



HAL
open science

Acoustique et respiration dans le jeu musical des instruments à vent : application aux flûtes

Camille Vauthrin

► **To cite this version:**

Camille Vauthrin. Acoustique et respiration dans le jeu musical des instruments à vent : application aux flûtes. Acoustique [physics.class-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. NNT : 2015PA066388 . tel-01273297

HAL Id: tel-01273297

<https://theses.hal.science/tel-01273297v1>

Submitted on 12 Feb 2016

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

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



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

Spécialité :
Acoustique

Présentée par :
Camille Vauthrin

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

Sujet de la thèse :

**ACOUSTIQUE ET RESPIRATION DANS LE JEU MUSICAL
DES INSTRUMENTS À VENT :
APPLICATION AUX FLÛTES**

Soutenue le : 28 septembre 2015

devant le jury composé de

M. Christophe Vergez, Directeur de Recherche CNRS, LMA, Marseille	Rapporteur
M. Jean-François Petiot, Professeur des Universités, IRCYCN, Centrale Nantes	Rapporteur
M. Thomas Hélie, Chargé de recherche CNRS, IRCAM, Paris	Examineur
M. Thomas Similowski, Professeur à l'UPMC, Paris	Examineur
M. Patricio de la Cuadra, Professeur, PUC, Santiago	Examineur
M. Benoît Fabre, Professeur à l'UPMC, Paris	Directeur de thèse
Mme. Isabelle Cossette, Professeur à l'Université de Mc Gill, Montréal	Co-Directrice de thèse

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

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

*« On n'a pas besoin de respirer comme une baleine si on est un poisson rouge sur une étagère : il faut juste ouvrir la bouche et respirer suffisamment pour dire à sa flûte :
"Je t'aime, la plupart du temps ..." »*

Michel Debost

Remerciements

Tout d’abord, un grand merci au duo à l’encadrement sans faille : Benoît et Isabelle, même avec ce grand Atlantique. Merci à vous pour votre amitié, votre enthousiasme, votre dynamisme, votre confiance et vos encouragements. Merci Benoît pour tes qualités humaines, ta gaieté, ton soutien et tous ces bons moments passés ensemble, quoique le collage de gommettes ... Merci Isabelle pour ton exceptionnel accueil outre Atlantique, tes enseignements de la physiologie (je ne parlais pas de bien haut), ton accompagnement lors de la conception/réalisation des expériences (merci Bob aussi !), tes relectures (de mon piètre anglais) et bien plus encore ; merci également au Pocket EMG (et à ses (nombreux) caprices).

Je remercie très chaleureusement Jean-François Petiot et Christophe Vergez d’avoir accepté d’être rapporteurs de cette thèse, et d’avoir passé leur été à lire, commenter et porter de l’intérêt à ces travaux. Merci Christophe de m’avoir encouragée durant la période pré-thèse. Je remercie également mes examinateurs Thomas Hélie, Thomas Similowski et Patricio de la Cuadra. Merci Thomas S. d’avoir suscité un intérêt pour nos travaux au travers diverses discussions, interrogations et de nous avoir ouvert les portes de ton laboratoire. Merci à Patricio pour ces discussions sur la quena et d’avoir accepté de participer aux expériences respiratoires préliminaires.

Merci à Jean-Yves Roosen et Noémie pour votre collaboration précieuse, de m’avoir accueillie dans votre atelier avec mes graphiques et mes centièmes de millimètres.

Merci à Laurent, de m’avoir appris à utiliser les divers outils de l’atelier, à différencier du contre-plaquer et du bois, à manier le PVC, de m’avoir aidé lors de la conception d’outils expérimentaux (Lola verra peut-être le jour), pour tes idées et d’avoir géré les contraintes audio de la soutenance. Merci à Yves et Julien pour leur aide aux expériences québécoises.

Merci également aux autres membres du LAM, acteurs de la bonne ambiance régnant au sein de l’équipe, Jean-Loïc et son dynamisme, Claudia et ses violons, Pascal et sa Bretagne, Jean-Marc et sa présence dominicale, Boris, Catherine, Hugues, René,...

Merci aux thésards et ex thésards LAMiens, surtout à mon petit frère de thèse Augustin et joyeux gai-luron pour ton soutien, tes phrases cultes, merci à toi de rigoler (et participer) à mes blagues ; merci également à mes grands frère et sœur, Arthur et Delphine de partager avec moi ce goût prononcé du fromage et de la bière. Merci à Benoît pour ces dîners/discussions tardifs. Merci à Paul et Roman de participer au quena-band. Merci à Lionel et Hugo pour leurs pouces verts, Juan-Pablo et ses gâteaux, Henri et sa rapidité, Alexandre et ses geekeries, Indiana, Cédrik et bon courage aux derniers arrivés Timothy et Clara.

Merci également aux stagiaires et contractuels passés par le LAM, plus particulièrement Samuel, Louis (merci de participer au chapitre 2) et Elsa pour les soirées Escaliennes. Merci aussi Camille de m’avoir épauler durant ces derniers mois.

Merci aux pièces rapportées Vlad et Sibylle, respectivement pour les blagues (vaseuses) et les

p'tits coins à rhum (souvent fermés).

Merci aux thésardes québécoises Catherine et Audrey pour leur accueil et leur aide à la réalisation des expériences. Merci aussi à Vincent pour ton aide et discussions (même au Mulli!).

Merci aux collègues de conférences Soizic, Simon, Kurjn, Alexis.

Merci à Anastasie et Pierre Dumail pour leurs discussions sur la pédagogie musicale, merci Pierre d'avoir accepté de jouer le cobaye instrumenté. Merci aussi aux cobayes Pauline, Gérémia et Gabriel.

Merci à mes amis parisiens, et (ex)manceaux. Merci surtout à Guillaume pour tes découragements qui ne portent pas de fruit, tes calculs de pourcentages, ton énigme triennale, et sans rancune *fclose(f)*; un gros merci à Thibaut pour ton accueil manceau récurrent, tes sandwiches à la carotte râpée, au bocal de compote, mais aussi à ta poubelle et à l'inauguration de ta machine à laver (merci à Benoît et Augustin de la regarder). Merci aussi à Maxime (tu as encore maigri non?) pour ces mois de collocation, ces dégustations au café Léon, et ses danses endiablées, merci également à l'acolyte de l'humour déstructuré Rémi et sa culture musicale. Merci à Côme (grosse-nadine), à ta capacité de lancer des débats interminables sans en démordre (alors, la croûte au-dessus ou en-dessous?). Merci à Rodrigue (4 fois), Julien et Cella. Merci aussi aux morues Laure et Floriane pour ces longs déjeuners agrémentés de discussions, de rigolades et confessions. Merci aussi aux ATIAMIENS Guillaume et Quentin et à vos mamans, merci pour vos fibres artistiques respectivement musicales et dessinatrices. Merci à vous tous de participer (depuis un certain temps déjà, on ne comptera pas) à ces WE normands "touristiques", auxquels sont gravés des souvenirs forts en émotion et inoubliables, de dégustations & fine gastronomie, de randonnées (boueuses ou sableuses), d'explorations musicales et de l'Internet, de danses, de chants traditionnels *On est Normand!*, même de déneigement, merci à vous de défier sans succès mes amis bas-normands. A ce propos merci à Benji et son calva', Justine et ses exploits à ski, Véro, Nina, ... aux amis-animateurs et leurs jerricanes.

Merci à mes amis haut-normands, Marine pour ton accueil provençal, les balades dans les calanques et de m'avoir occupée (pour la bonne cause du Wata) pendant la fin de ma thèse (au cas où je m'ennuierais ...). Merci à Adèle & Lise pour votre soutien et ces séances de déchiffrages jouées, chantées mais surtout épiques, merci à Pierre pour l'intérêt que tu as porté à mon travail (et réciproquement), mais aussi pour ces franches séances de rigolades. Merci à ma vieille chaussette Nicolas. Merci à ma grande sœur Flore pour ton soutien, ta disponibilité sans faille à chaque retour, et ces longs Tea-Time.

Merci aux amis *far far away*, Eva pour les super vacances, Laurie mon guide touristique outre Atlantique, ainsi que Robiche et ses croyances de facteurs à dos de lama.

Merci à l'Orchestre de la Bastille, et plus particulièrement à *la folle* Julie (et sa joie de vivre), à Marion et Ellénore pour leur soutien final.

Merci aux amis du PVL, surtout à mes partenaires de choc Laurent et Carole pour leurs encouragements. Merci Carole pour tes cours de féminisme et tes qualités humaines.

Je souhaite remercier très chaleureusement mes professeurs de musique, merci à Lydie qui dès mon plus jeune âge m'a berché euh'd'dans, à Denise et le club des belettes de m'avoir initié à la flûte, à Hélène, Daniel et Catherine d'avoir pris le relais, à Nadia notre *Vénérable Maître* d'avoir animé les cours de musique d'ensemble et à Eric de m'avoir transmis sa grande sensibilité musicale. Merci aussi aux chefs du Pop' Jean-Philippe et Didier. Un grand merci à Frédéric de m'avoir initié à réfléchir sur les techniques de jeu, d'être venu le jour J, mais surtout pour tes grandes qualités humaines et ton soutien.

Merci également à Françoise, Jean-Loup, Hélène & Mathieu, Agnès & PE d'avoir porté de l'intérêt à mes avancements pendant ces trois années, et pour leurs encouragements. Merci à ma famille surtout à mon frère et ma mère pour leur soutien, leurs encouragements lors de ces trois années (mais pas que!) et leur grande patience (surtout pour la fin).

Pour finir, Merci à A'riou.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	iv
I Introduction générale	1
Présentation	3
Etat de l'art	5
Démarche	19
II Etude de la réponse acoustique de la flûte	23
1 The design of a chromatic quena : How can linear acoustics help ?	25
1.1 Introduction	27
1.2 Hypothesis, acoustic theories	28
1.2.1 From global description to acoustical parameters	28
1.2.2 Acoustic tools and method	28
1.3 Designing a prototype	31
1.3.1 Notches, knot and length cylinder	31
1.3.2 Determination of a simple profile tuning to the equal temperament chromatic scale : the first two registers	33
1.3.3 Link between resonance and sounding frequencies	34
1.3.4 The third register	36
1.4 Conclusion and expectations	38
1.5 Appendix	40
2 Influence de la position des lèvres du musicien sur le rayonnement à l'embouchure de la flûte.	43
2.1 Introduction	43
2.2 Outils acoustiques	44
2.2.1 Outils acoustiques pour la modélisation des segments de flûte	44
2.2.2 Tubes cylindriques et côniques	45
2.2.3 Trous fermés	46
2.2.4 Modélisation du raccord capteur d'impédance	47
2.3 Méthode	50
2.3.1 Validation de la méthode utilisée	50

2.3.2	Protocole expérimental	52
2.3.3	Limites de la méthode	53
2.4	Résultats	54
2.5	Synthèse	59
3	Comment contrôler la justesse dans le jeu de la flûte ?	63
3.1	Introduction	63
3.2	Méthode	64
3.2.1	Protocole	64
3.2.2	Paramètres mesurés	66
3.2.3	Paramètres aéro-acoustiques étudiés	68
3.3	Résultats	70
3.3.1	Jeu de la gamme chromatique	70
3.3.2	Jeu des trois Sol avec un crescendo - decrescendo	72
3.4	Synthèse	74
III	Stratégies respiratoires développées par le musicien	77
4	How does a flute player adapt his breathing and playing to musical tasks ?	79
4.1	Introduction	81
4.2	Previous studies and control parameters	82
4.2.1	Previous studies	82
4.2.2	Overview of the acoustical and hydrodynamical parameters	83
4.2.3	Overview of respiratory parameters	85
4.3	Musical tasks presentation and introduction of the flautist	87
4.4	Measurements	87
4.4.1	Acoustical	87
4.4.2	Respiratory	89
4.5	Results	90
4.5.1	Mouth pressure-chest volume diagram	90
4.5.2	Hydrodynamical and respiratory analysis	91
4.6	Discussion	97
4.6.1	Comparison between previous studies and our results	97
4.6.2	Proposal of a model based on observations	99
4.7	Conclusions and perspectives	103
5	Comment estimer l'activité du diaphragme et l'effort respiratoire ?	105
5.1	Estimation de l'activité du diaphragme	105
5.2	Estimation de l'effort musculaire respiratoire	107
5.2.1	Estimation des travaux et puissances musculaires	107
5.2.2	Détermination des efforts respiratoires	108
5.3	Conclusion et poursuite du travail	113

6	When does the musical playing begin ?	115
6.1	Introduction	117
6.2	Methods	118
6.2.1	Subjects	118
6.2.2	Musical tasks	119
6.2.3	Set-up	120
6.3	Preliminary measurements & respiratory parameters	122
6.3.1	Preliminary measurements	122
6.3.2	Respiratory parameters derived from measurements	123
6.4	Presentation and analyses of the results	129
6.4.1	Inspiratory phase	129
6.4.2	Preparation before flute playing	135
6.5	Discussion & Conclusions	139
IV	Musique et interprétation	143
7	How does posture influence flute player's breathing and playing ?	145
7.1	Introduction	146
7.2	Control parameters	147
7.2.1	Acoustical parameters	147
7.2.2	Respiratory parameters	148
7.3	Measurements and protocol	149
7.3.1	Measurements	149
7.3.2	Musical tasks and presentation of the flautist	150
7.4	Results	150
7.5	Discussion and conclusion	153
8	Stratégies du jeu musical	155
8.1	Introduction	155
8.2	Protocole, paramètres étudiés, présentation des extraits musicaux et flûtistes	156
8.2.1	Protocole	156
8.2.2	Définition des paramètres étudiés	157
8.2.3	Présentation des extraits musicaux	161
8.2.4	Présentation des flûtistes	163
8.2.5	Conditions de jeu	163
8.3	Résultats	163
8.3.1	Analyse du jeu du sujet 1	164
8.3.2	Analyse du jeu du sujet 2	176
8.3.3	Analyse du jeu du sujet 3	186
8.3.4	Qu'entend-on ?	193
8.4	Discussion	208

V	Conclusions et perspectives	213
VI	Annexe	223
A	Physiologie respiratoire	225
A.1	L'appareil respiratoire	225
A.2	Définition de la cage thoracique	226
A.3	Définition de l'abdomen	227
A.4	Muscles associés à la respiration	228
A.4.1	Muscles inspireurs	229
A.4.2	Muscles expirateurs	230
A.5	Propriétés statiques du système respiratoire	232
	Bibliographie	243
	Résumé/Abstract	244

Première partie

Introduction générale

Présentation

Mise en contexte

Le musicien apprend à contrôler le jeu de son instrument au cours de son parcours musical. Cet apprentissage nécessite plusieurs étapes : la production de la note, son contrôle (nuance, justesse, timbre, ...) notamment en fonction de la place qu'elle occupe au sein de la phrase ou de la structure musicale de la pièce jouée. Le musicien, par l'apprentissage répétitif, cherche à rendre reproductible le contrôle de son instrument, la production d'une pièce musicale, avec le plus de précision possible. En effet, comme l'explique Sloboda, [118], le musicien consacre la majeure partie de son temps à répéter, mais plus que "répéter" au sens premier du terme, il s'agit plutôt de déconstruire la structure, la travailler, la reconstruire, la comprendre, l'imaginer, la représenter. Cependant, contrôler son instrument ne fait pas d'un musicien un musicien expert. En effet, l'exécution experte nécessite de maîtriser une quantité de compétences spécifiques dans le but d'atteindre un niveau d'habileté, d'automatisme à la réalisation technique par le déploiement simultané de toutes ces compétences, en les soutenant et en les subordonnant à la structure d'ensemble d'une composition musicale, [118]. En d'autres termes, le musicien expert est capable d'automatiser la production technique afin de se concentrer sur la réalisation musicale.

Toutefois, les possibilités de contrôle dont le musicien dispose sont intimement liées à la façon dont les instruments de musique sont mis en vibration, mais aussi aux libertés apportées par la réponse acoustique de l'instrument, paramètre directement déterminé par la facture. Le fonctionnement des instruments de musique peut être séparé en deux grandes catégories, celle aux modes de jeu à oscillations entretenues (instruments à vent, cordes frottées, ...) et celle aux modes de jeu à oscillations libres (instruments à cordes pincées, frappées, percussions, ...). Dans le premier cas, le son est produit et modulé par le musicien tant que celui-ci interagit avec son instrument, alors que dans le second, le contrôle qu'a l'instrumentiste sur le son produit est préparatoire et cesse dès l'émission, [31]. Dans ce dernier cas, la part de contrôle de l'instrumentiste est limitée à cette brève interaction, les possibilités de contrôle entre ces deux catégories diffèrent grandement.

Aussi, les libertés laissées au contrôle du musicien dépendent également de l'instrument considéré. Effectivement, la géométrie (facture), le poids, l'ergonomie de l'instrument vont alors en partie définir le domaine dans lequel le musicien va pouvoir évoluer, ceci influant directement sur les stratégies de contrôle que le musicien pourra développer.

Positionnement de l'étude

Lors de ce travail de thèse, l'expertise développée par les instrumentistes sera mise à profit dans le but de développer notre compréhension de la production du son dans les instruments de

la famille des flûtes.

Le musicien (et les stratégies qu'il développe) ainsi que l'instrument (et sa facture) prennent une place prépondérante dans ce travail de thèse. Ce travail prend d'une part appui sur les connaissances accumulées au sein de l'équipe LAM (Lutheries-Acoustique-Musique) de l'Institut d'Alembert (UMR CNRS 7190) où a été accueillie cette thèse. Les thématiques portées par cette équipe relevant à la fois les sciences physiques telles que l'acoustique, la mécanique et le traitement signal, mais aussi l'étude de l'humain via la linguistique, la perception auditive et la psychologie. D'autre part, cette thèse est co-encadrée par Isabelle Cossette, du laboratoire MPBL (Music Performance and Body Laboratory) à l'Université de McGill à Montréal. Ce travail profite également des connaissances développées dans ce laboratoire, une partie des études expérimentales y ont d'ailleurs été menées. La réalisation de cette thèse a donc nécessité de réunir les compétences et outils scientifiques, théoriques et expérimentaux développés par ces deux unités dans le but d'analyser et d'expliquer au mieux les stratégies de contrôle développées par les musiciens, en lien avec les possibilités apportées par l'instrument. Cette thèse se situe dans la continuité des travaux de recherches développés par ces deux institutions, avec la nouveauté de les rapprocher directement.

Ce travail profite également des relations établies par l'équipe LAM avec les facteurs d'instruments, et plus particulièrement de flûte traversière, les musiciens ou encore plus récemment avec le pôle Neurophysiologie Respiratoire Expérimentale et Clinique, UPMC Paris 6.

Etat de l'art

Introduction : Qu'est-ce-qu'une flûte ?

Les instruments de musique à embouchure de flûte font partie des plus anciens instruments, et sont également ceux les plus représentés dans le monde. Le nom latin, *tibia*, de la flûte suggère que les premières flûtes pourraient avoir été fabriquées à partir d'os. Ce fait est d'ailleurs en accord avec plusieurs découvertes archéologiques à travers le monde, par exemple la figure 1 représente le plus vieux fragment de flûte qui a été découvert en Slovénie par Ivan Turk, [97]. Cette flûte daterait de l'époque de l'Homme de Néandertal, soit il y a environ 43 000 ans, et aurait été taillée dans un os d'ours des cavernes. On remarque que deux trous sont complets et deux autres partiels, à chaque extrémité. La plus vieille flûte datant du paléolithique (25000



FIGURE 1 – Photo du plus ancien fragment de flûte, taillée dans un os d'ours des cavernes, découvert en Slovénie par Ivan Turk, [97].

ans avant JC.) dont l'acoustique a été étudiée est représentée en figure 2-haut, [55]. Cette flûte a été découverte lors de fouilles archéologiques dans la grande salle de la grotte d'Isturitz parmi 22 autres fragments de flûte. Les fouilles menées dans cette grotte ont révélé la plus forte concentration de flûtes préhistoriques connue au monde à ce jour. Ces flûtes sont en os de rapace, gypaète et vautours, oiseaux encore présents de nos jours dans les Pyrénées et Pays Basque. Elles portent des trous latéraux au nombre de trois ou quatre. Ces instruments n'étant pas en état d'être joués, l'étude acoustique a permis de justifier que ceux-ci correspondaient bien à des instruments de type flûte. La plus vieille flûte découverte dans un état encore jouable, en Chine, a été fabriquée il y a environ 9 000 ans, dans un os de grue du Japon. Cette dernière, représentée figure 2-bas, est constituée d'une seule pièce longue de 20.3 cm, comportant sept trous. Elle peut être jouée en la tenant verticalement, en soufflant sur le biseau à l'extrémité haute. Aujourd'hui, nous appelons *flûte* les instruments au fonctionnement similaire à cette dernière, c'est à dire



FIGURE 2 – **Haut** : Flûte périgordienne de la grotte d'Isturitz (Pyrénées atlantiques) conservée au musée des antiquités nationales de Saint-Germain-en-Laye, [55]; **bas** : Photo de la plus ancienne flute jouable découverte en Chine. Cette flûte aurait été fabriquée il y a environ 9000 ans, [98].

un instrument à vent dont l'excitation n'implique pas la vibration d'un corps solide (anche ou lèvres), mais où le fonctionnement repose sur le couplage d'un jet d'air instable avec les modes de résonance d'un résonateur acoustique. Ainsi, la famille des flûtes regroupe une variété d'instruments, voir figure 3, comme les flûtes à encoche, les flûtes globulaire, traversière ou à bec ainsi que le tuyau d'orgue.

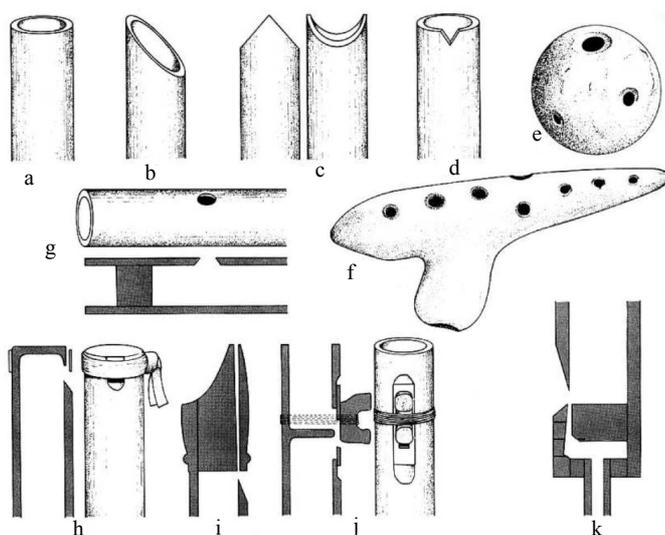


FIGURE 3 – Différents instruments de la famille des flûtes, d'après Groove, [63]. Flûtes à encoche (a, b, c et d), flûtes globulaires (e et f), flûte traversière (g), flûtes à bec (h, i et j) et tuyau d'orgue (k).

La famille des flûtes présente une grande variété d'instruments aux dimensions physiques disparates (allant du sifflet au tuyau d'orgue) et donc des ordres de grandeur des paramètres de contrôle variés. Plusieurs classifications de ceux-ci sont possibles (Meylan [92], Leipp [82] ou Castellengo [29]). Toutefois, une approche commune est de classer les instruments de la famille des flûtes selon l'importance relative de la facture et/ou du contrôle du musicien. En effet, selon la flûte considérée, certains éléments du fonctionnement de l'instrument peuvent être soit fixés

par la facture, soit contrôlés par le musicien. La liste suivante, proposée par Blanc, [18], propose un classement des instruments de la famille des flûtes par influence croissante du musicien sur le son, soit une influence de la facture décroissante :

- Dans les tuyaux d'orgue, chaque note est jouée par un instrument différent, le facteur détermine alors chaque paramètre, la pression de jeu comprise.
- Dans les flûtes à bec, la géométrie de la partie excitatrice est déterminée par le facteur, le musicien contrôle ensuite la hauteur de la note (via le résonateur), la pression de jeu et l'articulation.
- Dans les flûtes traversières ou à encoche, le musicien contrôle l'essentiel des paramètres géométriques de l'excitateur (correspondant au canal dans la flûte à bec) par l'ouverture des lèvres, la distance de celles-ci au biseau, la pression de jeu ...
- Dans les flûtes de type shakuachi, le flûtiste contrôle de manière encore plus libre les conditions aux limites du résonateur, à l'extrémité active.

Un des enjeux de notre travail est d'étudier les instruments où les possibilités de contrôle par le musicien sont importantes, c'est-à-dire la flûte traversière moderne ou la quena (flûte à encoche des Andes).

Etude aéro-acoustique des instruments de musique

Dans la littérature, les études portant sur l'étude des instruments de musique sont nombreuses, Chaigne et Kergomard [75], Wolfe [133], Nederveen [99], Coltman [33] et bien d'autres encore. L'acoustique linéaire à 1 dimension, permet une connaissance développée de l'influence de la plupart des éléments de facture (sections et épaisseur de perce, trous, cheminées, clés, chanfreins, canal, ...) sur l'estimation des fréquences de résonance de l'instrument.

La modélisation de la géométrie des instruments à vent peut s'effectuer à partir de différentes méthodes. Par exemple, la "méthode des matrices de transfert" [106] permet d'approximer la géométrie de l'instrument par une suite de segments, où chacun peut représenter un cône, un cylindre, un trou, une cheminée... Chaque segment est décrit par une matrice reliant pression et débit entre entrée et sortie du segment, dans laquelle chacun des termes est dépendant de la fréquence. Les propriétés acoustiques (impédance/admittance d'entrée) de l'instrument complet sont retrouvées par la mise en cascade de ces segments qui se traduit par le produit des matrices associées. Des méthodes numériques ont également été utilisées dans la littérature afin de modéliser la géométrie des instruments, comme la "méthode par éléments finis", [80] ou par "différences finies" [100]. Enfin, une approche analytique peut également être effectuée, [99], mais reste réservée à des géométries "analytiques".

Une fois la géométrie de l'instrument modélisée, les fréquences de résonance sont estimées à partir de l'impédance d'entrée de l'instrument qui est définie comme le rapport de la pression

acoustique sur le débit acoustique, à l'entrée de l'instrument. Cette grandeur dépend directement de la fréquence et traduit la réaction de l'instrument à une excitation en fréquence donnée. Lors d'un balayage en fréquences, l'amplitude de l'impédance d'entrée est alors constituée de plusieurs maxima et minima, ces derniers correspondant aux fréquences de résonance d'un instrument de type flûte puisqu'il s'agit d'un instrument ouvert à ses deux extrémités. La figure 4 représente d'une part (à droite) le doigté du Sol 4, ainsi qu'une représentation simplifiée des ondes stationnaires de pression correspondantes à ce doigté, ainsi que pour les deux notes Sol 5 et Ré 6 qui correspondent au second et troisième régime d'oscillation, susceptibles d'être joués sur ce même doigté. La figure 4 de gauche, représente l'impédance d'entrée de ce doigté, on retrouve alors le minima correspondant au Sol 4 ainsi que les deux suivants correspondant aux second et troisième régimes. Les outils de l'acoustique 1D présents dans la littérature, permettent ainsi de

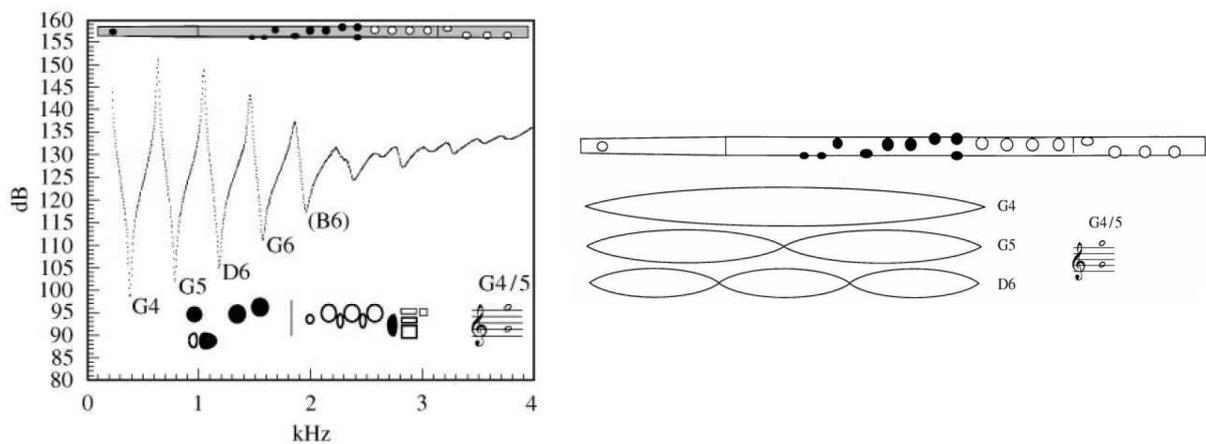


FIGURE 4 – Schémas acoustiques et doigtés du Sol3/Sol4 (gauche) ; représentation de l'impédance d'entrée du doigté Sol3/Sol4 ; figure issue de l'étude menée par Wolfe [133].

retrouver de manière suffisamment précise, pour être utile à un facteur d'instrument, [20], les fréquences de résonance de l'instrument, donnant ainsi des indications sur les notes jouables de l'instrument et leur justesse.

Dans toutes les flûtes pour lesquelles le jet est formé à la sortie des lèvres de l'instrumentiste, les lèvres sont positionnées face au biseau de manière favorable à la mise en oscillation de l'instrument. Les lèvres couvrent donc partiellement le trou d'embouchure et modifient la réponse acoustique de l'instrument. Cette modification est délicate à intégrer dans la modélisation acoustique d'une part du fait qu'elle est variable puisque les lèvres bougent pour s'approcher ou se reculer du biseau, [33, 57, 41], et d'autre part parce que chaque instrumentiste adopte une position personnelle, liée à sa morphologie et à ses habitudes de jeu.

Dans la littérature, ce point est très peu documenté et la présence des lèvres est, au mieux, prise en compte par une correction de longueur fixe, [133].

L'acoustique linéaire à 1 dimension permet donc une compréhension globale du fonctionnement de l'instrument défini par sa géométrie, cependant il est difficile de faire le lien entre celle-ci

et la production musicale. En effet, cette dernière nécessite de la part du musicien d'effectuer les contrôles adaptés, comme par exemple de fournir une pression adaptée à la hauteur de la note, et bien au-delà si le musicien souhaite rendre la structure musicale compréhensible, notamment par la modulation de cette dernière et de la géométrie des lèvres.

L'impédance ne permet alors que de caractériser le comportement passif de l'instrument, soit le résonateur. Lors de son comportement actif, l'instrument (flûte) entier peut être décrit par un couplage entre les modes hydrodynamiques du jet et les modes acoustiques du résonateur. Dans la littérature, [54, 75, 33], la flûte est décrite en première approximation par trois blocs indépendants, figure 5. Les trois éléments sont supposés interagir localement, et sont donc ana-

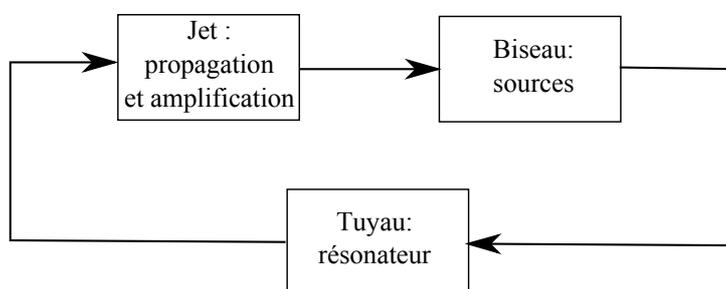


FIGURE 5 – Description générale du fonctionnement de la flûte vue comme trois blocs.

lysés séparément, puis concaténés afin d'obtenir une imitation du fonctionnement de la flûte. Les fréquences obtenues en comportement actif de l'instrument sont alors appelées les fréquences de jeu. Celles-ci sont notamment affectées, par le mécanisme d'excitation (le souffle). C'est pourquoi, plusieurs études portent sur le sujet, les modèles décrits sont basés sur une description simplifiée de la dynamique des fluides et permettent d'obtenir des résultats pertinents et comparables aux expérimentations. Ces travaux, initiés historiquement par Coltman [34, 35], Fletcher [57], démontrent notamment que les fréquences de jeu f dépendent de la pression du souffle, et donc de la vitesse de jet U . La figure 6, issue des travaux d'Auvray [9], met en évidence cette variation en représentant la fréquence de jeu adimensionnée par la fréquence de résonance en fonction de la vitesse de jet adimensionnée. Dans certains cas, Auvray [10] et Blanc [18] ont observé des fréquences de jeu de l'ordre de la moitié de la fréquence de résonance, soit une octave en dessous. La figure 6 nous informe donc bien sur les variations de fréquence produites par des variations de vitesse de jet. L'étude du comportement hydrodynamique de l'instrument paraît donc indispensable à la compréhension du fonctionnement de celui-ci.

Dans cette direction, plusieurs travaux de recherches ont porté sur le comportement hydrodynamique de l'instrument, et plus particulièrement de la flûte à bec. Ségoufin, [114], s'est intéressée notamment à l'influence de la géométrie (longueur et convergence) du canal de la flûte à bec sur l'instabilité du jet d'air, montrant que la longueur de ce dernier modifie la dépendance fréquentielle de l'instabilité du jet. Les travaux de Ségoufin ont également porté sur l'étude du profil de vitesse du jet et de son étalement, à la lumière, en particulier au raccordement entre l'écoulement intérieur et le jet formé à l'extérieur.

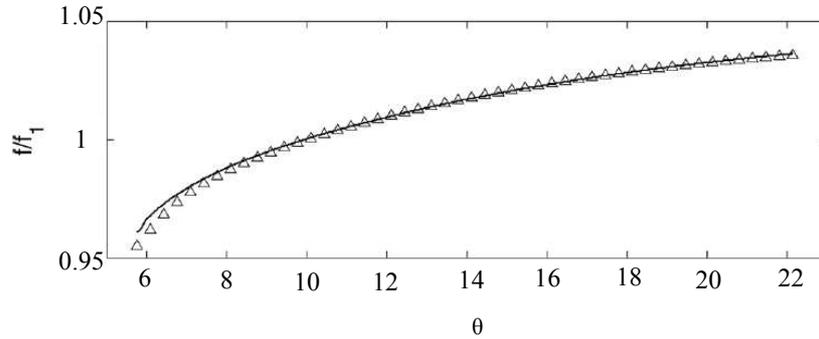


FIGURE 6 – Représentation de la fréquence adimensionnée f/f_1 en fonction de la vitesse de jet adimensionnée $\theta = U/fW$, pour une méthode à variation lente des paramètres (triangle) et pour un calcul numérique (ligne pleine), décrits dans l'étude d'Auvray [9]. W est la distance entre le biseau et la sortie du jet.

Le comportement du jet d'air produit dans un instrument de type flûte à bec a également été étudié par Blanc, [18]. Il montre l'influence de la géométrie des chanfreins sur la stabilité des régimes de l'instrument, ainsi que sur son timbre et son volume sonore, d'une part lors de l'observation de l'harmonisation d'une flûte par un facteur et d'autre part à l'aide d'un modèle de réceptivité du jet à une perturbation transverse. Aussi, Blanc montre à partir de ce modèle, que la vitesse adimensionnée apparaît comme un critère de prédiction de stabilité des régimes.

Plus récemment, Auvray [10], s'est intéressé à la dynamique du comportement des flûtes à bec liée aux variations de la pression d'alimentation. Les travaux d'Auvray ont notamment porté sur la reformulation de deux modèles existants, jet-drive et discrete-vortex, et de leur validation/comparaison face aux variations lentes de la pression d'alimentation. Des évolutions de ces modèles seront par ailleurs proposées. D'autre part, Auvray s'est intéressé au couplage acoustique entre musicien et instrument, et à ses conséquences sur le son produit, sur les seuils de changement de régime, les transitoires d'attaque et le contenu spectral.

Une des caractéristiques fondamentales du fonctionnement des flûtes est la capacité à changer de régime d'oscillation lorsque la vitesse de jet augmente. Si on considère en première approximation, que l'oscillation tend à passer au régime supérieur lorsque la vitesse de jet adimensionnée dépasse un certain seuil, les travaux de Terrien, [123], montrent que le musicien expert développe des stratégies de jeu dans le but d'à la fois combiner les effets de la dynamique de la pression buccale avec d'autres paramètres de contrôle (comme le conduit vocal), afin d'élargir le cycle d'hystérésis associé au changement de régime.

A un degré plus fin de l'analyse, les questions relatives à la réponse en régime transitoire et du couplage avec d'éventuelles résonances acoustiques en amont du point de formation du jet constituent des éléments importants dans la technique du jeu et le contrôle instrumental. Les travaux d'Auvray et Ernoult, [10, 52], apportent des éléments par la modélisation de ces aspects.

Ernoul, [52], montre par ailleurs dans son étude sur les transitoires d'attaque dans les flûtes à bec, que le musicien est soumis à des limitations physiques de l'instrument lors de la réalisation de ceux-ci. Par exemple le musicien est contraint par le lien entre le temps de montée de l'acoustique et la fréquence de jeu. Aussi, le mécanisme de source acoustique force la fréquence à évoluer avec l'amplitude acoustique. Cependant, pour d'autres paramètres de contrôle, le musicien semble libre de les faire évoluer au cours des transitoires d'attaque, comme par exemple la pression buccale.

Les possibilités qu'a l'instrumentiste de façonner le son sont d'autant plus importantes lorsque la géométrie du canal de formation du jet n'est pas déterminée par la géométrie de l'instrument mais par l'instrumentiste lui-même, ce qui est le cas lors du jeu de la flûte traversière. En effet, lors du jeu de la flûte traversière les caractéristiques du jet sont régies par la bouche du musicien, par l'ouverture de ses lèvres, mais aussi par la distance de celles-ci au biseau. Les caractéristiques du jeu n'influent donc pas seulement sur la fréquence de jeu mais aussi sur la qualité sonore du son produit. Dans cette optique, plusieurs études portent sur les différents paramètres de contrôle hydrodynamique développés par le musicien dans le cas du jeu de la flûte traversière. De la Cuadra [41], s'intéresse à analyser les différents paramètres de

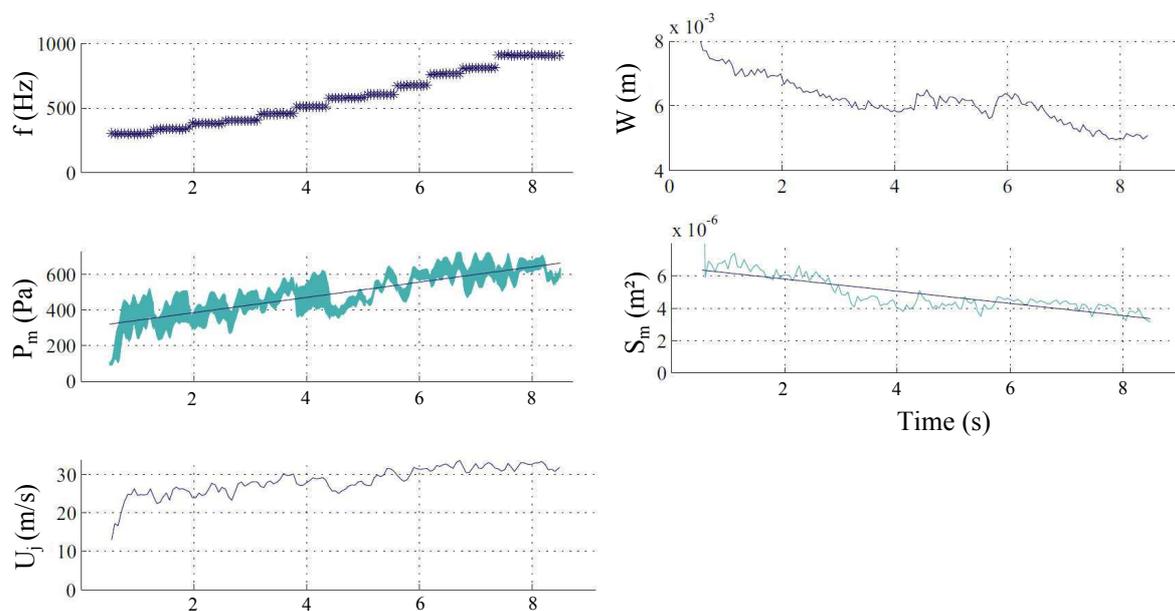


FIGURE 7 – Représentation des différents paramètres de jeu (fréquence f , pression buccale P_m , vitesse de jet U_j , distance des lèvres au biseau W , surface d'ouverture des lèvres S_m) mesurés et calculés lors du jeu d'une gamme ascendante (Ré Majeur) par un flûtiste, lors de l'étude de De la Cuadra, [41].

contrôle hydrodynamique qui régissent le jeu de la flûte, par exemple dans le cas d'une gamme ascendante. La figure 7 montre le contrôle réalisé par le flûtiste sur le jet lors du jeu de la gamme, les différents paramètres étudiés sont la fréquence de la note f , la pression buccale P_m , la vitesse de jet U_j , la surface de l'ouverture entre les lèvres S_m et la distance des lèvres au biseau W . De la Cuadra, [41], poursuit son étude avec une comparaison entre un flûtiste novice et un flûtiste

expérimenté. Il montre que le flûtiste expérimenté acquiert au cours de son apprentissage une certaine coordination des paramètres de contrôle qui lui permet d'obtenir un fonctionnement opérationnel et optimisé de l'instrument. L'étude de ces paramètres de contrôle peut également aider à la compréhension de la production sonore.

Dans les travaux de Montgermont, Blanc, De la Cuadra, [96, 18, 41], les principaux paramètres de contrôle sont résumés à travers deux indicateurs hydrodynamiques que sont le nombre de Reynolds Re et la vitesse de jet adimensionnée.

Le nombre de Reynolds caractérise la structure du jet, la théorie indiquant que ce dernier est laminaire pour des valeurs du nombre de Reynolds inférieures à 2000-3000 et turbulent pour des valeurs supérieures. Blanc, [18], montre le lien entre Re , dans un cas laminaire, et l'esthétique sonore, notamment par la corrélation entre Re et le débit d'air et donc la puissance sonore. Le caractère turbulent du jet d'air dans le jeu des flûtes a été étudié par Auvray, lors de son étude sur l'acoustique des flûtes de Chinos, [10].

La vitesse de jet adimensionnée θ , est définie par $\theta = U/f_0W$ où U est la vitesse du jet d'air, f_0 la fréquence fondamentale et W la distance des lèvres au biseau. θ est un indicateur du régime de fonctionnement de l'instrument, [114, 18, 9, 41], qui varie entre 4 et 15, les basses et hautes valeurs indiquant respectivement un fonctionnement en sous-régime et sur-régime de l'instrument. Les variations de la vitesse adimensionnée peuvent également être associées à des variations du contenu spectral, [130].

Dans le cas des flûtes pour lesquelles le flûtiste forme le jet à la sortie de ses lèvres, il peut contrôler indépendamment ces deux paramètres adimensionnés, [41], et ainsi jouer distinctement avec la puissance sonore et le contenu spectral du son qu'il produit. Les grandeurs que le flûtiste doit contrôler sont la pression buccale, la position des lèvres par rapport à l'embouchure mais aussi l'ouverture entre les lèvres. Il s'agit donc d'un contrôle musculaire au niveau des lèvres et de la bouche mais aussi sur l'ensemble du système respiratoire.

Enfin, parmi les moyens de contrôle utilisés par les instrumentistes dans le jeu de la flûte, le vibrato est utilisé à des fins musicalement expressives. Le vibrato est produit par le musicien par des variations cycliques à la fois de la fréquence fondamentale, de l'amplitude sonore et/ou du contenu spectral. Des études sur la production du vibrato ont été menées par Castellengo, [30] dans le cas de la flûte traversière, mais aussi sur le vibrato produit lors du chant par Raming, Shipp, Sundberg et d'Alessandro, [110, 115, 122, 5].

Etude de la respiration des musiciens

Les premières études du contrôle respiratoire dans le jeu des instruments à vent ont été proposées par Bouhuys en 1964, [22, 21], suivi par Berger, [15, 16] en 1965 et 1968, qui ont effectués diverses mesures sur les instrumentistes à vent ¹.

1. Une description simplifiée de la physiologie et de la mécanique respiratoire est présentée en Annexe

Lors de sa première étude, [22], Bouhuys s'intéresse au jeu de divers instruments de la famille des instruments à vent : hautbois, clarinette, flûte, piccolo, flute à bec, saxophone, basson et cor anglais. Différents paramètres liés à la respiration des musiciens à vents sont mesurés : la pression buccale, la concentration en CO_2 , les déplacements du thorax, l'activité électrique du cœur. Les volumes et débits moyennés d'air expiré sont obtenus par une méthode indirecte : le musicien joue une note tenue sur un temps donné après avoir inspiré à 100% de sa capacité vitale, le volume d'air restant est alors expiré dans un spiromètre dans le but d'être évalué. A partir des mesures de capacité vitale de chacun des sujets, le volume utilisé peut alors être estimé, ainsi que le débit moyen utilisé. Les musiciens jouent différentes notes tenues, à différentes hauteurs ou nuances.

Bouhuys montre dans cette étude que, lors du jeu de la plupart des instruments à vent (hormis la clarinette), la pression buccale augmente avec la hauteur de la note jouée et la nuance, celle-ci variant entre 300 et 2100 Pascal. Les débits d'air varient de 0.05 à 1.6 litre/s. Bouhuys indique également que l'augmentation de la puissance fournie à l'instrument (produit de la pression buccale par le débit d'air expiré) est due majoritairement à une augmentation du débit d'air expiré. De plus, Bouhuys observe que les patrons respiratoires des notes tenues, représentés dans un graphique volume de la cage thoracique en fonction de la pression pulmonaire, semblent indiquer une activation des muscles inspiratoires pendant le jeu de l'instrument, dans le but de contre-balancer le rappel élastique de la cage thoracique. Cette hypothèse a d'ailleurs été vérifiée par la suite par Cossette, [40] lors de son étude sur les flûtistes.

Berger, [15] s'intéresse au jeu de la trompette sur 10 sujets, à travers l'étude de la pression buccale et de la quantité d'air utilisée lors du jeu de différentes notes à différentes nuances. Berger rapporte alors que les notes jouées *ff* nécessitent une pression buccale plus importante, ainsi qu'une plus grande quantité d'air que celles jouées *pp*. Ces résultats vont donc dans le sens et la continuité de ceux présentés par Bouhuys.

Dans sa seconde étude, Berger [16] s'intéresse à l'activité électrique des muscles lors du jeu de la trompette, et en particulier lors du jeu de notes répétées. Berger mesure l'activité de différents muscles par électromyographie de surface : des intercostaux externes et internes, du grand droit et du muscle oblique externe de l'abdomen. Berger montre que l'activité électrique de ces muscles croît avec la hauteur de note, dans le but de favoriser la montée de pression buccale. Il remarque également une baisse de l'activité musculaire lorsque le musicien joue un decrescendo, dès le début de celui-ci. Ces observations sont directement interprétées par l'auteur comme une nécessité de faire monter ou descendre la pression buccale.

Plus tard, en 1968, Bouhuys [21] présente le premier travail permettant d'estimer les débits d'air instantanés expirés, par pléthysmographie, comme montré en figure 8. En plus des mesures de volume d'air, la pression buccale est également mesurée ainsi que le débit d'air expiré. La puissance fournie à l'instrument ainsi que la résistance à l'embouchure sont déduites des mesures de pression buccale et de débit d'air. La respiration durant le jeu de plusieurs instruments a alors été étudiée pour le trombone, le bugle, le cor, la clarinette, la flûte et le hautbois, mais

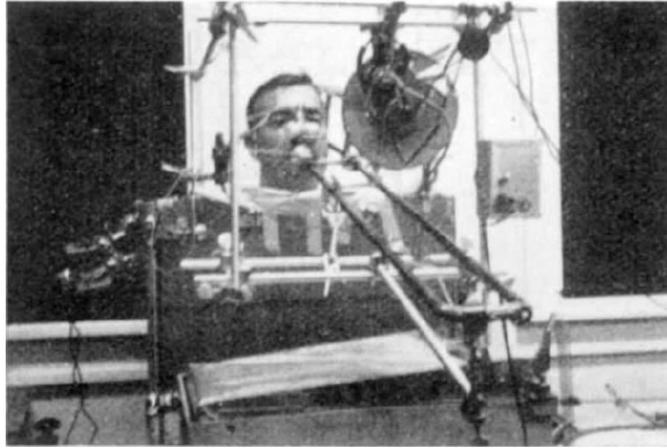


FIGURE 8 – Photo tirée de l'article de Bouhuys, [22], représentant l'expérience menée sur un joueur de trombone, au moyen d'un pléthysmographe corporel.

également durant le chant et le sifflement.

Les résultats de cette étude montrent que le maintien du jeu d'une note pour une certaine hauteur et dynamique nécessite une pression buccale et un débit d'air constants. De plus, il a été noté que les pressions buccales les plus hautes déployées étaient pour le hautbois alors que les plus basses correspondent au jeu de la flûte à bec. Bouhuys observe alors que le jeu de la flûte à bec nécessite une certaine activité des muscles inspireurs durant l'expiration, afin de contre-balancer le rappel élastique du système pulmonaire, et ainsi limiter l'augmentation de pression buccale. Au contraire, durant le jeu du hautbois, il est remarqué une activité des muscles expirateurs dès le début du jeu, certainement pour favoriser la production de hautes pressions buccales par compression de l'abdomen et de la cage thoracique. Malgré le fait que le jeu de la flûte s'effectue à grands débits d'air, et que ceux utilisés lors du jeu du hautbois soient moindres, les mesures de Bouhuys n'ont montré aucune hyper ou hypoventilation du musicien.

D'autres recherches ont ensuite été menées afin d'étudier la contribution de chacun de compartiments du thorax durant le jeu d'instruments à vent, les premiers résultats étant apportés par Bouhuys, [21] à l'aide d'un pneumographe. Par la suite, des travaux ont été menés par Fuks, [59] en utilisant des mesures de pléthysmographie respiratoire inductive durant le jeu d'instruments à anche. La pléthysmographie respiratoire inductive utilise deux bandes disposées sur le haut-thorax et l'abdomen, ces bandes étant munies d'un bobinage électrique alimenté par un oscillateur. Une variation de l'aire de la section transversale entourée par les bobines engendre alors des variations sur les propriétés électromagnétiques du système. Les variations de volumes de l'abdomen et du haut-thorax produisent alors des variations correspondantes dans le signal de sortie du système. La figure 9 représente la disposition de ces bandes sur le thorax. Le jeu du hautbois, du saxophone alto, de la clarinette et du basson par des musiciens professionnels a ainsi été analysé par Fuks. L'étude montre, dans un premier temps, les variations d'estimation de volumes dues à la position du sujet, puis, dans un second temps présente les volumes estimés durant le jeu des instruments. Fuks remarque que, durant les inspirations en jeu, le volume

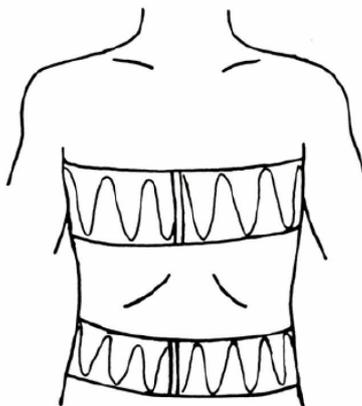


FIGURE 9 – Représentation du positionnement des bandes utilisées pour la pléthysmographie respiratoire inductive. Figure issue de [6]

abdominal est mis à plus grande contribution que le volume thoracique chez la plupart des musiciens. De plus, il observe également une certaine anticipation au geste inspiratoire, par la légère augmentation des volumes thoraciques et abdominaux en fin d'expiration qui sont interprétés comme des relâchements musculaires. Aussi, Fuks montre que l'état respiratoire (combinaison pression-volume) dans lequel le musicien commence à jouer, dépend de la note et de la nuance qu'il doit jouer, c'est-à-dire de la pression buccale que celui-ci a besoin de générer.

Dans cette même direction, Cossette [38] évalue dans son étude les déplacements latéraux et antéro-postérieurs de la cage thoracique ainsi que les dimensions antéro-postérieures de l'abdomen à l'aide de magnétomètres. En plus de ces mesures de déplacements, étaient mesurés les pressions buccale, pleurale et gastrique ainsi que le son produit. Les résultats ont montré que les flûtistes utilisent différentes stratégies de mise à contribution des différents compartiments, certains déplaçant plus l'abdomen, et inversement par d'autres. Cependant, indépendamment de ces différentes stratégies, les valeurs de la pression buccale, de la vitesse du jet et du débit expiré par les flûtistes sont assez proches. Cossette conclut que les flûtistes contrôlent la hauteur de la note et l'intensité sonore par la pression buccale et le débit d'air, indépendamment de la manière dont la pression buccale est générée.

Thomasson, [125], dans son travail réalisé sur les patrons respiratoires en contribution relative de l'abdomen ou du haut-thorax montre également que les chanteurs d'opéra n'utilisent pas tous les mêmes stratégies respiratoires, certains mettant plus à contribution le compartiment abdominal ou thoracique lors de l'inspiration. Thomasson note également que certains chanteurs augmentent légèrement le volume du compartiment abdominal en fin d'expiration, juste avant l'inspiration, ce qui correspond en quelque sorte à une anticipation de l'inspiration par un relâchement des muscles abdominaux.

De plus Thomasson, [124] indique sur une deuxième étude menée sur les chanteurs professionnels classiques, que ceux-ci utilisent lors du chant des volumes respiratoires compris entre 70% et 30% de leur capacité vitale. Ces valeurs sont également proches de celles rapportées par Hixon, [67], dans son travail sur les stratégies respiratoires employées par les chanteurs. Hixon observe

que les chanteurs respirent avec des volumes respiratoires compris entre 60% et 30% de leur capacité vitale.

Plus récemment, l'utilisation de systèmes de pléthysmographie opto-électronique a permis de mesurer par méthode optique les variations de volume de toute la cage thoracique, qui peut alors être étudiée en plusieurs compartiments. Cette méthode consiste à capturer par caméras infra-rouge le mouvement de réflecteurs disposés sur le thorax du flûtiste. Une fois les positions de chacun des marqueurs repérées, le volume du thorax est reconstruit. L'étude de Cossette, [39] combine ces mesures de volumes avec des mesures d'activité musculaire par électromyographie, et de pression buccale durant le jeu de la flûte. La figure 10 représente la disposition des marqueurs sur la face avant du thorax ainsi que le découpage en trois compartiments de celui-ci. Ce

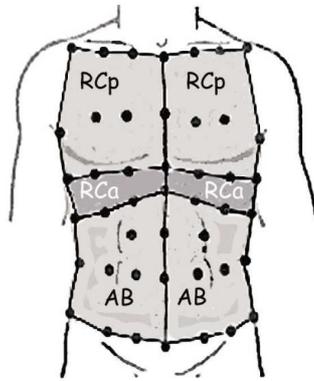


FIGURE 10 – Représentation du positionnement des marqueurs pour la pléthysmographie opto-électronique ainsi que le découpage du thorax associé, figure tirée de [40].

travail porte alors sur l'étude du soutien (associé à une haute qualité de jeu) durant le jeu de flûtistes professionnels. Les résultats montrent que durant l'expiration, les muscles inspireurs (scalènes et sternocléïdomastoidiens) sont activés, dans le but de contrôler le retour élastique du système respiratoire. Cette activité est ensuite suivie par une activité des muscles expirateurs abdominaux, dans le but de poursuivre l'expiration et de contrôler la pression buccale, en particulier lors du jeu soutenu.

Une autre étude menée par Cossette plus récemment, [40], cherche à donner une vue globale du souffle à la production sonore, dans le jeu de la flûte traversière. Pour cela, le travail combine la mesure des paramètres hydrodynamiques (faites à Paris) et respiratoires (effectuées à Montréal). Tirée de cette étude, la figure 11 représente l'évolution des paramètres hydrodynamiques (pression buccale P_m , distance des lèvres au biseau W , débit Q_j et vitesse de jet adimensionnée U_j/fW) et respiratoires (volumes d'air et activité musculaires), les lignes pointillées représentant la Capacité Résiduelle Fonctionnelle (CRF²) du volume de la cage thoracique et les activations moyennes à la CRF pour chaque muscle. Les résultats de cette étude montrent que les paramètres

2. La capacité résiduelle fonctionnelle est présentée en annexe. Certains chapitres étant rédigés en anglais, la capacité résiduelle fonctionnelle sera notée indifféremment CRF ou FRC.

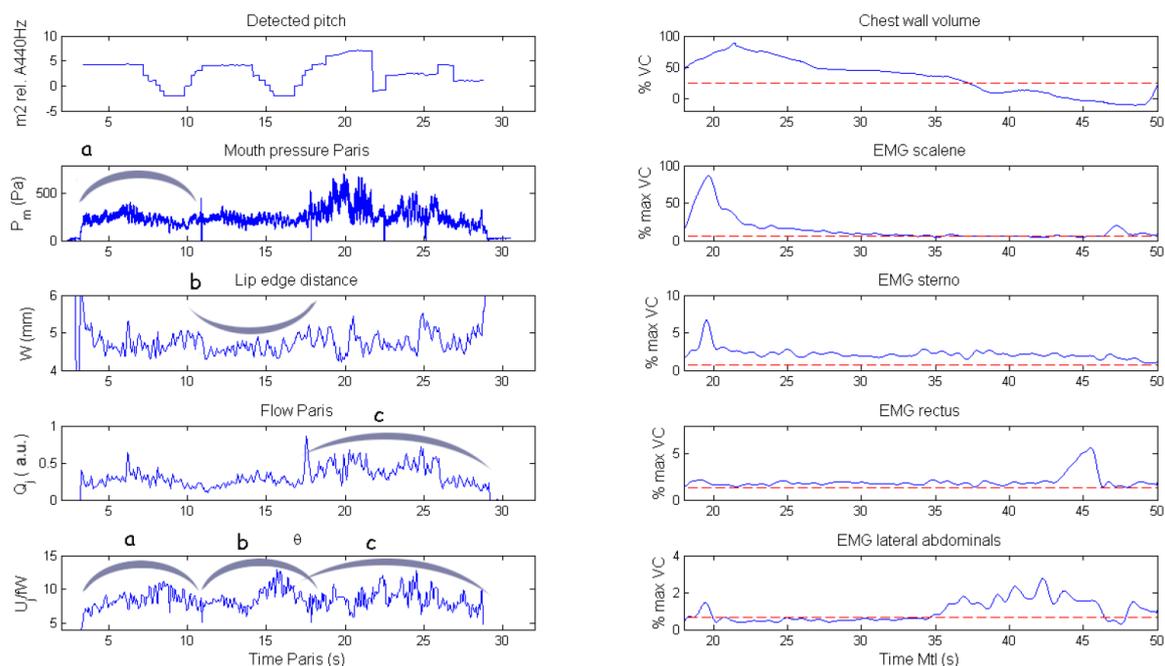


FIGURE 11 – Représentation des différents paramètres de contrôle (respiratoires et hydrodynamiques) lors du jeu du Prélude à l’après-midi d’un faune de Debussy. Paramètres mesurés à Paris à gauche : hauteur de la note, pression buccale P_m , distance des lèvres au biseau W , débit du jet Q_j et vitesse adimensionnée U_j/fW . Paramètres mesurés à Montréal à droite : Volume de la cage thoracique V_c et activités musculaires des scalènes, sternocléidomastoïdiens, du grand droit (rectus) et abdominaux latéraux. Sur les figures de droite, les lignes pointillées représentent la Capacité Résiduelle Fonctionnelle (CRF) du volume du système respiratoire et les activations moyennes à la CRF pour chaque muscle. Les phrases musicales sont identifiées par a, b, c, figure tirée de [40].

hydrodynamiques sont directement liés à la structure musicale, comme repéré par *a, b, c* sur les variations de pression buccale, débit et vitesse adimensionnés sur la figure 11, indépendamment de l’état respiratoire auquel le flûtiste joue. Ce dernier adapte donc ses stratégies respiratoires au volume respiratoire disponible au cours du jeu, dans le but de produire les stratégies hydrodynamiques associées au jeu de l’extrait musical demandé.

Enfin, durant sa thèse, Fréour [58], a étudié les stratégies respiratoires développées par les trombonistes à partir de la mesure des volumes du système respiratoire par pléthysmographie opto-électronique, et des mesures de pressions oesophagienne (pleurale) et gastrique. La figure 12 représente une photo de l’expérience menée par Fréour. Fréour montre que le diaphragme semble relâché pendant le jeu du trombone, celui-ci étant actif uniquement pendant l’inspiration. De plus, Fréour observe une relation quasi-linéaire entre la pression buccale et la fréquence fondamentale de la note jouée. Fréour note également que lors du jeu d’une note tenue, le tromboniste met plus à contribution le compartiment abdominal que le thoracique dans la première partie



FIGURE 12 – Photo représentant l'expérience menée par Fréour, photo tirée de [58].

de l'expiration, et inversement dans la seconde partie, ceci signifiant une activité des muscles expirateurs de l'abdomen dès le début du jeu afin de faire diminuer le compartiment abdominal, la fin de l'expiration est alors produite par l'écrasement de la cage thoracique par les muscles expirateurs thoraciques.

Démarche

Problématiques

L'analyse de l'état de l'art montre que la conception d'un instrument à partir de l'étude de sa réponse acoustique passive est techniquement possible mais se heurte à une difficulté majeure lorsqu'il s'agit d'intégrer dans la modélisation l'influence de la présence des lèvres. Or, il apparaît que la position des lèvres est en partie dictée par la nécessité de contrôler la production aéro-acoustique du son. Cette dernière est elle-même totalement liée à la vitesse de jet, qui est contrôlée par le système respiratoire. Ainsi, les notions de respiration et de contrôle des lèvres doivent être intégrées dans la "conception". De manière complémentaire à cette approche "conception", les questions au coeur de notre travail peuvent être mises en lumière en considérant un instrumentiste qui doit interpréter un extrait musical sur un instrument donné. Il doit pour cela faire face aux qualités et défauts de l'instrument et aux limites de ses possibilités physiologiques. Intégrant tous ces éléments dans le contexte musical (oeuvre musicale et instrument imposé), le musicien développe des stratégies de jeu tant sur le plan respiratoire que sur le plan de contrôle de la production du son. Il apparaît alors nécessaire d'intégrer, dans une vision globale, ces différents éléments.

Autour de l'étude du jeu des flûtes, trois domaines de recherche sont rassemblés : l'étude de la respiration, l'étude de la réponse acoustique des résonateurs et l'étude de la production aéro-acoustique du son. L'objectif central de cette thèse est d'intégrer les connaissances, de manière précise et détaillée, de ces trois domaines afin d'étudier le jeu des instruments en contexte musical ; aucune analyse statistique n'est donc envisagée. En retour, les connaissances dans chacun de ces domaines doivent se trouver développées par la mise en perspective proposée. L'approche que nous avons retenue est de décomposer le travail en plusieurs études qui, chacune, concerne une partie du problème, tantôt du côté de l'analyse de la réponse acoustique de l'instrument, tantôt du côté de l'analyse des stratégies respiratoires. Ainsi, le travail aborde successivement les questions suivantes.

- *Comment l'acoustique linéaire peut-elle aider à la conception ou l'évolution d'un instrument ?* Théoriquement, l'acoustique permet de prévoir avec précision les fréquences de résonance d'un instrument à partir de sa géométrie. L'exercice proposé ici est de confronter ces calculs à la réalité d'un atelier de facture instrumentale, et à la complexité du jeu par un musicien. Il s'agit, par le moyen de l'acoustique linéaire, d'aider le facteur de flûte dans la conception d'un instrument, une quena chromatique, dans le but d'obtenir un processus de conception plus rapide et plus efficace. L'instrument conçu doit être pensé de façon à garder une esthétique sonore andine et permettre au musicien de jouer avec des technicités d'une flûte moderne.
- *Quelle est l'influence de la position des lèvres du musicien sur la réponse acoustique de la flûte ?* Le positionnement des lèvres sur l'embouchure de la flûte traversière a des consé-

quences fortes sur le fonctionnement hydrodynamique en jeu mais aussi sur la réponse passive de l'instrument. C'est ce second point qui est analysé plus précisément. Il est question d'apporter une compréhension de l'influence qu'a la position des lèvres du musicien sur le rayonnement acoustique à l'embouchure de la flûte et les variations que cela engendre sur les fréquences de résonance de l'instrument.

- *Comment le flûtiste contrôle-t-il le diapason ?* La position des lèvres influence donc les fréquences de résonance de l'instrument et constitue un moyen pour l'instrumentiste de contrôler la justesse du jeu. Il s'agit d'apporter une compréhension sur le contrôle aéro-acoustique que développe le musicien selon différents accords de l'instrument imposés, pour un jeu à un diapason visé.
- *Quelles sont les stratégies respiratoires développées par le flûtiste pendant le jeu ?* Le jeu de la flûte nécessite en premier lieu que l'instrumentiste adapte la pression buccale à la hauteur de la note jouée. La pression buccale est directement sous contrôle du système respiratoire, puisqu'elle résulte des forces passives élastiques des tissus combinées aux efforts musculaires qui s'exercent sur le thorax. Afin d'analyser les contrôles aéro-acoustiques et respiratoires développés par le musicien pendant le jeu de la flûte, un protocole d'expérimentation doit être développé, permettant l'acquisition des paramètres régissant chacun de ces contrôles en simultané.
- *Quand commence le jeu du flûtiste ?* La pédagogie des instruments à vent et du chant insiste beaucoup sur l'importance de l'inspiration dans la production du son et de la musique, laissant imaginer que le jeu musical démarre bien avant le début du son. Il s'agit d'étudier la phase de préparation à la production sonore, c'est-à-dire l'inspiration, et ainsi de comprendre comment celle-ci est effectuée en lien avec la consigne musicale. Les stratégies employées par trois flûtistes seront analysées, à travers l'évolution de paramètres respiratoires essentiellement.
- *Les interférences entre posture et respiration sont-elles fortes dans le jeu du musicien ?* L'apprentissage et le jeu soliste sont le plus souvent réalisés en position debout alors que le jeu en orchestre et en musique de chambre est généralement assis, [60]. Certains des faisceaux musculaires de la statique étant impliqués dans la respiration, il s'agit de proposer une étude sur l'influence de la position dans laquelle se tient le musicien (assis ou debout) sur les stratégies de contrôle respiratoire et aéro-acoustique que celui-ci met à exécution durant le jeu musical. L'évolution des paramètres régissant ces contrôles sera analysée en regard des variations qu'apportent la posture sur l'élasticité et la résistance abdominale.
- *Quels moyens les flûtistes mettent-ils en œuvre afin de rendre notable la structure musicale et son interprétation ?* Pouvons-nous mettre à profit les connaissances acquises durant les études précédentes, à la fois sur le fonctionnement acoustique de la flûte et sur les stratégies

respiratoires engagées par le musicien, afin d'apporter une compréhension des contrôles (respiratoire et aéro-acoustique) que le musicien développe dans le but de rendre le jeu musical ? Une analyse fine et comparative du jeu de trois flûtistes sur des extraits musicaux issus du répertoire de la flûte traversière sera menée.

Intérêts de l'étude

Les intérêts du travail présenté dans ce document sont multiples et variés. Tout d'abord, les études menées sur la réponse acoustique des instruments de type flûte sont loin d'essayer d'améliorer, ou de révolutionner la facture des instruments, mais s'emploient à comprendre les connaissances empiriques des facteurs. Ces études amènent également à s'interroger sur la création et le développement d'outils d'aide à la facture, basés sur l'acoustique linéaire, tel que le projet *Pafi*, [102].

Aussi, les connaissances actuelles du fonctionnement des instruments de type flûte trouvent des applications dans le domaine de la synthèse sonore par modèle physique, [119, 17]. La synthèse sonore est un outil pouvant à la fois servir à la création musicale mais aussi à la validation de modèles de fonctionnement de l'instrument, [95].

Les développeurs de systèmes de synthèse sonore, [1] ont clairement identifié la difficulté à contrôler de manière réaliste, avant même de parler d'expressivité, les algorithmes de synthèse sonore, comme par exemple la synthèse sonore par modèle physique. Il convient alors de déterminer des paramètres de contrôle pertinents dans le but de rendre la synthèse sonore convaincante.

D'autre part, du point de vue du flûtiste, nous pouvons envisager que ce travail de thèse apporte des éléments qui aident à structurer la pédagogie de l'instrument. En effet, ce travail permet d'explicitier et développer la compréhension des stratégies développées chez les flûtistes, notamment de rendre plus précis le discours du pédagogue à propos des techniques respiratoires alors que le contrôle respiratoire, par nature interne, est difficile à montrer à l'élève, et fait quelquefois l'objet de représentations mentales éloignées de la réalité physiologique. De plus, nous pouvons également attendre des intérêts du point de vue pédagogique sur les techniques de jeu employées à l'embouchure, par exemple sur le contrôle de la justesse, de la dynamique,... Enfin, ces deux aspects peuvent également (et ont certainement intérêt à) être travaillés pédagogiquement de manière groupée.

Pour finir, d'autres intérêts, peuvent être attendus dans le domaine de la physiologie respiratoire et de la pneumologie, [126], notamment sur la "compétence" respiratoire acquise et développée par les joueurs d'instruments à vent qui peuvent alors être vus comme des experts de la respiration et donc être des sujets d'études particuliers. De plus, le développement de stratégies respiratoires particulières par les flûtistes laisse penser qu'il pourrait exister une "personnalité" respiratoire, ceci constituant un intérêt particulier de la part des physiologistes respiratoires et pneumologues, [116].

Organisation du document

Le document est présenté sous la forme de cinq parties, formant un ensemble de neuf chapitres. Les chapitres sont rédigés principalement en français et en anglais, sous la forme d'article soumis ou en cours de soumission.

La seconde partie porte sur la réponse acoustique de la flûte, c'est-à-dire le fonctionnement passif de l'instrument. Cette partie s'articule autour de trois chapitres, le premier centré sur la modélisation acoustique, alors que les deux suivants sont à caractère expérimental. Le chapitre 1 porte sur l'apport de l'acoustique linéaire dans la conception d'un nouvel instrument, en collaboration avec un facteur de flûte. Cette étude permet notamment d'obtenir une bonne connaissance des équilibres et compromis liés à la facture, qui seront utiles pour la suite du travail. Le chapitre 2 concerne l'influence de la position des lèvres du musicien sur la réponse acoustique de l'instrument, puis le chapitre 3 amène à comprendre comment, au moyen de son contrôle aéro-acoustique (et notamment de sa position à l'embouchure) le flûtiste peut contrôler la justesse son instrument.

La troisième partie porte sur les stratégies respiratoires développées par les flûtistes, et se décompose en trois chapitres. Le chapitre 4 propose une analyse des stratégies respiratoires développées par un flûtiste durant le jeu d'extraits musicaux. Le chapitre 6 porte sur la préparation de la production sonore, et plus particulièrement sur les stratégies respiratoires développées par trois flûtistes au cours de l'inspiration, au regard des extraits musicaux proposés. Le chapitre 5 apporte les éléments théoriques de physiologie respiratoire nécessaires à la compréhension des études expérimentales réalisées, chapitre 6 et par la suite.

La quatrième partie se déroule en deux chapitres, qui cherchent à mettre en relation les connaissances développées lors des deux premières parties. Le chapitre 7 traite de l'influence de la posture du musicien sur son jeu musical. Nous cherchons à comprendre si les stratégies de jeu (aéro-acoustiques et respiratoires) sont modifiées par un changement de posture, assis ou debout. Puis, le chapitre 8 propose une analyse des stratégies mises en œuvre par les flûtistes pour interpréter et rendre notable la structure musicale de l'extrait dans le son produit. Cette analyse se base notamment sur la compréhension des stratégies respiratoires globales effectuées lors de la partie trois et également sur les libertés et contraintes apportées par l'instrument, discutées en seconde partie.

Enfin, la cinquième et dernière partie apporte une synthèse, conclut ce document sur les principaux résultats obtenus, ainsi que les limitations associées à ce travail. Les perspectives envisagées afin de poursuivre ces travaux sont également présentées.

Deuxième partie

Etude de la réponse acoustique de la flûte

The design of a chromatic quena : How can linear acoustics help ?

Avant-propos :

L'article *The design of a chromatic quena : How can linear acoustics help ?*, dont est inspiré ce chapitre, a été publié aux actes de la conférence SMAC (Stockholm Music Acoustics Conference), de 2013. Les auteurs sont Camille Vauthrin et Benoît Fabre de l'Institut d'Alembert/LAM, UPMC Univ Paris 6, CNRS UMR 7190 ; et Patricio de la Cuadra, CITA, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile.

Cet article présente une étude qui a été menée conjointement avec le facteur de flûte Jean-Yves Roosen, en réponse à la demande d'un de ses clients de développer un instrument, une quena chromatique. La position générale de ce travail est donc à l'intermédiaire entre l'optimisation acoustique et le travail en atelier avec le facteur de flûte. Les discussions et travaux menés avec le facteur permettent de s'approcher et d'intégrer au mieux les contraintes liées à la fabrication d'un instrument.

L'objectif de ce travail est d'aider le facteur de flûte, à partir des théories issues de l'acoustique linéaire, dans la conception d'un instrument nouveau, la quena chromatique, dans le but d'obtenir un processus de conception plus rapide et efficace. Cet instrument doit être pensé de manière à conserver une esthétique sonore Andine, typique de la quena diatonique tout en ayant des technicités de jeu de la flûte moderne.

Les résultats montrent l'intérêt d'une telle approche. D'une part pour le facteur, ce travail permet une accélération du processus de fabrication de l'instrument en limitant le nombre de cycle essais/ajustements, c'est-à-dire une réduction du temps de travail et de la matière première (bois, ébène) consommée. D'autre part, pour la modélisation acoustique, ce travail a permis d'offrir une vue globale de l'influence des modifications géométriques sur les fréquences de résonance de l'instrument. Aussi, ce travail met en évidence les différences entre les fréquences de résonance de l'instrument et celles obtenues en jeu. Ces différences étant dues à la fois aux changements de position des lèvres du musicien à l'embouchure selon la note jouée, mais aussi aux différences entre fréquences de résonance et de jeu. L'étude de l'influence de la position des lèvres à l'embouchure de l'instrument sur les fréquences de résonance de l'instrument constitue une perspective importante à ce travail, menée dans le chapitre suivant.

La dernière phase de la conception de l'instrument, les réglages et ajustements fins de celui-ci

restent ensuite dans les mains du facteur. Enfin, l'instrument est actuellement en test auprès de musiciens. La méthode que nous avons développée ici, est complémentaire aux études sur la réponse acoustique des instruments en l'absence de tout instrumentiste et celles focalisées sur l'évaluation directe des qualités des instruments par des instrumentistes, comme par exemple le travail de Poirson, [107].

abstract

While traditional instrument making relies on trials and errors process, acoustics may help in designing a new instrument or evolution of existing instruments; resulting in a faster/more efficient designing process and/or better quality instrument. Because of complex and intricate relations between the different building parameters, it also may focus work on the specific parameters. This work can also help to grasp global influence of each geometric parameter on the note's pitch, harmonicity between the registers, the timbre or the field of freedom in play. The definition of the requirements provides the objectives and the limitations of the design process. The requirements are established from linear acoustics, discussions with the flute maker. The prototype of the chromatic quena should correspond to these; especially of the crossover between Andean sounding aesthetics and modern flute playing techniques. Linear acoustics allows to give relatively correct details on resonance frequencies, however the timbre is more difficult to study. In the aim to approach the diatonic quena's timbre, their distinguished elements are preserved on the chromatic quena as the notch, the knot. Moreover, large holes allows to obtain a regular timbre. This work shows that this design process can help the flute maker in realization of chromatic quena, especially in reducing the number of prototypes.

1.1 Introduction

The aim of this study is to help the instrument maker in the process of designing the geometry of new chromatic quena. The traditional quena is a diatonic instrument, producing a diatonic scale of seven notes in one octave by the opening of seven side holes. Semitones that are not found in this diatonic scale can still be produced, using cross fingerings, partial opening of the holes and adjusting the pitch with the lips, resulting in uneven timbre as well as awkward fingerings. On the opposite, the new chromatic quena should include eleven holes to allow for even timbre, clean intonation and ease of playing. Thus, each hole is associated to a semitone of the scale. Indeed, a key mechanism needs to be developed to control the opening of 11 holes using 9 fingers, like that found in modern so-called Boehm flutes, and other woodwind instruments. Wolfe, [133], shows how Boehm's system with large holes allows a certain homogeneous tone. The study presented in this paper is part of a project including flute and quena players from Latin America and the french flute maker, J.Y Roosen. The new chromatic quena is built by the flute maker to allow crossover between Andean sounding aesthetics and modern flute playing techniques. The sounding aesthetics of the new chromatic quena should therefore be in close relation to that of the traditional quena. Therefore certain distinguishing elements belonging to the traditional quena should be preserved. While the method commonly used by instrument makers in such a case would be to go through several prototypes, our study shows how acoustic theory can help the design process, mostly by reducing the number of prototypes needed.

The second section of this paper reformulates the problem in an acoustic design problem, and discusses the acoustic, hypothesis on which the study is based. Then, the acoustic tools and methods are described. The third section describes the process of prototype's design and finally conclusion and expectations are established.

1.2 Hypothesis, acoustic theories

1.2.1 From global description to acoustical parameters

The traditional quena is a diatonic instrument. It is made out of a roughly cylindrical tube on which seven holes are located. The size of the holes is rather large with a typical value of 0.6 times the bore diameter, however the shape is not perfectly circular but carved for tuning purpose. The bore is also not exactly cylindrical because of the natural material used (most often bamboo cane). Two specific features are : the notch at the active extremity and the knot at the passive extremity which corresponds to a knot of bamboo. During the traditional design process, the notch is first carved, then the size of the knot and cylinder length (37-40 cm) adjusted for the tuning of the lowest note (G4). Only after, the holes are drilled and adjusted to the desired scale.

The chromatic quena should approach the timbre and the sounding aesthetics of the traditional diatonic quena while allowing a chromatic equal temperament scale in terms of pitch. To quantify these elements, acoustical parameters can be used. For example, resonance frequencies allow to approach the pitch of the notes played. Resonance frequencies are to be distinguished from the sounding frequencies, the latter corresponding of the instrument in active behavior. Indeed, sounding frequencies evolve according to the speed of the jet or the register as shown by Auvray [9] and Meissner [91] or the position of the musician's lips, Cossette [40] and Coltman [33]. A deviation between resonance and sounding frequencies can be observed. The timbre or the sounding aesthetics are more difficult to quantify with parameters of linear acoustic, however some elements may be provided. To approach the traditional sound of the quena, the size of the bore, the shape of the notch and the knot should be preserved, moreover to obtain an even timbre across the scale, the holes should have similar sizes. Even if linear acoustic can't predict the timbre, these conditions should allow to stay close to the original sound.

1.2.2 Acoustic tools and method

Acoustical model of the cylinder : The theory of plane waves described in the Appendix allows to express the transfer matrix of a cylinder. Propagation is described using a transmission line formalism as explained in the books [75], [105] :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c j \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} j \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

where Γ is the propagation constant ($\Gamma = jk_c$, and k_c the complex wave number which takes into account viscosity and thermal conduction effects), L is the length of the cylinder and Z_c is the characteristic impedance expressed later. This transfer matrix allows to connect pressure P and acoustic flow U at each extremity of the cylinder.

The Stokes number is defined as the ratio of the cylinder radius to the boundary layer thickness : $r_v = |k_v a|$. k_v is expressed by $k_v = \sqrt{-\frac{j\omega}{c_0 l_v}}$, with $l_v = \frac{\mu}{\rho_0 c_0}$. a is the radius of the cylinder, c_0 is the velocity of the sound, ρ_0 is the air density and μ the dynamic viscosity. For large pipes with

values of the Stokes number greater than 10, the constant of propagation Γ becomes :

$$\Gamma = \alpha + j \frac{\omega}{v_\phi} \quad (1.2)$$

where $\alpha = \frac{\omega}{c_0} \left[\frac{\alpha_1}{r_v} + \frac{\alpha_2}{r_v^2} \right]$, $\alpha_1 = 1.044$ and $\alpha_2 = 1.08$, $v_\phi = c_0 \cdot \frac{1}{1 + \alpha_1/r_v}$. Taking into account the visco-thermal effects, the characteristic impedance is written as :

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{S} \left[1 + \frac{\bar{\alpha}_1(1-j)}{r_v} - \frac{\bar{\alpha}_2 j}{r_v^2} \right] \quad (1.3)$$

where $\bar{\alpha}_1 = 0.37$ and $\bar{\alpha}_2 = 1.147$, for air. S is the cross-section of the cylinder.

The temperature-dependent parameters are : the sound velocity c_0 , the density ρ_0 , the dynamic viscosity μ and the thermal conductivity κ .

The holes : The side-holes perturb the acoustic-field inside the bore, the opening or the closing of these modifies the resonances of the instrument and thus allows the musician to play different notes. Therefore, resonances frequencies of the instrument change according to the geometry of the side holes and a precise description of each hole is essential to the prediction of the resonance frequencies. While the geometry of the holes may be adjusted by the flute maker during the fine tuning of the instrument, we will restrict our study to idealized cylindrical geometry of the holes. The holes are described by their radius, chimney and position on the cylinder. It is assumed that the distance between tone holes is sufficiently large to make higher propagating mode interactions negligible.

A hole inserted between two segments cylindrical duct, relates the input, 1, and output quantities, 2 :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = T_{cyl} T_{hole} T_{cyl} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

where T_{hole} and T_{cyl} are respectively the transfer matrix of the hole and the cylinder. The transfer matrix of a side-hole may be approximated by a T-junction, as shown in figure 1.1.

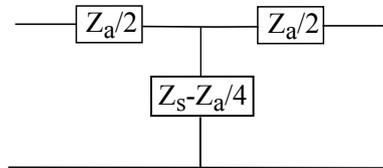


FIGURE 1.1 – Block diagram showing the T-junction for a tonehole.

This T-junction depends on two parameters : the shunt impedance Z_s and the series impedance Z_a . These are defined differently for an open or closed hole. In the literature, there are several descriptions of tonehole on a pipe. Two geometrical cases are distinguished : a tonehole on a thick pipe and a tonehole with a chimney on a pipe without thickness. Different mathematical expressions for these impedances in low frequencies are available in the literature by Pierce, Nederveen, Dalmont, Dubos, Keefe [105, 99, 43, 50, 72] and Lefebvre [80] with finite elements. All of them are summarized and compared in Eveno's thesis [53]. After a comparison of these

different mathematical expressions, the model used in this study is Lefebvre's model. In our case, this model is the most relevant, it allows to take into account the pipe's thickness ; which is responsible for the height of the tonehole. The radiation of the tonehole is approximated by that of a piston in an infinite plane baffle. Furthermore, this model is also coherent for small height of holes. This model takes into account the matching volume between the bore cylinder and the hole cylinder.

The transfer matrix corresponding of the T-junction's schema is expressed by :

$$T_{hole} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\overline{Z}_a}{2\overline{Z}_s} & \overline{Z}_a(1 + \frac{\overline{Z}_a}{4\overline{Z}_s}) \\ 1/\overline{Z}_s & 1 + \frac{\overline{Z}_a}{2\overline{Z}_s} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

where \overline{Z}_s and \overline{Z}_a are the dimensionless impedances defined respectively by $\overline{Z}_s = Z_s/Z_0$ and $\overline{Z}_a = Z_a/Z_0$ with $Z_0 = \rho_0 c_0/S$. Expressions impedance are then set according to the configuration of the hole : open (*o*) or closed (*c*) and detailed in [80].

The end knot : The end knot can be considered as a cylinder with a smaller section s_b . Then follows Γ_b and Z_{cb} . The transfer matrix T_b of a cylinder with a length l_b can be associated to this end knot.

Radiation of the instrument : The radiation of the passive extremity is approximated by that of a thin tube baffle, the radiation impedance can be written as follows in low frequencies :

$$Z_r = \frac{\rho_0 c_0}{s_b} \left(jk0.6r_b + \frac{1}{4}(kr_b)^2 \right) \quad (1.6)$$

with $s_b = \pi r_b^2$, 0.6 is probably underestimated because of the small baffle associated with the knot.

The whole instrument Finally, the whole instrument corresponds to the product of transfer matrices :

$$Z = T_h \cdot \prod_i \{T_{cyl_i} T_{hole_i} T_{cyl_i}\} \cdot T_b \quad (1.7)$$

where T_h is the transfer matrix of the cylinder corresponding to the length correction of the notch. Z is thus expressed as a matrix $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, the input impedance of the quena can be expressed as :

$$Z_e = \begin{pmatrix} AZ_r & B \\ CZ_r & D \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

$$Z_e = \frac{AZ_r + B}{CZ_r + D} \quad (1.9)$$

The quena being an open-open instrument, the resonance frequencies are those of input admittance peaks. The frequencies are estimated from the zero crossing of the imaginary part of the admittance by dichotomy-method.

1.3 Designing a prototype

The quena, figure 1.2, can be studied in two elements : the active part with the notch and the passive part : the resonator.

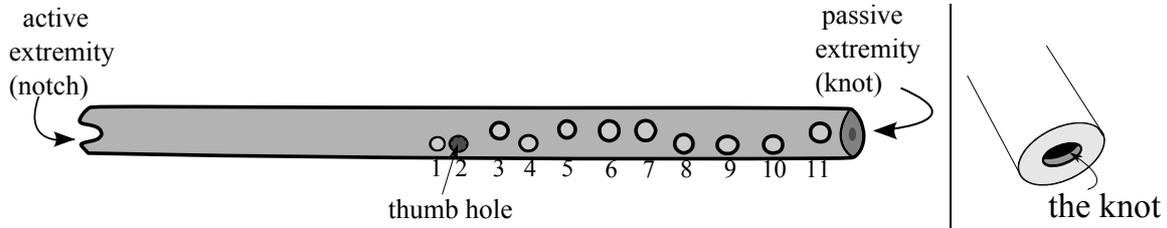


FIGURE 1.2 – Left : schematic figure of a quena on which are illustrated toneholes, passive and active extremities ; right : zoom on the knot of the quena.

This project is developed in collaboration with a flute-maker. To easily interact with him, the design of the chromatic quena is based on the traditional design process. Therefore, no global optimization algorithm, as Le Vey's method [85], is used. The step by step design follows the traditional process. Moreover, this allows to understand the importance of the steps order in the realization, but also to observe the influence of each geometric parameter on the resonance frequencies.

The wood used to the final chromatic quena will be ebony, the pipe is then considered as a cylindrical pipe. The first prototypes presented in this study are built in plastic tube which are also considered as cylindrical.

In a first step, the length correction of the notch is deduced by comparing the resonance frequency of a pipe model without the notch and the playing frequency of a pipe with the notch, for one note the pipe being without hole. The model allows to optimize the geometries of the knot and of the cylinder total length to obtain the desired pitch of G4. In a second step, side holes are included and their positions are manually optimized for proper intonation of the first two octaves, the most pertinent geometry of the resonator is searched. Lastly, the fingerings of the third register are established.

1.3.1 Notches, knot and length cylinder

The notch constitutes the active entrance of the quena, three shapes of notches can be listed : in "U", in "V" and the "little notch". A study measuring the playing range for each shape of notch by L. Garcia [61], shows that a notch with a little window allows a wider range of playing frequencies. On the other hand, the orientation of the labium is to be considered. In fact, when the labium is oriented towards the outside, Garcia notices an expansion of the playing range. The notch selected is a notch between a shape in "V" and a "little notch". The dimensions of the notch are : 9 mm long and 10 mm wide. The labium is carved in the thickness of the tube to 1/3 from the outside and to 2/3 on the inside. This geometry of the notch was selected after observation of traditional diatonic Chilean quenenas, to offer an easy adaptation of the blowing technique of quena players as well as similar sounding aesthetics.

knot's geometry	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	IH (cents)
$r_b=5$ mm, $l_b=4$ mm	391.7	786.2	6.2
$r_b=5$ mm, $l_b=6$ mm	391.7	787.0	7.9
$r_b=4$ mm, $l_b=4$ mm	391.7	787.4	8.8

TABLE 1.1 – Table showing the calculating of the inharmocity of $G4$ and 5 according to the knot's geometry in a pipe

It is important to start the study with the notch because it determines the open area at the blowing end, and therefore the corresponding length correction. Its shape strongly influences the resonance frequencies of the cylinder. As a first approximation, the length correction is considered as constant for all the frequency band. The evolution of the length correction according to the register or flutist's position will be discussed section 1.3.3. In the same way quena-makers do, the notch is carved on a relatively long cylinder which is played, the playing frequency of the pipe with a notch is thus obtained. By comparing this playing frequency of the pipe with the notch and the resonance frequency of a numerical model of the same pipe without the notch, a length correction l_h can be associated to the notch. In this case it's equivalent to $l_h = 3.4$ cm. Then the knot's geometry can be determined.

The knot is included in the model as discussed in section 1.2 with two geometric parameters, its length and cross-section. The $G4 - 5$'s harmonicity can be studied as a function of the latter two using our model. $G4 - 5$'s harmonicity changes according to the length or the section of the knot as shows the table 1.1. A small variation of 1 mm is added successively on the radius and on the length of the knot. The length of the cylinder is thus adapted to obtain the same pitch of $G4$ and so making more legible reading the inharmocity.

The inharmocity is defined by Debut [45] as the relative difference between the resonance frequency f_n and n times the first resonance f_1 :

$$IH = \frac{f_n - nf_1}{nf_1} \quad (1.10)$$

$$IH(cents) = \frac{IH}{5.78 \cdot 10^{-4}} \quad (1.11)$$

f_1 ($G4$), f_2 ($G5$) and IH values are referenced in table 1.1 according to the knot's geometry in a pipe.

The table 1.1 indicates that $G4 - 5$ inharmocity increases when the length of the knot increases. The same for a decreasing cross section. To obtain an equal timbre on each notes of the scale, the geometry of the last open hole should be identical for each fingering. Thus for the $G4$, the last open hole is the knot, its dimensions should approach the geometry of the side holes. A radius $r_b = 5$ mm and a length $l_b = 4$ mm is a right compromise between the tuning and the geometry of the knot. Indeed the knot's radius is identical to that of the last holes and the knot's thickness approaches the one of the pipe. This knot induces an inharmocity of about 6 cents between $G4$ and $G5$. Lastly, to obtain in the model the resonance frequency of the $G4$,

the length of the pipe should be $L = 37.9$ cm.

1.3.2 Determination of a simple profile tuning to the equal temperament chromatic scale : the first two registers

Criteria/condition of the tuning In the first step of the design, a simple profile tuning to the equal temperament chromatic scale is sought for the first two registers only. This first tuning is based on resonance frequencies, thus on the geometric parameters (toneholes and cylinder). The input admittance of the quena is calculated following the theory presented in section 1.2. The algorithm developed during this study is validated by comparison with other software packages, as well as for simple geometrical test cases allowing an analytic resolution. Geometric data of existent traditional diatonic quena are also studied with the program. The first geometric model of a chromatic quena is thus based on resonance frequencies. The two first requirements of the instrument maker are tonehole's diameters smaller than 10 mm by steps of 1/2 mm to comply with existing drill-bits.

When all the toneholes are closed, the instrument plays the lowest note : G4=392 Hz, and when the upper toneholes are open the pitch rises by semitone, until the F#6=1480 Hz for the second register. The chromatic quena includes 11 toneholes, the fingerings are the same for the first two registers.

During the test of a new instrument, the player evaluates its quality firstly by the precision of the intonation. Then the timbre, the sound and the ease of play are compared. Because of the different qualities searched by the players, these criteria are more difficult to quantify. Since the most important parameter is the intonation of the instrument, this study focuses on the pitch of the quena.

For an instrument like the quena, the fine tuning of the instrument maybe carried by small adjustments of the tone hole geometry in a final stage of tuning. Furthermore, the individual features of each player's lips also influence the tuning. Therefore, the accuracy in tuning that we expect is restricted in the following way, the frequency criteria are established by :

α – Tuning based on the equal temperament chromatic scale A4=440 Hz

β – Maximum frequency deviation of the tuning across two octaves : $\delta f_{max} - \delta f_{min} = 25$ cents

γ – Frequency interval between two consecutive fingerings < 4 cents : $\delta f_{n+1} - \delta f_n < 4$ cents where δf corresponds to the interval in cents between resonance frequencies and frequencies of the scale. The last criterion corresponds to the fact that the player may easily adjust his lip position for the pitch correction, and develop a global pitch correction through the whole compass of the instrument. A local compensation between two notes in a small interval is much less easy to achieve.

Tuning profile : After determining the length correction of the notch, the geometry of the knot and the length of the pipe, the 11 toneholes are arbitrarily placed on the pipe with diameters between 7 to 10 mm. This allows to take into account the small volumes in the toneholes when

they are closed. Determining the geometry with the algorithm begins with the tonehole 11, the closest to the knot at the passive end. Because we consider large sides holes, adjustments of diameters or positions of this hole have a very little influence on the tuning of the notes lower. The tuning is carried from the tonehole 11 to the first. The geometric determination of tonehole's position and diameters follows three steps :

- the frequency to the first impedance peak is approximately determined by the position of the hole
- the diameter is adjusted for best harmonicity between the first two registers
- the hole's position can be modified to obtain the exact desired frequencies

The fixed parameters are the temperature to $t = 22^{\circ}C$, the cylinder's radius to $a = 9.5$ mm and the thickness of the pipe $h = 2.95$ mm. The simplest intonation profile obtained is shown in figure 1.3. This profile corresponds to the instrument's geometry in figure 1.4. The first

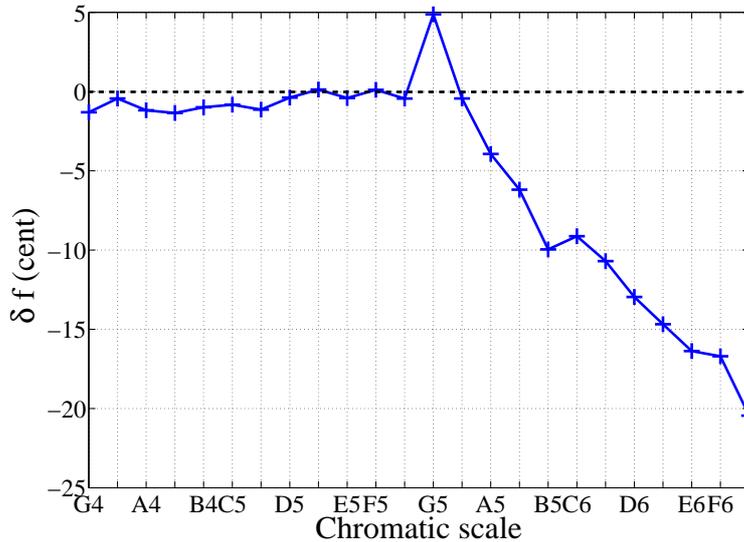


FIGURE 1.3 – Calculation of the frequency interval (δf) between the intonation profile and the equal temperament chromatic scale with A4 tuned at 440Hz for the geometry of the quena defined in figure 1.4. Length correction at the notch is taken as 3.4 cm and the temperature $t = 22^{\circ}C$ in the calculation. The intonation profile presented corresponds to the resonance frequencies.

intonation profile, figure 1.3, respects the constraints explained previously and shows a certain regularity between the first two registers. A little gap appears on the G5 due to the knot. The first register is tuned around zero and the second register is a simple decay.

1.3.3 Link between resonance and sounding frequencies

A deduction of a new intonation profile : As discussed in section 1.2, there is a shift between resonance and sounding frequencies. Auvray [9] and Meissner [91] show with experiments and models the active behavior of a flute depending on the speed of the jet. Coltman

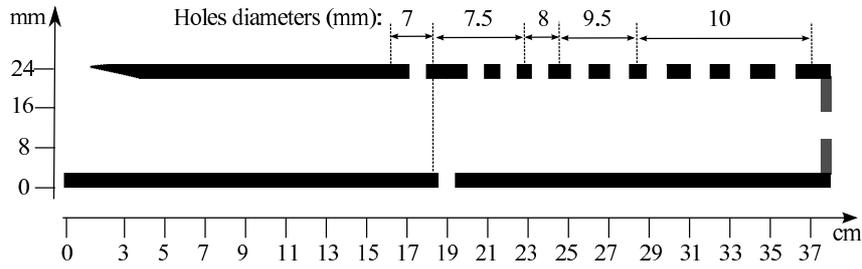


FIGURE 1.4 – Figure showing the global geometry of the quena in cross-section view.

[33] and Cossette [40] explain how the expert musician can control the sounding frequency by approaching the labium resulting in a modification of the open area. To highlight the difference between sounding and resonance frequencies, the instrument described in figure 1.4 is built in a plastic tubes and played by a musician without specific instruction, except to play the scale. The sounding frequencies are measured by a tuner, with a precision of 5 cents. This process allows to obtain a global view of the interval between sounding frequencies and the tempered scale, which is represented in figure 1.5. A target profile at fixed length correction at the lips is then deduced, that corresponds to the difference of resonance and sounding frequencies : $\delta f_{th} = \delta f_{res} - \delta f_{sound}$.

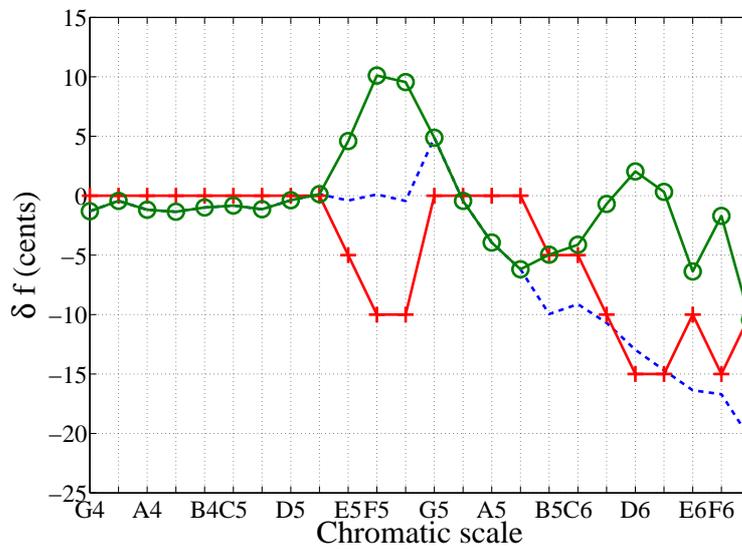


FIGURE 1.5 – Calculation of the frequency intervals (δf) between the equal temperament scale and the resonance frequencies (dashed), the sounding frequencies (crosses) of the instrument described in figure 1.4. The target profile is deduced from the difference between the latter two (circles).

Figure 1.5 shows that the sounding frequencies follow the resonance frequencies in the lowest part of the first register up to $D\#5$. Next, for the last notes of the first register they are somehow flat. For the second register, they are in average 5 cents sharp. The target profile shows the intonation profile to achieve in order to obtain sounding frequencies closer to the desired scale. A new geometry is then developed.

Determination of the new geometry : The aim is now to determine a new geometry of the quena to approach the target profile. For that, the previous geometry is slightly modified. The constraints of the tuning are the same as above. In a simplistic way, an octave can be reduced by increasing the diameter of the hole and vice versa. The cylinder's dimensions are the same : radius, thickness, length, knot and notch. Temperature is also the same. The new geometry of the instrument is plotted on figure 1.6, highlighting the modifications from the previous geometry.

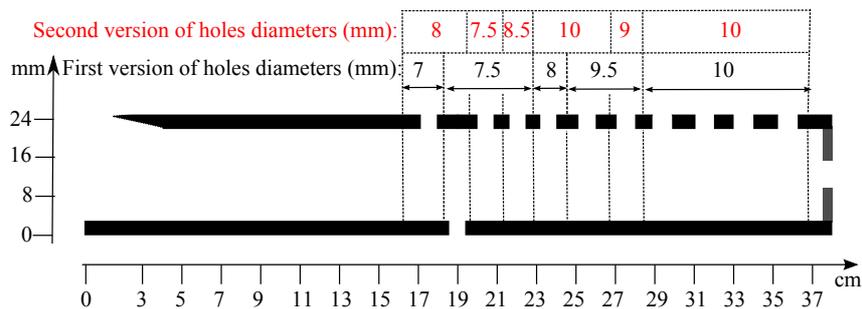


FIGURE 1.6 – Illustration showing the modifications on tonehole's geometry (positions and diameters) between the first and the second intonation profiles on the first two registers.

Comparing figures 1.4 and 1.6, it is possible to note that the geometry of the lowest holes was not changed. In fact, the tuning of the lowest notes in the scale was correct. The diameters of some upper toneholes were enlarged somewhat to match the desired tuning between the two registers. The position of the lowest holes was not changed too, but some positions of the upper holes have been changed between -1.5mm and $+4\text{mm}$ from the first geometry. The intonation profile obtained for this second geometry is presented in figure 1.7.

The second intonation profile is close to the target tuning up to $A\#5$. For the upper notes, the second intonation profile is a bit lower, maximum of 10 cents. The interval between the resonance frequencies and the target profile for the upper notes (from the $B5$) is reduced of approximately 9 cents. The same between $E5$ and $G5$, the interval is reduced of 6 cents. To further reduce this gap, it would be necessary to increase the diameter of the first holes, but this would not be compatible with the key mechanism. However, these differences are consistent with the desired values presented in section 1.3.2 and regular, thus easier to control in play.

1.3.4 The third register

The scale from the $G6$ to the $F\#7$ constitutes the third register of the quena. This register isn't played with the same fingerings than the first two octaves. The Boehm's key-mechanism is also adapted to perform this last register. The quena's fingerings are determined from modern flute's fingerings.

The register hole : On the modern flute, small diameter holes are placed between the

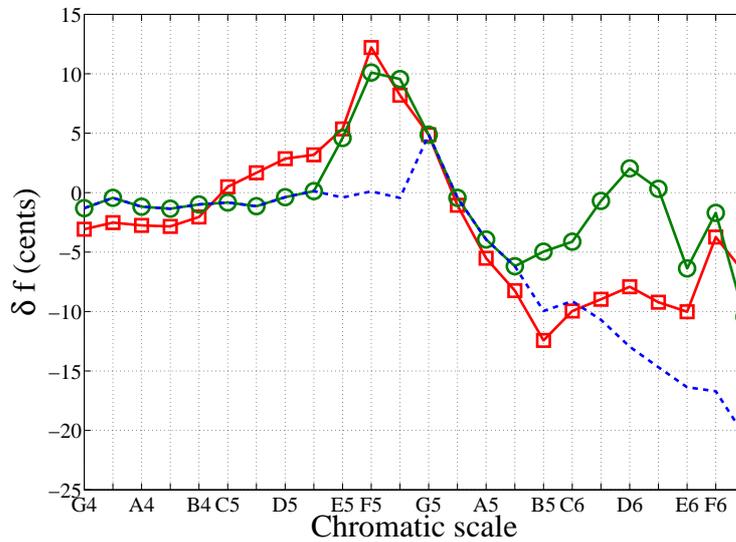


FIGURE 1.7 – Representation of the frequency intervals (δf) between the tempered scale and the resonance frequencies from the first geometry described in figure 1.4 (dashed) : already presented in figure 1.5 is plotted for reference. The target profile deduced from interval between the sounding and resonance frequencies of the first geometry (circles), also presented in figure 1.5 is plotted for reference. Last, the resonance frequencies from the second geometry described in figure 1.6 (squares) is represented. For the two geometries, the length correction of the notch is 3.4 cm and the temperature $t = 22^\circ C$.

mouthpiece and the tone holes. These register-holes help the oscillation of upper pipe resonances by reducing the first admittance peaks. In the case of the chromatic quena the hole the closest to the notch acts both as a tonehole for $F\#5 - 6$ and as a register hole for $G6$ and for notes in the third octave of the instrument.

Its position is important because it determines the tuning of $F\#5$ and 6, but also of $G6$. The geometry of this hole is deduced by a compromise between these three notes. The hole's position determines the tuning of $G6$, the diameter the tuning of $F\#5$ and 6. From the previous section, it can be estimated that $G6$ must be tuned between -5 and -10 cents relative to the equal temperament scale. A tuning of -7 cents corresponds with the calculation to a hole's position of 17.7cm. Then, the tuning and harmonicity of $F\#5$ and 6 can be studied according to the hole's radius. The target intonation profile estimates a deviation of $+10$ cents and -10 cents, respectively for the $F\#5$ and 6. The best compromise is to choose the diameter of 8 mm. In fact the deviation is then respectively to 8 cents and -7 cents. This compromise allows to approach best the equal temperament scale in play.

Fingering of the third register : The fingerings for the third register are determined by playing, based on modern flute fingerings. The second instrument described in figure 1.6 is built in a plastic tube, with the geometry of the register hole described in section 1.3.4. First, each modern flute fingering is played on the quena. If the pitch is sharper than the desired pitch, an other tonehole is closed from the passive extremity. The effective length of the instrument is then extended and the pitch falls a few cents. These fingerings must obviously comply with the Boehm's key-mechanism.

The resonance frequencies can then be calculated for each fingering. The intervals between the resonances frequencies and the equal temperament scale are represented in figure 1.8 for the three registers.

Figure 1.8 shows that the higher the note is, the lower resonance frequency compared to the equal temperament scale is. Playing in the third register requires high jet velocities. This has been observed on modern flute with an increasing of the value of the sounding frequency. However, on modern flute the musician compensates a high air velocity with the distance to the labium, [41].

1.4 Conclusion and expectations

The first prototype of a new chromatic quena has been designed with a method similar to the one of the flute-maker. The first step consists in observing different diatonic quenans and duplicating them. Then, 1D linear acoustic is used to determine the geometry to be closer to the desired scale. 1D linear acoustic allows to obtain interesting and relevant information on resonance frequencies. However, there is a difference between resonance and sounding frequencies (obtained while playing). To identify the interval between the last two, the first model of quena must be played. It is then observed that this interval increases with the pitch of the note played. The length correction of the notch changes with the frequency, probably due to the forward

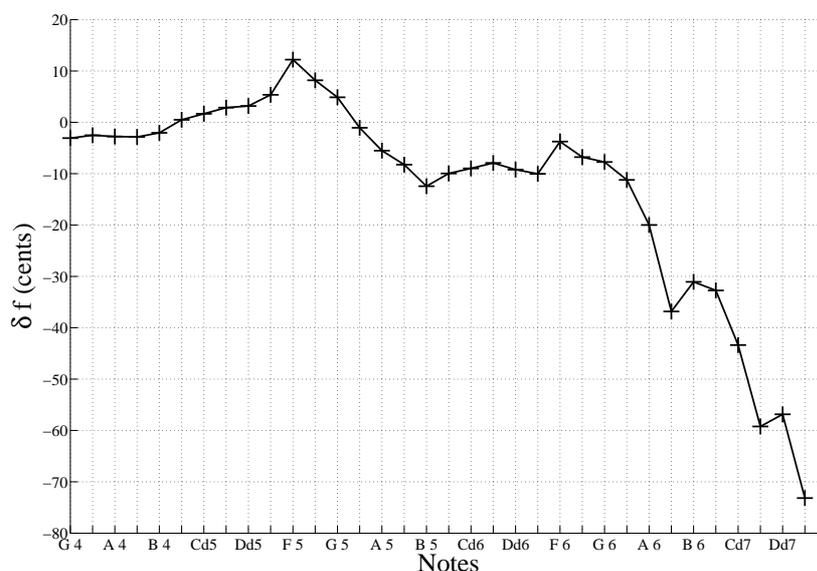


FIGURE 1.8 – Calculating of the frequency intervals (δf) between the equal temperament scale and the resonance frequencies of the three octaves. These fingerings of the third register are determined by playing the instrument described by the geometry 1.6 and with the register-hole’s geometry described in section 1.3.4.

motion of the lips towards the labium. It would be interesting to develop the work in this direction, in order to determine how the notch, the position of the lips, the velocity of the jet are involved in the interval between resonance and sounding frequencies.

1D linear acoustic can give efficient information on resonance frequencies, it offers a global view of the influence of geometric modifications, since it presents an intonation profile showing the predicted pitch variations for all the notes. However, no single parameter allows to quantify the sound, the timbre, the intensity or the dynamic. The increase of the side-holes number reduces the distance between each hole. This affects the cutoff frequency of the instrument, which may change the timbre. These parameters are also interesting, effectively the timbre, the sound of the instrument and the ease to play are criteria in the appreciation of an instrument. 1D linear acoustic does not allow to quantify these features and this is the most important limitation of 1D linear acoustic. Therefore, the preservation of the notch and the knot, regular hole’s diameters, the timbre of the chromatic quena should remain in close reference to the diatonic quena timbre.

Finally, the 1D linear acoustic allows to help the flute-maker, mostly by speeding up the observation phase and the first phases of geometry determination. Indeed, this design process based on a traditional process, but includes 1D linear acoustic to reduce the number of prototypes to be actually built. However it doesn’t replace the later phases of adjustments by the flute maker. Moreover, the quena chromatic will be realized in wood with a key-mechanism. The influence of the keys or of the fingers is not included in this model. It may be possible to include them with a correction term.

acknowledgments The authors would like to thank Laurent Quartier, Arnaud Gérard and

J.Y Roosen, the flute-maker, for his suggestions, discussions.

1.5 Appendix

From the plane wave to the matrix transfer of the cylinder : Linear acoustic is based on the equation of loss-less acoustic waves in air :

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.12)$$

where p is the pressure and c_0 is the velocity of sound.

In a cylindrical tube of radius a , at frequencies under the cutoff frequency $f_c = 1.84 \frac{c_0}{2\pi a}$, the general solution is a plane wave, written following d'Alembert as the sum of two progressive waves, $f^+(x-ct)$ and $f^-(x+ct)$ moving respectively, in the $+x$ and $-x$ directions with a velocity c_0 :

$$p(x, t) = f^+(x - c_0 t) + f^-(x + c_0 t) \quad (1.13)$$

This equation becomes in the frequency domain :

$$P(x, \omega) = P^+(\omega) e^{-jkx} + P^-(\omega) e^{jkx} \quad (1.14)$$

where $k = \omega/c_0$ is the wave number. Euler's equation allows to obtain the acoustic flow :

$$U(x, \omega) = Z_c^{-1} [P^+(\omega) e^{-jkx} - P^-(\omega) e^{jkx}] \quad (1.15)$$

with $Z_c = \rho_0 c_0 / S$ the characteristic impedance of the cylinder if ρ_0 is the air density and S the cross-section of the cylinder. Acoustic pressure and flow at any given position x in the cylinder can be written as functions of the pressure and flow at $x = 0$, $P_0 = P(0, \omega)$ and $U_0 = U(0, \omega)$ as :

$$\begin{cases} P(x, \omega) = P_0 \cos kx - U_0 Z_c j \sin kx \\ U(x, \omega) = -P_0 Z_c^{-1} j \sin kx + U_0 \cos kx \end{cases} \quad (1.16)$$

Equation (1.16) can be generalized for the abscissa x_1 and x_2 with $x_2 - x_1 = L$, the length of the cylinder :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kL & Z_c j \sin kL \\ Z_c^{-1} j \sin kL & \cos kL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

Introducing the "transfer matrix" from the position x_2 to the position x_1 . This "transmission line" formalism will be used throughout the paper.

Two major mechanisms of attenuation are present in a wave-guide : viscosity and thermal conduction effects which are mainly effective close to the inner surface. The theory from Zwicker and Kosten, [134] allows to keep using the plane wave description with uni-dimensional equations considering averaged acoustic quantities. The averaging is carried over the cross section of the cylinder. This theory dissociates the viscous and thermal effects and leads to a formulation by transmission lines, as explained in the books [75], [105].

$$\frac{dP}{dx} = -Z_\nu U \quad \text{and} \quad \frac{dU}{dx} = -Y_t P \quad (1.18)$$

where

$$Z_\nu = \frac{j\omega\rho_0}{S} \left[1 - \frac{2}{k_\nu a} \frac{J_1(k_\nu a)}{J_0(k_\nu a)} \right]^{-1}, \quad (1.19)$$

$$Y_t = j\omega\chi_S S \left[1 + (\gamma - 1) \frac{2}{k_t a} \frac{J_1(k_t a)}{J_0(k_t a)} \right] \quad (1.20)$$

Z_ν and Y_t are respectively the linear impedance in series and the linear admittance in parallel, corresponding to the viscous and thermal conduction effects. J_0 and J_1 are the Bessel functions and χ_S the adiabatic compressibility.

Then the solutions of transmission lines become :

$$P(x, \omega) = P^+(\omega)e^{-\Gamma x} + P^-(\omega)e^{\Gamma x} \quad (1.21)$$

$$U(x, \omega) = Z_c^{-1}[P^+(\omega)e^{-\Gamma x} - P^-(\omega)e^{\Gamma x}] \quad (1.22)$$

where Γ is the propagation constant ($\Gamma = jk_c$, and k_c the complex wave number). The transfer matrix of the cylinder can be expressed by :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c j \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} j \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1.23)$$

Influence de la position des lèvres du musicien sur le rayonnement à l'embouchure de la flûte.

2.1 Introduction

Le contrôle expert développé par le musicien est intimement lié à l'instrument, notamment à ses éléments de facture. Dans la littérature, l'influence de la géométrie de chacun des éléments de facture (perce, trous, clés, ...) sur les fréquences de résonance est bien étudiée et connue, par l'acoustique linéaire. L'influence de la position des lèvres du musicien à l'embouchure sur le rayonnement de cette dernière a, quant à elle, été peu étudiée. En effet, une telle étude est délicate car elle consiste à passer d'un cas pratique de rayonnement en trois dimensions à une modélisation à une dimension, de plus le rayonnement à l'embouchure dépend de la morphologie individuelle du flûtiste, l'expérience étant alors difficilement reproductible. Lors de l'étude menée au chapitre 1, nous avons cependant remarqué empiriquement que la position des lèvres du musicien avait une influence sur le rayonnement du trou d'embouchure, et donc potentiellement sur les fréquences de résonance.

En effet, le musicien est amené, selon la tessiture de la note jouée, à faire évoluer la vitesse du jet d'air produit, celle-ci augmentant avec la fréquence de la note jouée ou la nuance, [57, 41]. De plus, le fonctionnement optimal d'une flûte est obtenu [41, 9] pour des valeurs de vitesse de jet adimensionnée entre 4 et 7, la vitesse adimensionnée étant définie par $\theta = U/f_0W$, où U est la vitesse de jet, f_0 la fréquence fondamentale de la note jouée et W la distance des lèvres de musicien au biseau. Le musicien contrôle la vitesse adimensionnée du jet θ pour une note donnée grâce aux deux paramètres : vitesse de jet U et distance au biseau W , entre 4 et 12 à des fins expressives, [41, 40, 128].

Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif d'étudier l'influence de la position des lèvres du musicien à l'embouchure sur le rayonnement de celle-ci et donc sur les fréquences de résonance de l'instrument. Pour cela, nous demandons à un musicien de jouer une gamme sur deux octaves (c'est-à-dire de faire varier f_0) pendant que des mesures d'impédance de l'instrument sont effectuées sur chacune des notes jouées, à l'aide du capteur d'impédance développé au CTTM du Mans, [83, 84]. La position des lèvres du musicien à l'embouchure est également filmée, et la distance des lèvres au biseau mesurée durant le jeu afin d'établir une relation entre distance au biseau, impédance de rayonnement à l'embouchure et fréquences de résonance de l'instrument.

Nous présentons dans un premier temps les outils acoustiques nécessaires à la modélisation acoustique de la flûte et donc à la détermination de l’impédance de rayonnement à l’embouchure. Dans un second temps, nous expliquons la méthode utilisée, le protocole de l’expérimentation, ainsi que les limitations apportées par ces derniers. Puis, nous présentons les résultats obtenus, et amenons à la discussion.

2.2 Outils acoustiques

Nous présentons dans cette partie les outils acoustiques nécessaires à la modélisation acoustique linéaire de certains segments de la flûte. En effet, nous mesurons l’impédance de la flûte sur un trou de cadence, comme indiqué sur la figure 2.1. Afin de déduire la contribution de la

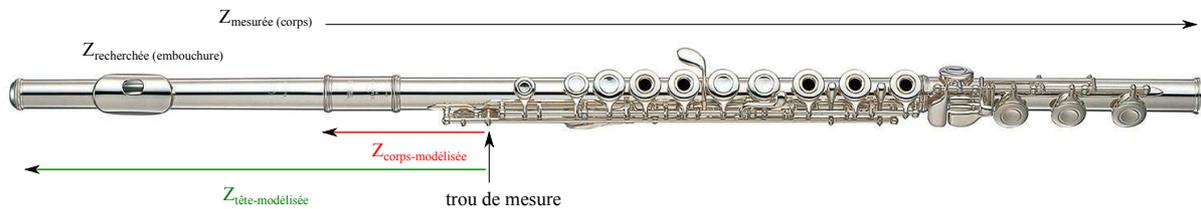


FIGURE 2.1 – Figure représentant la flûte, indiquant le trou de cadence à partir duquel l’impédance est mesurée, ainsi que l’impédance du corps mesurée, l’impédance du trou d’embouchure recherchée et les impédances modélisées.

position des lèvres du musicien dans le rayonnement à l’embouchure de la flûte, par la détermination de l’impédance au trou d’embouchure de la flûte, nous serons amenés à modéliser certains éléments de la flûte. Pour obtenir l’impédance à l’embouchure de la flûte, nous devons ramener l’impédance mesurée à la clef de cadence ; pour cela nous devons connaître l’impédance d’une partie du corps (à droite du point de mesure). Modéliser cette impédance serait possible mais induirait certainement un nombre important d’erreur (notamment par la modélisation des clefs ouvertes) ; aussi il est plus simple de mesurer l’impédance du corps entier depuis son extrémité créant la jonction avec la tête (pour le doigté voulu) et de ramener celle-ci au point de mesure, en modélisant uniquement le segment entrée du corps-trou de mesure $Z_{\text{corps modelise}}$. Nous modélisons également l’impédance de la tête de la flûte à partir du point de mesure $Z_{\text{tete modelisee}}$, dans le but de ramener l’impédance mesurée à l’embouchure.

Nous présentons dans un premier temps les outils acoustiques nécessaires à l’estimation de ces impédances, puis ceux nécessaires à la modélisation du raccord flûte-capteur.

2.2.1 Outils acoustiques pour la modélisation des segments de flûte

Géométrie des segments à modéliser

Nous représentons en figure 2.2, le schéma de la géométrie du segment de flûte à modéliser. Les longueurs et diamètres sont donnés en mm sur la figure 2.2. Nous remarquons que ce segment de la flûte est constitué d’un tronçon de cône sur lequel est disposé le trou d’embouchure pour

la tête et d'un tronçon cylindrique avec deux trous (le second étant celui de la mesure) pour le début du corps.

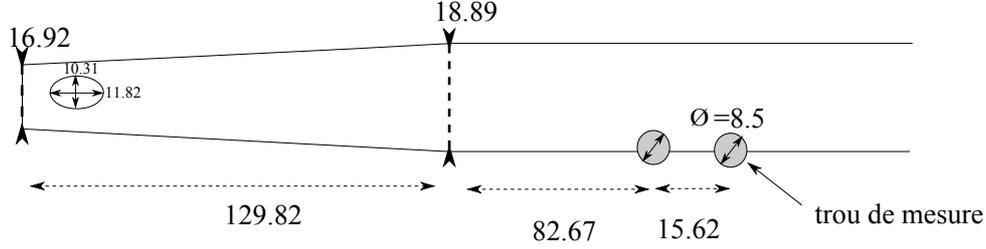


FIGURE 2.2 – Géométrie du segment de flûte à modéliser. Les dimensions sont données en mm.

Nous présentons alors par la suite les outils acoustiques afin d'inclure dans un modèle d'acoustique linéaire ces différents éléments, cette modélisation est également basée sur le travail de Tamas, [132].

2.2.2 Tubes cylindriques et côniques

Modèle acoustique d'un tube cylindrique : La théorie des ondes planes décrite dans la littérature par Pierce, Bruneau et Kinsler [105, 24, 77] et résumée dans le chapitre 1 permet d'exprimer la matrice de transfert d'un tube cylindrique, dans le cas où la propagation est décrite en utilisant le formalisme de lignes de transmission, comme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c j \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} j \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

où Γ est la constante de propagation, L la longueur du cylindre et Z_c l'impédance caractéristique. Cette matrice de transfert permet de relier la pression P et le débit acoustique U à chaque extrémité du cylindre.

Pour des tuyaux larges (avec des valeurs du nombre de Stokes, $r_v = \frac{\rho d v}{\mu L c}$ où d est la longueur caractéristique de la particule, v la vitesse du fluide, μ la viscosité dynamique du fluide et Lc la longueur caractéristique ; supérieures à 10), la constante de propagation Γ est :

$$\Gamma = \alpha + j \frac{\omega}{v_\phi} \quad (2.2)$$

où $\alpha = \frac{\omega}{c_0} \left[\frac{\alpha_1}{r_v} + \frac{\alpha_2}{r_v^2} \right]$, $\alpha_1 = 1.044$ et $\alpha_2 = 1.08$, $v_\phi = c_0 \cdot \frac{1}{1 + \alpha_1/r_v}$. En prenant en compte les effets visco-thermiques, l'impédance caractéristique peut alors s'écrire :

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{S} \left[1 + \frac{\bar{\alpha}_1 (1 - j)}{r_v} - \frac{\bar{\alpha}_2 j}{r_v^2} \right] \quad (2.3)$$

où $\bar{\alpha}_1 = 0.37$ et $\bar{\alpha}_2 = 1.147$, pour l'air. S étant la section du cylindre.

Modèle acoustique d'un tube cône : De la même façon que pour le tronçon cylindrique, en suivant [75], nous exprimons la matrice de transfert pour un tronçon cône, voir figure 2.3, reliant la pression P et le débit acoustique U à chacune des extrémités de ce tronçon :

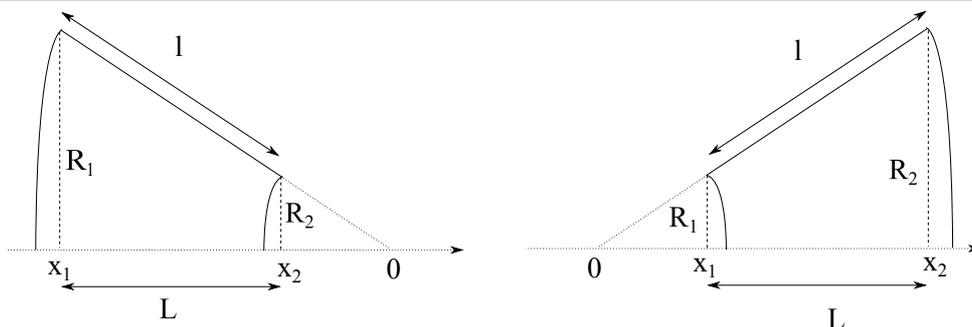


FIGURE 2.3 – Indicateurs géométriques utilisés pour le modèle acoustique de tronçons de cônes convergent ou divergent, figure tirée de [75].

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

où $A = \frac{R_2}{R_1} \cos \Gamma L - \frac{\sin \Gamma L}{\Gamma x_1}$; $B = j \frac{\rho_\nu c_0}{\pi R_1 R_2} \sin \Gamma L$, $C = \frac{\pi R_1 R_2}{\rho_\nu c_0} \left[j \sin \Gamma L \left[1 + \frac{1}{\Gamma^2 x_1 x_2} \right] + \frac{\cos \Gamma L}{j \Gamma} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) \right]$; $D = \frac{R_1}{R_2} \cos \Gamma L + \frac{\sin \Gamma L}{\Gamma x_2}$.

De plus, dans ce cas où les effets visco-thermiques sont pris en compte, $\rho_\nu = \rho_0 \left(1 + \frac{2\sqrt{-j}}{R} \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \right)$. Dans cette dernière équation, ainsi que dans la définition de Γ , à défaut d'un modèle exact susceptible d'intégrer les variations de section, la valeur de R considérée correspond au rayon moyen $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$.

2.2.3 Trous fermés

Les trous modifient le champ acoustique à l'intérieur de la perce, l'ouverture ou la fermeture de ceux-ci modifiant les fréquences de résonance de l'instrument et permettant alors au musicien de jouer différentes notes. La composition d'un trou inséré entre deux segments cylindriques peut être décrit par des matrices de transfert comme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = T_{cyl} T_{hole} T_{cyl} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

où T_{hole} correspond à la matrice de transfert du trou et T_{cyl} celles des cylindres. La matrice de transfert d'un trou peut être approximée par une jonction en T, comme montré en figure 2.4. Comme discuté lors du chapitre 1, la matrice de transfert correspondant à ce schéma de jonction en T peut être exprimée par :

$$T_{hole} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\overline{Z}_a}{2\overline{Z}_s} & \overline{Z}_a \left(1 + \frac{\overline{Z}_a}{4\overline{Z}_s} \right) \\ 1/\overline{Z}_s & 1 + \frac{\overline{Z}_a}{2\overline{Z}_s} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

où \overline{Z}_s et \overline{Z}_a sont les impédances adimensionnées définies respectivement par $\overline{Z}_s = Z_s/Z_0$ et $\overline{Z}_a = Z_a/Z_0$ avec $Z_0 = \rho_0 c_0/S$. Les expressions des impédances Z_a et Z_s dépendent alors selon le trou est fermé ou ouvert, ceci est défini dans [80].

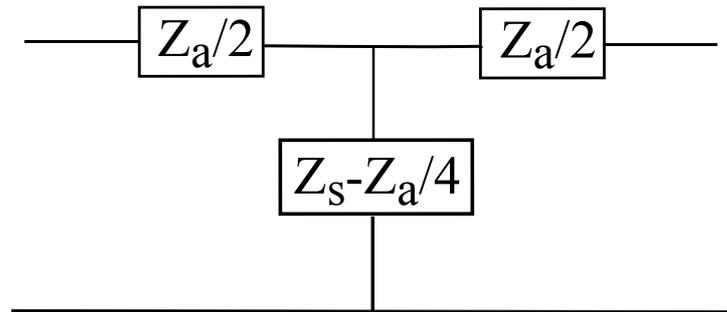


FIGURE 2.4 – Schéma électrique équivalent à une jonction en T pour un trou, dans une analogie électroacoustique pression-tension et courant-débit, .

2.2.4 Modélisation du raccord capteur d'impédance

Le capteur d'impédance, [83, 84], représenté en figures 2.5 mesure la pression dans deux cavités séparées par un haut-parleur piezo-électrique. Une de ces cavités est complètement fer-

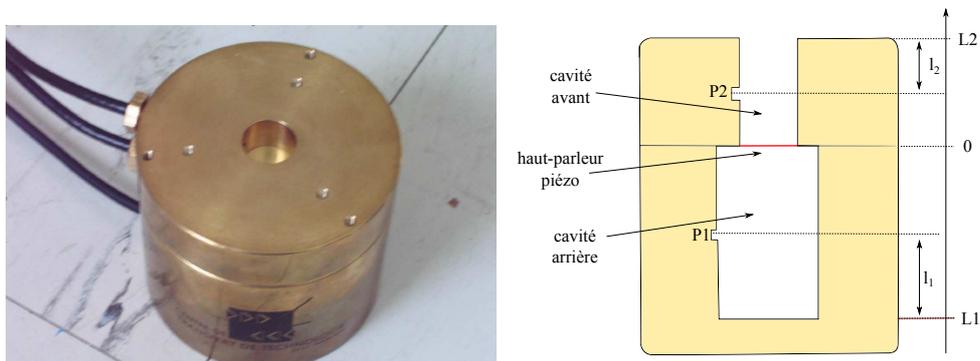


FIGURE 2.5 – A gauche : photographie du capteur d'impédance et à droite la géométrie associée à celui-ci.

mée tandis que l'autre communique avec le système acoustique que l'on veut étudier. Lors de la mesure, le haut-parleur est excité avec un sinus glissant qui couvre la bande fréquentielle voulue. Le logiciel capteurZ donne alors l'impédance d'entrée du système acoustique en fonction de cette bande fréquentielle.

Habituellement, l'impédance acoustique d'entrée des instruments (fermé-ouvert) est mesurée directement en posant l'extrémité active de l'instrument (à la verticale) sur le capteur, cependant dans le cas des flûtes l'extrémité active est ouverte, il n'est donc pas si aisé de mesurer l'impédance d'entrée, d'autant plus que ce qui nous intéresse est le rayonnement de l'embouchure. Nous utilisons alors un raccord réalisé par le facteur de flûte Jean-Yves Roosen, voir figure 2.6 afin de mesurer l'impédance depuis la cheminée d'une clé de cadence (clé servant uniquement à la réalisation de trilles) de la flûte. Nous sommes alors amenés à modéliser ce raccord afin de ramener à l'entrée de la clé l'impédance mesurée par le capteur.

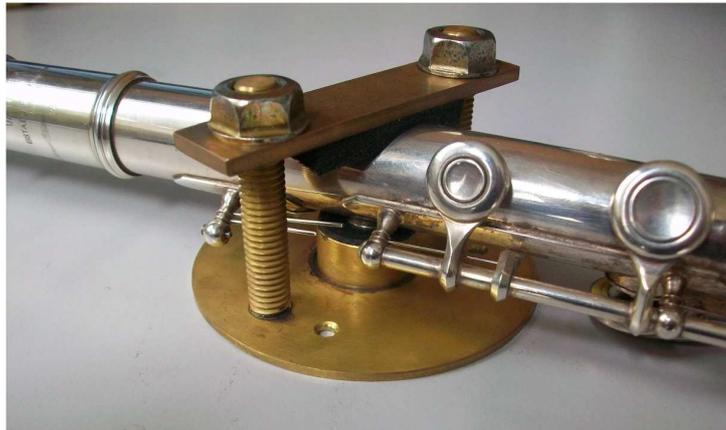


FIGURE 2.6 – Photographie du raccord créant la jonction capteur d'impédance-clé de cadence de la flûte.

Géométrie du raccord

Le raccord est disposé sur la capteur comme le montre la figure 2.7. Celui-ci est constitué de plusieurs cylindres concentriques, de la jonction capteur à celle de la clé de la flûte. Le diamètre du raccord à la jonction au capteur est le même que celui du capteur.

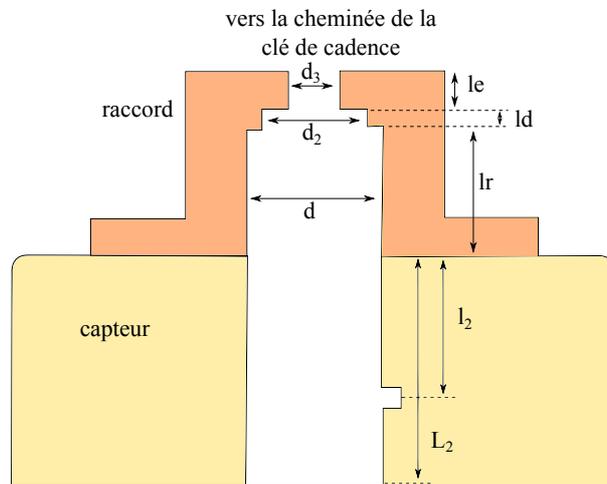


FIGURE 2.7 – Géométrie du raccord faisant la jonction capteur-clé de cadence de la flûte.

Tuyaux avec discontinuité de section

Afin de modéliser par l'acoustique linéaire le raccord, nous nous intéressons alors aux modèles de discontinuité de sections entre deux cylindres. Les travaux de Kergomard, [74] apportent les outils nécessaires. Nous rappelons ici ces outils où a correspond au diamètre du petit cylindre, b celui du plus grand, α au rapport des deux : $\alpha = a/b$ et $\epsilon = 1 - \alpha$.

La masse acoustique M_d , voir figure 2.8 associée à une discontinuité de section peut s'écrire sous

la forme :

$$\frac{M_d a}{\rho_0}(a, k) = \frac{M_d a}{\rho_0}(\alpha, 0) + \alpha A(\alpha) Q(k) + \alpha B(\alpha) Q^2(k) \quad (2.7)$$

où $Q = 1/[1 - (k/k_c)^2]^{1/2} - 1$ et $k_c b = 3.831706$.

Pour $\alpha < 0.55$:

- $M_d a / \rho = 0.26164 - 0.353\alpha + 0.0809\alpha^3 + 0.00119\alpha^5 + 0.0175\alpha^6$
- $A(\alpha) = 1.8598\epsilon^3 - 1.2029\epsilon^4 + 0.162\epsilon^5$
- $B(\alpha) = -0.1197 + 0.6488\alpha - 1.074\alpha^2 + 0.85\alpha^4$

Pour $\alpha \geq 0.55$:

- $M_d a / \rho = (4/\pi^2)\epsilon^2(-0.49198 \ln \epsilon + 0.50.49 - 0.376246\epsilon^2 - 0.852222\epsilon^2 \ln \epsilon)$
- $A(\alpha) = 0.0000137 + 0.01889\epsilon^2 + 0.8202\epsilon^3 + 0.9301\epsilon^4 - 1.47586\epsilon^5$
- $B(\alpha) = -0.01554\epsilon^2 - 0.4249\epsilon^2 + 0.776\epsilon^4$

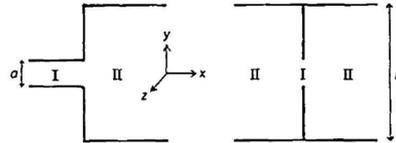


Figure 1. Bidimensional geometry: discontinuity in cross-section and diaphragm of zero thickness.

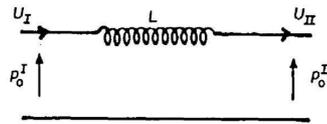


Figure 2. Equivalent electrical circuit for a discontinuity.

FIGURE 2.8 – Impédance équivalente d'une discontinuité de section, figures tirées de [74].

Sous forme de matrice de transfert, une discontinuité de section peut alors se résumer sous la forme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ Z_c U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & j\omega M_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ Z_c U_2 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Modélisation de la jonction raccord-flûte

Afin de modéliser la jonction entre le raccord et la clé de cadence de la flûte, on se reporte à la description d'un trou débouchant dans un conduit donnée par Kergomard, [75], page 316. La figure 2.9 montre l'impédance équivalente au branchement. Les valeurs L et L_1 dépendent du rayon a du tube de la flûte et du rayon b du trou. Ces valeurs sont données ici dans le cadre

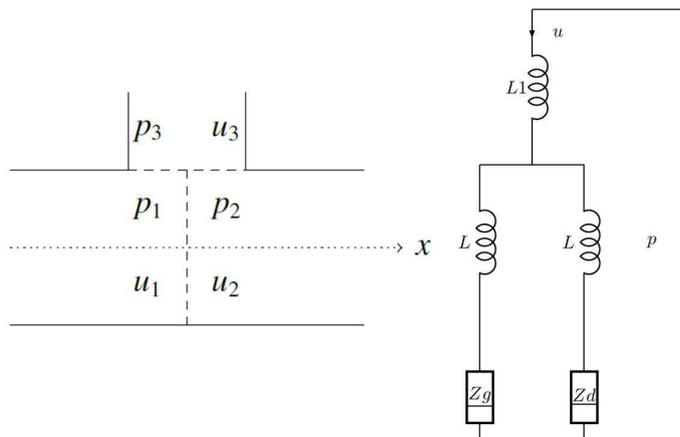


FIGURE 2.9 – L'impédance vue depuis l'entrée de la clé de mesure où Z_g correspond à l'impédance d'entrée à gauche du trou de mesure (vers la tête) et Z_d est l'impédance d'entrée à droite du trou de mesure (vers le corps).

d'une approximation basses fréquences, en considérant que la cheminée est assez longue pour que les modes évanescents n'interfèrent pas.

$$L = \frac{m_a}{2} \quad (2.9)$$

$$L_1 = m_s - \frac{m_s}{4} \quad (2.10)$$

$$m_s = \frac{\rho_0}{\pi b} \left(0.82 - 0.193 \frac{b}{a} - 1.09 \left(\frac{b}{a} \right)^2 + 1.27 \left(\frac{b}{a} \right)^3 - 0.71 \left(\frac{b}{a} \right)^4 \right) \quad (2.11)$$

$$m_a = \frac{\rho_0 b}{\pi a^2} \left(-0.37 + 0.087 \frac{b}{a} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad (2.12)$$

2.3 Méthode

2.3.1 Validation de la méthode utilisée

La méthode utilisée consiste à mesurer l'impédance de la flûte à l'aide du capteur d'impédance par le moyen d'un raccord entre celui-ci et la clé de cadence. L'impédance donnée par capteur Z est alors celle à la sortie du capteur ; nous ramenons celle-ci au moyen de la modélisation du raccord au niveau de la clé de cadence.

Cette impédance au niveau de la clé de cadence peut se décomposer en deux impédances : celle à gauche de la clé, et celle à droite (vers le corps). Nous mesurons alors indépendamment l'impédance de la tête de la flûte et celle du corps de la flûte pour un doigté donné. Nous ramenons alors chacune de ces impédances mesurées au moyen de la modélisation des segments adéquats ($Z_{corps \text{ modélise}}$), voir figure 2.1 à la clé de cadence. Puis, nous réunissons ces deux impédances afin d'obtenir l'impédance totale vue de la clé de cadence et la comparons à la mesure de flûte entière.

Les parties réelles et imaginaires des deux impédances, l'une de la flûte entière mesurée au point de mesure et l'autre obtenue par la composition des impédances tête et corps en parallèle

sont représentées en figure 2.10, pour un doigté de Do grave (soit tous trous fermés). A partir de

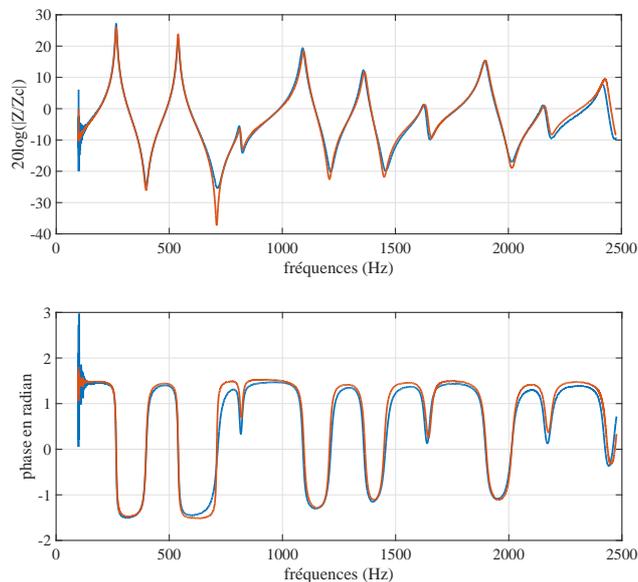


FIGURE 2.10 – En bleu le module et la phase de l'impédance de la flûte entière mesurée au niveau de clé de cadence ; en rouge le module et la phase de l'impédance reconstruite à partir des mesures indépendantes des impédances de la tête et du corps de la flûte, ramenées au niveau de la clé de cadence ; pour un doigté de Do grave (tous les trous fermés) en l'absence des lèvres de l'instrumentiste.

la figure 2.10, nous pouvons remarquer que la reconstruction de l'impédance de la flûte entière vue de la clé de cadence, par la mesure des impédances de la tête et du corps ramenées à la clé de cadence est correcte, hormis une singularité autour du troisième pic d'admittance aux alentours de 700 Hz. Cette singularité peut être due au fait que les impédances mesurées des parties droite et gauche ont respectivement des minima autour de 750 et 850 Hz, l'information de pression étant faible autour de ceux-ci, la combinaison des deux pour remonter à l'impédance totale à la clé d'impédance peut donc être moins précise que la mesure effectuée directement en ce point. La modélisation du segment entre le trou de mesure et le début du corps (ou fin de la tête) semble donc correcte.

Par la suite nous pourrions donc estimer l'impédance à gauche du trou de mesure (vers la tête), par la combinaison des mesures d'impédance de la flûte entière au point de mesure, de celle du corps au doigté voulu, et de la modélisation du segment trou de mesure-début du corps. Il convient d'ajouter que la flûte est un instrument ouvert-ouvert, chaque extrémité correspondant à un noeud de pression et un maximum de vitesse, le jeu se fait alors sur les minima de l'impédance d'entrée. Cependant la mesure observée ici est faite depuis la clé de cadence de la flûte, c'est donc aux maxima d'impédance auxquels nous devons nous intéresser dans ce cas. En effet, le point de mesure étant fermé, ceci correspond à un maximum de pression et un noeud de vitesse, c'est donc bien aux pics d'impédance que nous devons nous intéresser. Ce qui est

alors un avantage sur la qualité de la mesure, le rapport signal sur bruit de la mesure obtenue via le capteur est meilleur sur les pics d'impédance que sur les creux. Il est donc plus judicieux d'utiliser cette méthode de mesure que de mesurer l'admittance d'entrée de la flûte.

2.3.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental est assez semblable à celui décrit par Cossette [40]. Il a pour objectif de permettre la mesure de la position relative des lèvres sur l'embouchure de la flûte, à partir d'une analyse d'images caméra. Pour cela, la caméra est solidaire de la flûte et l'ensemble est suspendu à une balançoire afin d'offrir à l'instrumentiste le confort de pouvoir bouger la flûte en gardant la caméra fixe par rapport à la flûte. L'ensemble est représenté en figure 2.11. La caméra permet une vue des lèvres du flûtiste, à la fois de face mais aussi à 90° au moyen d'un miroir à 45° . Cette vue transverse permet une estimation de la distance des lèvres du flûtiste au biseau W , via le traitement des images obtenues par la caméra.

De plus, le capteur d'impédance est attaché à la flûte au moyen du raccord présenté précédem-

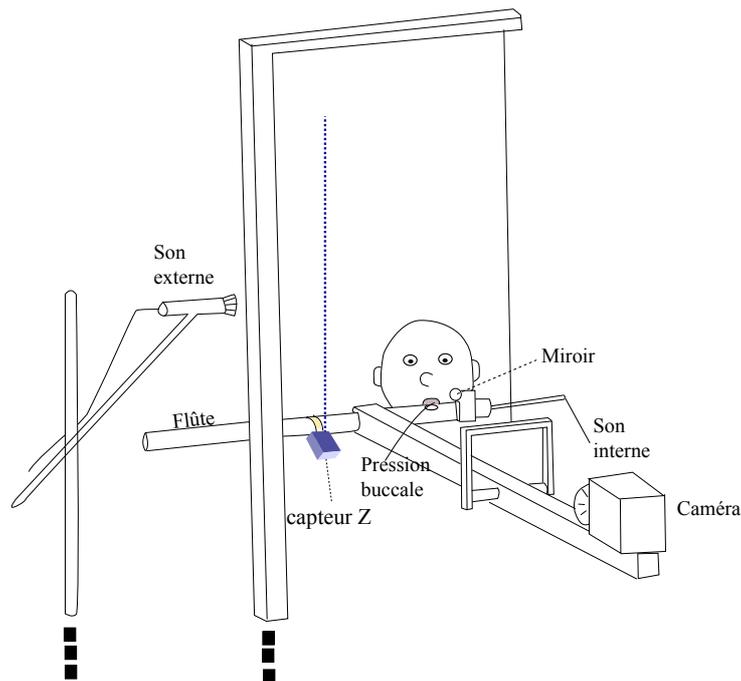


FIGURE 2.11 – Schéma de l'installation expérimentale. La flûte à laquelle est fixée le capteur d'impédance est disposée sur une balance avec une caméra, le tout étant équilibré afin d'obtenir des conditions de jeu les meilleures possibles.

ment. Le capteur est lui suspendu au moyen d'un élastique afin de ne pas déséquilibrer le jeu de la flûte. La flûte utilisée est une flûte d'étude Yamaha.

Les mesures d'impédance et de la distance des lèvres au biseau sont donc effectuées simultanément. La température est relevée à chaque mesure d'impédance afin de prendre en compte celle-ci dans la modélisation.

Il est alors demandé au musicien de jouer un arpège de Do Majeur ascendant sur deux octaves,

une fois dans la nuance p et une fois f .

2.3.3 Limites de la méthode

La première limitation liée à ce protocole est que les mesures d'impédance avec le capteur ne peuvent s'effectuer en jeu, c'est-à-dire quand l'instrument sonne. En effet, le son de la flûte est plus important que le signal d'excitation généré par le haut-parleur piézo-électrique, faisant alors saturer les microphones ou rendant la composante sonore de la flûte difficile à filtrer.

Les mesures d'impédance sont effectuées sans que le musicien ne souffle dans la flûte. On demande donc à celui-ci de jouer la note et de s'arrêter de souffler sans changer de position afin d'effectuer la mesure d'impédance. La position du musicien est contrôlée sur les images, afin de bien vérifier que ce dernier ne bouge effectivement pas.

La seconde limitation provient du fait que la mesure des minima d'impédance n'est pas suffisamment précise. En effet, lorsque l'on essaie d'extraire l'impédance de gauche (celle de la tête) à partir de celles du corps et de la flûte entière, l'impédance obtenue ne correspond pas au modèle autour des minima de l'impédance de droite mesurée, comme le montre la figure 2.12. On comprend bien sur la figure 2.12, les difficultés que cela peut engendrer sur l'estimation des fréquences de résonance et sur l'estimation de l'impédance de rayonnement à l'embouchure. Afin de palier ce problème et comme les mesures ne se font pas en jeu, le flûtiste jouera alors la

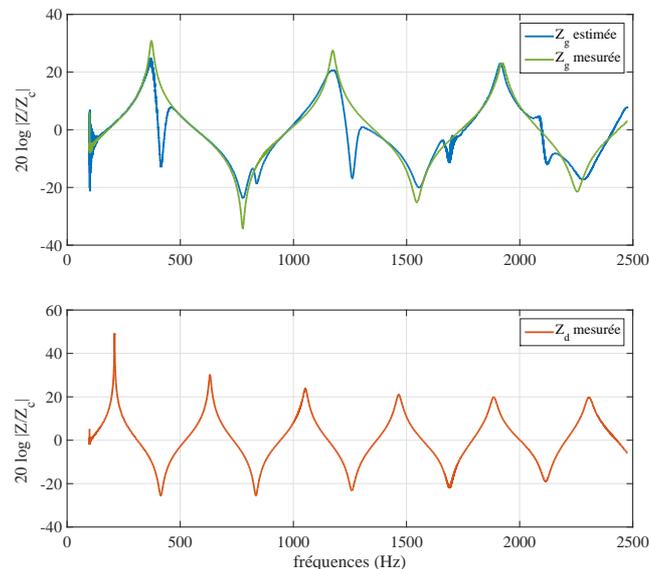


FIGURE 2.12 – En haut : en bleu le module de l'impédance de la partie gauche (tête) estimée à l'aide des mesures de l'impédance de la partie droite (corps) et de la flûte entière depuis la clé de mesure. En vert, est représenté le module de l'impédance de la partie gauche mesurée directement à l'aide du capteur Z et ramenée à la clé de mesure. En bas : le module de l'impédance de la partie droite ayant servi à estimer l'impédance de la partie gauche, en bleu, au dessus. Le doigté utilisé est celui d'un do grave.

note souhaitée, puis arrêtera de souffler et changera de doigté avant la mesure d'impédance. En effet, ce doigté de Do médium possède le minimum d'impédance à la fréquence la plus élevée et permet une estimation correcte dans une bande fréquentielle allant jusqu'à 1200Hz. La figure 2.13 représente le module de l'impédance d'entrée de la partie droite pour un doigté de do médium.

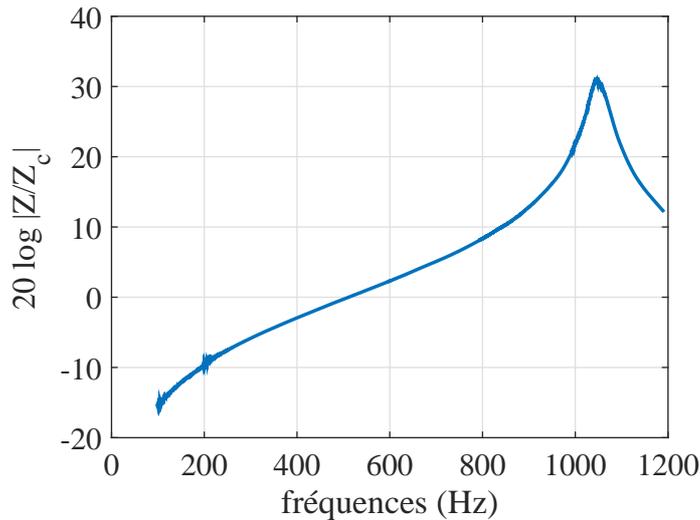


FIGURE 2.13 – Module de l'impédance d'entrée mesurée de la partie droite et ramenée au point de mesure pour un doigté de do médium. Le minimum de cette impédance est hors de la bande fréquentielle utile.

2.4 Résultats

Les flûtistes savent que les résonances de l'instrument chutent d'environ d'un demi-ton lorsque l'instrument est progressivement approché des lèvres pour venir en position de jeu, au travers de l'augmentation progressive de l'impédance de rayonnement du trou d'embouchure de la flûte par la couverture partielle du trou par les lèvres mais aussi par la présence du visage.

Les résultats attendus concernent l'impédance de rayonnement à l'embouchure en fonction de la note jouée et de la distance des lèvres au biseau. Dans un premier temps, l'impédance de la partie gauche du point de mesure est estimée à partir de l'impédance totale mesurée, et de l'impédance de la partie droite mesurée. Puis, de la mesure d'impédance de la partie gauche est estimée l'impédance de rayonnement à l'embouchure via la modélisation de la tête de la flûte (qui correspond à la partie gauche). Nous présentons d'une part le module de l'impédance de rayonnement à l'embouchure pour chacune des notes jouées, et sans flûtiste en figure 2.14. Les notes jouées sont indiquées par le numéro du doigté, depuis le doigté du do grave noté 1 jusqu'au sur-aigu noté 37, voir figure 2.19 en annexe. Certaines impédances de rayonnement d'embouchure n'apparaissent pas, celles-ci étant faussées à cause de mouvements des lèvres du flûtiste durant la mesure. A partir de la figure 2.14, nous pouvons noter un écart flagrant entre

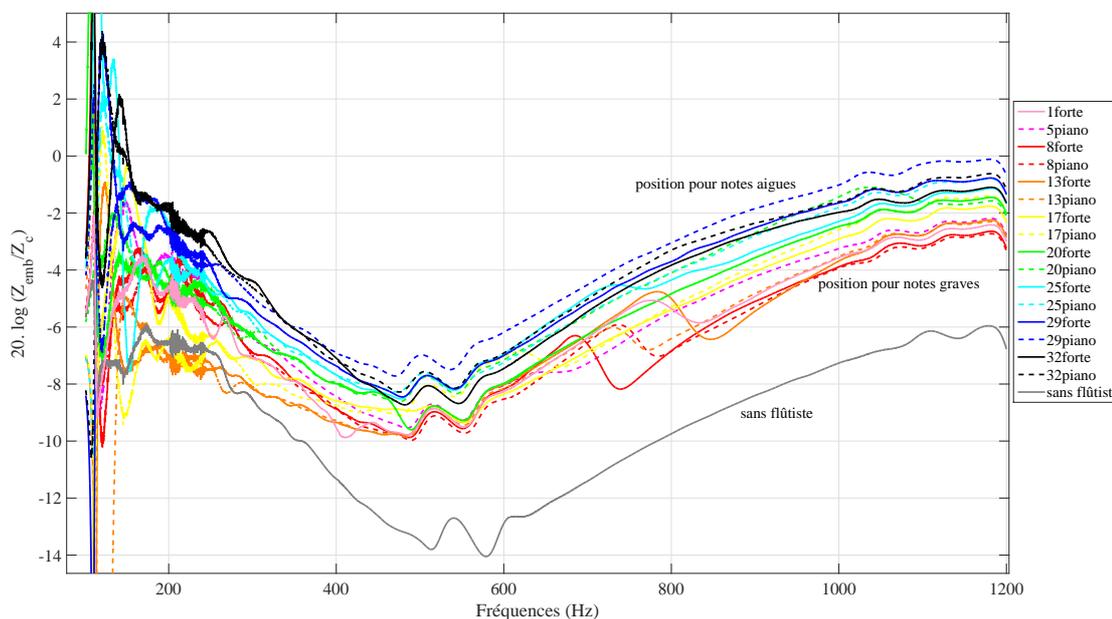


FIGURE 2.14 – Module de l’impédance de rayonnement à l’embouchure de la flûte déduite de la mesure pour les différentes notes jouées, mais aussi sans flûtiste.

le module de l’impédance de rayonnement sans flûtiste et avec flûtiste, ce dernier étant plus haut d’environ 4dB. De plus, nous remarquons également que globalement plus le doigté correspond à une note aiguë, plus le module de l’impédance de rayonnement augmente, nous observons une différence de 3.5dB environ entre les deux extrêmes. Aussi, nous notons que pour certains doigtés, le module de l’impédance de rayonnement est plus fluctuant, comme pour le doigté 13 joué f ; ceci pourrait être la conséquence d’un mouvement des lèvres du flûtistes durant la mesure d’impédance. Nous constatons également que pour une même note, l’impédance de rayonnement est légèrement plus haute quand celle-ci est jouée p .

Aussi, nous remarquons que les allures globales du module de ces impédances de rayonnement sont semblables à celles attendues par un modèle de piston plan avec écran infini sur la bande fréquentielle [500 1200]Hz. Entre 0 et 200 Hz, la mesure paraît très bruitée en raison d’un rapport signal sur bruit trop faible, ce qui peut expliquer l’écart à une potentielle courbe théorique $Z_{emb} = j\omega M/S$, qui augmenterait des basses aux hautes fréquences. Cependant la décroissance du module entre 200 et 500Hz est inexplicée.

La phase de l’impédance de rayonnement à l’embouchure pour chacun des doigtés est représentée en figure 2.15. Nous remarquons alors à partir de la figure 2.15 que la phase de l’impédance de rayonnement à l’embouchure est autour de $\pi/2$ entre 500 et 1200 Hz; en dessous, la phase chute. Une approximation du trou d’embouchure par une masse acoustique est alors valable entre 500 et 1200 Hz, cette bande fréquentielle correspondant à un kr_{emb} compris entre 0 et 0.13 donc inférieur à 1.

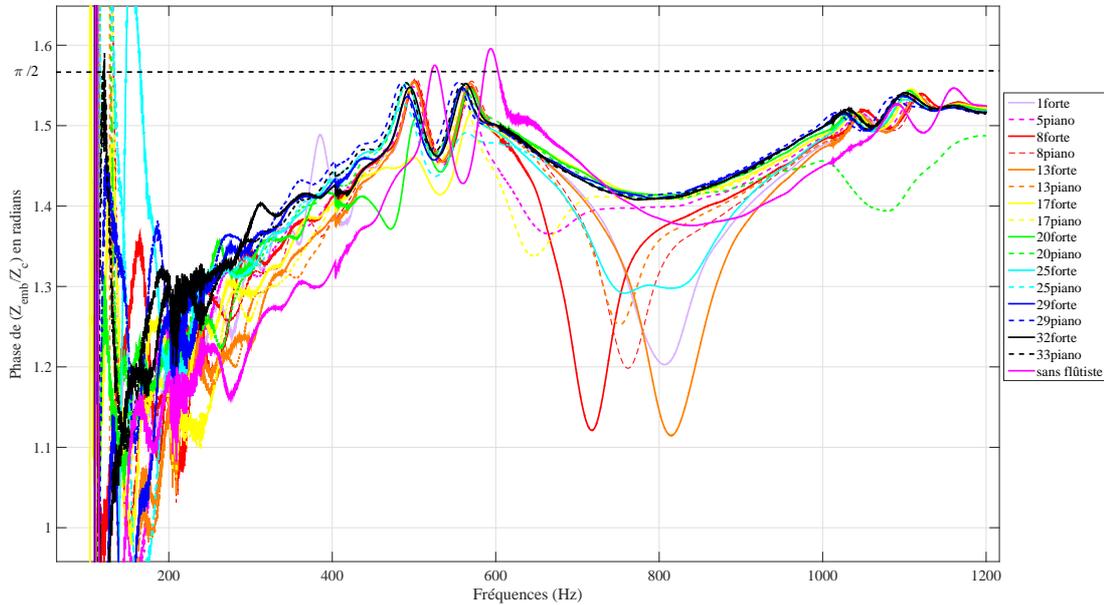


FIGURE 2.15 – Phase de l'impédance de rayonnement à l'embouchure de la flûte pour les différentes notes jouées, mais aussi sans flûtiste.

Aux basses fréquences, l'impédance de rayonnement selon un modèle de piston plan en écran infini peut s'écrire sous la forme, d'après [75, 73, 105] :

$$Z_R = Z_{c_{fl}} \left(jk\Delta L + \frac{1}{2}(kr_{emb}^2) \right) \quad (2.13)$$

où r_{emb} est le rayon de l'embouchure, $Z_{c_{fl}}$ l'impédance caractéristique de la flûte, et ΔL la correction de longueur ; le facteur $\frac{1}{2}$ correspond à un rayonnement en écran plan infini. Cette formule est valable tant que $kr_{emb} < 1$, ce qui est notre cas ici.

Nous cherchons alors ici les valeurs de r_{emb} et ΔL qui correspondent dans un premier temps à l'impédance de rayonnement à l'embouchure sans les lèvres du flûtiste, entre 500 et 1200Hz. A partir de la formule ci-dessus, nous notons que la correction de longueur est associée à la partie imaginaire de l'impédance de rayonnement, alors que le rayon est lui associé à la partie réelle. La recherche du couple $r_{emb}, \Delta L$ optimal est menée, en termes d'écart quadratique moyen par rapport à la mesure dans la bande [500;1200]Hz, pour les parties réelles et imaginaires respectivement.

La figure 2.16 présente dans le cas sans flûtiste, l'optimisation qui mène à des valeurs de $r_{emb} = 19.10mm$ et $\Delta L = 28.8mm$. Nous représentons également les module et phase de l'impédance de l'embouchure obtenue par le modèle de trou latéral décrit par Lefebvre, [80] pour les paramètres géométriques mesurés sur la flûte : rayon de la flûte $r_{fl} = 19mm$, rayon de l'embouchure $r_{emb} = 5.5mm$ (rayon d'un disque de surface égale à celle du trou d'embouchure, mesurée de manière optique par détection de contour sur image), hauteur de cheminée $h = 2mm$. Nous remarquons que le module d'impédance obtenu est assez proche de la mesure. Nous pouvons en conclure que le modèle de rayonnement au bout de l'embouchure semble être valide pour la détermination de

la correction de longueur pour des valeurs de kr_{emb} entre 0.05 et 0.2.

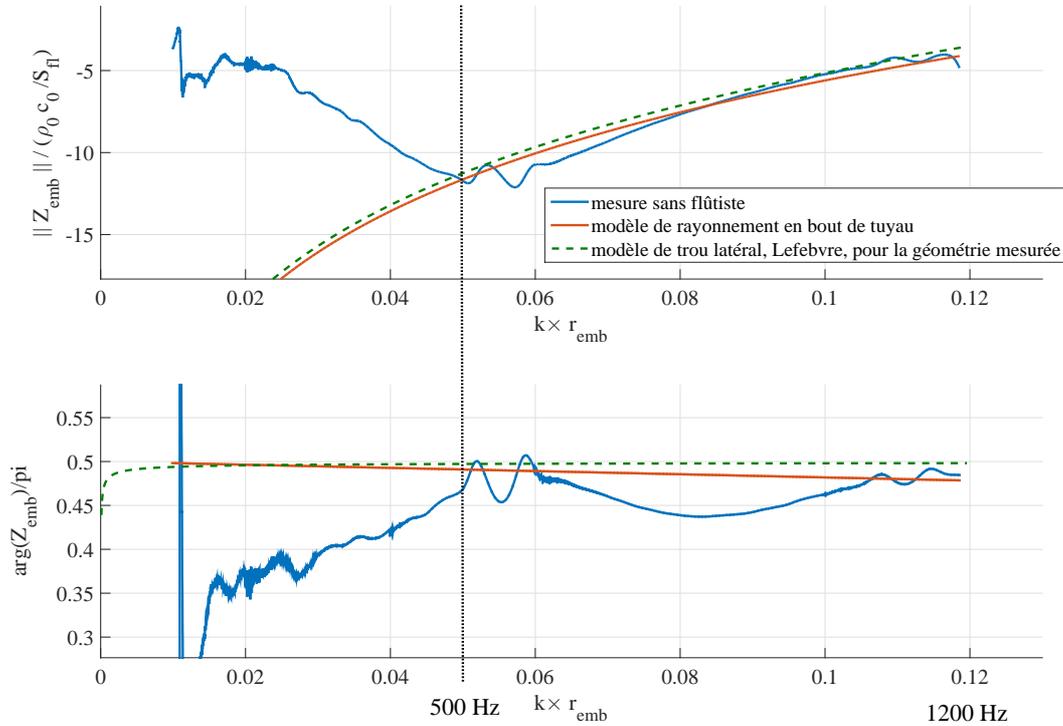


FIGURE 2.16 – Module et phase de l’impédance de rayonnement à l’embouchure de la flûte : en bleu, mesurée sans flûtiste, en rouge, modélisée comme un rayonnement en bout du tuyau et optimisée sur la mesure, les valeurs découlant de l’optimisation sont $R = 19.10m$ et $\Delta L = 28.8mm$; et en vert : modèle de trou latéral de Lefebvre [80] pour les valeurs géométriques mesurées sur l’instrument, $r_{fl} = 19mm$, $r_{emb} = 5.5mm$ (rayon déduit de la surface mesurée par détection de contour sur image et assumée comme un disque), hauteur de cheminée $h = 2mm$.

Nous itérons alors cette démarche sur chacune des mesures d’impédance de rayonnement à l’embouchure pour chacun des doigtés. Nous cherchons maintenant à établir un lien entre les variations de la position des lèvres à l’embouchure et ce modèle d’impédance de rayonnement. Nous représentons alors en figure 2.17, d’une part les variations de rayons ΔR déterminées par le modèle pour chaque doigté et sans flûtiste en fonction de la distance des lèvres du flûtiste au biseau, W . De la même façon, nous représentons les variations de ΔL en fonction de W . A partir de la figure 2.17, nous remarquons qu’il n’existe pas de dépendance entre les variations de rayons et les valeurs de W , les variations des valeurs de rayons sont d’ailleurs assez faibles. Par contre nous observons que la valeur de ΔL évolue globalement en fonction de celle de W ; en effet plus W est grand, plus ΔL diminue. Ce qui signifie que plus le musicien s’éloigne du biseau, plus la correction de longueur associée à l’impédance de rayonnement à l’embouchure est faible, ce qui semble pertinent. La relation entre ΔL et W est alors représentée par une droite

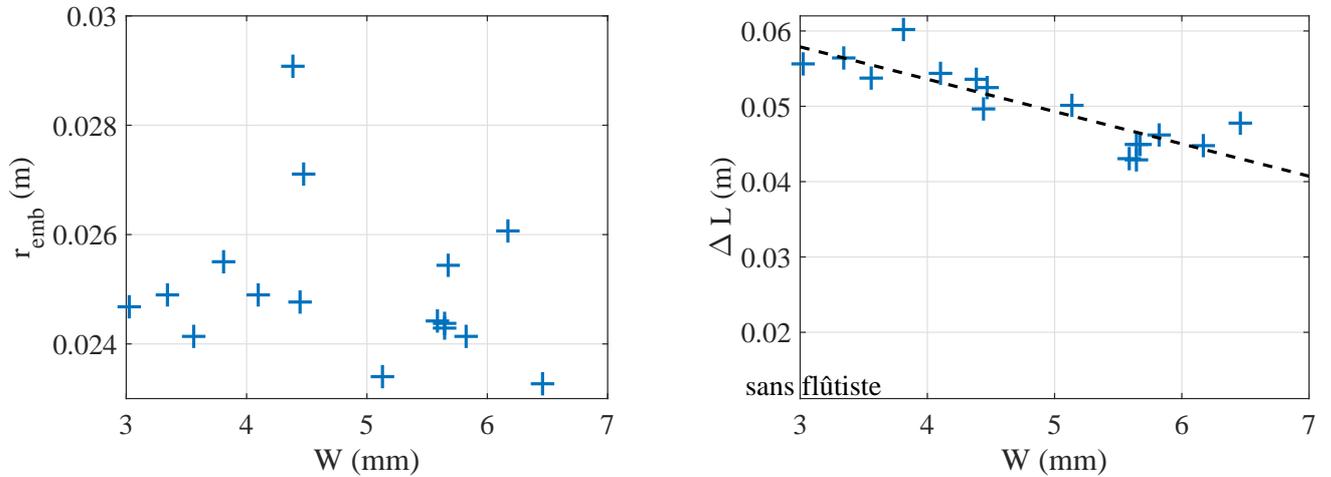


FIGURE 2.17 – Figure représentant les variations ΔR et ΔL entre les valeurs cibles sans flûtiste et celles avec flûtiste pour différents doigtés, en fonction de la distance des lèvres au biseau.

sur la figure 2.17 d'équation :

$$\Delta L = -0.0043W + 0.0708 \quad (2.14)$$

Nous pouvons également nous intéresser aux valeurs des fréquences de résonance de la flûte dépendant de la position des lèvres et donc de la correction de longueur associée au modèle de l'impédance de rayonnement, pour le doigté donné, soit le 13. Les fréquences de résonance sont estimées en cherchant le minimum de la somme des modules des impédances à gauche et à droite du trou de mesure : $f_0 = f(\min(|Z_g| + |Z_d|))$. Nous représentons alors en figure 2.18, l'écart en cent entre la fréquence de résonance sans flûtiste et celles obtenues pour les différents notes visées en fonction de la correction de longueur ΔL . A partir de la figure 2.18

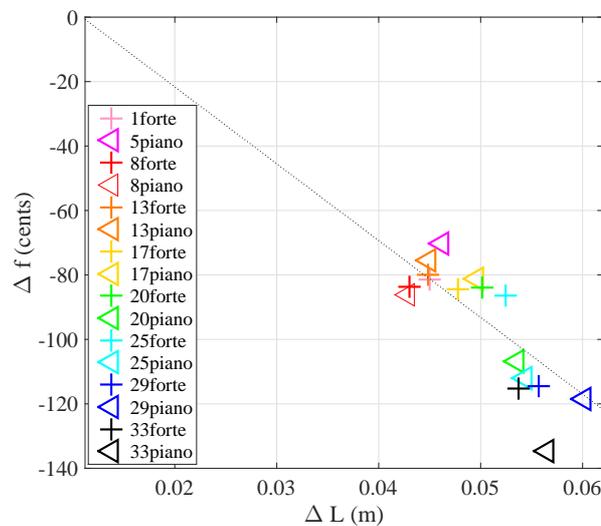


FIGURE 2.18 – Figure représentant des écarts entre la fréquence de résonance de la flûte sans flûtiste et pour différentes positions des lèvres Δf_0 (en cents) en fonction de ΔL .

nous remarquons qu'une couverture de l'embouchure par les lèvres du musicien modifie les fréquences de résonance de l'instrument d'au moins 70 cents, soit une correction de longueur de l'impédance de rayonnement de 45mm. Nous notons également qu'un rapprochement des lèvres du musicien au biseau de 3 mm (soit de 6 à 3mm) engendre une baisse de la fréquence de résonance de l'instrument d'environ 40 cents. Cette variation étant associée à une variation de la correction de longueur de l'impédance de rayonnement à l'embouchure de 15 mm environ. Nous notons également que lors du jeu des notes à une octave d'écart jouées sur un même doigté en changeant le contrôle, comme par exemple les notes 13 et 25 ou 5 et 17, le musicien est amené à rapprocher ses lèvres du biseau afin d'exciter l'instrument sur le second registre, ceci modifiant la correction de longueur de 10mm environ. Le musicien ne jouant pas l'octave dans la même position, la correction de longueur associée à l'impédance de rayonnement est donc différente pour un même doigté, selon l'octave jouée.

2.5 Synthèse

Ce travail a permis de montrer que nous pouvions déterminer l'impédance de rayonnement à l'embouchure de la flûte à partir de la mesure de l'impédance de la flûte entière. Cette impédance de rayonnement à l'embouchure de la flûte sans musicien a d'ailleurs pu être rapprochée, dans une bande fréquentielle donnée, de deux modèles : le premier étant un modèle de trou latéral simple décrit par Lefebvre [80] et le second étant celui de rayonnement au bout d'un tuyau.

Nous avons pu estimer que la présence des lèvres du musicien à une distance de 6 mm environ du biseau modifiait la correction de longueur du modèle de rayonnement à l'embouchure d'environ 5 mm, faisant également baisser la fréquence de résonance de l'instrument de 80 cents environ. Plus précisément, plus le flûtiste est amené à rapprocher ses lèvres du biseau, plus cette correction de longueur augmente et donc la fréquence de résonance baisse. Cette dernière observation confirme les résultats de l'étude de Coltman, [33], dans laquelle il couvrait de plus en plus le trou d'embouchure et relevait alors des fréquences du résonateur plus basses.

Par contre il n'a pas été noté de variations des rayons estimés lors du rapprochement des lèvres du musicien. Ceci confirme les résultats obtenus par Coltman, [33] qui concluait à la symétrie de rayonnement des monopoles à chaque extrémité de la flûte malgré une asymétrie des ouvertures rayonnantes (trou d'embouchure partiellement couvert d'un côté et extrémité terminale de la flûte de l'autre). Ceci indique que le débit acoustique, qui est le terme source du champ rayonné est indépendant des variations de surface à l'embouchure.

Nous avons également remarqué que pour un doigté donné, pour exciter le second registre le flûtiste est amené à rapprocher ses lèvres du biseau. Ceci vient en accord avec le fait que la flûte soit inharmonique. En effet, si la flûte était harmonique, le musicien n'aurait pas à changer de position pour changer de régime, cependant ces changements de registre seraient d'autant plus difficiles à effectuer, oscillant entre les deux. La flûte a donc nécessité à être inharmonique

afin de palier cette difficulté, d'où la présence du cône dans l'embouchure, celui-ci permettant certainement de faire monter les fréquences de résonance des régimes supérieurs par rapport à l'harmonicité au premier régime. C'est pourquoi les choix du facteur concernant l'harmonicité de l'instrument sont donc possiblement reflétés dans les stratégies de jeu développées par les musiciens, celui-ci rapprochant ses lèvres du biseau pour le jeu des régimes supérieurs certainement pour ajuster la justesse du jeu.

La position des lèvres du flûtiste a donc une influence non négligeable sur les fréquences de résonance de l'instrument. Nous avons montré que cette influence peut être prise en compte sous la forme d'une correction de longueur dans l'impédance de rayonnement d'un tuyau qui doit être intégrée dès conception de la géométrie.

En effet, le changement de régime est contrôlé par l'instrumentiste au travers de la vitesse de jet adimensionnée. Pour monter une octave sur les notes ayant même doigté dans les registres grave et medium (notes 5 et 17, 13 et 25) le flûtiste doit augmenter la vitesse de jet adimensionnée, voir chapitre 8 en combinant augmentation de la vitesse de jet et diminution de la distance W au biseau. Il est vraisemblable que les choix du facteur concernant l'harmonicité influent donc directement la stratégie de l'instrumentiste avec les conséquences attendues sur l'équilibre sonore (puissance et contenu spectral) entre les différents régimes de la flûte.

Annexe

The figure displays 37 numbered musical staves, each representing a specific note on the flute. Each staff includes the note name, its key signature (sharps and flats), and a fingering diagram below it. The diagrams use numbers 1-4 and circles to indicate which fingers and keys are used. The notes are arranged in a chromatic scale from C to B, with some notes having alternative fingerings.

Note	Key Signature	Fingering
1	C	1
2	C# Db	1 2
3	D	1 2
4	D# Eb	1 2 3
5	E	1 2 3
6	F	1 2 3 4
7	F# Gb	1 2 3 4
8	G	1 2 3 4
9	G# Ab	1 2 3 4
10	A	1 2 3 4
11	A# Bb	1 2 3 4
12	B	1 2 3 4
13	C	1
14	C# Db	1 2
15	D	1 2
16	D# Eb	1 2 3
17	E	1 2 3
18	F	1 2 3 4
19	F# Gb	1 2 3 4
20	G	1 2 3 4
21	G# Ab	1 2 3 4
22	A	1 2 3 4
23	A# Bb	1 2 3 4
24	B	1 2 3 4
25	C	1
26	C# Db	1 2
27	D	1 2
28	D# Eb	1 2 3
29	E	1 2 3
30	F	1 2 3 4
31	F# Gb	1 2 3 4
32	G	1 2 3 4
33	G# Ab	1 2 3 4
34	A	1 2 3 4
35	A# Bb	1 2 3 4
36	B	1 2 3 4
37	C	1

FIGURE 2.19 – Figure représentant les numéros des doigts du jeu de la flûte.

Comment contrôler la justesse dans le jeu de la flûte ?

3.1 Introduction

De Pythagore à nos jours, comme le dit Debost, [44], la justesse est un "... sujet inépuisable". En effet, depuis l'accord pythagoricien (de l'antiquité jusqu'à la musique médiévale) jusqu'à la gamme tempérée (imposée à l'époque de la Révolution française), [47], le découpage de la gamme musicale en tempérament n'a cessé d'évoluer, passant par la gamme de Zarlino, les tempéraments mésotoniques,... La gamme tempérée ou gamme au tempérament égal prend naissance à la période baroque, et se généralise par la suite. Ce système de hauteurs divise l'octave en douze intervalles chromatiques égaux, permettant les modulations à l'infini. Ceci uniformisant alors les demi-tons et rend possible les modulations ou l'écriture dans toutes les tonalités, à l'image du *Clavier Bien Tempéré*, Bach y proposant 12 préludes et 12 fugues correspondant aux tonalités basées sur les 12 demi-tons de la gamme chromatique.

Les instruments de musique sont également amenés à évoluer, [47] apparaissent alors les instruments dits « tempérés » : clarinette, hautbois, ... permettant de jouer n'importe quelle tonalité sur un seul instrument. La facture de la flûte a également évolué, [108] partant d'une flûte diatonique à 6 ou 7 trous sur laquelle les intervalles de demi-tons sont réalisés jusqu'au *XVIII – XIX^{ième}* siècle par des doigtés de fourche qui, selon la tonalité entraînent certaines inégalités de sonorité ou de justesse. Pour répondre à ces problèmes de justesse, de nouvelles clefs sont progressivement ajoutées à l'instrument (clefs de sol \sharp , puis de fa et de si \flat) et les trous sont progressivement élargis. Le changement le plus radical dans la flûte du *XIX^{ième}* siècle est associé au nom du flûtiste et facteur de flûte Theobald Boehm, pour qui le but était de fabriquer une flûte avec une sonorité plus importante dont le timbre serait homogène note à note et l'accord plus juste. Boehm propose alors un système avec des trous plus larges et un mécanisme de couplage évitant les doigtés de fourche. Les demi-tons sont alors produits par l'ouverture successive de chacun des 15 trous, favorisant ainsi l'homogénéité de timbre entre toutes les notes. Une mécanique complexe est ajoutée afin de permettre au flûtiste de contrôler l'ouverture et la fermeture des 15 trous avec 9 doigts. Les clefs permettent, de plus, d'obstruer des trous trop larges pour être obstrués par les doigts seuls. Aussi, la perce de la flûte moderne de Boehm est plus large, avec une perce de la tête dit "parabolique", fabriquée tout d'abord en bois puis progressivement en métal, ces éléments favorisant alors la sonorité de l'instrument. Boehm a alors révolutionné la facture de la flûte traversière, les changements effectués depuis

sur celle-ci étant mineurs.

Le musicien, grâce à son expertise musicale, apprend à s'adapter aux contraintes, limitations et libertés liées à la réponse acoustique de son instrument afin de réaliser l'extrait musical dans le tempérament demandé. Le travail de la justesse constitue un exercice classique pour le musicien, l'objectif étant de prendre le temps d'écouter ce qui est joué et de corriger en conséquence. Cet exercice peut s'effectuer dans un contexte harmonique, par exemple avec piano, mais aussi seul avec un accordeur. Debost, [44] conseille le travail des intervalles (seconde, tierce, octaves) mais aussi d'extraits musicaux dans lequel l'objectif est de choisir une note à laquelle porter attention, et comprendre ainsi comment la justesse de celle-ci évolue en fonction de sa position dans la phrase, dans la séquence mélodique, ou encore en milieu ou fin de souffle. Galway, [60] ajoute également que l'oreille doit être attentive aux nuances (crescendo, decrescendo), de les travailler, car la hauteur de la note peut y être altérée. Debost et Galway s'accordent sur le fait que le travail de la justesse doit s'effectuer lentement, en prenant le temps d'écouter, de corriger, de ré-écouter... De plus, Galway indique que la correction de la justesse s'effectue avec des ajustements infinitésimaux de la position des lèvres à l'embouchure.

L'objectif de cette étude est de comprendre, à partir de l'étude des paramètres aéro-acoustiques, la manière dont les flûtistes peuvent contrôler la justesse pendant le jeu et les conséquences ou coûts de contrôle, en terme de qualité de son produit mais aussi de la sollicitation respiratoire. Nous demandons pour cela au musicien de jouer des exercices classiques du travail de la justesse avec le même instrument accordé par trois fois différemment. L'objectif qui lui est proposé est de viser le même diapason à chaque fois, basé sur un la à 440 Hz. Au cours du jeu de ces exercices, nous mesurons différents paramètres aéro-acoustiques, la pression buccale, la géométrie des lèvres et le son interne ; dans le but d'étudier les variations des principaux paramètres caractérisant le jet d'air.

3.2 Méthode

3.2.1 Protocole

L'objectif de cette étude étant de comprendre comment le musicien adapte ses stratégies de jeu afin de compenser un désaccord de la flûte, on propose au musicien de jouer différents extraits musicaux à un diapason imposé alors que l'accord de l'instrument est volontairement modifié. Le moyen utilisé ici pour modifier l'accord de la flûte est d'en changer la longueur en changeant la longueur de la coulisse entre l'embouchure et le corps de la flûte ; trois longueurs de coulisse sont proposées : une coulisse à 0mm (la tête est enfoncée complètement dans le corps), une coulisse à 1.07 mm et enfin une coulisse à 4.84mm.

Le départ de l'expérience se fait en aveugle, nous ne savons pas à quelle longueur de coulisse correspond quel diapason. Des essais informels préalables permettent de s'assurer que les positions de coulisse proposées encadrent le diapason choisi. Le diapason imposé est donc basé sur un La à 440Hz, de façon arbitraire.

A partir de la formule approchée reliant longueur de tube et fréquence de résonance, pour un tube ouvert-ouvert :

$$f_n = n \frac{c_0}{2L} \quad (3.1)$$

où f_n est la fréquence de résonance du mode n , c_0 la vitesse du son et L la longueur du tube ; nous pouvons déterminer, par développements limités, la relation entre variation de longueur et variation de fréquence de résonance :

$$\begin{aligned} f_n &= n \frac{c}{2(l + \Delta l)} \\ f_n &\simeq \frac{nc}{2l} \left(1 - \frac{\Delta l}{l}\right) \\ \frac{\Delta f}{f} &= - \frac{\Delta l}{l} \end{aligned} \quad (3.2)$$

où Δl et Δf correspondent respectivement aux variations de longueur et fréquence. L'écart de fréquences en cents produit par une variation de longueur peut alors être approximé par :

$$\begin{aligned} \Delta f_{cents} &= 1200 \cdot \log_2 \left(\frac{f + \Delta f}{f} \right) \\ &= 1200 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\Delta f}{f} \right) \\ &= 1200 \cdot \log_2 \left(1 - \frac{\Delta l}{l} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Grossièrement, la flûte peut être assimilée en un tube variant de 30 cm (tous trous ouverts) à un tube de 63 cm (tous trous fermés). On représente en figure 3.1, les variations de fréquences en cents engendrées par des variations de longueurs de 1.07 mm et 4.84mm sur une longueur de tube variant entre 30 et 60cm. A partir de la figure 3.1, nous pouvons noter qu'une variation

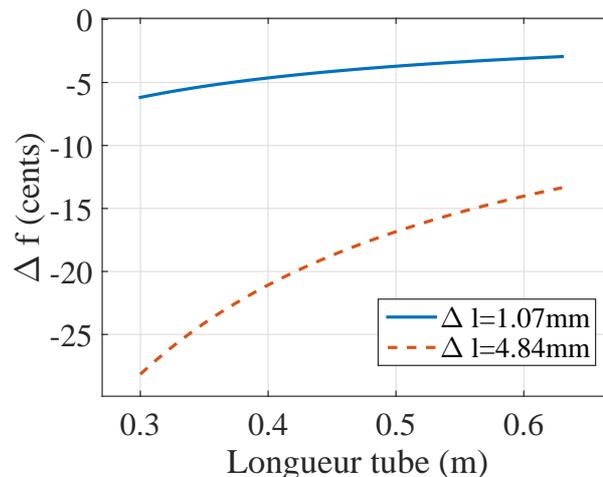


FIGURE 3.1 – Variations de fréquence engendrées par deux variations de longueur du tube de 1.07 mm et 4.84 mm sur un tube de 63 cm.

de longueur de 1.07mm engendre des variations de fréquences assez faibles entre -6 et -3 cents ;

alors qu'une variation de longueur de 4.84mm engendre des variations de fréquences entre -27 cents (environ 1/8 de ton) et -13 cents.

On propose au musicien de jouer deux exercices musicaux classiques : une gamme chromatique ascendante-descendante sur les trois octaves et trois sol aux trois octaves jouées avec un crescendo-decrescendo. Les partitions de ces extraits sont présentées en figure 3.2.

Gamme chromatique

Nuances sur trois sol

FIGURE 3.2 – Figure représentant les partitions des extraits musicaux joués par le flûtiste.

Durant le jeu de ces extraits, avec les trois positions de coulisse de la flûte différentes, le musicien contrôle la justesse de son jeu via un accordeur Korg OT-120 à aiguille indiquant l'écart en cents au tempérament égal à 440Hz. Aucune consigne spécifique n'est indiquée au musicien, hormis celle de jouer la gamme en contrôlant au maximum la justesse.

3.2.2 Paramètres mesurés

Le protocole de mesure utilisé durant cette étude est très similaire à celui présenté dans le travail de Cossette, [40] pour l'acquisition aéro-acoustique. Un schéma représentatif de l'installation de l'expérience est présenté en figure 3.3. La géométrie des lèvres (surface d'ouverture A) est capturée via les images filmées par la caméra disposée sur la balance, un miroir attaché à la flûte permet d'obtenir la vue transverse et ainsi la distance des lèvres au biseau W . Les images sont acquises à une cadence de 21.8 Hz, ce qui semble suffisant pour estimer en jeu les variations de géométrie des lèvres du musicien. La flûte est également attachée à la balance qui est alors équilibrée afin que le musicien joue dans la position la plus confortable possible.

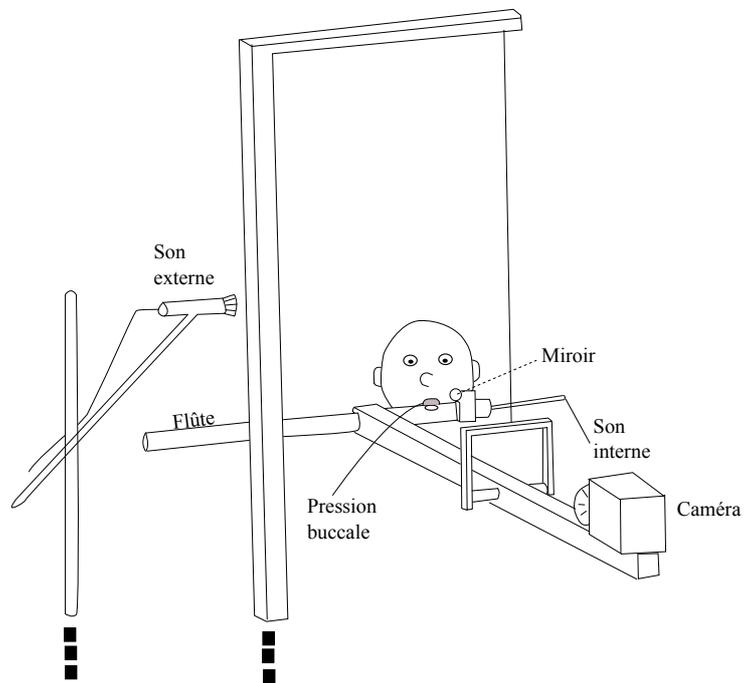


FIGURE 3.3 – Figure représentant l’installation de l’expérience : la caméra filmant la géométrie des lèvres (distance au biseau W et aire d’ouverture entre les lèvres A). Sont également mesurés la pression buccale P_m , les sons interne et externe à la flûte. La flûte est rendue solidaire de la caméra au moyen d’une balance équilibrée afin que le musicien joue dans la position la plus confortable possible.

La pression buccale est acquise via un cathéter dans la bouche du musicien branché sur un capteur de pression (Endevco). Après quelques minutes de jeu, le musicien s'adapte à la présence de ce cathéter et joue sans trop de gêne.

Le son interne de la flûte est mesuré via un capteur de pression acoustique Kistler, et le son externe est enregistré via deux microphones Schoeps MK6 (capture stéréophonique) positionnés à environ 70cm du trou d'embouchure de la flûte connectés à une carte audio numérique Motu Traveler qui permet l'enregistrement audio à 44100 Hz.

Le son interne, la pression buccale et la synchronisation de caméra sont acquis via une carte d'acquisition NI à une fréquence d'échantillonnage de 51200Hz.

3.2.3 Paramètres aéro-acoustiques étudiés

La fréquence fondamentale f_0 du son produit est estimée à partir du signal sonore interne à la flûte à l'aide de l'estimateur Yin, [32]. A partir de cette estimation de la fréquence fondamentale f_0 , nous pouvons estimer l'écart fréquentiel en cents Δf_0 entre la fréquence jouée et le diapason à 440 Hz : $\Delta f_0 = 1200 \log_2 \left(\frac{f_0}{440} \right)$.

En supposant que l'énergie cinétique du jet est dissipée par la turbulence et que la pression du jet est atmosphérique, à partir de la pression buccale P_m , en utilisant l'équation de Bernoulli, nous pouvons estimer la vitesse U du jet d'air : $U = \sqrt{2P_m/\rho_0}$, où ρ_0 est la densité de l'air, [127].

Le jet d'air peut également être décrit par deux nombres adimensionnés : la vitesse de jet adimensionnée $\theta = U/f_0W$ et le nombre de Reynolds $Re = UD/\nu$ où D est le rayon hydraulique et ν la viscosité cinématique de l'air. Le rayon hydraulique D est défini comme $D = 4A/p$ où p est le périmètre mouillé. En supposant que l'aire d'ouverture des lèvres a la forme d'une ellipse, le rayon hydraulique est défini par Blevins, [19], comme :

$$D = \frac{4ab}{(a+b)\left(1 + \frac{h}{4} + \frac{h^2}{64} + \frac{h^3}{256}\right)} \quad (3.4)$$

où $h = (a-b)^2/(a+b)^2$, a est le demi-grand axe et b le demi petit axe de l'ellipse. La géométrie de l'ellipse (a et b) est déterminée à partir des images par un algorithme de traitement d'image. La structure du jet est reliée au nombre de Reynolds, pour un souffle doux, le jet est laminaire et devient alors turbulent pour un souffle plus fort. La littérature indique que la transition du comportement du jet laminaire à turbulent s'effectue pour des valeurs de Re entre 2000 et 3000, suivant Mankbadi [89]. Cependant cette transition reste difficile à prédire. La turbulence est associée à une production de bruit de souffle large bande, [130, 68]. Ce bruit est filtré par les résonances passives de l'instrument, ceci constituant une part importante des caractéristiques perçues du son de la flûte.

Le jet d'air intrinsèquement instable est soumis à une vitesse acoustique transverse de sorte que l'instabilité du jet est contrôlée par la perturbation acoustique. La vitesse acoustique due à l'énergie acoustique accumulée dans le tuyau crée donc une perturbation initiale sur le jet

qui est amplifiée et convectée, résultant en un retard temporel. Les relations existantes entre ce retard et les résonances passives de la flûte ont été discutées dans la littérature par Coltman [33], Fabre [54] et Auvray [9]. Le flûtiste est capable d'ajuster ce retard en faisant varier la pression buccale, laquelle modifie la vitesse de jet U , ou en changeant la longueur du jet W (en changeant la distance des lèvres au biseau). C'est pourquoi la vitesse adimensionnée $\theta = U/f_0W$ est utilisée comme un descripteur du jet. La théorie, [33, 54, 9], indique que la condition optimale correspond à un retard d'une demi période sur le jet, et pouvant être exprimée comme :

$$\theta = U/f_0W = 4...7 \quad (3.5)$$

Le jeu de la flûte nécessite alors un ajustement de ces différents paramètres, d'une part pour garantir l'oscillation à la fréquence désirée et, d'autre part, quand celle-ci est atteinte, pour produire des formes temporelles spécifiques de ces paramètres afin de réaliser des intentions expressives.

De plus, nous pouvons également nous intéresser à la puissance fournie à l'instrument à l'embouchure \mathcal{P}_{instr} . Celle-ci peut s'exprimer sous la forme :

$$\mathcal{P}_{instr} = Q \cdot P_m \quad (3.6)$$

$$\mathcal{P}_{instr} = A \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} \cdot P_m^{3/2} \quad (3.7)$$

où Q est le débit d'air fourni à l'instrument, celui-ci pouvant être estimé à partir de la vitesse de jet U et de la surface d'ouverture des lèvres comme : $Q = A \cdot U$.

A partir de l'estimation du débit Q et de la pression buccale P_m , il est possible d'estimer le volume d'air utilisé V . Le volume V peut être exprimé en fonction du débit Q et à partir de l'expression de la conservation de la masse :

$$Q = -\frac{1}{\rho} \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (3.8)$$

où ρ est la masse volumique de l'air et V le volume d'air

On fera l'hypothèse d'un régime de compression isotherme, en effet la surface d'échange entre le fluide et les tissus pulmonaires étant très importante, environ $140m^2$, [28], nous supposons que le fluide est à température constante, celle des corps, ne variant pas à l'échelle de l'expérience.

La relation entre variations de pression et de densité est alors donnée par :

$$\rho = \frac{P_m}{c^2} \quad (3.9)$$

Enfin, nous pouvons remplacer notre expression de ρ dans l'expression du débit (3.8), et ainsi estimer le volume d'air utilisé V , via l'intégration du débit sortant, en fonction des paramètres connus :

$$V = -\frac{1}{\rho} \int Q \rho dt + C \quad (3.10)$$

$$V = -\frac{1}{\rho c^2} \int Q P_m dt + C \quad (3.11)$$

car c est une constante, C correspond à la constante d'intégration.

L'instrumentiste est un flûtiste amateur, qui joue régulièrement en orchestre et en formation de musique de chambre. Ce dernier ayant participé à d'autres études expérimentales de cette thèse (chapitre 6 et 8), les mesures/résultats pourront être confrontées à celles portant sur l'analyse des stratégies de jeu.

3.3 Résultats

3.3.1 Jeu de la gamme chromatique

Le premier extrait étudié est ici le jeu de la gamme chromatique sur trois octaves, ascendante et descendante. Le musicien respire à chaque octave. La figure 3.4 représente les différents paramètres étudiés pour le jeu de la gamme chromatique pour trois longueurs de coulisse différentes notées 000, 107 et 484 mm. Sont représentés sur cette figure, la fréquence fondamentale f_0 et le centre de gravité spectral en demi-tons relatifs au La 440 Hz, les écarts en cents entre la fréquence fondamentale et le diapason basé sur un La 440Hz, la pression buccale en Pa, la distance des lèvres au biseau en mm, la vitesse de jet adimensionnée θ , le nombre de Reynolds Re et enfin la puissance fournie à l'instrument en dB relatifs à 1 Watts. A partir de la figure 3.4, nous remarquons que pour les trois réalisations les valeurs et patrons du CGS sont assez semblables. Par contre, nous pouvons noter des écarts fréquentiels au diapason plus importants pour les réalisations avec la coulisse à 000 et 484 (10^{-2} mm). Ces écarts sont compris entre -20 et +30 cents, soit sur un ambitus d'un quart de ton, alors que pour la réalisation avec la coulisse à 107, les écarts fréquentiels sont moindres, entre -20 et 0cents.

Nous pouvons également noter, que plus la coulisse est allongée, plus la pression buccale développée est importante, en effet celle-ci augmente de plus de 500 Pa sur la réalisation avec la coulisse la plus allongée, surtout le jeu de la troisième octave. Les valeurs du nombre de Reynolds évoluent dans ce même sens, avec une augmentation de plus de 2000 sur le jeu de la troisième octave de la gamme pour la coulisse à 484. De même pour la puissance fournie à l'instrument. Différents patrons de variations de la distance des lèvres au biseau sont remarquables, alors que pour la réalisation avec la coulisse à 107, W varie entre 7 et 2mm environ, la distance diminuant lorsque la hauteur de note augmente ; nous remarquons de plus faibles variations de celle-ci pour les deux autres réalisations. En effet, pour celle avec la coulisse à 000, W varie entre 2 et 4mm, et pour celle avec la coulisse à 484, W varie entre 4 et 7mm. Il semble toutefois y avoir des distances minimale et maximale de W , respectivement 2 et 7mm, que le musicien ne dépasse

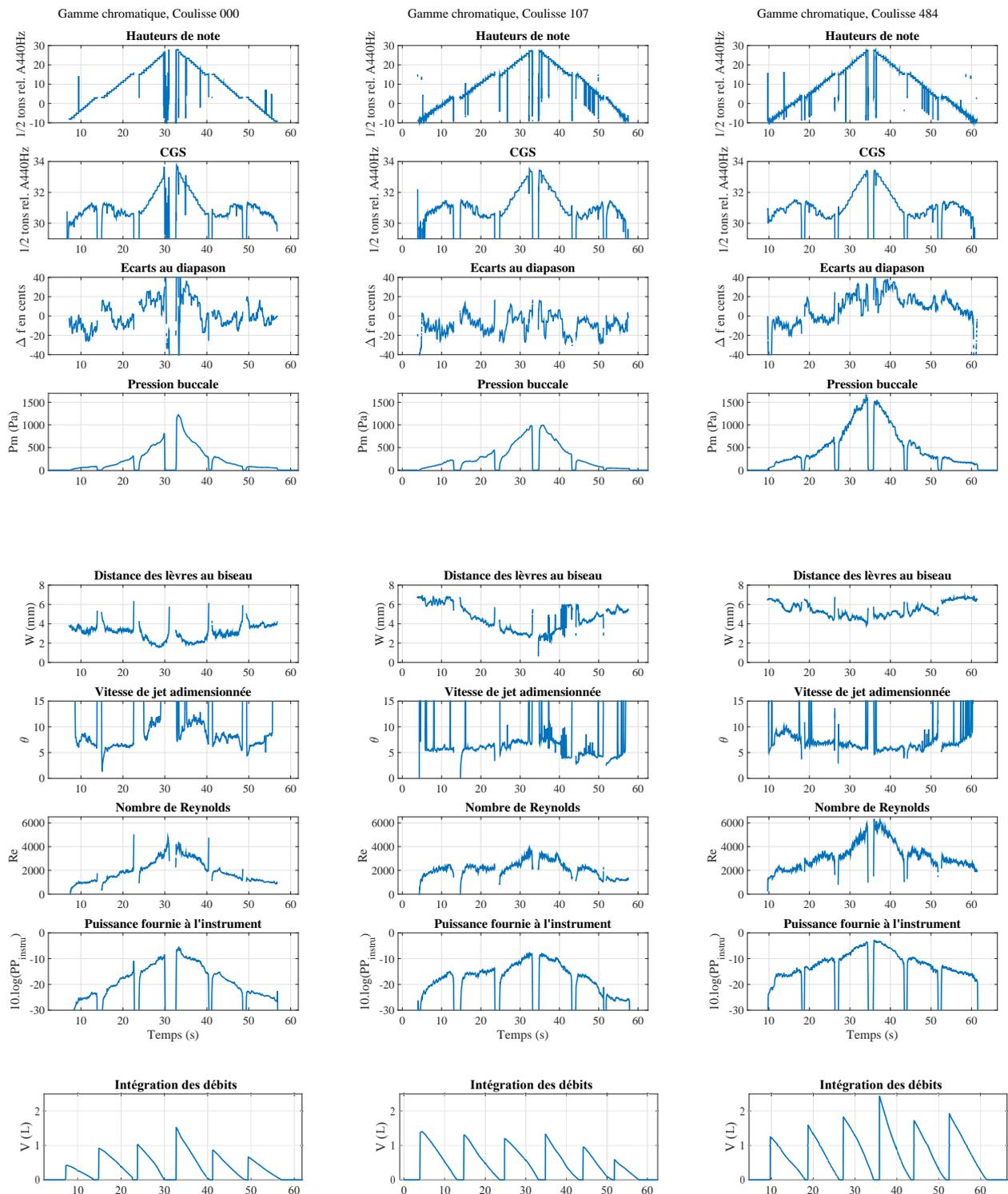


FIGURE 3.4 – Figure représentant les variations des paramètres étudiés : la fréquence fondamentale f_0 , le CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz, l'écart de fréquence au diapason basé sur le La 440Hz, Δf en cents, la pression buccale P_m en Pa, la distance des lèvres au biseau W en mm, la vitesse de jet adimensionnée θ , le nombre de Reynolds Re et la puissance fournie à l'instrument en dB relatifs à 1 Watt ; pour le jeu de la gamme chromatique ascendante/descendante pour trois longueurs de coulisse différentes (enfouée à fond à gauche, tirée de 1.07 mm et 4.84mm à droite).

pas.

Enfin, les variations de la vitesse adimensionnée sont assez parlantes. Il semble que le musicien privilégie des valeurs de θ entre 5 et 7 ; c'est pourquoi sur la réalisation avec la coulisse à 484, le musicien augmente fortement la pression buccale. En effet, comme ce dernier est obligé de découvrir l'embouchure afin de faire monter la fréquence fondamentale, pour garder des valeurs de θ entre 5 et 7, il est alors contraint d'augmenter la vitesse de jet. Nous notons également que le nombre de Reynolds atteint de très hautes valeurs, le son produit est donc altéré. Lors de la réalisation avec la coulisse à 000, nous notons l'effet inverse, afin de faire baisser la fréquence fondamentale car l'accord de l'instrument est plus haut, le musicien couvre l'embouchure de la flûte en se rapprochant du biseau, d'où une diminution de W . Seulement, le musicien ne peut baisser la pression buccale que jusqu'à un certain seuil auquel cas il n'arriverait pas à jouer les notes de la troisième octave, c'est alors pour cela que nous observons des valeurs de θ au-dessus de 10 dans le jeu de la troisième octave.

Il semble alors que la position de coulisse la plus confortable pour le jeu du musicien soit celle à 1.07mm. En effet, les évolutions des paramètres de contrôle montre que le musicien est plus libre de faire varier W et P_m dans le but de contrôler Re et θ que dans les deux autres cas où le musicien semble contraint par des soucis de justesse. Aussi, l'écart de la fréquence fondamentale au diapason confirme cette idée, les écarts étant plus faibles pour la position de la coulisse à 1.07mm. Nous pouvons également noter que la consommation d'air est nettement plus importante lorsque la coulisse est à 4.84mm, ce qui indique que le musicien se fatigue plus, ce qui conforte l'idée que cette position de coulisse n'est pas confortable pour le musicien. Cette consommation d'air est d'ailleurs moindre et plus régulière pour le jeu avec la coulisse à 1.07mm.

3.3.2 Jeu des trois Sol avec un crescendo - decrescendo

Après avoir étudié comment le musicien adapte son jeu à différents accords de l'instrument sur une large bande fréquentielle, nous nous intéressons ici à la réalisation des nuances. Il est demandé au flûtiste de jouer les Sol de chacun des registres de l'instrument en effectuant un soufflet (crescendo-decrescendo) sur chacun. Le musicien respire entre chaque note. Nous représentons en figure 3.5, les mêmes paramètres qu'étudiés précédemment mais ici pour le jeu des trois sol. A partir de la figure 3.5, nous remarquons que la réalisation des soufflets engendre quelques variations du CGS, et donc du contenu spectral du son produit, en particulier sur le Sol du second registre pour les trois réalisations.

Nous notons également que les écarts fréquentiels au diapason visé sont assez faibles pour les trois réalisations (entre 10 et -20 cents), hormis pour le Sol du troisième registre réalisé avec la coulisse à 000 qui est trop haut de +20 cents environ. Sur chaque Sol réalisé, nous pouvons d'ailleurs remarquer que la réalisation du crescendo fait monter la fréquence fondamentale, alors que celle-ci décroît pendant le decrescendo. Ceci semble d'ailleurs intimement lié aux variations de la pression buccale, qui évoluent également dans ce sens. A la vue de l'allure de la pression buccale pour la réalisation avec la coulisse à 484, nous pouvons penser que la capillaire pouvait être certainement obstrué, faussant alors P_m et les paramètres en découlant.

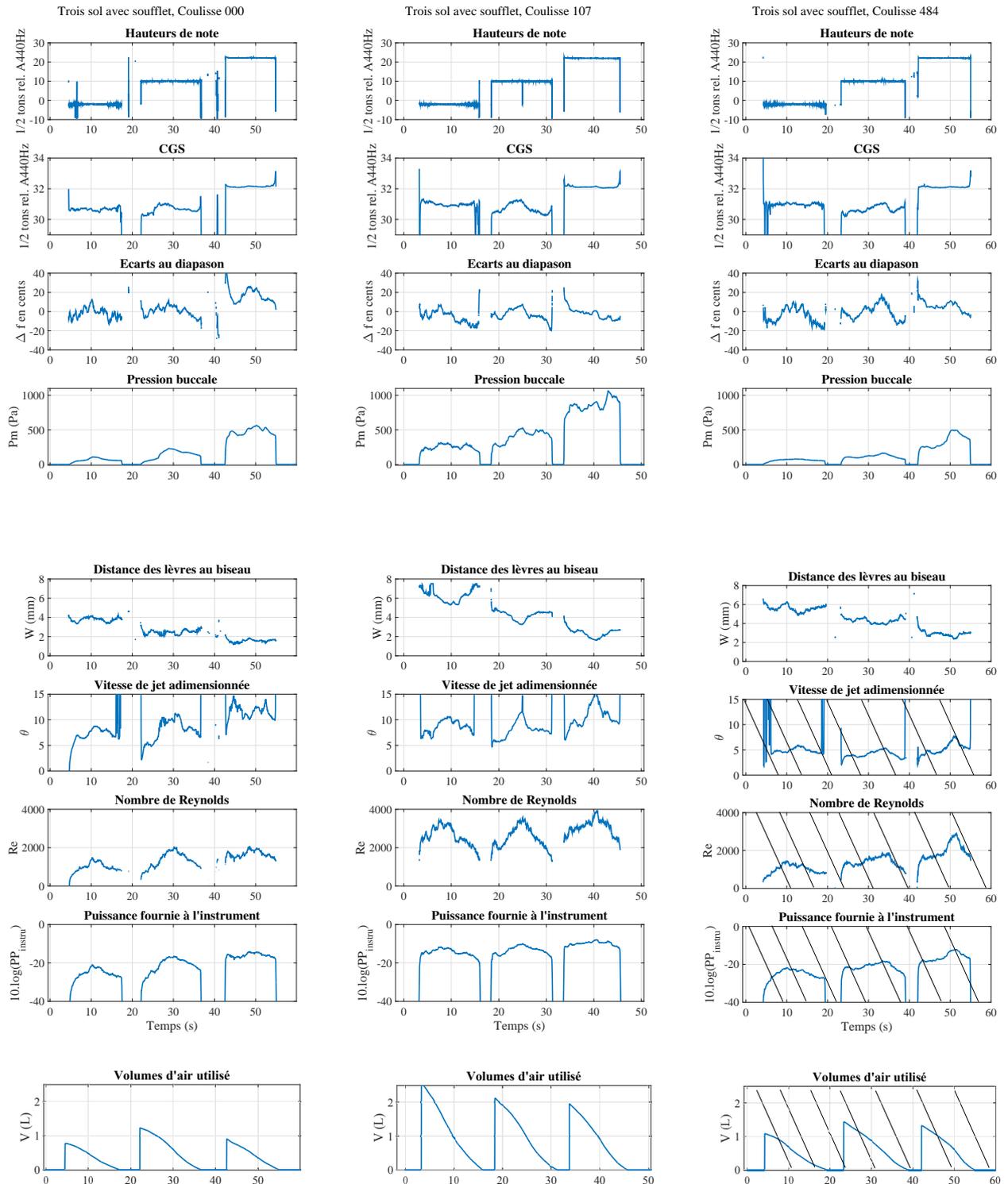


FIGURE 3.5 – Figure représentant les variations des paramètres étudiés : la fréquence fondamentale f_0 , le CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz, l'écart de fréquence au diapason basé sur le La 440Hz, Δf en cents, la pression buccale P_m en Pa, la distance des lèvres au biseau W en mm, la vitesse de jet adimensionnée θ , le nombre de Reynolds Re et la puissance fournie à l'instrument en dB relatifs à 1 Watt ; pour le jeu des trois sol sur chaque registre de l'instrument avec un soufflet, pour trois longueurs de coulisse différentes (enfoncée à fond à gauche, tirée de 1.07 mm et 4.84mm à droite).

Nous pouvons remarquer que le jeu avec la coulisse avec la 107 est assez différent des deux autres réalisations, en effet le musicien semble avoir moins de contrainte liée à la justesse, celui-ci faisant varier généreusement P_m et W dans le but de réaliser les soufflets. En effet, pendant le crescendo, alors que P_m augmente légèrement, W diminue clairement, en résulte alors une augmentation de θ entre 3 et 5 sur chaque crescendo ; et à l'inverse lors du decrescendo. Ces variations importantes de θ sont alors la raison des variations du CGS. Tandis que par exemple pour la réalisation avec la coulisse à 000, le musicien fait peu varier W , certainement dans un souci de justesse. D'ailleurs nous pouvons noter que W est globalement plus faible, comme lors du jeu de l'extrait précédent, le musicien couvre l'embouchure afin de faire baisser la fréquence. La réalisation du soufflet est donc majoritairement réalisée par une variation de la pression buccale. Celle-ci entraînant d'ailleurs des variations du nombre de Reynolds, et donc de la puissance fournie à l'instrument.

De plus, le volume d'air utilisé double entre la réalisation à 000 et celle à 107. Le musicien retient alors son jeu lors de la réalisation avec la coulisse à 000 afin de limiter la pression buccale produite.

Pour la réalisation avec la coulisse à 484, même si l'analyse de la pression buccale et des paramètres en dépendant est difficile, nous pouvons toutefois noter la même idée dans les variations de W . En effet, les variations de la distance au biseau sont moindres, le musicien semble ici aussi préserver la justesse du son produit.

3.4 Synthèse

La flûte traversière est souvent jouée, en jeu soliste, avec une tendance à faire sonner les notes les plus aigües de la tessiture à un diapason plus élevé que les deux premières octaves. En contexte orchestral, les flûtistes sont amenés à compenser cette tendance.

L'étude de la gamme chromatique permet de montrer que le musicien contrôle la justesse du son produit, comme le précise Galway, [60], en découvrant l'embouchure afin de faire monter la fréquence fondamentale du son produit, ce qui est d'ailleurs en cohérence avec le chapitre précédent ; ou en couvrant l'embouchure dans le but de faire baisser cette dernière, W diminuant alors de 6 à 4 mm sur la première octave de la gamme entre le jeu avec la coulisse à 107 ou à 000. En effet, comme remarqué dans le chapitre 2, une telle diminution de W engendre un allongement de la correction de longueur de l'impédance de rayonnement d'environ 10 mm, soit une chute de la fréquence de résonance d'environ 30 cents sur le doigté 13. Cependant, l'effet sur la fréquence de jeu n'est pas si direct, les variations de W étant accompagnées de variations de la pression buccale (donc U), dans le but de conserver au maximum le rapport U/W égal pour une note donnée. Hormis dans des cas extrêmes comme le troisième registre de l'instrument pour lequel la pression d'alimentation ne peut pas baisser indéfiniment, engendrant alors une hausse de la valeur de θ , le musicien ne jouant alors plus dans la zone optimale des valeurs de θ ; rendant certainement le jeu moins facile.

L'analyse du jeu des trois sol réalisés avec soufflet montre qu'il existe différentes stratégies pour effectuer des crescendo ou decrescendo ; le musicien peut alors faire varier uniquement la pression buccale ou bien l'associer avec une variation de W . Cette dernière combinaison semblant être privilégiée lorsque l'accord de l'instrument est le plus confortable, sinon le musicien est contraint de gérer la justesse par la couverture de l'embouchure limitant alors les variations de W . En effet, l'étude de ces deux extraits permet de remarquer qu'il existe des limites aux valeurs de W , le musicien ne se rapprochant pas plus de 2mm, et ne s'écartant pas plus de 7mm. Ces valeurs étant certainement intimement liées au bon fonctionnement de l'instrument. D'ailleurs les valeurs de W présentées lors des travaux de de la Cuadra et Cossette, [41, 40] ont des valeurs limites de W extrêmement proches de celles présentées ici, entre 2 et 8mm.

Il semblerait alors qu'il y ait une position de la coulisse, celle à 107, pour laquelle le jeu apparaît comme plus confortable, notamment par le fait que le musicien joue avec des valeurs des paramètres de contrôle θ et Re correspondantes à celle du jeu classique du musicien, voir chapitres 6 et 8. Mais aussi, parce que le musicien semble plus apte à modifier ces paramètres, à les contrôler en faisant à la fois varier la pression buccale P_m et la distance W des lèvres au biseau. De plus, dans cette position les valeurs de puissance fournie à l'instrument et de volumes d'air utilisés semblent moins extrêmes, plus réguliers et cohérents avec les valeurs données par la suite, chapitre 8.

Globalement, l'instrument proposé permet, pour les deux exercices étudiés, de maintenir facilement le diapason imposé, sur l'ensemble de la tessiture pour le réglage intermédiaire de la coulisse. Les deux autres positions de coulisse induisent des désaccords de l'instrument qui sont facilement compensés par l'instrumentiste dans certaines zones de la tessiture, mais au prix d'une forte consommation d'air (et donc d'un effort respiratoire supplémentaire), d'un son bruité (Re atteint 6000) dans le haut de la tessiture lorsque la coulisse est tirée au-delà de sa position moyenne.

Si les contraintes imposées à l'instrumentiste semblent difficiles à tenir, surtout dans l'aigu de la tessiture, elles sont respectées dans les deux octaves basses, et indiquent alors que la marge de correction dont l'instrumentiste dispose est probablement supérieure au "désaccord" expérimenté ici. Ainsi, la qualité de l'instrument en termes de justesse doit être relativisée : des écarts de 10 cents sont ici aisément corrigés, cette correction pouvant aller jusqu'à 25 cents, ce qui justifie pleinement les critères de conception, qui pouvaient apparaître arbitraires au chapitre 1. D'éventuels défauts de justesse de l'instrument n'empêchent donc pas, dans certaines limites, le flûtiste de jouer juste mais le pénalisent en termes de qualité de son et d'effort. Ces deux aspects sont développés dans la troisième partie de ce document.

Troisième partie

**Stratégies respiratoires développées
par le musicien**

How does a flute player adapt his breathing and playing to musical tasks ?

Avant-propos :

L'article *How does a flute player adapt his breathing and playing to musical tasks ?*, qui suit, a été publié dans le journal *Acta Acustica united with Acustica*, volume 101, pages 224-237 en janvier 2015. Les auteurs sont Camille Vauthrin et Benoît Fabre de l'Institut d'Alembert/LAM, UPMC Univ Paris 6, CNRS UMR 7190 ; et Isabelle Cossette de Schulich School of Music/MPBL/CIRMMT/Mc Gill University, Montreal, Canada.

Cet article présente une étude expérimentale menée au sein de laboratoire MPBL (Music Performance and Body Laboratory), et propose un modèle simplifié de flûtiste. Ce travail s'intéresse aux contrôles aéro-acoustiques et respiratoires développés par le musicien pendant le jeu de la flûte. En effet, le jeu de la flûte nécessite que l'instrumentiste adapte la géométrie de ses lèvres, ainsi que la pression buccale à la hauteur, nuance ... selon la note jouée. Or, la pression buccale est contrôlée directement par le système respiratoire, via les forces passives et/ou actives résultant sur la cage thoracique, et donc les poumons. Il s'agit alors d'étudier ces différents contrôles lors du jeu musical.

Pour ce faire, un protocole expérimental est développé, permettant l'acquisition simultanée des paramètres aéro-acoustiques et respiratoires. L'analyse de l'évolution des paramètres pendant le jeu de trois pièces musicales présentant des difficultés techniques et musicales différentes, montre comment le flûtiste adapte ces contrôles selon la consigne musicale demandée. Par exemple, une longue phrase musicale requiert une grande prise de volume d'air avant le jeu, ensuite la pression buccale est adaptée à la note à jouer, selon sa hauteur, la nuance visée. De plus, les résultats indiquent que le contrôle du débit d'air sortant est directement corrélé à la dynamique de jeu, ce débit d'air pouvant être contrôlé par la surface d'ouverture des lèvres ou par l'action des muscles. Ceci confirme une forte corrélation entre les contrôles exercés par le musicien à la bouche et ceux du système respiratoire. Enfin, l'analyse du jeu du flûtiste permet de proposer un modèle simplifié du système respiratoire du flûtiste reliant les volumes d'air et la pression buccale aux activités musculaires.

Cette étude permet d'obtenir une compréhension des stratégies aéro-acoustique et respiratoires développées par le flûtiste en jeu, cependant une information importante au fonctionnement du système respiratoire doit ici être déduite : l'activité du diaphragme. La mesure de l'activité du diaphragme a donc été l'objet de nouvelles mesures, dont l'interprétation fait l'objet des chapitres suivants.

abstract This study was triggered by the flute players' and teacher's claim that a high quality of playing cannot be reached without a precise control of the breathing, starting during preparatory phases. Among all the controls developed by the musician, this work focuses on the interactions between respiratory activity and hydrodynamical parameters during flute music performance. In order to study these interactions, the following parameters are measured during the playing of a flautist : muscle activation, chest-wall compartment displacement and volume, blowing pressure in the mouth, lip position, and radiated sound. All these measurements are taken simultaneously, using a combined set-up developed to acquire both respiratory and hydrodynamical data. Three musical excerpts with different complexities (one scale and two pieces of the flute repertoire) are analyzed. The results show that in preparation to a long musical phrase, the player takes a deeper and longer inhalation than for a standard phrase and, that he needs to develop a specific control of flow for playing. This control of flow requires the flautist, as opposed to normal breathing conditions at rest, to coordinate the respiratory muscles while expiring. This control, in correlation with the lip geometry, allows the player to produce musical variations such as "dynamics". Additionally, the respiratory analyses show that the flautist develops three different patterns of chest volume variations, one for each of the three musical tasks. Finally, a simple, qualitative model is presented in order to link respiratory and aerodynamic parameters to muscular activity, mouth pressure and chest volume during flute playing.

4.1 Introduction

Music performance requires that the instrumentalist develops, through long training, an expert control of playing. In order to play the requested pitch, amplitude and timbre associated to musical pieces, the instrumentalist must control his fingers, lips and many respiratory parameters. This aim of this study is to understand how the flautist's respiratory activity and control parameters are linked to achieve musical tasks. Our first goal is to establish an experimental set-up which allows the simultaneous measurements of the hydrodynamical parameters (mouth pressure, motion of the lips, and radiated sound), and the respiratory parameters (chest-wall compartment volume variations and respiratory muscle activations). The hydrodynamical and aeroacoustical analyses give information on how to adjust the control parameters according to the musical tasks performed. The analysis of the respiratory parameters allows us to quantify the displacements of the chest-wall compartments during inspiration and expiration and to identify the muscular activation associated with the displacements. Simultaneous measurements of the parameters allow us to understand how they are linked together during musical tasks.

Before statistics can be used on the relevant parameters, one must understand how the flautist adapts and coordinates his playing technique according to different musical tasks and to the complexity of the score in order to obtain a fine understanding and definition of the parameters. Three musical tasks presenting different complexities in terms of register, dynamic and time duration were observed. The first excerpt is a G Major diatonic scale ; the two next excerpts constitute pieces of the flute repertoire : Debussy *Prélude à l'après-midi d'un faune* and Bee-

thoven *Leonore Overture n°3*. Each excerpt was performed on an average four times until the quality of musical performance and data acquisition was deemed satisfactory. Therefore, three performances were selected out of twelve measurements.

First, you will find below a short synthesis of previous studies on flute respiratory and acoustical control parameters and an overview of the acoustical, hydrodynamical and respiratory parameters used during flute playing ; secondly, the methodology used, the results of the acoustical and respiratory measurements and a comparison with results of previous studies ; and finally, a model that we developed connecting the respiratory and hydrodynamical parameters which, when combined with the pressure-volume curve of the respiratory system, allows us the estimation of the respiratory effort during the musical tasks.

4.2 Previous studies and control parameters

4.2.1 Previous studies

Among the numerous studies on musical instruments and more specifically on the flute and the player, this section discusses the most relevant studies related to our work. In his study, Fletcher [57] presents measurements of physical parameters of the performance technique used by a group of experienced flute players. Fletcher's objectives are to understand the physical basis of how some instruments are used to make music and to determine the physical criteria that characterize these instruments. Other studies dealing with acoustical or hydrodynamical descriptions include : Coltman [34, 35], Kergomard [75], Wolfe [133], Benade [13], Nederveen [99], Fabre [54], Nolle [101]. In relation to the analysis of flute control parameters, de la Cuadra's study [41], focuses on the comparison between a novice and an experienced flautist.

The sounds produced by flutes depend not only on the physical characteristics of the instrument but also on the control exerted by the musician. This is especially important when the air jet is shaped with the lips of the player which is the case for the flute in our study. Among other studies describing the influence of the player on the flute and on the sound produced, we can also cite Montgermont [95, 96] and Coltman [33].

Finally, more directly related to our study, we can mention three investigations conducted by Cossette [38, 39, 40]. The first study focuses on the respiratory mechanisms of professional flautists. Different pulmonary pressures, muscular activation and air volume have been measured in order to compare different musical exercises such as staccati and sustained tones at different frequencies and intensities. Cossette's study [38] shows that different flautists use different strategies to control mouth pressure, and that the individual mastery of the instrument permits to control airflow and velocity in order to produce the desired sound intensity and frequency. The second study [39] focuses on professional flute playing with or without breath support, which in turn is associated with high quality playing. The concept of breath support is widely used amongst flute players and teachers. Work by Cossette [39] shows that breath support entails antagonistic contraction of nondiaphragmatic inspiratory muscles that tend to hold the rib cage at a higher lung volume than during normal breathing. This relieves the expiratory muscles from the task of producing the right mouth pressure, especially at the end of the phrases, so they

can contribute more to the finer control of mouth pressure modulations required for high quality playing. Recordings included optoelectronic plethysmographic measurements of chest-wall volume (V_{cw}) and its compartments, surface electromyography of the scalene, sternocleidomastoid, parasternal, lateral abdominal, and rectus abdominus muscles, mouth pressure, and sound. Last study combines measurements performed in two different experimental set-ups (Montréal & Paris) in order to provide a global view, from breath to sound, of one flautist playing the flute. One of the experiments provides data on the flautist's respiratory behavior, while the aim of the second experiment was to gather data for the analysis of hydrodynamical and aeroacoustical flute playing control parameters. The objectives of this study was to understand how does the player adjust the different control parameters to produce the musical task required by the score and how does this modulate the resulting sound in the flute. Other studies on the respiratory parameters and music playing include studies on singers (e.g. Hixon [67], Pettersen [104]).

4.2.2 Overview of the acoustical and hydrodynamical parameters

Flute operation can globally be described as a coupling between the hydrodynamic modes of a jet and the acoustic modes of a resonator. Pipe resonances mostly depend on its geometry while the jet provides the necessary energy to sustain the oscillation. As discussed by Fabre [66] and commonly referred to in the literature [75, 33], the flute operation may be approximated by three independent blocks, Figure 4.1. The different elements (jet, sources, resonator) interact

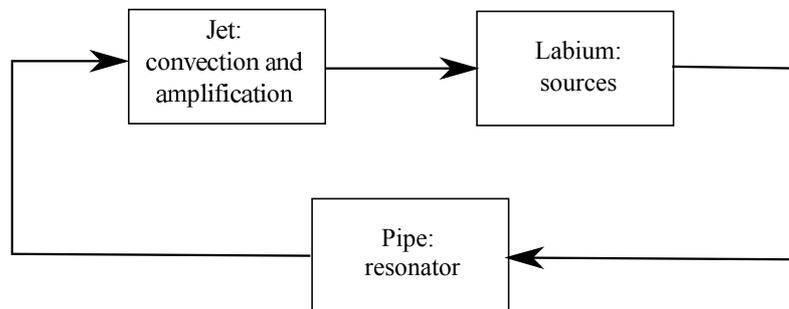


FIGURE 4.1 – General description of flute operation as three independent blocks coupled together.

locally and are therefore analysed separately and then concatenated to produce an illustration of the flute operation. The acoustic resonances of the resonator have been studied by Coltman [33], Kergomard [75], Fletcher [57], Wolfe [133], Benade [13] and Nederveen [99]. We focus here on the jet-labium configuration as the player controls both the jet characteristics and the lip to labium distance W . Assuming thin boundary layers in the lip channel, we obtain the jet flow Q by the product of velocity U and opening area A between the lips $Q = AU$. Assuming that the kinetic energy of the jet is dissipated in turbulence and that the pressure in the jet is atmospheric, we estimate the jet velocity from the mouth pressure P_m using Bernoulli's equation : $U = \sqrt{2P_m/\rho_0}$, where ρ_0 is the air density [127].

As in [57, 54, 41, 33, 130], these parameters can be described by using dimensionless numbers : the dimensionless jet velocity θ , ($\theta = U/fW$, where f is the fundamental frequency of the radiated sound), the Strouhal number Str_h , ($Str_h = fh/U$, where h is the height of the flue

from where the jet flows) and the Reynolds number Re , ($Re = UD/\nu$, where D is the hydraulic diameter and ν the kinematic viscosity of the fluid). The hydraulic diameter D is defined as $D = 4A/p$, where p is the wet perimeter. Assuming that the lip area is an ellipse, the hydraulic diameter is defined by Blevins [19], as :

$$D = \frac{4ab}{(a+b)(1 + \frac{h}{4} + \frac{h^2}{64} + \frac{h^3}{256})} \quad (4.1)$$

where $h = \frac{(a-b)^2}{(a+b)^2}$, a is the semi-major axis and b , the semi-minor axis. In our set-up, the geometry of the lips (a and b) is tracked through image processing in order to estimate D .

The structure of the jet is related to the Reynolds number. The jet is laminar for soft blowing conditions. Theory indicates that the transition from laminar to turbulent jet seems to occur in the range of $Re = 2000 - 3000$, following Mankbadi [89]. However, this transition is difficult to predict. When blowing harder, the jet becomes turbulent. Turbulence is known to produce a breathy wide band noise [130, 68]. When this noise is filtered by the passive resonances of the pipe, it constitutes an important part of the perceived characteristics of flute sound.

The jet transverse oscillation induced by a harmonic acoustic perturbation is expressed as the propagation of a wave of growing amplitude. Following Rayleigh [111] and Mattingly [90] and as discussed by de la Cuadra [41], the convection velocity as well as the spatial amplification factor of the wave are function of the dimensionless frequency : the Strouhal number. Following de la Cuadra [41] and Nolle [101], the jet instability appears to be maximal around :

$$0.02 < Str_h = fh/U < 0.05 \quad (4.2)$$

depending on the jet velocity profile. Keeping the Strouhal number in such a range is also part of the control by the player.

In Figure 4.1, the jet acts as an amplifier and delay. The intrinsically unstable jet is submitted to a transverse acoustic velocity, so that the jet instability is triggered by the acoustical perturbation. The acoustic velocity due to the acoustic energy accumulated in the pipe therefore creates an initial perturbation on the jet that is amplified while it is convected downstream towards the labium, resulting in a time delay. Relations between this time delay and passive resonance in the flute are discussed in the literature by Coltman [33], Fabre [54] and Auvray [9]. The flautist is able to adjust the delay by changing the blowing pressure, which modifies the jet velocity U , or by changing the length of the jet W , which corresponds to a change of distance between the lips and the labium. This is why a dimensionless velocity, $\theta = U/fW$, is used as a describer. The convection velocity of perturbations of the jet is about 30% to 50% of the jet center line velocity, [41]. The theory [33, 66, 9], indicates that the optimal condition corresponding to half-period delay on the jet may then be expressed as :

$$\theta = U/fW = 4...7 \quad (4.3)$$

Combining equations (4.2) and (4.3), the optimal range of the thickness ratio W/h of the jet is :

$$3 < W/h < 12 \quad (4.4)$$

In the case of a short channel like the lips, the maximum jet instability occurring at $Str_h \approx 0.03$ indicates an optimal value of $W/h \approx 8$.

Thus, the theory indicates optimal values of the dimensionless parameters θ , W/h and an upper limit of the Reynolds number, in correlation with the total jet flow Q . Playing the flute requires the adjustment of these different parameters, first, in order to guarantee the oscillation at the requested frequency and, once this is achieved, to produce specific time shaping of these parameters in order to achieve expressive intentions.

4.2.3 Overview of respiratory parameters

This section provides an overview of the respiratory parameters associated to flute playing by a healthy musician. Although all components of the respiratory system are essential to its good functioning, we limit our description to the main respiratory concepts and mechanisms relevant to flute playing. More detailed information on respiratory mechanics can be found in [67, 113, 87]. The different parameters described below include the pulmonary volumes, the main respiratory muscles and the pressure-volume curve of the respiratory system. At first, we focus on the air movement into and out of the lungs required for flute playing. Pressure variations in the lungs and in the pulmonary airways create pressure gradients that regulate pulmonary ventilation. The muscles, by contracting, create forces which deform the structure of the respiratory system. The structure displacements modify the volumes of the cavities which, in turn, create pressure variations. Respiration depends on passive (elasticity, surface tension and gravity which tend to take back the lung structure to its resting position) and active forces (muscle activation). The elastic recoil of the respiratory system results from the respective resting states of the lungs and chest wall. Figure 4.2 shows a sketch of the so called static volume-pressure curve of the respiratory system (Prs) including both the lung (Pl) and chest-wall (Pw) behaviors. Figure 4.3 represents a sketch of spirometric tracings of the static pulmonary volume subdivisions : Total Lung Capacity (TLC), Vital Capacity (VC), Residual Volume (RV), Inspiratory Capacity (IC), Functional Residual Capacity (FRC), Inspiratory Reserve Volume (IRV), Tidal Volume (TV) and Expiratory Reserve Volume (ERV).

Pulmonary pressure and passive forces change according to the pulmonary volumes. At Total Lung Capacity (TLC), when the lungs are totally filled with air, the passive forces exerted on the system are strong enough (pressure approximately of 4kPa) so that, if respiratory muscles are relaxed, air naturally tends to go out of the lungs until the resting volume, Functional Residual Capacity (FRC), is reached. At FRC, passive forces (elasticity, surface tension and gravity) of the lungs and the chest wall are equal and opposite. When all the air in the lungs is maximally blown out, the volume of air that remains in the lungs is the Residual Volume (RV). At this volume and when muscles are relaxed, passive forces are oriented outwards and tend to make the air come in until FRC is reached. The air comprised between Total Lung Capacity (TLC) and Residual Volume (RV) is called the Vital Capacity (VC) and is the air available to play the flute or another wind instrument. Vital Capacity varies according to size, age, gender, and origins. Tidal Volume (TV) commonly refers to the air used during quiet breathing. Active forces resulting from muscular contraction enlarge the chest-wall cavity during inspi-

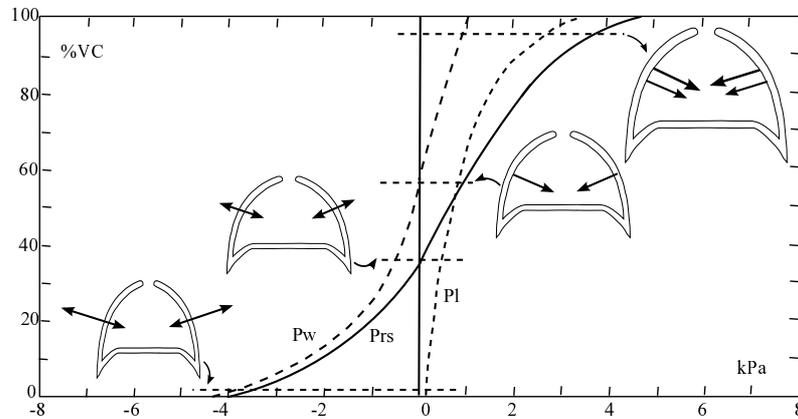


FIGURE 4.2 – Sketch of static volume-pressure curves of the lungs (Pl), chest wall (Pw) and total respiratory system (Prs) during relaxation. The arrows in the lung drawings indicate the static forces exerted by the lung and the chest wall at different volumes. Figure issued from [3, 8].

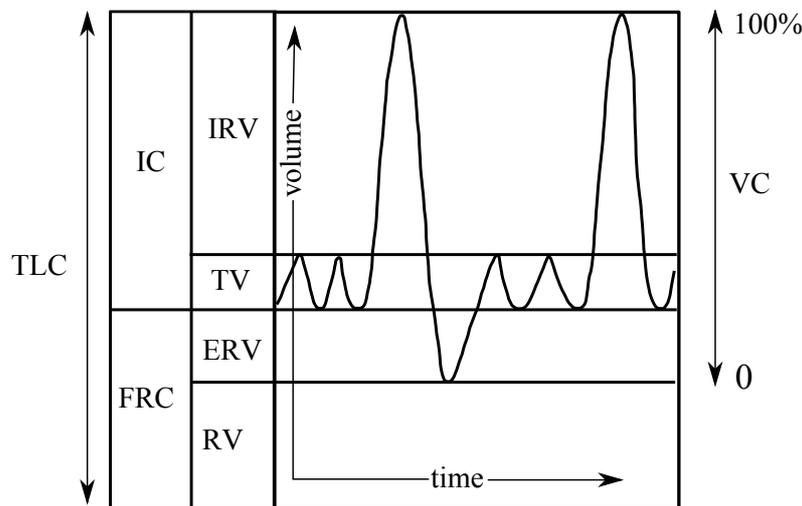


FIGURE 4.3 – Sketch of spirometric tracings of static pulmonary volume and capacity subdivisions : Total Lung Capacity (TLC), Vital Capacity (VC), Residual Volume (RV), Inspiratory Capacity (IC), Functional Residual Capacity (FRC), Inspiratory Reserve Volume (IRV), Tidal Volume (TV) and Expiratory Reserve Volume (ERV). Figure adapted from [3, 8].

ration and decrease it during expiration. When contracting, the main inspiratory muscle, the diaphragm, a dome-shaped muscle and tendon structure, flattens. This creates a depression in the thoracic compartment and an in-draught in the lungs. This “descent” of the diaphragm (actually, rather flattened dome) pushes the abdominal viscera down and causes a “swelling” belly. Then, as the phrenic center (diaphragm center) is stabilized, the lower ribs, on which the diaphragmatic muscle fibres are inserted, elevate and create an expansion of the lower part of the thorax. As stated previously, during a tidal expiration, the thorax passively returns to its resting state at FRC, while, during a forced expiration, air displacement is considerable and requires more force. The action of the diaphragm is completed by other inspiratory muscles (e.g. scalene, sternocleidomastoidian, external intercostals), and expiration is forced by the expiratory muscles.

4.3 Musical tasks presentation and introduction of the flautist

The aim of the present work is to study the control exercised by the flautist during various musical tasks entailing different musical and/or respiratory complexities. More specifically, our goal is to observe how a flute player adapts his breathing and playing to musical tasks. The flute player is asked to perform three musical tasks, Figure 4.4 : a G major scale and two pieces of the flute repertoire. The scale on two octaves constitutes for a flute player a practice routine which does not require any special musical or respiratory effort. The second task is to play the flute solo at the beginning of an orchestral piece, Debussy *Prélude à l'après-midi d'un faune*. The tempo is moderate and the excerpt is long. Traditionally, the flautist is expected to play this musical passage in one breath. Time duration is the principal challenge, made even more demanding by a crescendo-descrescendo indicated at the end. As the flautist plays solo, a high quality and musical sound is sought. The last is a Beethoven excerpt : *Leonore Overture*. Similarly to the Debussy, this excerpt is the beginning of a repertory piece, but this one is played by the woodwind instrument section. The difficulty of this excerpt resides in its length, its dynamic changes (from *ff* to *pp*) and in the fact that it is played in the third register, which typically requires higher pressures.

A musician volunteered to play after a recruitment announcement was made through the Schulich School of Music at McGill University. The flautist is a woman who was 47 years old at the moment of the measurements. Trained as a professional flute player, she had an extensive playing experience (over 250 public concerts) and played regularly over 20 years.

4.4 Measurements

4.4.1 Acoustical

As stated previously, one of our goals was to measure simultaneously the acoustical and the respiratory parameters. The experimental set-up is based on the one described by de la Cuadra [41] for the acoustical parameters and on the one by Cossette [40] for the respiratory parameters. This section presents the acoustical parameters only.

G scale



Prélude à l'après-midi d'un faune



Leonore Overture

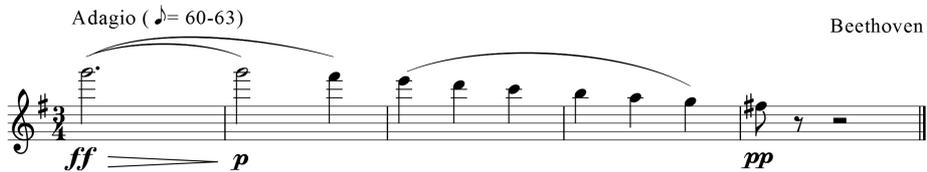


FIGURE 4.4 – Scores of the three musical tasks

The experiment was conducted in the Music Performance and Body Laboratory (MPBL), a room ($80m^3$) without anechoic treatment, which provided an environment similar to that found in a normal practice room. To measure the pressure in the mouth, we used a soft tube connected to a calibrated differential pressure sensor (± 100 cm H_2O , UT-PDP-100, Scireq Inc.). While the presence of the measuring tube in the mouth is disturbing at the beginning of the session, the player taking part in our experiments seemed to accommodate rapidly and claimed to have played with her usual sound quality by the end of the session for the three excerpts analysed in this paper. Under normal playing conditions, the lip opening is the strongest constriction on the flow path from the lungs to the outside. Therefore, we assume that the mouth pressure provides a fair estimation of the lung pressure. The radiated sound, recorded at sampling rate of 44280 Hz, was measured with an external microphone (Neumann TLM-103) placed 1 meter from the flautist. The camera device used to film the lips of the flautist was slightly modified from the one used by de la Cuadra [41] in order to make it compatible with the OptoElectronic Plethysmograph (OEP). The camera was attached 2 cm from the extremity of the flute head. In this set-up, the camera catches a transverse view of the lips. To catch the frontal view, a mirror was placed near the embouchure forming an angle of approximately 45 degrees with the flute. Images were taken at a rate of 25 images per second, which provides a sufficiently large sampling rate to capture the control dynamics. Figure 4.5 shows a schematic view of the set-up.

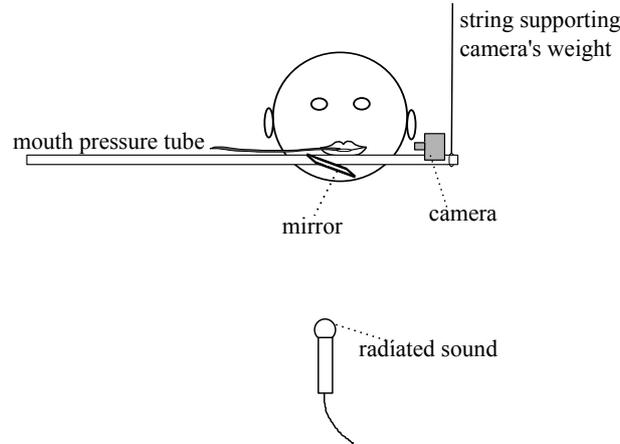


FIGURE 4.5 – Schematic view of the set-up. The radiated sound is measured a meter from the player's mouth.

4.4.2 Respiratory

As stated previously, in the respiratory component of this study, we focus on air volume variations and on principal and surface muscle activations that occur during flute playing. The chest wall is divided in three compartments : the pulmonary rib-cage compartment (RC_p), the abdominal rib-cage compartment (RC_a) and the abdominal compartment (AB), as shown in Figure 4.6. These chest-wall volumes are measured by OptoElectronic Plethysmography (OEP,

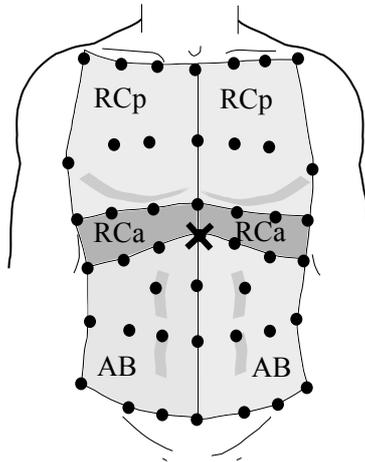


FIGURE 4.6 – Sketch showing the markers' positions on the three compartments of the thorax : the pulmonary rib-cage compartment (RC_p), the abdominal rib-cage compartment (RC_a) and the abdominal compartment (AB). The cross corresponds to the xyphoidal transverse plane.

Smart System, BTS) as in [39, 40]. The OEP consists of 9 infrared video cameras tracking 89 hemispherical 10 mm diameter reflective markers apposed on the chest wall of the flautist as shown on Figure 4.6 for the frontal view. The markers are positioned in seven rows between the clavicle and the iliac crest, [7]. With the 3D coordinates of the markers, Gauss' theorem is used to calculate the volume variations as described by Cala et al. [26]. The data recorded with the

OEP system, sampled at 60Hz, allow the reconstruction of the three chest-wall compartment displacements and their volume changes.

As stated previously, we also measured the activation of the main respiratory muscles which contraction is easily and non-invasively measurable with surface electromyography (EMG) during flute playing : scalene, sternocleidomastoidian, rectus abdominus and lateral abdominal muscles (internal and external obliques, and transverse combined). Intercostal muscles also contribute to both the inspiration and the expiration but, as they are superposed, these muscles are difficult to measure and are thus not included in this study. Muscular activity is measured with a wireless 16-channel electromyogram system (BTS, Milan, Italy). To check the appropriate placement of the electrodes, the flute player was asked to do specific movements, as explained in Cossette's study [39]. The signals are sampled and recorded at 960 Hz and, during the analysis process, rectified and low-pass filtered (2 Hz, Butterworth).

A recording session lasts approximately two hours and a half, the first hour being mostly spent on preparation : positioning of the infra-red reflective markers on the player's chest wall, positioning and test of the EMG electrodes. Playing then takes approximately one hour thirty minutes. Twelve tasks were recorded out of which three were selected, analyzed and presented in this paper. In order to simplify data representation and comparison, respiratory volumes and muscular activity are expressed against time as a percentage of the maximal volume or maximal activation reached during a vital capacity (VC) manoeuvre (% max VC). Our flautist has a VC of 3.7 liters.

4.5 Results

We analyze the three musical tasks in order to connect the respiratory and hydrodynamical control parameters. The air contribution and the pressure used for each excerpt are plotted in a mouth pressure-chest volume diagram. Then, while taking into account the different complexities of each musical task, the acoustical and respiratory parameters are observed and compared in order to better understand the flautist's control.

4.5.1 Mouth pressure-chest volume diagram

Figure 4.7 shows the mouth pressure-chest volume diagram for the three tasks. In a first step, the curve cannot be associated to the relaxation curve described in the 4.2.3 section (Figure 2), as the esophageal and gastric pressures were not measured in this study. However, this diagram allows a comparison of the air volume and pressure contributions for the three excerpts. Tidal volume is determined by averaging end-inspiratory and end-expiratory volumes during a 1-minute quiet breathing period (maximal and minimal volumes over 10 cycles of quiet breathing). Our flautist's average Tidal Volume occurs between 28% and 48% of her Vital Capacity as shown by the dotted loop on Figure 4.7. All pressures are measured as a difference to the atmospheric pressure, which is represented by the vertical line at $P = 0$. The residual volume corresponds to 0 % of the VC. Inspiration before playing corresponds to negative pressure values. The air flow used to produce the sounds is associated with a decrease of the chest volume at positive

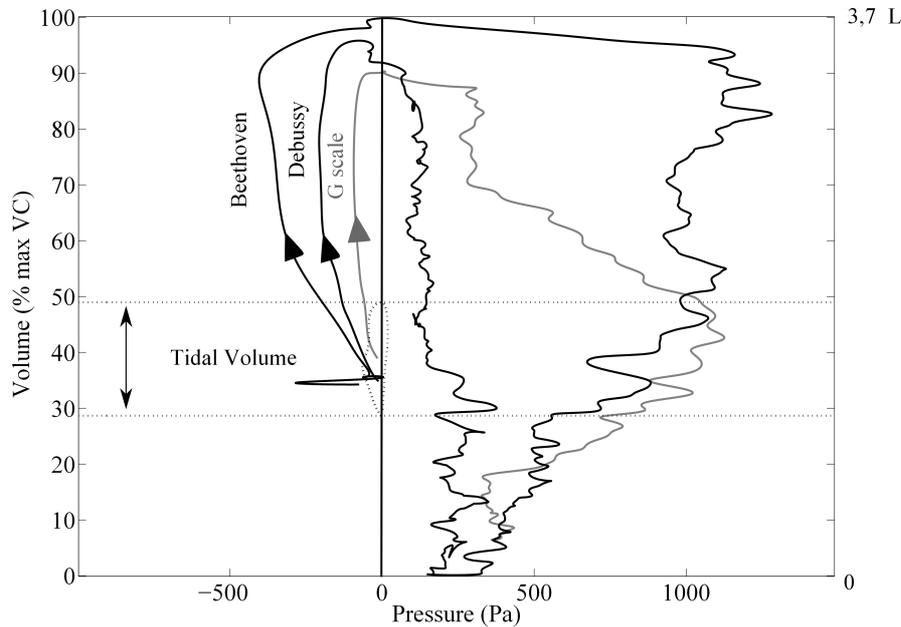


FIGURE 4.7 – Mouth pressure-chest volume curves for the three musical tasks. Horizontal dotted lines represent Tidal Volume and the dotted loop, an averaged cycle of quiet breathing.

mouth pressures. The other tracings end when the sound production ends. Note that the highest volume of air is taken for the Beethoven excerpt (approximately 100% of VC) and the lowest one, is for the G scale (around 90% of VC). The flautist uses almost all of her Vital Capacity for Beethoven and Debussy excerpts, while she uses 82% of her VC, from 90% to 8%, for the G scale. As for pressure variations, we note that the highest pressure is mobilized for the Beethoven excerpt, around 1000 Pa. The lowest ones are observed during Debussy excerpt, varying between approximately 200 Pa and 400 Pa.

4.5.2 Hydrodynamical and respiratory analysis

Hydrodynamical and respiratory data are synchronized and presented together. Figures 4.8, 4.9 and 4.10 show measurements of radiated sound, mouth pressure, opening area between the lips, distance of the lips to the labium, flow of the jet, total volume, muscular activation, Reynolds number and dimensionless velocity θ respectively for the G scale, the Debussy and the Beethoven.

G scale : Figure 4.8 shows that mouth pressure roughly follows pitch variations, particularly in the higher register (between the vertical lines 2 and 3). Indeed, pitch increases with a factor of 4, while mouth pressure increases by a factor of 3,6. When pitch decreases, mouth pressure decreases by the same factor. While pitch rises, the area between the lips decreases from 8 to 5mm^2 . We assume that this is done in order to keep low flow variations and prevent extreme increment of loudness in the high register. Mouth pressure (and therefore velocity) is almost constant between vertical lines 1 and 2, suggesting that the decrease of θ is mostly due to the

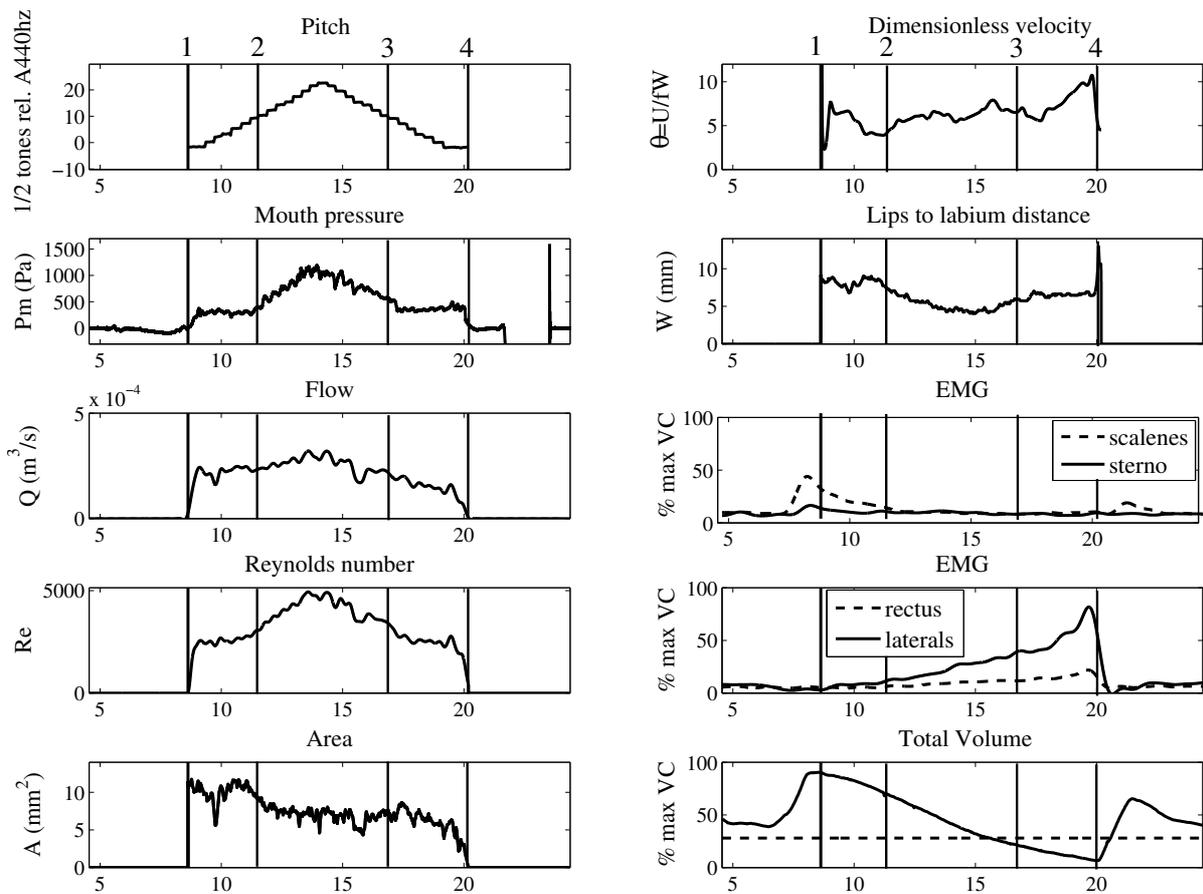


FIGURE 4.8 – Representation of pitch, hydrodynamical and respiratory parameters for the G scale. Left panels : pitch in semitones relative to A440Hz, mouth pressure P_m , flow Q , Reynolds number Re , area between the lips A . Right panels : dimensionless velocity θ , distance from the lips to the labium W , muscular activation of sternocleidomastoidians, scalenes, rectus abdominus and laterals, and total chest-wall volume in %VC. The vertical lines represent the beginning of sound production and the limits between each register. The dashed horizontal line on the total chest-wall volume plot indicates the FRC (Functional Residual Capacity).

stability of W and U , while the frequency increases. During the second octave (between vertical lines 2 and 3), θ stays relatively constant, the ratio U/f being compensated by a diminution of the labium distance W . Finally, between vertical lines 3 and 4, mouth pressure (and the velocity as well) is again kept relatively constant, suggesting that the increase of θ is due to the stability of W and U , while the pitch decreases. θ variations during G scale playing lie between 4 and 11. A similar behavior is observed between pitch variations and Reynolds number which increases by a 2.75 factor between 2500 and 5000 between lines 2 and 3. Please note that Reynolds number and flow Q follow similar paths.

Concerning muscular activation, Figure 4.8 shows that inspiratory and expiratory muscles are not activated at the same time during G scale playing ; indeed, the inspiratory muscles are activated before line 2 only while the expiratory ones are after line 2 only. Furthermore, at the end of the inspiration, the activation of the inspiratory muscles, the scalenes and sternocleido-

mastoidians, are respectively 40% and 12% of the maximal activation reached during a vital capacity manoeuvre.

Debussy excerpt : From Figure 4.9, we note that for the two first musical structures (bet-

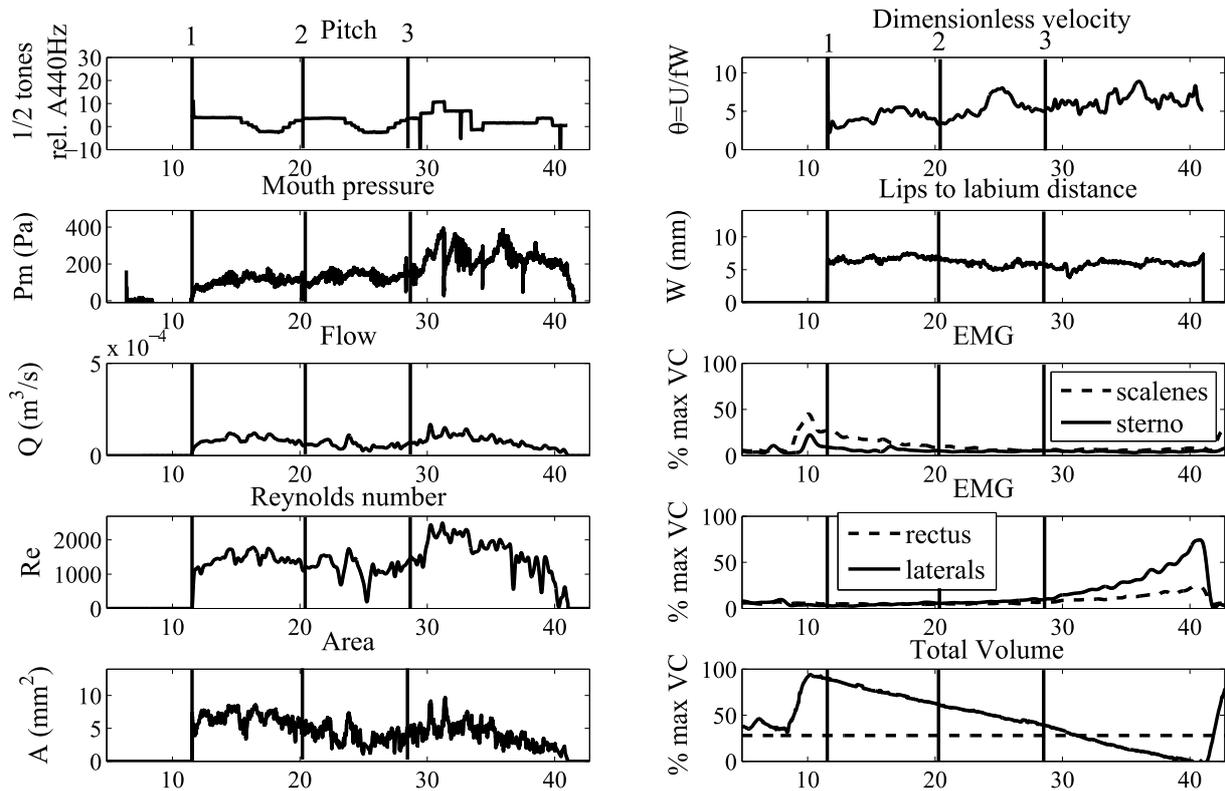


FIGURE 4.9 – Representation of pitch, hydrodynamical and respiratory parameters for Debussy excerpt. Left panels : pitch in semitones relative to A440Hz, mouth pressure P_m , flow Q , Reynolds number Re , area between the lips A . Right panels : dimensionless velocity θ , distance from the lips to the labium W , muscular activation of sternocleidomastoidians, scalenes, rectus abdominus and laterals and total chest-wall volume in % VC. Vertical line 1 represents the beginning of the sound production, vertical line 2, transition from the first musical structure to the second one and, line 3, transition from the second musical structure to the third one. The dashed horizontal line on the total chest-wall volume plot indicates the FRC (Functional Residual Capacity).

ween the vertical lines 1 and 3), mouth pressure remains almost constant but increases up to around 400 Pa for the last phrase (after line 3). At the end, mouth pressure seems to be higher than at the beginning although the melody occurs around similar pitches. The player seems to produce the indicated crescendo by increasing the dimensionless jet velocity rather than by increasing the air flow. Indeed, in order to play this long excerpt up to its end, the flautist seems to save air, as is clearly reflected in the flow data which is approximately 2.8 times smaller than the one used for the G scale. The crescendo-decrescendo (from 25s to 40s) is executed by modulating the area of the lips, thus the flow. Little variations (between 6 and 7.5 mm) are

observed on *W*. Reynolds number is also correlated with pitch at the end of the Debussy excerpt (mostly after the vertical line 3, Figure 4.9). When comparing the Reynolds number values between Debussy and the G scale, we note much smaller values in Debussy (between 1000 and 2200). These differences may result from the smaller values in lip area and hydraulic diameter *D*. The crescendo-decrescendo at the end is clearly reflected by this number. The fluctuations in dimensionless velocity (between 4 and 6) are smaller than those of the G scale, perhaps because of lower pressure and velocity.

Similarly to the G scale, muscle activation during Debussy switches from inspiratory to expiratory around line 2. However, the inspiratory muscle activation is more important than in the G scale (respectively 22% vs 12% of the maximal VC activation (% max VC) for the sternocleidomastoidians and 45 % vs 40 % max VC for the scalenes). This is directly correlated with the total air contained in the lungs at the end of the inspiration which is 90% of VC for the G scale and 95% for the Debussy excerpt but also to the length of the musical task. As mentioned before, the flautist uses almost all of her VC for Debussy excerpt, resulting in expiratory muscle activation respectively at 22% and 74% for the rectus and laterals. Even if close to all the VC air is used to play Debussy, the activation of the expiratory muscles is lower during playing than during the VC manoeuvre as the latter requires stronger expiratory muscle activation to fully expel air at a faster pace.

We also note that muscular activation is longer in the Debussy excerpt than during the scale : inspiratory muscles are activated about 10s during Debussy against 3s during the scale ; expiratory muscles, for 12s during Debussy against 8s for the scale. The control of the outgoing air volume, thus the air flow, results from the combined activation of the muscles in conjunction with the control of the opening area of the lips. Between lines 1 and 2, the contraction of the inspiratory muscles controls the flow of air going out ; between lines 2 and 3, no muscles are activated but we observe a decrease in the lip area that may help to control the air exhaust and thus the flow. Finally, after line 3, the exhalation is controlled by the expiratory muscles. After the 35th second, the decrescendo is performed by a decrease of the lip area and an increase of the expiratory muscle activation. This coaction allows the maintenance of a controlled low flow throughout the excerpt.

Beethoven excerpt : Mouth pressure at the beginning of the Beethoven excerpt is the same as that in the high register of the G scale. Indeed, the note is the same. In this excerpt, pitch decreases while mouth pressure also globally goes down. Tracings show fast pressure variations that are heard as vibrato. The strong decrescendo on the first note of the score is clearly reflected on the tracings which demonstrate the combined action of many of the parameters. Indeed, the area of the lips decreases by a factor of 2 in 1s and the flow by a 1.6 factor, while mouth pressure remains constant and the lips get closer to the labium by 1 mm. A fast relaxation of the inspiratory muscles (respectively from 64% to 8% and 57% to 15% for the scalenes and sternocleidomastoidians) results in a quick volume variation. The rest of the excerpt, a long decrescendo, shows that the flow decrease is controlled by an increase of the expiratory muscle activation and a decline of the lip area. The slight increase of the distance of the lips to the

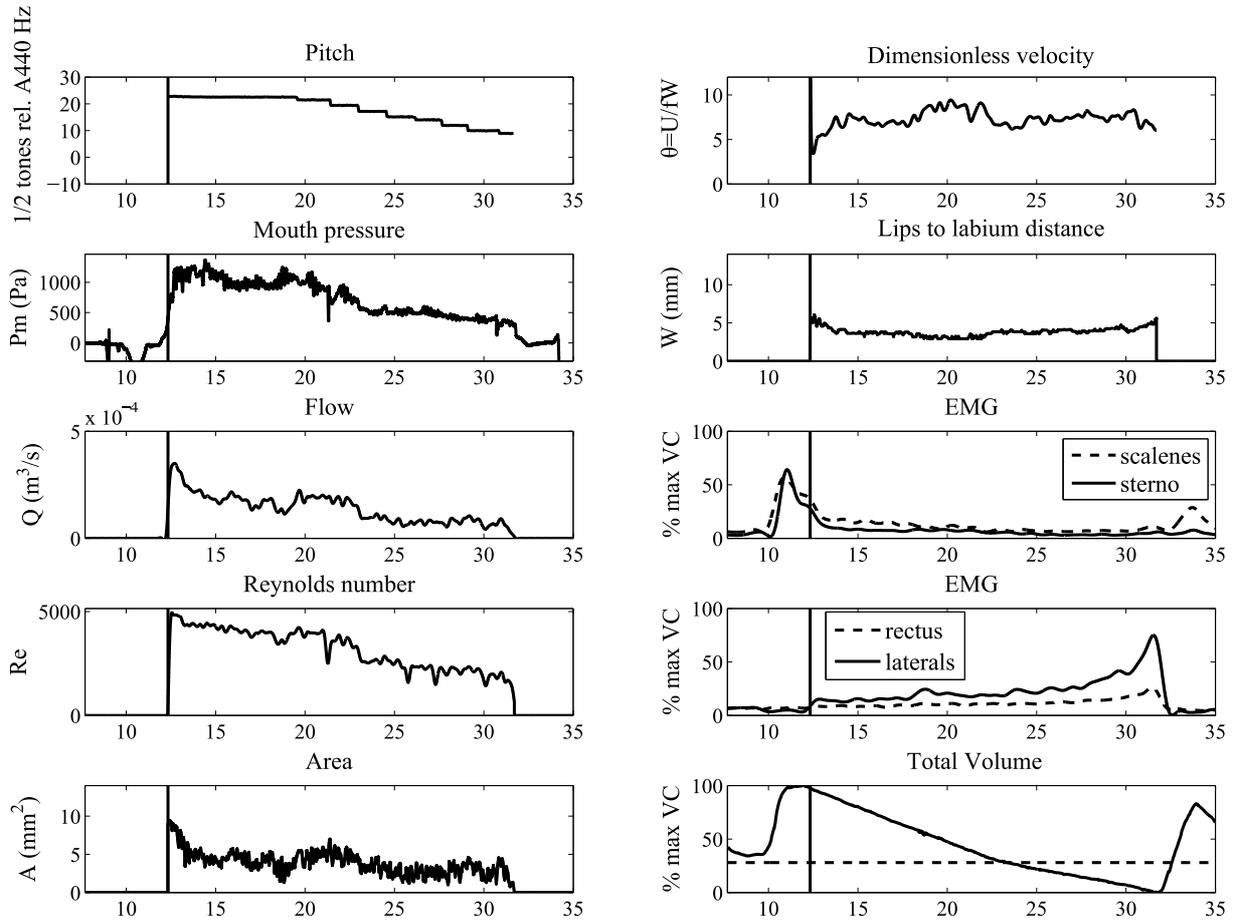


FIGURE 4.10 – Representation of pitch, hydrodynamical and respiratory parameters for Beethoven excerpt. Left panels : pitch in semitones relative to A440Hz, mouth pressure P_m , flow Q , Reynolds number Re , area between the lips A . Right panels : dimensionless velocity θ , distance from the lips to the labium W , muscular activation of sternocleidomastoidians, scalenes, rectus abdominus and laterals, and total chest-wall volume in %VC. The vertical line represents the beginning of sound production. The dashed horizontal line on the total chest-wall volume plot indicates the FRC (Functional Residual Capacity).

labium W may help to stay in tune despite the jet velocity and flow decays. The decrescendo and the decay of pitch and flow appear to be reflected in the Reynolds number. Once again, flow and Reynolds number appear to be strongly correlated. However, variations in dimensionless velocity are small (between 6 and 8).

Figure 4.10 shows a slight contraction of the expiratory muscles from the beginning of the excerpt. Indeed, the flautist needs to produce a high pressure to create the requested ff and may do this by creating a compression of the abdomen with the abdominal muscles. At the end of the excerpt, the flautist has used all of her Vital Capacity and activates her expiratory muscles at 26% for the rectus and 75% for the laterals.

Chest-wall compartment contributions :

A Konno-Mead diagram [78] shows the contribution of each chest-wall compartment during the inspiratory and expiratory phases. Figure 4.11 depicts the volume variations of the upper thorax compartment (V_{RCp}) against the variations of the abdominal compartment (V_{ab}) for the three musical tasks. The black circle represents the beginning of the inspirations, the crosses, the beginning of sound production for each excerpt, the arrows, the direction of the tracings and the gray line, the linear function corresponding to an equal contribution of each compartment.

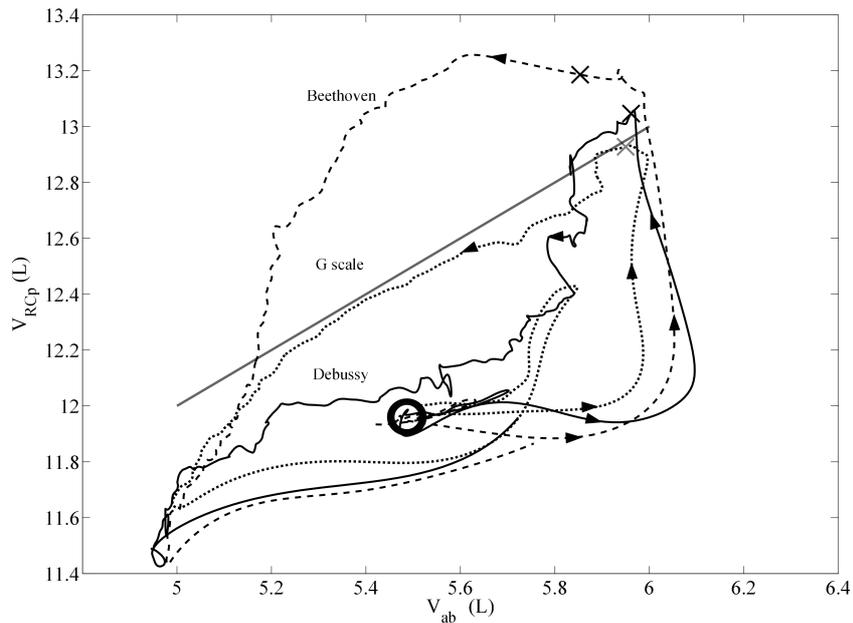


FIGURE 4.11 – Konno-Mead diagram for the three musical tasks : Debussy excerpt (dark line), Beethoven excerpt (dashed line) and G scale (dotted line). Volume variations of the upper thorax compartment (V_{RCp}) are shown against volume variations of the abdominal volume (V_{ab}). The gray line represents the slope for equal contributions of V_{RCp} and V_{ab} determined by the linear function : $V_{RCp} = V_{ab} + 7$.

Figure 4.11, inspiration occurs in two phases : first, the abdominal volume (V_{ab}) increases and, second, the chest-wall volume follows. Contrarily and as exemplified in Figure 4.11, the expiratory phase varies from one musical task to the other.

During the G scale, the contribution of each compartment is approximately equivalent, the expiration phase roughly follows a linear function.

The beginning of the Debussy excerpt (Figure 4.11) displays a higher diminution of the upper thorax compartment (from 13L to 12.2 L) than of the abdominal one (6L to 5.6L). This is shown by a steeper slope than the one of the linear function. For most of the rest of the excerpt, the contribution of these two compartments is approximately the same (the slope is close to 1).

Interestingly, during the first decrescendo of the Beethoven excerpt, the chest-wall volume continues to increase while the abdomen is decreasing. This is almost certainly due to the action of the expiratory muscles which are pushing and transferring pressure from the abdominal

compartment to the thoracic one by compressing forcefully the abdomen while the diaphragm is relaxed. This action compresses the chest-wall volume and helps increase the pressure in the lungs in order to produce the required pressure to play the high *ff* note. During the following decrescendo, the slope is slightly more important than the linear function especially in the V_{RCp} , suggesting that it is produced by a major decrease in the upper thorax volume.

4.6 Discussion

4.6.1 Comparison between previous studies and our results

We compare the analysis of our data for each excerpt with results from previous publications by de la Cuadra [41], Fletcher [57], Cossette [38, 39, 40], and Montgermont [95].

Two octave diatonic scale :

Cossette's [40] and de la Cuadra's [41], show that mouth pressure increases with frequency, when ascending diatonic scales are played at constant dynamic. Our results show that pitch increases by a factor of 4, while mouth pressure increases by a factor of 3,6 while playing a G scale. These ratios are slightly higher than the ones of de la Cuadra [41] who shows that mouth pressure increases by a factor 2 over a diatonic scale, while frequency increases by a factor of 3, which is equivalent to a factor of 1.4 for the jet velocity U . Furthermore, these ratios seem to be in the same order of magnitude than those of Cossette's study : mouth pressure increases by a factor of 3.3, while pitch increases by a factor of 4. Interestingly, our measurements show that the relation between mouth pressure and frequency is not linear over the two octaves as, during the first octave, mouth pressure remains stable. Montgermont [95] also discusses the dependence of mouth pressure on dynamics : when going from *pp* to *mf* and from *mf* to *ff*, P_m increases by 100 Pa. As also noted by Montgermont [95], flute players may use different strategies to balance jet velocity and jet length. The dimensionless jet velocity θ allows a comparison of the different strategies used by players. Total jet flow Q is also related to the players' strategy. While dimensionless jet velocity θ is related to the over/under playing of a frequency regime as well as to the harmonic development of a tone, jet flow is related to the acoustical power of a sound. The player can therefore control the complementary aspects of loudness separately : the harmonic richness and the acoustical power of sound. As observed in our results, de la Cuadra [41] and Cossette [40] note that an increment in jet velocity seems to be compensated by a decrease of the lip hole area A which may result in a decrease of jet flow Q . This may help to prevent an increment of loudness in the higher register. De la Cuadra reports a range of flow between 100mL/s to 400mL/s, which is a little higher than the values reported here. For an ascending diatonic scale (always by a factor of 3 for the frequency), de la Cuadra [41] shows that jet length W decreases by a factor of 1.8 while Montgermont [95] shows variations of W from 8 mm to 4 mm, as observed during our second octave. According to Montgermont [95], dimensionless velocity θ should be around 7 for optimal phase oscillation (comfortable playing zone). Furthermore, values between 7 and 17 help to produce more energy on the higher harmonics. Additionally, our measurements show similar pattern of the dimensionless velocity as the one observed by Cossette [40]. Indeed during an ascending scale, θ decreases with frequency for the first octave

and is kept stable for the second one. At last, our results show similar variations of dimensionless velocity to Cossette's work [40], in fact θ evolves between 4 and 15 for the two diatonic scales. De la Cuadra [41] shows that Reynolds number increases with frequency and dynamic from 1000 to 3500 during a diatonic scale (less than two octaves). (In de la Cuadra's study, Reynolds number is expressed as Uh/ν and not with D). For a two octave scale, our results report a Reynolds number between 2000 and 5500 and suggest that Reynolds number is correlated with flow. The muscular activation we found is consistent with Cossette's observations [40] during a scale. Effectively, Figure 4.8 shows that the inspiratory muscles are activated during expiration and then switch to expiratory muscle contraction. In Cossette's study [40], the flautist plays the entire two octaves ascending diatonic D scale over the Functional Residual Capacity. In our study, the flautist plays an ascending and descending G diatonic scale within a breath, approximately at the same tempo, which requires her to use more air as the scale contains twice more notes and lasts twice longer. Furthermore, Cossette's flautist [40] has a VC of 5,6 L while ours has a 3,7 L VC. As a result, our flautist uses a higher percentage of her air vital capacity, probably because of her lower vital capacity.

Debussy Prélude à l'après-midi d'un faune :

As explained previously, this piece does not require a high dynamic or intensity but air requirement is high as the first phrase is very long and ends with a crescendo-decrescendo. As this excerpt is in the first octave of the precedent scale in a *pp* dynamic, mouth pressure is in the same range and reflects the frequency variations. Cossette [40] observes mouth pressure variations between 250 and 700 Pa; for the last phrase, our values are somewhat lower. As observed by Cossette, the crescendo-decrescendo in the last part of the solo is performed by modulating the area of the lips. Again, as our flautist has a smaller Vital Capacity than the one in Cossette's study, she saves air and produces lower pressures and air velocity than the flautist in Cossette's study. The little variations observed on W , between 6 and 7.5 mm, are in the same order of magnitude as the ones in Cossette's study, which are between 4.5 and 5.5 mm. In that study, dimensionless velocity θ shows the musical structure. Indeed, the three slurs are clearly distinguishable, however θ values are lower in our study than in Cossette's (respectively between 4 and 8, and between 7 and 13). This may be a direct consequence of a lower velocity. Similarly to the G scale and to Cossette's study, the inspiratory and expiratory muscle activations do not overlap during Debussy and the switch occurs at the FRC of the abdominal volume. However, the activation of the sternocleidomastoidian muscles is more important than the activation reported by Cossette, 22 % against 7%. On the contrary, the scalene activation is less important in our study : 45 % against 80%. The two subjects use their inspiratory muscles differently. This is also in accordance to other findings from Cossette [39] which demonstrate that some flautists recruit more their sternocleidomastoidians and other flautists, more their scalenes. Moreover, our flute player activates her expiratory muscles at a much greater level (22% and 74% respectively for the rectus and laterals) than the one reported in the previous study [40] (5 % for both muscles). Once again, it should be correlated with the vital capacity of the two flautists and the pulmonary volume at which they are playing. Furthermore, our results are more correlated with

Cossette's study [39], which shows expiratory muscles activation between 40 and 100%. This activity increases with the decrease of the air volume. Finally, our results show that flow and modulation of the exit of air may be controlled by the contraction of the inspiratory muscles, by the slow action of the expiratory muscles or by a reduction of the lips area when the muscles are not activated.

Beethoven Leonore Overture :

Leonore Overture is also a slow and long piece but, in contrast to the Debussy excerpt, it requires more intensity and is played at a higher pitch. With these requirements, it is consistent that mouth pressure and jet velocity are in the same range as for the top range of the scale. On a sustained note with decrescendo, de la Cuadra [41] observes significant decreases in flow, in Reynolds number, and in the lip area measurements. Our results show the same trend. The values decrease slowly with the decrescendo until the end of the phrase. Flow is in the range of the one observed by de la Cuadra, between 1.10^{-4} and 4.10^{-4} m³/s. Please note that during this decrescendo, tracings show a fast relaxation of the inspiratory muscles and an increasing contraction of the expiratory muscles. Mouth pressure is compensated by slightly adjusting the jet length W to keep θ almost constant and, as discussed by de la Cuadra [41], θ remains almost stable around 7. Reynolds number values correspond to those in the high register of the diatonic scale and are also correlated with flow. Contrarily to the other excerpts, the activations of the inspiratory and expiratory muscles are superimposed from the beginning of the excerpt. Cossette [38] shows that to play in the high register, the expiratory activity is increased in order to compress the lung volume and increase the pressure. Furthermore, by contracting, the expiratory muscles push the diaphragm up (if relaxed), and create a transfer of pressure from the abdomen to the chest-wall cavities.

Finally, three different motions of the rib cage are distinguished during the expiration of the three excerpts. Interestingly, Cossette [38] found three patterns similar to these during sustained tones, but in three distinct flautists.

4.6.2 Proposal of a model based on observations

Previous studies [95, 33, 38, 40, 67] show different analyses of the respiratory and/or hydrodynamical parameters; however, the protocols of those studies do not include the simultaneous measurements of the various parameters. In this section, we aim to develop a model that highlights the player's breathing strategy for the different musical tasks performed. Based on the simultaneous observations of the parameters gathered through the study, we wish to establish a model that will let us infer the muscular activities from the blowing pressure and the pulmonary volume. The model requires that we 1) estimate the position of the diaphragm in order to analyze and understand the variations of the three compartments; 2) identify the constant volume which corresponds to the viscera; and finally, 3) determine the actual pulmonary volume used by the flautist.

Identification of the diaphragm position According to Aliverti’s findings [6], the diaphragm position can be approximated by observing the abdominal volume. In order to illustrate our model, we first focus on the G scale, a simple task that does not require any special effort. Figure 4.12 shows the detected pitch, the activation of the respiratory muscles (in % the maximum activity during VC) and the abdominal volume (V_{ab}). Figures 4.8 and 4.12 show that

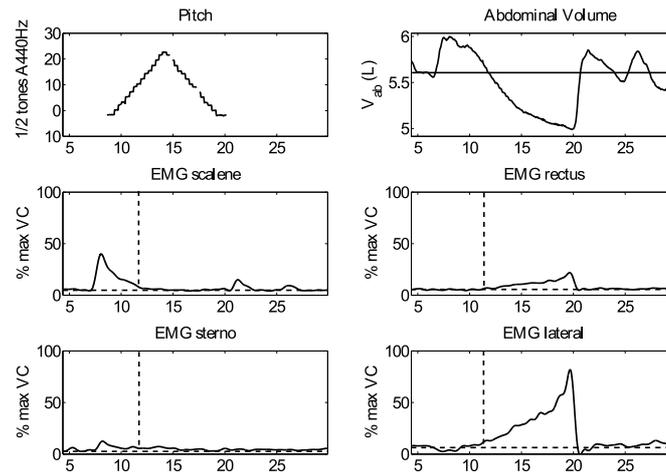


FIGURE 4.12 – G scale. Detected pitch (semitones relative to A440Hz), EMG scalenes, EMG sternocleidomastoidians, abdominal volume (% max VC), EMG rectus and EMG lateral abdominals. The dashed vertical line shows the switch between inspiratory and expiratory muscular activations.

expiration splits in two phases during the G scale. First, from the beginning up to around 8.5 s to 12s, the inspiratory muscles contract, holds the elastic recoil of the respiratory system and slows down the expiration. Secondly, after 12s (dashed vertical line), the inspiratory contraction switches to an expiratory one. This switch corresponds to the transition of the abdominal volume from above to under FRC. By looking into the axial distance of the abdominal volume at the xyphoidal transverse plane, Aliverti [6] showed that, under conditions of quiet breathing and exercise, with and without expiratory flow limitation, instantaneous D_{ap} (antero-posterior V_{ab} distance at the diaphragm level) can be approximately estimated from V_{ab} . At the abdominal resting volume when all muscles are relaxed, the diaphragm is in its resting position (cupola). When there is no antagonist muscle contraction, we can assume that the abdominal volume at the FRC corresponds to the incompressible volume of the viscera and that, at this time, the position of the diaphragm is roughly at the delimitation between the V_{ab} and the V_{RCa} . Finally, when V_{ab} is higher than the resting volume, the diaphragm is lower than its resting position and conversely. We propose a division of the thorax into two compartments separated by the diaphragm : the viscera volume (assumed to be incompressible) and the chest-wall volume.

Presentation of the model Figure 4.13 depicts the proposed model of the flautist’s thorax with the two principal compartments : the viscera volume and the chest-wall volume. Figure

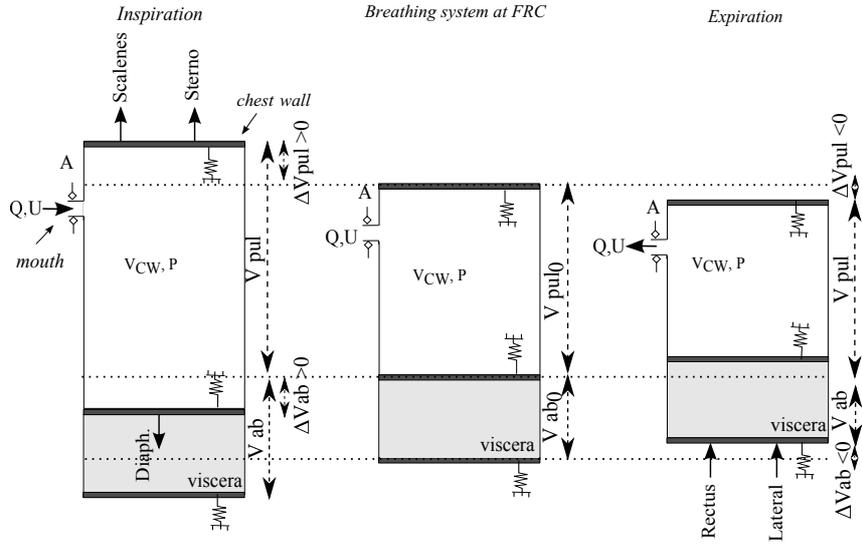


FIGURE 4.13 – Model of the flautist’s thorax and mouth at different respiratory volumes : at FRC (centre), and at pulmonary volumes above FRC (left) and under FRC (right). The gray block corresponds to the incompressible volume of the viscera, and the white block corresponds to the chest-wall cavity volume, above the diaphragm. The dotted lines represent the boundaries of FRC for both compartments. Arrows indicate the direction of the force applied by inspiratory and expiratory muscles.

4.13, the respiratory system of the player is represented as a cylinder with moving pistons. Note that the mouth is represented by an opening on the thorax compartments, which is adjustable with the lip area A . This one also controls flow Q from the jet velocity U . The air duct being narrowed at the lips, the pressure into the lungs is assumed to be equal to mouth pressure. During inspiration (left), the flautist contracts inspiratory muscles (e.g. diaphragm, scalenes, sternocleidomastoidians) which increases the chest-wall cavity. On the contrary, below FRC (right), the flute player contracts expiratory muscles, (e.g. rectus and lateral abdominals) to force the air out. Although they are important actors in respiration, intercostal muscles are sometimes associated to inspiration and other times to expiration, [48, 49]. In addition, as their complexity and location makes it difficult to measure their activation with surface EMG, we did not include them in our study. The viscera block shows the incompressible volume of the viscera and the chest-wall block constitutes the volume above the diaphragm. In Figure 4.13 :

- V_{ab} represents the measured abdominal volume
- V_{pul} is the sum of the measured V_{RCp} and V_{RCa} volumes, shown in Figure 4.6.

At rest, V_{AB} and V_{pul} respectively become V_{AB_0} and V_{pul_0} , and the viscera volume is equal to V_{AB_0} . The volume above the diaphragm, without the viscera volume, can then be expressed according to the measured parameters :

$$V_{CW} = V_{pul_0} + \Delta V_{pul} + \Delta V_{ab} \quad (4.5)$$

where the sign of ΔV_{pul} and ΔV_{ab} is positive above abdominal FRC and negative under abdominal FRC. Furthermore, $V_{CW_{max}} - V_{CW_{min}} = VC$ (Vital Capacity). One of the key points that link this model to the measurements in the previous sections is that the volumes are measured using reflectors at fixed positions on the skin while the volumes in the model are moving following the diaphragm motion and thus V_{CW} only represents the air volume variations.

Minimal effort curve In Figure 4.14, a curve, made of mouth pressure and chest volume measured when the active forces are zero (no muscular activity), is fitted to our measurements. This curve, that we call the minimal effort curve, is an interpolation between points of minimal muscular activity. Therefore, it is different from the relaxation curve of Figure 4.2 but may provide relevant information on the respiratory system during playing. A minimal effort condition appears only once in each of the measurements we conducted. For example, the minimal active force in the G scale occurs at the time indicated by the vertical dashed line on Figure 4.12. On the mouth pressure-chest volume diagram for the three musical tasks (Figure 4.14), each point of “no active force” is represented by a cross. The model is fitted to the experimental data through four points (crosses). The minimal effort curve is represented by the dashed-line.

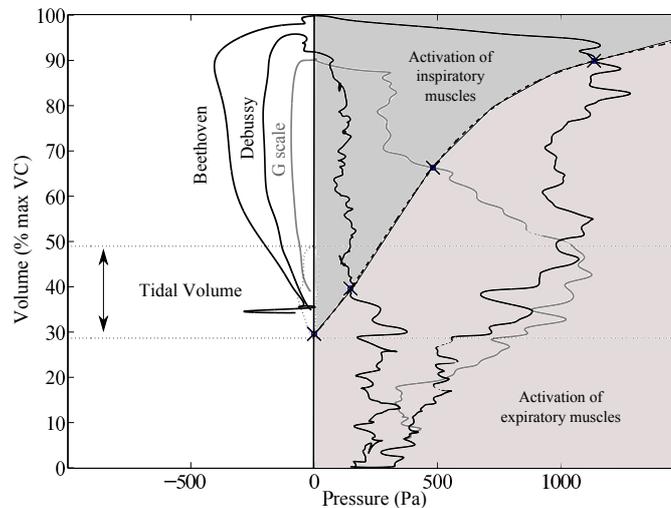


FIGURE 4.14 – Mouth pressure - chest volume curves for the three musical tasks. Dashed-curve represents the minimum effort curve interpolated from FRC and minimal effort zones (crosses). Tidal volume is indicated by horizontal dash lines and the quiet breathing loop.

The model, which is based on the pressures developed by muscle activation, shows that mouth pressures above the minimal effort curve require the activation of inspiratory muscles, while the ones below the static curve entail the contraction of the expiratory muscles. This means that above the curve, exhalation is at least partly controlled by the inspiratory muscles while, under the curve, abdominal muscles are the main agonists.

Figure 4.14 shows two distinct expiratory zones : the upper dark area which corresponds to the inspiratory effort produced to slow down the expiration ; and the lower gray area which shows

the effort produced by the expiratory muscles to push the air out. This model allows us to predict the muscular efforts that the flautist must produce for a given pressure and volume. The muscular actions and volume variations observed during the G scale and Debussy excerpt fit well with this model. However, the scenario is slightly different during the Beethoven excerpt. Indeed, the first *ff* note in the high register requires the flautist to increase the pressure by compressing the volume with the expiratory muscles at the beginning. The expiratory muscles are thus activated before the abdominal volume returns to FRC. However this area of muscular coaction is very restricted, thus the point of minimal effort can be assumed as the point where the muscular activity (inspiratory and expiratory) is minimal.

4.7 Conclusions and perspectives

A combined experimental set-up was used in order to have persistent data of the respiratory and hydrodynamical parameters of a flautist's performance. The data analysis provides information on the fine control required to play three musical tasks and shows how the flautist needs to adapt the control parameters to perform different musical complexities. Indeed, a long musical excerpt requires the flautist to take a high volume of air, then to adapt mouth pressure and other parameters to the dynamic and the specific demands of the musical task. Furthermore, a highly precise control of flow, directly correlated to the dynamic level, is required. During playing, flow control may be performed by the lip area to regulate dynamic variations as at the beginning of the Beethoven excerpt, but also by the respiratory muscles as in the Debussy excerpt. This phenomenon indicates and confirms that a strong coordination between the control at the lips and by the respiratory system of the flautist is necessary. Our results are in accordance with previous studies by Cossette [38, 39, 40], de la Cuadra [41] and Montgermont [95]. Furthermore, our measurements and analyses allowed us to provide a simplified model which links air volume and mouth pressure to muscular activation. The duration and the tempo of a musical task inform us on the air volume required, and when combined with mouth pressure, our model allows us to estimate the muscular activation (inspiratory or expiratory) of musical tasks such as a G scale and the Debussy excerpt. Even in the cases of more complex excerpts which require muscular co-activation to produce high pressure as in the Beethoven, our model provides the necessary elements to obtain a global view of the muscular activations. The concept of the minimal effort curve provides information on when inspiratory and/or expiratory muscles are activated and which muscles need to be recruited to obtain the required pressure and volume. Finally, this study described the fine control of the flautist's coordination during complex musical tasks, highlighting how respiratory and hydrodynamical control parameters are associated with the musical tasks.

A simplified model of the respiratory mechanics has been developed. Nevertheless, the activity of one of the most important respiratory muscles, the diaphragm, not monitored in the present study, was only deduced from the volume observations. Monitoring the diaphragmatic activity [2] would allow us to verify and further develop our model. The lip action, which was related to the control of flow, could be analysed more precisely by measuring facial muscle activation with

electromyography. Our model was developed after observing one player only. This simplified model of the respiratory mechanics can now be used to compare different players and highlight the various strategies they have developed to play complex musical tasks.

Acknowledgement

The authors are grateful to Thomas Similowski for fruitful and stimulating discussions.

Comment estimer l'activité du diaphragme et l'effort respiratoire ?

Avant-propos : L'objectif de la suite du travail est de poursuivre celui effectué au chapitre 4, afin d'obtenir une description plus fine des stratégies respiratoires développées par le flûtiste dans un contexte musical. Pour ce faire, dans un premier temps, notre but est d'obtenir une estimation de l'activité du diaphragme plus fiable que le modèle décrit dans le chapitre 4. En effet, le diaphragme étant le muscle principal de la respiration, l'estimation de son activité paraît primordiale. Dans un second temps, nous cherchons une manière d'estimer les efforts respiratoires effectués par le musicien pendant le jeu. Nous allons alors montrer comment à partir de mesures de pression, nous pouvons estimer ces différents éléments de la respiration.

5.1 Estimation de l'activité du diaphragme

Comme expliqué en Annexe, le diaphragme constitue le muscle principal de la respiration, dans la phase d'inspiration il joue le rôle d'une pompe, favorisant l'expansion des poumons en s'aplatissant. Pouvoir estimer son activité durant le jeu d'instruments à vent est donc essentiel.

L'enregistrement de l'activité électrique du muscle diaphragmatique est ancien, comme en témoigne les travaux d'Agostoni en 1960, [4]. Cet enregistrement permet une évaluation électrique de l'activation du diaphragme et du nerf phrénique (Les nerfs phréniques naissent dans la région cervicale, entre les troisième et cinquième segments médullaires cervicaux. Ils descendent dans le thorax et assurent l'innervation de la plèvre médiastinale et du péricarde. Ils finissent sur le diaphragme, assurant son innervation sensitive (faible) et motrice, permettant sa contraction et son relâchement, mouvement essentiel à la respiration). Cet activité électrique diaphragmatique peut se mesurer par trois méthodes : des électrodes de surface, ou intramusculaire (petite aiguille plantée dans le muscle entre les côtes et la voie oesophagienne), ou encore via une électrode dans un cathéter gastrique, [117]. Cependant, l'enregistrement de l'activité électrique du muscle diaphragmatique et le traitement de signal associé sont complexes du fait de la contamination possible du signal par la contraction synchrone de muscles voisins, intercostaux, abdominaux ou plexus brachial, [117]. De plus, l'activité électrique cardiaque peut également bruyier le signal, [12], ou des problèmes de mobilité de la source électrique par rapport au capteur, ou de péristaltisme oesophagien (contraction musculaire permettant la progression d'un aliment dans la voie oesophagienne), ... [86] peuvent fausser l'analyse.

Mesurer l'activité électrique soit par EMGs de surface ou intramusculaire ou encore par la voie oesophagienne ne semble pas être la technique la plus simple ni efficace. Une autre façon d'estimer l'activité du diaphragme comme montrée par les travaux de Miller, ou Laporta, [93, 79], consiste à mesurer la pression transdiaphragmatique, c'est-à-dire à mesurer la différence de pression de part et d'autre du diaphragme. Le muscle diaphragmatique, dans sa partie supérieure est en contact direct avec la plèvre diaphragmatique, la pression de celle-ci est directement mesurable seulement en plaçant un cathéter dans cet espace pleural, [14], ce qui n'est pas possible dans notre cas. Seulement, la pression dans le tiers inférieur de l'oesophage est très proche de celle de la plèvre, [14], de plus il est plus aisé de mesurer celle-ci dans le conduit oesophagien. Le diaphragme dans sa partie inférieure est en contact direct avec la cavité abdominale et les organes digestifs qu'elle contient. L'organe le plus proche et le plus accessible étant l'estomac, la pression sous-diaphragmatique est donc mesurable dans l'estomac.

Par ces deux mesures de pression, P_{oes} et P_{gas} , respectivement pressions oesophagienne et gastriques, schématisées en figure 5.1, nous pouvons estimer la pression trans-diaphragmatique P_{di} :

$$P_{di} = P_{gas} - P_{oes} \quad (5.1)$$

et ainsi obtenir une estimation de l'activité du diaphragme ; puisque le diaphragme, en se contractant et en s'aplatissant, va compresser l'estomac et donc augmenter sa pression interne, son action va favoriser l'expansion des poumons en faisant chuter la pression pleurale et donc oesophagienne. Une augmentation de la pression trans-diaphragmatique par rapport à sa valeur de repos indique alors, lors de l'inspiration, une activation du diaphragme.

Des erreurs lors de l'estimation de l'activité du diaphragme par cette méthode peuvent apparaître, notamment lors de péristaltisme oesophagien, l'oesophage se contractant, la pression oesophagienne croît et ne fournit pas une bonne estimation de la pression pleurale. D'autre part, lorsque les muscles expirateurs de l'abdomen sont compressés de manière très importante et que le volume est bas dans l'échelle de la capacité vitale, ceux-ci compressent alors l'abdomen faisant remonter le diaphragme dans la cage thoracique ; poussant alors le muscle dans les limites de son élasticité. Les fibres du diaphragme (et non son action) résistent alors à l'action des abdominaux, compressant alors l'estomac, faisant monter la pression gastrique. L'augmentation de la pression trans-diaphragmatique visible en expiration lorsque le volume d'air est très faible n'est donc pas due à l'action directe du diaphragme. Cependant, on s'attend à ce que le diaphragme ne soit plus actif en toute fin d'expiration forcée, ce qui rend alors distinguable une augmentation de la pression trans-diaphragmatique due à l'action du diaphragme ou à une grande activité des muscles abdominaux. En effet, l'action simultanée du diaphragme et des muscles abdominaux est uniquement utilisée lors de la détresse respiratoire intense, ou lors de manœuvres d'expulsion, [62].

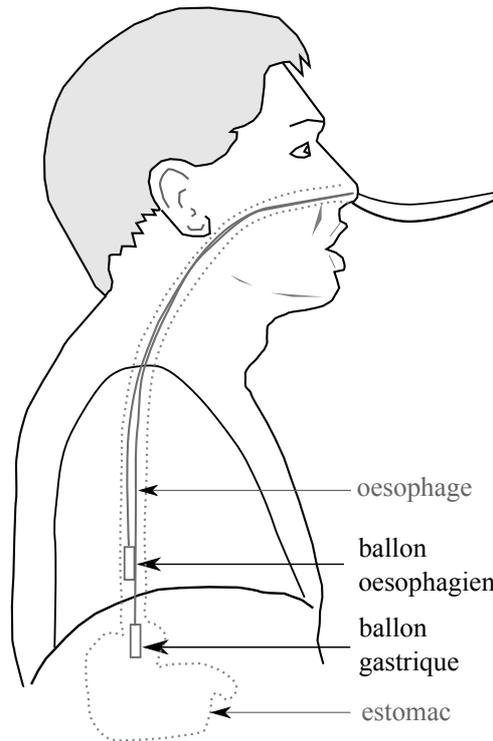


FIGURE 5.1 – Représentation schématique du placement des cathéter-ballons permettant l'acquisition des pressions œsophagienne et gastrique, figure adaptée de [14, 79].

5.2 Estimation de l'effort musculaire respiratoire

5.2.1 Estimation des travaux et puissances musculaires

Nous nous intéressons maintenant aux efforts fournis par les muscles sollicités durant la respiration, d'une part les muscles inspireurs et d'autre part les muscles expirateurs. Les mesures de pressions œsophagienne et gastrique subissent respectivement les mêmes variations que les pressions pleurales et abdominales. Leurs mesures à différents volumes, en état de relaxation permettent d'obtenir les courbes pression-volume statiques des espaces pleuraux et abdominaux, c'est-à-dire les courbes de relaxation de chacun de ces espaces, voir Annexe. Ces courbes indiquant les pressions développées dans chaque espace par les forces passives à différents volumes, tout écart à ces courbes résulte d'une activité musculaire.

Comme expliqué par Benditt, Campbell et Loring, [14, 27, 2], le travail respiratoire, W est défini de façon générale, lors de variations de volumes V et pressions P , par :

$$W = \int_0^V P dV \quad (5.2)$$

correspondant alors à l'intégrale de la pression sur une variation de volume donnée. Dans un plan (V,P), dans lequel serait représenté la courbe de relaxation du système et la courbe des variations de pressions effectuées aux volumes donnés, le travail correspond alors à la surface entre la courbe des pressions développées et celle de la relaxation.

Le travail est alors exprimé en $Pa.m^3$, soit des Joules. Un Joule correspond au travail obtenu lorsqu’une variation de pression de 1000 Pa est appliquée à 1L de gaz. Le travail fourni par les muscles peut alors être résistif, inspiratoire ou expiratoire, comme l’explique Campbell [27]. A partir des mesures de pression pleurale et abdominale, nous verrons par la suite comment les efforts peuvent être calculés selon leur localisation et fonction.

Le travail fournit alors une intégrale de l’estimation de l’effort fourni sur une variation de volume donnée, on obtient une estimation globale de cet effort. Pour obtenir une information instantanée sur la production de cet effort, nous devons nous intéresser aux puissances développées par les muscles. En effet, la notion de puissance correspond à une quantité d’énergie par unité de temps, soit en d’autres termes des Joules par seconde, celle-ci est plus communément exprimée en Watts.

La puissance \mathcal{P} fournie par un système à variations de pression et volume peut être définie sous la forme :

$$\mathcal{P} = P.Q \quad (5.3)$$

où Q est le débit produit par les variations de volumes, $Q = dV/dt$. Cette puissance permet alors d’obtenir une information instantanée sur les efforts produits par les muscles.

Nous décrivons ensuite les différents travaux et puissances associés aux efforts musculaires.

5.2.2 Détermination des efforts respiratoires

Les efforts fournis par les différents muscles durant l’inspiration ou l’expiration sont définis relativement à la courbe de relaxation pression-volume, correspondante aux variations de pressions induites par les forces passives (élasticité, gravité,...) à différents volumes du système. Nous expliquons, dans un premier temps, en nous appuyant sur un exemple, comment cette courbe de relaxation est construite. Dans un second temps, nous présentons brièvement les efforts musculaires sous forme de travail à l’inspiration et à l’expiration.

La courbe de relaxation

La courbe de relaxation est une relation entre la pression et le volume lorsque les muscles respiratoires sont complètement relâchés. Dans l’objectif de déterminer les courbes de relaxation des compartiments de la cage thoracique pulmonaire (par la mesure de la pression oesophagienne) et celle du compartiment de l’abdomen (par la mesure de la pression gastrique), il est demandé au sujet d’effectuer une manoeuvre de relaxation. Pour ce faire, le sujet respire dans une valve à trois positions (ouverte, fermée, résistance au débit) par la bouche, le nez étant fermé à l’aide d’une pince nasale. La manoeuvre consiste à inspirer jusqu’à ce que la Capacité Pulmonaire Totale (TLC) soit atteinte, à relâcher tous les muscles sans que l’air ne sorte (contre la valve fermée), puis à laisser aller l’air, sans contracter les muscles, contre la valve ouverte avec résistance jusqu’au volume de repos (FRC), comme montré en figure 5.2. Sur la figure 5.2, la ligne verticale

représente l'ouverture de la valve et donc le début de l'expiration. Le sujet présenté ici est une femme ayant une capacité vitale de 4.2 L.

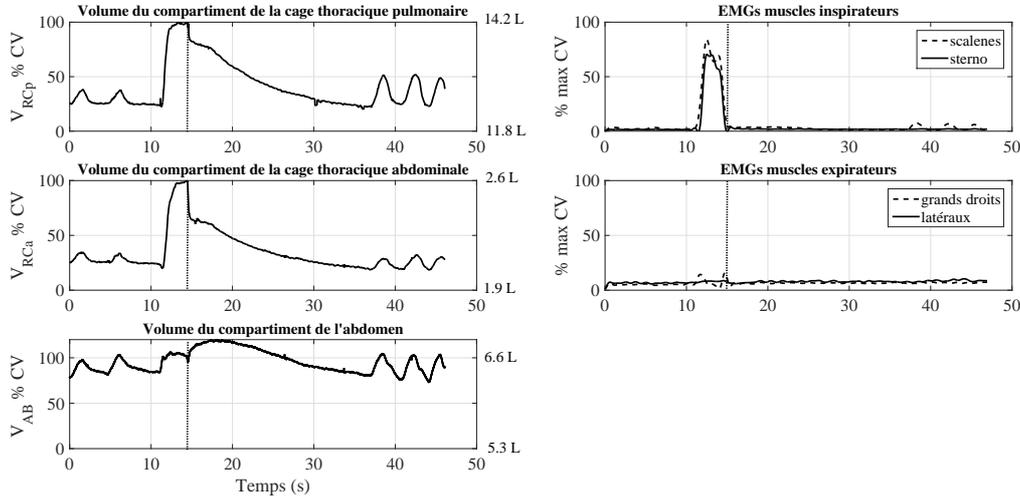


FIGURE 5.2 – Figure représentant les tracés des différents volumes et activités musculaires durant la manœuvre de relaxation. La ligne verticale représente l'ouverture de la valve.

Courbe de relaxation de la cage thoracique pulmonaire : La manœuvre semble bien réussie lorsqu'aucune activité EMG n'apparaît durant la phase d'expiration, [109]. La courbe de relaxation de la cage thoracique pulmonaire est estimée à partir de la phase d'expiration de la manœuvre de relaxation, [7]. Une interpolation polynomiale de second ordre est alors appliquée dans le plan (P_{oes}, V_{RCp}) , sur la phase d'expiration, voir figure 5.3. L'expression analytique de la courbe de relaxation de la cage thoracique pulmonaire est alors écrite comme suit :

$$V_{RCp_{relax}} = \alpha P_{oes_{relax}}^2 + \beta P_{oes_{relax}} + \gamma \quad (5.4)$$

où α , β et γ sont les trois coefficients ajustés à partir de la régression au second ordre.

Enfin, cette régression polynomiale est extrapolée sur toute la capacité vitale.

Courbe de relaxation de l'abdomen : Le sujet n'ayant pas la même posture pendant la manœuvre de relaxation et le jeu de la flûte, la cage abdominale étant certainement plus tendue lors du jeu de la flûte pour le maintien de l'instrument (bras levés), il nous est impossible d'utiliser les données provenant de la manœuvre de relaxation pour en déduire la courbe de relaxation abdominale. La courbe de relaxation du compartiment de l'abdomen est alors calculée à partir d'un segment de respiration au repos (en effet la respiration de repos est réalisée par la seule action des muscles inspirateurs durant l'inspiration et les muscles abdominaux ne sont pas actifs durant l'expiration). En suivant la procédure proposée dans [7], la courbe de relaxation est alors estimée de la manière suivante, voir figure 5.4 :

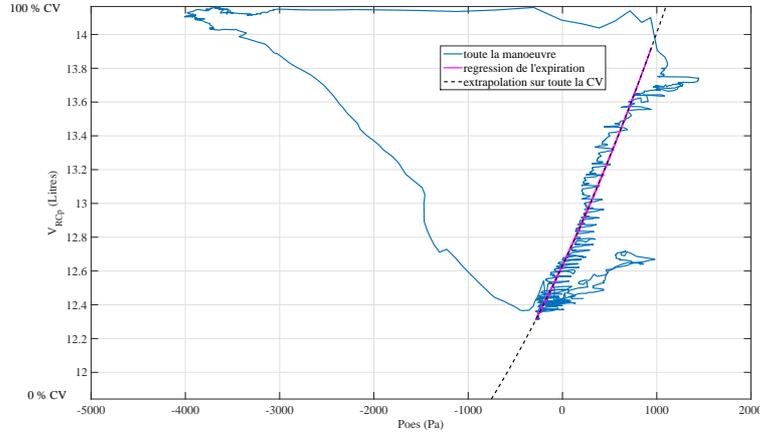


FIGURE 5.3 – Figure représentant la courbe de la manoeuvre relaxation, la régression faite sur l'expiration et l'extrapolation de celle-ci sur toute la capacité vitale dans le plan P_{oes}, V_{RCp} .

- Ré-échantillonnage des 6 cycles de respiration de repos sur une même échelle temporelle (ces cycles sont choisis pour leur répétabilité)
- moyennage sur les 6 cycles
- interpolation linéaire de la phase d'expiration dans le plan $\log(P_{gas}), V_{AB}$

Comme le sujet change légèrement de position entre chaque exercice musical, la courbe de relaxation calculée durant la respiration de repos est alors comparée à celle calculée au repos demandé avant chaque exercice. Si un décalage est notable, la courbe de relaxation est alors ajustée à un point de fin d'expiration extrait d'une respiration de repos avant le jeu, [58]. En notant $(P_{gas,ref}, V_{ab,ref})$ les coordonnées de ce point de fin d'expiration dans le plan P_{gas}, V_{AB} , l'expression ajustée de la courbe de relaxation de l'abdomen est alors donnée par :

$$V_{AB_{relax}} = \phi \log \left(\frac{P_{gas}}{P_{gas,ref}} \right) + V_{ab,ref} \quad (5.5)$$

où ϕ est le coefficient calculé lors de l'interpolation linéaire.

Représentation du travail

On se contentera dans cette section de représenter les travaux produits lors de l'inspiration et l'expiration afin d'illustrer la discussion précédente sur les paramètres étudiés, leur interprétation étant détaillée plus particulièrement par la suite.

Travail musculaire lors de l'inspiration

Nous représentons en figure 5.5-haut le travail développé par les muscles lors de l'inspiration, qui correspond à l'aire comprise entre les courbes de relaxation et de pression-volume lors de l'inspiration dans un plan (V_{RCp}, P_{oes}) (Volume de la cage thoracique pulmonaire, Pression oeosophagienne) et d'autre part dans un plan (V_{AB}, P_{gas}) (Volume du compartiment de l'abdomen,

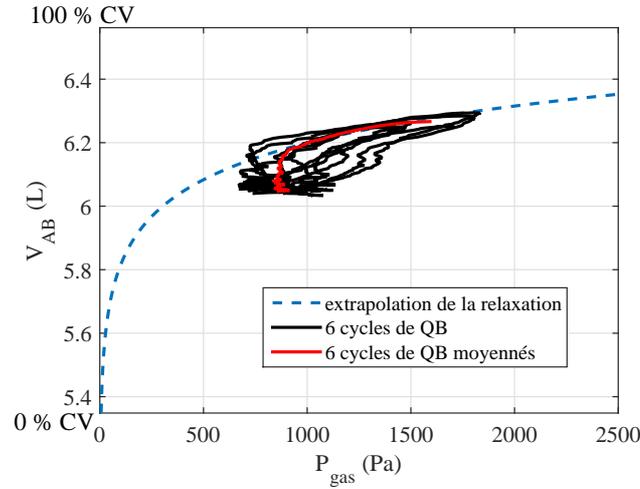


FIGURE 5.4 – Figure représentant 6 cycles de respiration de repos, les cycles moyennés et la régression-extrapolation sur toute la CV dans le plan P_{gas}, V_{AB} .

Pression gastrique). Les zones colorées correspondent aux travaux développés lors de l'inspiration. L'exemple donné est l'inspiration réalisée avant le jeu de la première phrase du *Prélude à l'après-midi d'un faune*. Sur la figure 5.5-haut, à gauche, la zone colorée correspond aux travaux développés durant l'inspiration par les muscles inspirateurs de la cage thoracique W_{RCp} , travail correspondant à la chute de la pression oesophagienne (qui estime la pression pleurale) accompagnée par l'augmentation du volume thoracique pulmonaire. Nous remarquons alors que le musicien part d'une position de repos, sur la courbe de relaxation. Le travail du muscle diaphragmatique est lui défini comme étant la différence des travaux thoracique et abdominal. On remarque que la pression gastrique durant cette inspiration n'est pas tout à fait sur la courbe de relaxation car le musicien bouge légèrement pendant l'inspiration, peut-être fait-il alors monter légèrement la pression gastrique par l'action des muscles posturaux.

Travail musculaire lors de l'expiration

La phase d'expiration est définie comme la phase où il y a production sonore et où l'air sort alors des poumons. Nous utilisons ici le même exemple que précédemment, mais dans la phase de jeu. Nous représentons en figure 5.5 -bas les travaux développés par les muscles durant l'expiration, soit d'une part la représentation des courbes de relaxation et des pressions-volumes déployés lors de l'expiration par le système dans un plan (V_{RCp}, P_{oes}) et d'autre part dans un plan (V_{AB}, P_{gas}) . Les zones colorées correspondent aux travaux développés lors de l'expiration.

A partir de la figure 5.5-bas, à gauche, nous notons deux travaux distincts de part et d'autre de la courbe de relaxation. Premièrement le travail fourni par les muscles inspirateurs de la cage thoracique $W_{RCp_{insp}}$ qui retiennent l'affaissement de la cage thoracique afin de limiter l'expiration et la pression fournie et de ne pas faire monter les pressions de jeu au-delà des valeurs nécessaires au jeu *pp* et en bas registre, caractéristiques de cet extrait. Et deuxièmement, le travail fourni par les muscles expirateurs de la cage thoracique $W_{RCp_{exp}}$. Le travail étant défini comme l'intégrale

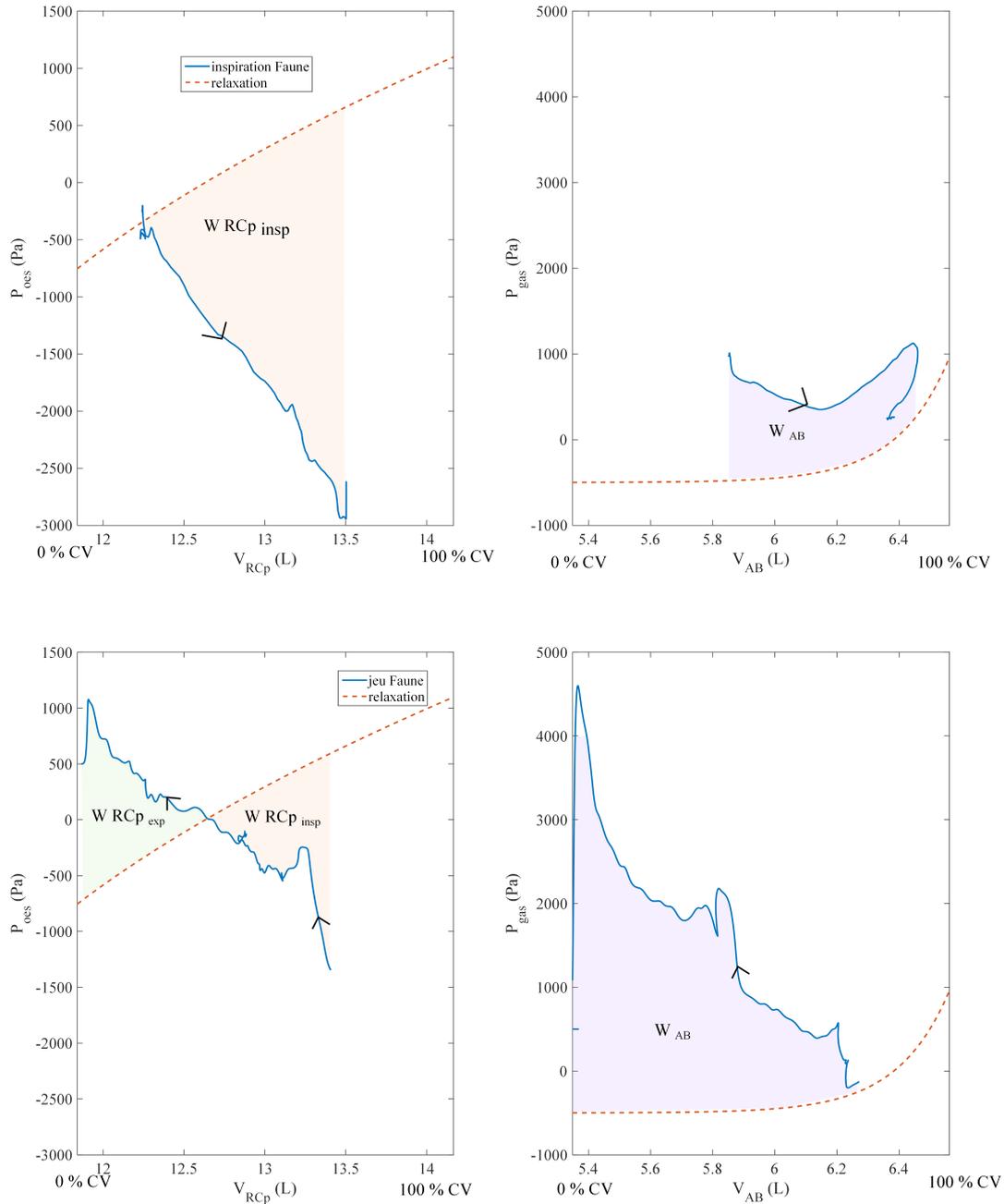


FIGURE 5.5 – Figure représentant à gauche : les pressions-volumes développés et la courbe de relaxation dans le plan (V_{RCp}, P_{oes}) ; à droite : les pressions-volumes développés et la courbe de relaxation dans le plan (P_{gas}, V_{AB}) . L'aire des zones colorées correspond au travail développé. Les flèches indiquent le déroulement temporel. En haut : Travaux inspiratoires, en bas : travaux expiratoires durant le jeu du *Prélude à l'après-midi d'un faune*

sur le volume de la différence de pression entre celles développées et la courbe de relaxation, les valeurs du travail des muscles inspireurs thoraciques sont donc négatives. Aussi, les puissances associées à ce travail seront également négatives. Par contre, le travail et les puissances associés aux muscles expirateurs thoraciques sont définis comme positifs.

Sur la figure 5.5-bas, à droite, la zone colorée correspond au travail développé par les muscles expirateurs de l'abdomen forçant l'expiration.

Il est alors possible pour chacun de ces groupes de muscles : inspireurs et expirateurs de la cage thoracique, diaphragme, expirateurs de l'abdomen d'estimer les puissances instantanées fournies pendant l'inspiration ou l'expiration, ceci sera détaillé par la suite.

5.3 Conclusion et poursuite du travail

Nous pouvons alors, dans la suite du travail, à partir des différents éléments présentés ici, compléter notre description des stratégies respiratoires développées par les flûtistes, notamment par les mesures de pressions oesophagienne et gastrique, qui permettent l'estimation de la pression trans-diaphragmatiques et donc l'estimation de l'activation du muscle diaphragmatique. De plus, nous pouvons faire progresser cette description des stratégies respiratoires, en comparant les mesures de pressions-volumes en jeu aux courbes de relaxation respectives de chacun des compartiments. Les travaux et puissances relatifs à chaque groupe de muscles : inspireurs et expirateurs de la cage thoracique, diaphragme, expirateurs de l'abdomen peuvent alors être estimés durant les phases d'inspiration et d'expiration.

When does the musical playing begin ?

Avant-propos :

L'article *When does the musical playing begin ?*, qui suit, est en cours de soumission dans le *Respiratory Physiology & Neurobiology journal*. Les auteurs sont Camille Vauthrin de l'Institut d'Alembert/LAM, UPMC Univ Paris 6, CNRS UMR 7190, Isabelle Cossette de Schulich School of Music/MPBL/CIRMMT/Mc Gill University, Montreal, Canada ; et Benoît Fabre de l'Institut d'Alembert/LAM, UPMC Univ Paris 6, CNRS UMR 7190

Cet article présente une étude expérimentale menée au sein du MPBL, dont le but est de comprendre comment trois joueurs de flûte inspirent et préparent le jeu en fonction de la consigne musicale proposée. En effet, la pédagogie de la flûte insiste sur cette phase préparatoire à la production sonore, laissant imaginer que le jeu musical démarre bien avant le début du son.

Les principaux paramètres de contrôle étudiés sont essentiellement respiratoires : les volumes d'air du thorax par un système d'électro-pléthysmographie, les pressions oesophagienne et gastrique permettant l'estimation des pressions pleurale, abdominale et trans-diaphragmatique. Des paramètres respiratoires pertinents sont alors définis, ceux-ci permettant de traduire l'effort musculaire engagé en terme de puissance ou travail mécanique. Les activités électriques des principaux muscles respiratoires sont également mesurés par électromyographie. Enfin, le son produit est enregistré dans le but d'analyser les caractéristiques acoustiques de la note jouée, et permet d'identifier les phases temporelles des respirations.

Ces différentes données sont recueillies sur le jeu de trois musiciens, jouant cinq pièces musicales du répertoire de la flûte traversière. L'analyse fine et détaillée du jeu de chacun des musiciens et les confrontations des différentes stratégies développées permet de définir les paramètres pertinents pour une potentielle analyse statistique future.

Les résultats de cette étude montrent que le musicien prépare le jeu musical selon deux visions, à long et court terme. La première, à long terme, se développe pendant la phase inspiratoire. Comme on peut s'y attendre, les volumes d'air inspirés sont corrélés aux durées d'inspiration mais aussi aux volumes utilisés durant l'expiration, c'est-à-dire durant la production sonore. Durant cette phase d'inspiration, le musicien développe différentes stratégies selon que l'inspiration à effectuer est au début de l'extrait ou entre deux phrases musicales, mettant respectivement à contribution majoritairement les muscles thoraciques lors d'inspirations longues

ou le diaphragme pour des inspirations rapides. L'inspiration fait nécessairement appel à des pressions négatives (c'est-à-dire inférieures à l'atmosphérique). La préparation du jeu à court terme concerne la phase post-inspiratoire et précédant la production sonore, phase nécessaire afin de faire monter la pression et donc favoriser l'expiration. Durant cette phase, le musicien prépare le jeu des premières notes. En effet selon la hauteur et la dynamique de celles-ci, le musicien va adapter son système respiratoire aux pressions à produire. Par exemple, si la tessiture des premières notes à jouer est basse et la nuance *pp*, comme le début du *Prélude à l'après-midi d'un faune*, le musicien va retenir l'expiration en privilégiant l'activité des muscles inspireurs afin de maintenir la cage thoracique ouverte et ainsi générer de faibles pressions. Au contraire si la consigne musicale impose une tessiture aigüe ainsi qu'une dynamique *ff* sur les premières notes à produire, le musicien va favoriser la montée de pression par le relâchement des muscles inspireurs de la cage thoracique, provoquant la compression des poumons, et parfois même accentuer cette compression en mettant à contribution les muscles expireurs.

Cette étude permet de mettre en lumière les stratégies inspiratoires développées par les trois flûtistes lors du jeu musical et confirme alors l'hypothèse selon laquelle le jeu musical débute bien avant la production sonore.

6.1 Introduction

The main goal of an instrumentalist's training is to develop the control and coordination of all gestures linked to the musical production. The aim of the instrumentalist's training is to control and coordinate all the gesture linked to musical production. In addition to the control of the fingers, flautists' fundamental control takes place at the mouth-piece where the air jet is directly shaped by the geometry of the lips, and its velocity is determined by the mouth pressure of the musician. Upstream, the mouth pressure is a reflection of the control established by the respiratory system.

The work presented here takes place in the continuity of two studies on the analysis of the controls developed by the musicians. The first from Cossette [40] presents and confronts hydrodynamical and acoustical measurements conducted in Paris, and respiratory measurements (on the same subject playing the same musical tasks) realized in Montreal. The second, from Vauthrin [128] presents the analysis of simultaneous measurements of hydrodynamical, acoustical and respiratory parameters in order to explain how these control parameters are linked to musical tasks.

The present paper goes one step further in analyzing the strategies developed by flautists, more specifically the player's action before the actual sound production. The study includes measurements of respiratory volumes together with pressure measurements from which mechanical work of the respiratory system is estimated. Comparison of the (volume-pressure) state of thoracic and abdominal compartments with the relaxation state allows us to globally determine the efforts produced by the respiratory muscles.

According to the work by Benditt, [14], oesophageal and gastric pressures may be used as estimations for pleural and abdominal pressures. Following Benditt, in the current analysis, the diaphragm activity is the difference between abdominal and pleural pressures.

The first studies on the respiration of wind players during musical playing published by Bouhuys, [21], describe mouth pressure and flow developed during the play of different instruments. Mouth pressures are shown to be instrument dependent. Among woodwind instruments, playing the oboe requires the highest pressures whereas playing the recorder corresponds to the lowest. The two others studies by Bouhuys [22, 23] focus on the link between mouth pressure, flow, power supplied to the instrument and acoustic power radiated, as functions of the musical dynamics played by the musician. Bouhuys shows correlations between the two powers and the mouth pressure.

Among the works dealing with the inspiration phase, two studies focused on inspirations during musical playing and during phonation. The first is conducted by Fuks [59] and presents respiratory measurements during professional reed woodwind playing. Fuks reports that most of the inspirations are carried between two musical phrases ; a musical phrase being cut only in case where an inspiration is physiologically needed. He also reports that the durations of the inspirations are between 217 and 448 ms, and that the abdominal compartment is more solicited

during the inspirations than the pulmonary ribcage volume. Furthermore, he shows that the respiratory state during playing is dependent on the mouth pressures that the musician needs to produce.

The second study is conducted by Tremoureaux, [126] and deals with respiratory cortical-activity during quiet breathing and phonation. The work shows that the respiratory cortical-activity is higher during phonation than during quiet breathing, and especially before a long sentence. Anticipation is thus noted in the respiratory cortical activity.

The aim of this study is to analyse how three flute players inspire, how their respiratory system is set to play, and how this phase of inspiration/preparation is linked to the musical tasks. The control parameters we focus on are mainly respiratory and include : a) the air volume variations of the thorax, measured by opto-electro-plethysmography, which can be decomposed into the volume variations of the three compartments of the thorax (pulmonary, abdominal ribcage and abdominal) ; b) oesophageal and gastric pressures measured in order to estimate respectively the pleural and abdominal pressures, from which the trans-diaphragmatic pressure may be estimated.

Measurements of respiratory parameters allow us to estimate muscular efforts during the inspiration and preparation before flute playing. These mechanical efforts may be interpreted as an instantaneous mechanical power which may be integrated over time to calculate the mechanical work associated with a specific inspiration. Muscular activity of the most important respiratory muscles for which contraction is easily and non-invasively measurable with surface electromyography is acquired as complementary information (scalene, sternocleidomastoidians, rectus abdominus and lateral abdominal muscles). At last, sound is recorded in order to analyse the acoustical characteristics of the note played, the musical structure and position of the respirations in time.

The data presented are collected on three musicians playing five musical excerpts from the flute repertory. Statistical analysis is therefore not possible, so we rather focus on a detailed analysis of the individual strategies used by each player. The comparison of the three strategies may lead to future statistical analysis once the relevant parameters are clearly identified.

The paper follows a standard structure : i.e. the methods and setup are first described together with the main parameters used for the analysis, and results are then presented and discussed.

6.2 Methods

6.2.1 Subjects

Three non-smoking flautists with normal pulmonary function tests are studied. The subjects are two females (subjects 1 & 3) and one male (subject 2) (age : 25-49). Two subjects (subjects 1 & 2) have been trained as professional flute players, have an extensive playing experience (over 250 public concerts) and played regularly over 20 years. The third subject is an amateur player,

who plays regularly in orchestra or chamber music ensembles.

6.2.2 Musical tasks

As the aim of this study is to analyse how flute players inspire and prepare the sound production in flute playing for different musical tasks, the flute players are asked to perform five musical pieces of the flute repertory (scores presented in figure 6.1). Breaths taken by the flautists are noted on the score by numbers; for the Poulenc excerpt, subject 1 inspires six times; the two other subjects, five times.

The figure displays five musical excerpts for flute. Each excerpt is presented with its title, composer, tempo, and dynamic markings. Breath markers are indicated by numbers 1 through 5 (or 6) above the notes.

- Prélude à l'après-midi d'un faune** (Debussy): *Très modéré* (♩ = 84-92), *p*. Breath markers 1, 2, 3, 4, 5.
- Leonore Overture** (Beethoven): *Adagio* (♩ = 60-63), *ff* to *pp*. Breath markers 1, 2, 3, 4, 5.
- Syrinx** (Claude Debussy): *Très modéré*, *mf* to *p*. Breath markers 1, 2, 3, 4, 5. Includes the instruction *Retenu*.
- Carmen** (Georges Bizet): *Allegretto quasi Andantino* (♩ = 60-72), *pp* *dolcissimo*. Breath markers 1, 2, 3, 4, 5.
- Sonate pour flûte et piano** (Francis Poulenc): *Assez lent* (♩ = 52), *p*. Breath markers 1, 2, 3 or 4, 4 or 5, 5 or 6.

FIGURE 6.1 – Musical scores.

The first musical task consists of playing the flute solo at the beginning of an orchestral piece, Debussy *Prélude à l'après-midi d'un faune*. The tempo is moderate and the excerpt is long. Traditionally, the flautist is expected to play this musical passage in one breath, [60]. Time duration is the principal challenge, made even more demanding by a crescendo-decrescendo indicated at the end. As the flautist plays solo, a high quality and musical sound is sought.

The second task is a Beethoven excerpt : *Leonore Overture*. Similar to the Debussy, this excerpt is the beginning of a repertory piece, but this one is played by the entire woodwind instrument section. The difficulty of this excerpt resides in its length, its dynamic changes (from *ff* to *pp*) and in the fact that it is played in the third register, which typically requires high mouth pressures.

Then, follows three musical excerpts with multiple respirations. The first one, an excerpt from the opera *Carmen* by Bizet is a flute solo in the second and third registers. In order to create an interesting excerpt, the last phrase of this excerpt was taken from another passage of the piece so the excerpt finishes with a long sustained note in the third register with a *pp* nuance. The second musical excerpt is the beginning of the second movement of the Poulenc flute sonata.

There is no important difficulty in terms of time duration, but the nuance is always *pp* and some musical phrases begin in the third register. The last musical excerpt is the beginning of a very well-known flute solo piece, *Syrinx* by Debussy. Because it is played solo, the musician is freer in his musical interpretation. The last phrase of this piece is long and in the third register with a slight nuance variation.

6.2.3 Set-up

Among the different respiratory components, this study focuses on air volume variations, surface muscle activations and trans-diaphragmatic pressure. The chest-wall volumes are measured by OptoElectronic Plethysmography (OEP, Smart System, BTS as in [40, 128, 39]). The OEP consists of 9 infrared video cameras tracking 89 hemispherical 10 mm diameter reflective markers apposed on the chest wall of the flautists. With the 3D coordinates of the markers, Gauss' theorem is used to calculate the volume variations as described by Cala et al. [26]. The data recorded with the OEP system, sampled at 60Hz, enable the reconstruction of the three chest-wall compartment displacements and their volume changes, V_{RCp} , V_{RCa} and V_{AB} , respectively for the pulmonary ribcage, the abdominal ribcage and the abdominal compartments, as represented in the left panel of the figure 6.2.

The activation of the main respiratory muscles (scalene, sternocleidomastoidian, rectus abdomi-

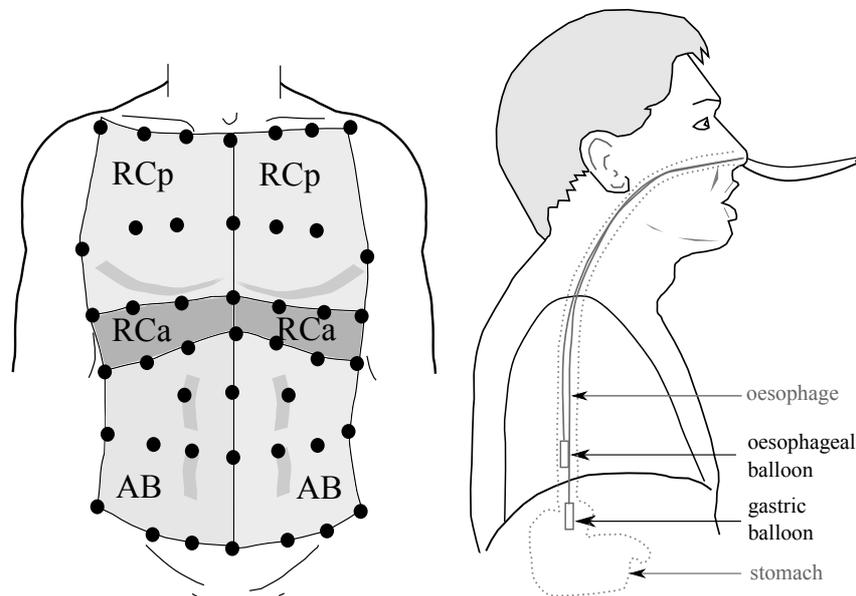


FIGURE 6.2 – Marker positions on the three compartments of the thorax, RCp , RCa and AB (left). The right figure represents the balloon positions to measure oesophageal and gastric pressures.

mus and lateral abdominal muscles (internal and external obliques, and transverse combined), are acquired by surface electromyography (sEMG). Surface EMG electrodes are connected to a wireless 16-channel electromyogram system (BTS, Milan, Italy). To check the appropriate placement of the electrodes, the flute players are asked to do specific movements, as explained in

Cossette's study [39]. The signals are sampled and recorded at 960Hz and, during the analysis process, rectified and low-pass filtered (2 Hz, Butterworth).

The trans-diaphragmatic pressure is deduced from oesophageal P_{es} and gastric P_{ga} pressure subtraction. Pressures are recorded relative to atmospheric pressure with conventional trans-nasal balloon-catheter systems (Marquat, Génie Biomédical, France : Balloon : length 80 mm, Catheter : length 78 cm, Outside diameter : 1.9 mm.), as represented in figure 6.2, right. The gastric balloon is placed in the stomach and the oesophageal balloon 10 cm above the diaphragm, following the procedure explained by Benditt [14]. The oesophageal balloon contains 0.5 mL and the gastric balloon 1 mL of air. All catheters, taped on the nose to avoid displacement during the measurements, are connected to pressure transducers ($\pm 100\text{cmH}_2\text{O}$, UT-PDP-100, Scireq Inc.).

The aero-acoustical set-up is summarized here and detailed in [128]. Mouth pressure is measured by a soft tube connected to a calibrated differential pressure sensor ($\pm 100\text{cmH}_2\text{O}$, UT-PDP-100, Scireq Inq.). While the presence of the measuring tube in the mouth is disturbing at the beginning of the session, the players taking part in our experiments seemed to accommodate rapidly and claimed to have played with their usual sound quality by the end of the session. A video camera device is used to catch the lips of the flautist. It is attached 2cm from the extremity of the flute head. In this setup, the camera catches a transverse view of the lips. To catch the frontal view, a mirror is placed near the embouchure, forming an angle of approximately 45 degrees with the flute. A heating resistor is placed on the backside of the mirror in order to prevent fogging. Images were taken at a rate of 25 images per second, a sufficiently large sampling rate to capture the control dynamics. Radiated sound, sampled at 44280 Hz, is recorded with two external microphones (Neumann TLM-103) placed 20° at the right and left, and 1 meter in front of the flautist. Figure 6.3 shows a schematic view of the set-up.

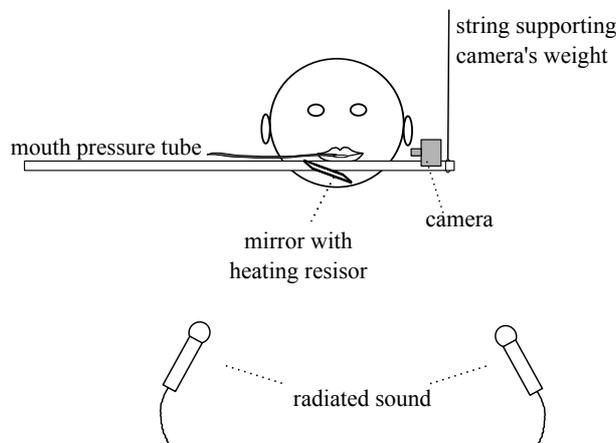


FIGURE 6.3 – Schematic view of the set-up.

6.3 Preliminary measurements & respiratory parameters

6.3.1 Preliminary measurements

Prior to flute playing and in order to gather respiratory indicators, the flautists are asked to perform respiratory maneuvers. First, the flautists breathe at rest ; tidal volume and Functional Residual Capacity (FRC) values are obtained. Then, flautists take the flute in a playing position and iterate a quiet breathing (QB) maneuver .We can then check if the FRC values change between the QB maneuver and the position during flute playing or if the respiratory muscles are activated while holding the flute.

Second, the flautists are asked to perform a vital capacity maneuver through a Hans Rudolph flow-meter, in order to determine their vital capacities and the maximal activity of their respiratory muscles. In order to simplify data representation, and comparison, respiratory volumes and muscular activity are expressed against time as percentage of the maximal volume or maximal activation reached during a vital capacity (VC) maneuver (% max VC). Vital capacities are 4.2L for subject 1, 6.2 L for subject 2 and 4.8L for subject 3.

At last, the flautists are asked to perform a relaxation maneuver in order to a curve that represents the state of the respiratory system at rest. Subjects inspire until 100 % of the VC is reached and then relax their muscles against a closed valve for a few seconds. Then the valve is partially opened and the flautist expires against the valve which acts as a flow controller. For the subjects 1 and 2, the relaxation curve of the ribcage compartment is obtained by this maneuver, as explained by Aliverti [7] : a second-order polynomial interpolation is applied in the (P_{es}, V_{RCp}) plan over the expiration section of the maneuver.

Muscular activity from EMG signals during the relaxation maneuver of subject 3 indicate that this subject did not completely relax his respiratory muscles. The relaxation curve is then extrapolated from the QB maneuver. As the oesophageal pressure during QB usually varies because of the activation of thoracic muscles, it is not representative of a relaxation state. For the relaxation curve, the oesophageal pressure is thus estimated, from QB expiration where P_{di} is constant, as $P_{es_{est}} = P_{ga_{QB}} - P_{di_{FRC}}$.

During QB, abdominal muscles are usually not recruited. The gastric pressure is thus only affected by the diaphragmatic activity during the inspiration. In order to obtain the relaxation curve, we extract the values of gastric pressure during the periods where the diaphragm is not active (i.e. when P_{di} is equal to that at FRC).

A relaxation line is then interpolated from the two extreme points of this curve, which is then extrapolated to the vital capacity, and gives an estimation of the relaxation curve for subject 3. For the three subjects, the relaxation curve of the abdominal compartment is computed from QB following Aliverti et al., [7]. Since QB maneuvers are performed in slightly different positions during music performance and respiratory maneuvers (arms down vs. up), the calculated abdominal relaxation curve slightly shift from position to the other. In addition, possibly because the flautist needs to hold the flute and prepare, the QB before playing is not always stable or periodic. In order to compensate for these offset and variations, the relaxation curve (calculated from QB cycles) is adjusted to the end-expiratory point of a quiet breathing cycle preceding the

musical tasks, as explained by Fréour [58].

6.3.2 Respiratory parameters derived from measurements

Inspiratory parameters

Although all components of the respiratory system are essential to its good functioning, we limit our description to the main respiratory concepts and mechanisms relevant to flute playing. More detailed information on respiratory mechanics can be found in [67, 113, 87].

Pressure variations in the lungs and in the pulmonary airways create pressure gradients that regulate pulmonary ventilation. The muscles, by contracting, create forces which deform the structure of the respiratory system. The structure displacements modify volumes of the cavities which, in turn, create pressure variations. Respiration depends on passive (elasticity, surface tension and gravity which tend to take the lung structure back to its resting position) and active forces (muscle activation). The elastic recoil of the respiratory system results from the respective resting states of the lungs and chest wall. This is measured during the relaxation maneuver, in which the measures of the oesophageal and gastric pressures provide estimations of the pleural and abdominal pressure. Figure 6.4 represents a sketch of the so called static volume-pressure curve of the respiratory system (P_{rs}) including both the lung (P_l) and the chest-wall (P_w) pressure behaviors.

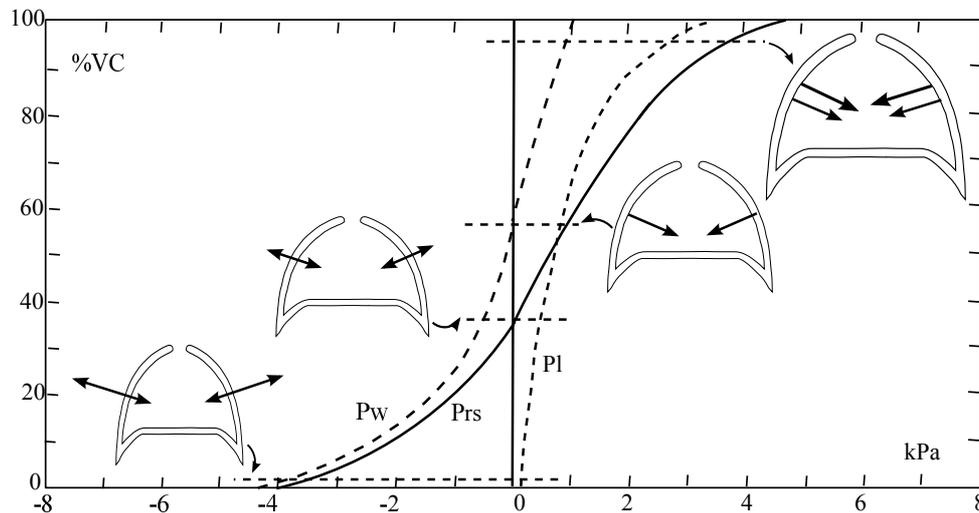


FIGURE 6.4 – Sketch of the static volume-pressure curves of the lungs (P_l), chest wall (P_w) and total respiratory system (P_{rs}) during relaxation. The arrows in the lung drawings indicate the static forces exerted by the lung and the chest wall at different volumes. Figure issued from [56, 6].

Pressures and passive forces vary with pulmonary volume. At 100% of the Vital Capacity (VC), when the lungs are totally filled with air, the passive forces exerted on the system are strong enough (approximately of 4kPa) so that, if the respiratory muscles are relaxed, air natu-

rally tends to go out of the lungs until the resting volume, Functional Residual Capacity (FRC), is reached. At FRC, passive forces of the lungs and the chest wall are equal and opposite. When all the air is blown out, at 0% VC, when the muscles are relaxed, passive forces are oriented outwards and tend to make the air enter the lungs until FRC is reached.

During QB, the inspiratory muscles (mainly the diaphragm and scalenes) are active while the expiratory exhalation is only due to the passive forces. Contrarily wise, during forced respiration, more inspiratory muscles are active (sternocleidomastoidian, external intercostals, etc.) and expiration is achieved by the activation of the expiratory muscles.

We focus on the air movement into the lungs required for flute playing, and the time duration of the air intake.

The inspiration phase starts when the total chest-wall volume V_{CW} is minimum and ends when it reaches its maximum before the sound is actually produced. During the inspiration, many parameters allow the characterization of the different inspirations of each musical excerpt. First, the inspiratory duration (ID) is defined as :

$$ID = t(max(V_{cw})) - t(min(V_{cw})) \quad (6.1)$$

where t represents the time. The second comparative parameter is the inspired volume, V_{insp} . It is defined as the difference between the maximum volume reached at the end of an inspiration and the minimum volume at the beginning of the following inspiratory phase.

As shown by Agostoni [3], the trans-diaphragmatic pressure may be used as an index of the diaphragmatic activity. The trans-diaphragmatic pressure is defined as the difference between the gastric and the oesophageal pressures :

$$P_{di} = P_{ga} - P_{es} \quad (6.2)$$

The effort provided by the inspiratory muscles during the inspiration can be quantified in terms of mechanical work as explained in Benditt's [14] and Campbell's [27] studies. In a plot of P_{es} vs V_{RCp} , the area between the relaxation curve and the inspiration curve corresponds to the mechanical work $W_{RCp_{insp}}$ produced by the inspiratory muscles on the rib cage. It is expressed as :

- $W_{RCp_{insp}} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} (P_{es} - P_{relax_{RCp}}) dV_{RCp}$

During the inspiration, $P_{es} - P_{relax_{RCp}}$ is positive, and so is the work. As the inspiratory muscles of the pulmonary rib cage are highly solicited during VC maneuvers, we calculate the work of these muscles during a VC maneuver and may then express the work of these muscles as a percent of the work achieved during VC.

Likewise, we can also define the work produced by the diaphragm W_{Diaph} as :

- $W_{Diaph} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} (P_{gas} - P_{relax_{AB}}) dV_{AB} - \int_{V_{min}}^{V_{max}} (P_{es} - P_{relax_{RCp}}) dV_{RCp}$

The work of the diaphragm during the VC is very small compared to those developed during playing, so the diaphragm work is expressed in Joules. Work is thus calculated by the integration between two instants and is expressed in Joules. For example, when 1 joule is applied to a gas which pressure is under 1 kPa, the volume changes by one liter.

Finally, during the inspiration, we define the power produced by the rib cage and the diaphragm, respectively \mathcal{P}_{RCp} and \mathcal{P}_{Diaph} , as :

- $\mathcal{P}_{RCp} = (P_{es} - P_{relax_{es}}) \cdot Q_{RCp}$
- $\mathcal{P}_{Diaph} = [(P_{ga} - P_{relax_{ga}}) - (P_{es} - P_{relax_{es}})] \cdot Q_{Diaph}$

where Q_{RCp} and Q_{Diaph} are the flows respectively generated by the rib cage $Q_{RCp} = \frac{dV_{RCp}}{dt}$ and the diaphragm $Q_{Diaph} = \frac{dV_{AB}}{dt}$.

Since the inspiration during VC maneuver is relatively slow and not representative of a maximal inspiratory force, the powers developed are low and cannot be used as reference. Therefore, the powers studied in this work are expressed in Watts (1 Watt corresponds to 1 Joule.s⁻¹) rather than as a percent of the maximum power developed during a VC maneuver, and correspond to instantaneous values. However, because the subjects have different vital capacities and morphology, the powers developed by the muscles may vary from one subject to another.

Estimation errors of these parameters may result from volume estimation errors due to a change of the flautist's position and from the Q_{Diaph} estimation. Indeed, even if the diaphragm position may be approximated by observing the abdominal volume [8], its movement out of the measured volume, estimated with fixed markers, may cause mistakes on the Q_{Diaph} estimation. However, as this may occur more when the abdominal muscles are pushing the diaphragm up at the end expirations, it does not affect a study such as ours on the inspiratory phase.

Preparatory parameters

As stated previously, the short phase between the inspiration and the sound production is associated to a preparatory phase, during which the musician creates the positive mouth pressures required to blow in the flute and produce sounds. Mouth and oesophageal pressures are negative during the inspiration, to suck the air in the lungs. The preparation phase corresponds to the build-up of the mouth pressure into the positive mouth pressure required to blow the flute.

The pressure variations, ΔP_{es} and ΔP_{di} , between the extrema obtained during the inspiration and the values at the beginning of sound correspond to :

- $\Delta P_{es} = P_{es}(min_{insp}) - P_{es}(sound)$
- $\Delta P_{di} = P_{di}(max_{insp}) - P_{di}(sound)$

The volume variations between the extrema are noted : ΔV_{RCp} for the pulmonary ribcage volume variation and ΔV_{AB} for the abdominal one. In order to describe the inspiratory muscle

activity before and at the beginning of playing, we report the values of the trans-diaphragmatic and oesophageal pressures as well as the pulmonary ribcage volumes when the sound begins. These two values P_{di} and P_{es} are plotted on a ribcage relaxation curve (V_{RCp} against P_{es}) give information about the inspiratory muscle activity of the ribcage, and on the state of the respiratory system, see figure 6.5 and 6.6.

Playing parameters

In order to compare the work developed during the inspiration to the one during flute playing, we also define the work during the expiration. First, the work of the inspiratory muscles on the pulmonary ribcage, $W_{RCp_{insp}}$, is defined in the same way as for the inspiration (section above), when the oesophageal pressures are smaller than those of the relaxation curve. It is expressed as :

$$\bullet W_{RCp_{insp}} = \int_{V_{max}^{min}}^{V_{min}^{min}} (P_{es} - P_{relax_{RCp}}) dV_{RCp}$$

Second, the work of the expiratory muscles $W_{RCp_{exp}}$ on the pulmonary rib cage is defined similarly. As the action of expiratory muscles creates higher oesophageal pressures than those of the relaxation curve, the work is thus calculated by looking at the area created under the relaxation curve. .

Furthermore, we define the work performed by the abdominal muscles W_{AB} as :

$$\bullet W_{AB} = \int_{V_{max}^{min}}^{V_{min}^{min}} (P_{ga} - P_{relax_{AB}}) dV_{AB}$$

Finally, the total work $W_{tot_{exp}}$ developed during the expiration can be expressed as the sum of all these works, as :

$$\bullet W_{tot} = W_{AB} + |W_{RCp_{insp}}| + W_{RCp_{exp}}$$

Parameter representation in an example

Inspiratory and expiratory phases discussed above and the volume-pressure curves are now illustrated for one breath, in figures 6.5 and 6.6.

Figure 6.5 shows the performance of *Prélude à l'après-midi d'un faune* by musician 1. The different parameters represented are : pitch, total chest-wall volume, power developed by the muscles on the rib cage and abdomen, and the mouth, gastric, esophageal and trans-diaphragmatic pressures. In this figure, inspiration and playing phases are highlighted respectively in pink and blue. The preparation phase is located between the two, in white. Furthermore, inspiratory duration is indicated as ID , the inspired volume as V_{insp} and esophageal and gastric pressure variations are indicated respectively as ΔP_{es} and ΔP_{ga} .

The work of the muscles on the rib cage and the abdomen during the inspiration are represented in the top of figure 6.6. On left panels, evolutions of RCp volume and esophageal pressure during inspiration are shown in a (V,P) plot including a relaxation curve. On the right, the abdominal volume and gastric pressure variations are represented on a (P,V) plot also with a relaxation

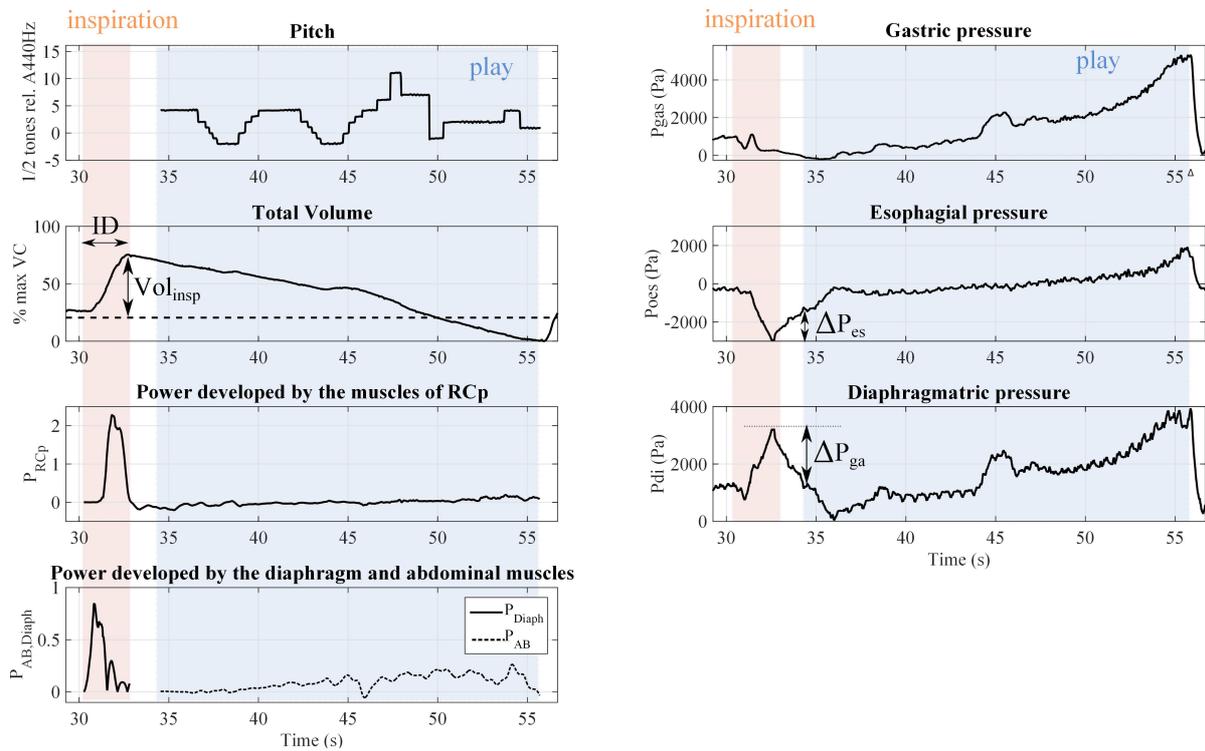


FIGURE 6.5 – Representation of the pitch and the respiratory parameters during the performance of *Prélude à l'après-midi d'un faune* by musician 1. Specific parameters are annotated : inspiratory duration (ID), inspiratory volume (V_{insp}), esophageal and gastric pressure variations (ΔP_{es} and ΔP_{ga}). We note that the musician moves at second 45, leading to an increase of the gastric and trans-diaphragmatic pressures and of the total volume.

curve. In each graph, the areas between the tracings and the relaxation curve, highlighted in colors, represent the work. Last, the bottom of the figure 6.6 shows the work developed, during the expiratory phase, by the inspiratory and expiratory muscles on the ribcage and on the abdomen. The left bottom plot shows, on each side of the relaxation curve, the work developed by the action of the inspiratory muscles during the expiration (under the relaxation curve in pink) and the work performed by the expiratory muscles mostly at the end of the expiration (above of the relaxation curve in blue).

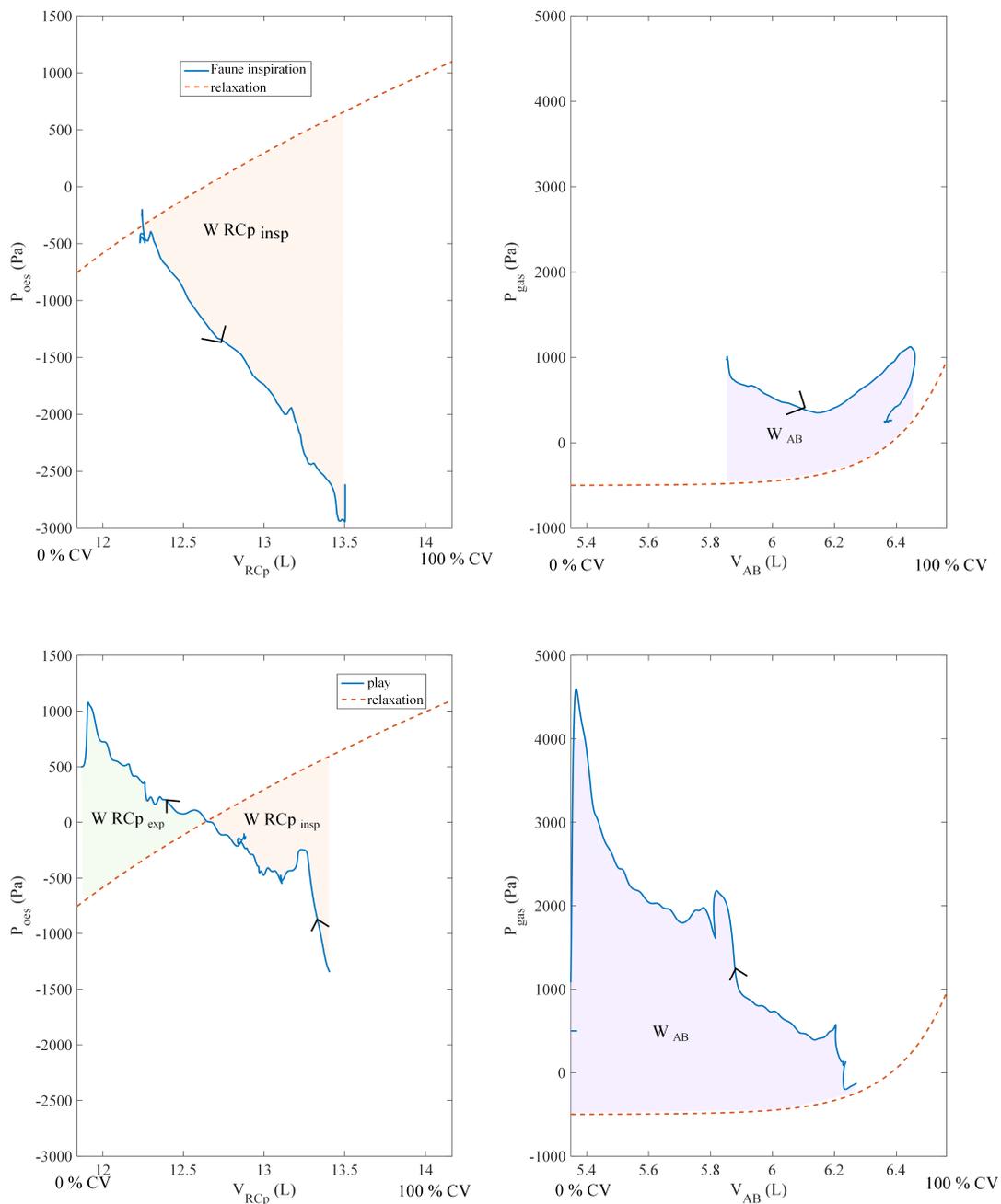


FIGURE 6.6 – Tracings of the ribcage volume (left) and abdominal volume (right) in a pressure-volume plot, during the **inspiration** (top) and the **expiration** (bottom) of the *Prélude à l'après-midi d'un faune* by musician 1. The dotted line represents the relaxation curve, corresponding to a "no-effort" condition. The distance of each tracing to the relaxation curve is associated to muscular efforts and the shaded area corresponds to the mechanical work of the muscles on each compartment (rib cage, abdominal). The arrows indicate the direction of time on each tracing.

6.4 Presentation and analyses of the results

This section presents the evolution of different parameters previously defined, during the inspiration and the preparation before sound is produced. All breaths taken by the three subjects during the five excerpts played are studied, but only the most significant and representative results are presented. The inspiratory phase is studied first, and then the preparatory phase.

6.4.1 Inspiratory phase

Analyses of inspiration duration and air volumes

Figure 6.7 presents the inspiratory duration and inspired air volume for each inhalation of the five musical excerpts played by the three subjects. Inspired air volumes are expressed as a percentage of the vital capacity (VC). Figure 6.7 shows that the first inspiration is 2 to 6 times

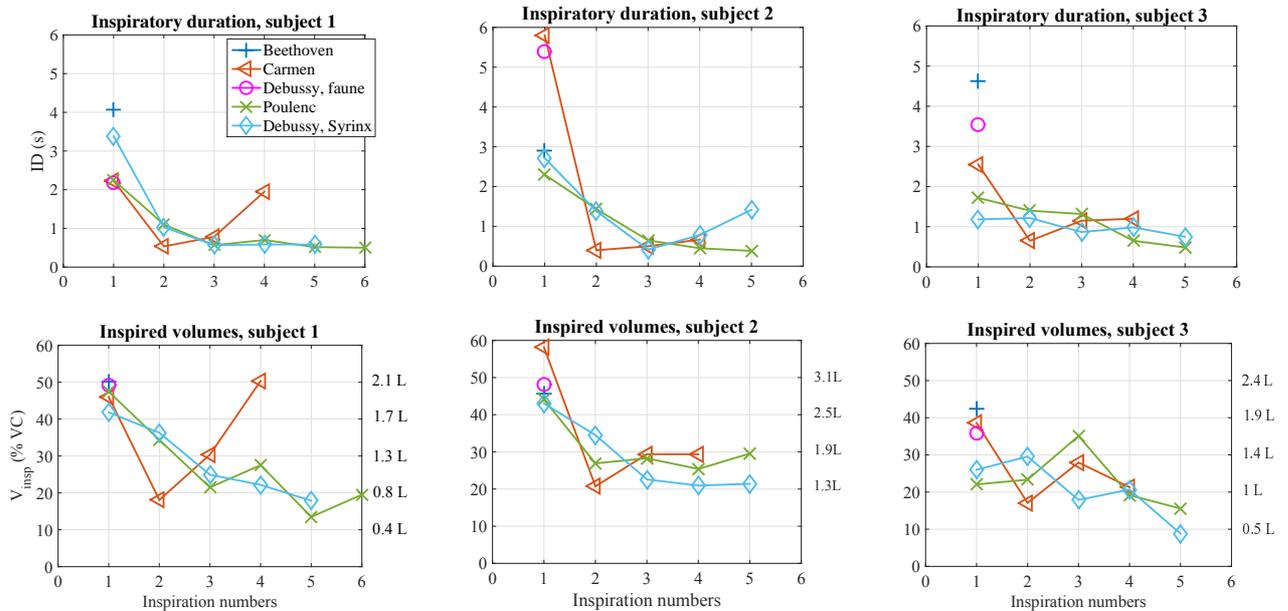


FIGURE 6.7 – Inspiratory duration (ID in s.) and inspired air volume (V_{insp} in %VC) for each breath (numbered) of the musical excerpts played by the three subjects. Please note that Debussy’s, *faune* and Beethoven’s excerpts are each played in one breath.

longer and is larger (at least by 0.5 L) than the following ones. As the fourth phrase of the Carmen excerpt has been extracted from the end of the piece, it is musically separated from the beginning of the excerpt. Because of that, subject 1’s fourth inspiration is of comparable volume to that of regular first inspirations. Indeed, inspirations between musical phrases are smaller than those at the beginning of a musical excerpt, and inspiratory durations are shorter. This may partly due to the fact that the player needs to follow a specific music tempo.

We also acknowledge differences between subjects’ vital capacity and the way they use it : subject 2 who has a larger VC (5.6 L) inspires larger volumes (between 1.2 to 3.2 L) than subject 1 (VC=4.2L), who inhales volumes between 0.5 and 2.1L. Interestingly, both subjects use similar

percentage of their VC for the first inspirations (between 40 and 60% VC). During playing, the volumes inspired by the two subjects lie between 20 and 40% of their VC. Subject 3 shows a different pattern since the inspired volumes are never greater than 40% of VC (even for the first breaths) and sometimes lower than 20% of VC.

The relation between the inspired air volume and the musical task is displayed, for the three subjects, through the ratio of inspired to expired air volumes in figure 6.8. The fourth and fifth respirations of Syrinx excerpt's are here considered as one breath (named 4) because of the continuity of the musical phrase; the inspired and expired volumes are respectively added before calculating the ratio. Figure 6.8 shows ratios between inspired and expired air volumes

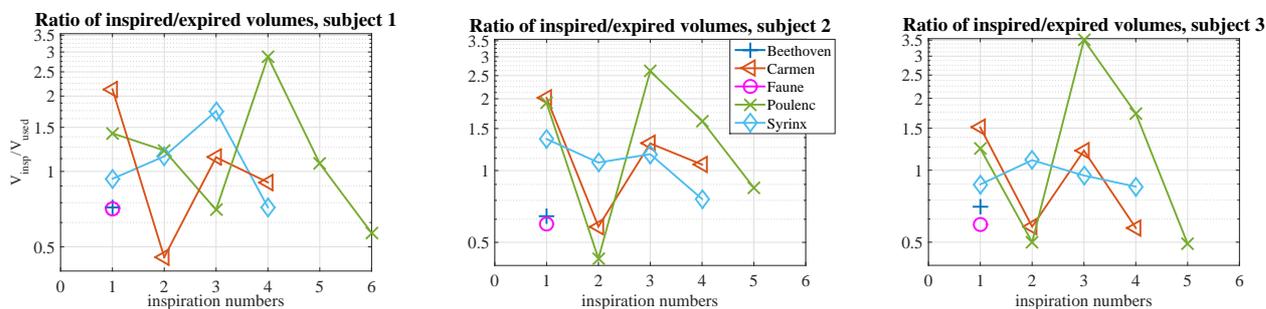


FIGURE 6.8 – Representation of the ratio between the inspired and expired air volumes (V_{insp}/V_{used} as function of breath number, for each flautist.).

varying from 0.5 to 1.5. Indeed, the three flautists adapt the size of their inhalations according to the musical phrase requirements. The ratio decreases with phrase duration (Faune, Beethoven excerpts and Carmen fourth phrase). For these, the inspired volume is initiated above FRC but expiration goes below FRC. The flautist inspires a smaller air volume than what is required for playing, whence a ratio less than 1. We also note a greater ratio between the inspired and expired air volumes for subjects 2 and 3's third inspiration in Poulenc excerpt. Indeed they play in five respirations whereas subject 1 does it in 6 breaths. Thus, subjects 2 and 3's second expiration is longer (whence a lower ratio) and their third inspiration is greater than the air used during the third expiration (whence a higher ratio). Lastly, we also observe that the ratio of inspired/expired volumes is globally higher for subject 2, who has the greatest vital capacity.

Muscle work and power during inspirations

Figure 6.9 reports the work developed by the diaphragm and the muscles of the pulmonary ribcage during the inspirations. The top row shows the work performed by the inspiratory muscles of the pulmonary ribcage (as a percentage of the maximal work reached during the vital capacity), for each inspiration of the five musical excerpts played by the three subjects. The bottom row of the figure 6.9 provides the ratio between the work developed by the diaphragm and by the inspiratory muscles of the pulmonary ribcage. The usage of oesophageal and gastric balloons may at times create oesophageal spasms. Only valid data, without spasms, are reported in figure 6.9.

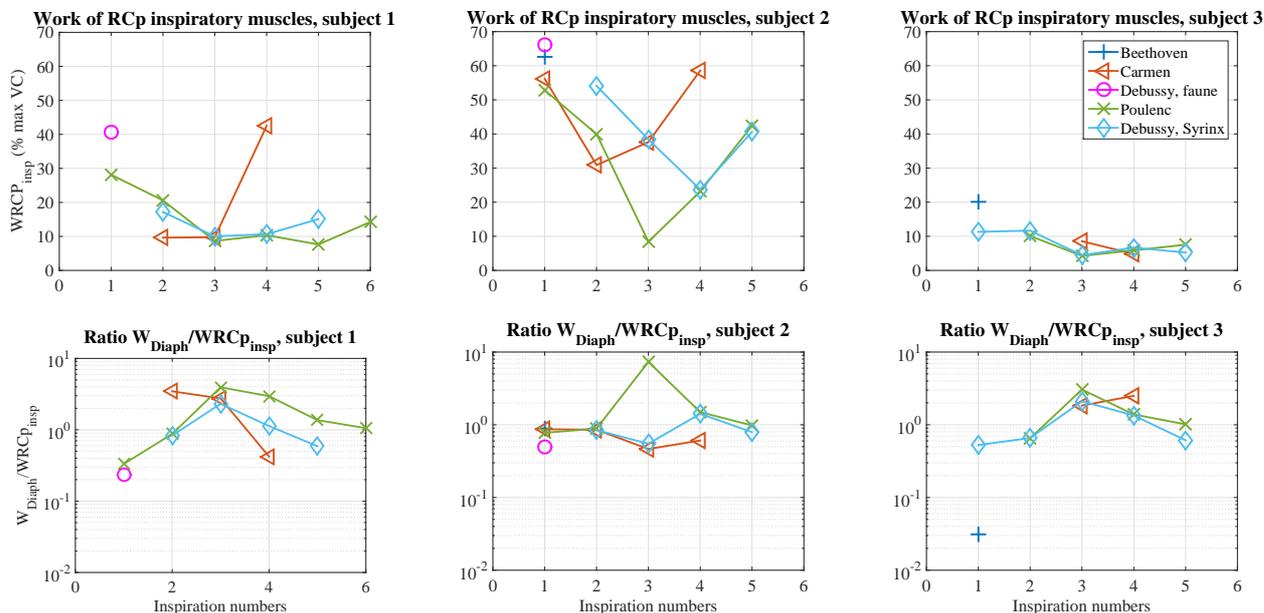


FIGURE 6.9 – Top : Work developed by the inspiratory muscles W_{RCp} in %VC in function of specific inspirations. Bottom : Ratio of the work developed by the diaphragm and the inspiratory muscles $W_{Diaph}/W_{RCp_{insp}}$ per breath, for each flautist.

In figure 6.9, we note that subject 1’s first inspirations in Debussy and Poulenc, as well as the fourth one in the Carmen excerpt, solicit a greater action of the pulmonary ribcage inspiratory muscles than the ones taken between two musical phrases (30-40% vs 10 % of VC work). This is also the case for subject 2, but this flautist produces a globally higher ribcage muscle work than the other flautists. He produces up to 60-70% VC work for the first inspirations and between 10 and 55% VC work for inspirations taken between musical phrases. Interestingly, subject 3’s work is lower than 20% of VC work, and even lower for the inspirations taken between musical phrases.

Ratios between the work of the diaphragm and the inspiratory muscles show that, for subjects 1 and 3, the diaphragmatic inspiratory work between musical phrases is 3-4 times more important than the one developed by the ribcage inspiratory muscles. This ratio falls between 0 and 1 for the first inspirations, meaning that the inspiratory muscles are solicited more for these than between phrases. For subject 2, the ratio is always around 1, except for the third inspiration of the Poulenc excerpt. This may be explained by the fact that this breath comes after a long musical phrase which requires the flautist to expire to a lower volume than FRC (close to 20%). Then, to inspire a large air quantity, the flautist solicits both the diaphragm and the ribcage muscles. Indeed, the work developed by the diaphragm for this inspiration is 7 times greater than the work developed by the inspiratory muscles of the ribcage.

Figure 6.10 shows the ratio between the total work developed during the inspiration to the one during the expiratory phase of flute playing for each musician playing each musical excerpt.

For subject 1, the ratios between the inspiratory and expiratory work are included between 0.8

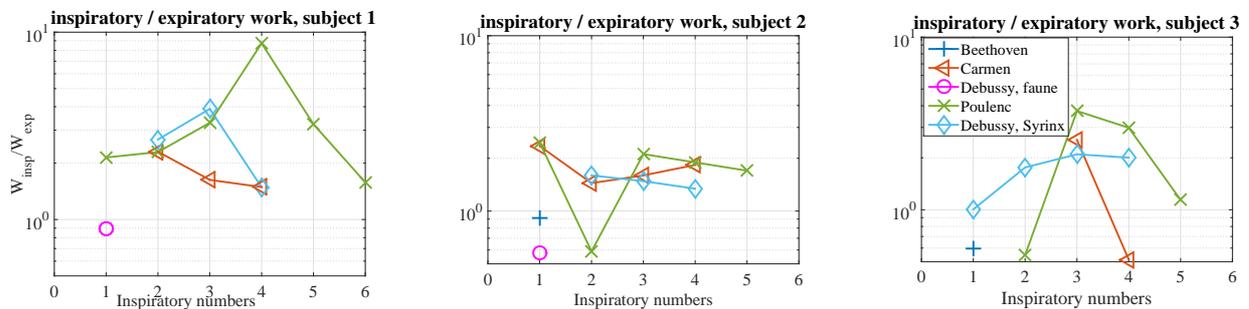


FIGURE 6.10 – Ratio of the total work developed during the inspiration W_{insp} and the expiration W_{exp} per breath.

and 4 for most of the breaths, except for the fourth one in the Poulenc excerpt, in which the ratio is equal to 10, maybe in order to go up in the VC percentage. As most of the ratios are close to or above 1, it suggests that this flautist tends to develop more energy during inspiration than during expiration. For subject 2, the ratios are most of the times between 1 and 2, and lower than 1 for the three long musical phrases. This suggests that this subject uses similar levels of energy during both inspiration and expiration. At last, similarly to subject 2, subject 3 ratios between inspired and expired work are lower than 1 for the long musical phrases, and above 1, up to 4, for shorter phrases.

Konno-Mead diagrams

Sequencing of the inspirations and anticipation of the next musical phrase during expiration may be easily seen on Konno-Mead diagrams in which pulmonary ribcage and abdominal volume variations during a breathing cycle are plotted one against another to show respective volume contributions. Figure 6.11 shows Konno-Mead diagrams for three phrases from two excerpts played by subject 2 : the Beethoven sole phrase played within a breath, and the Poulenc one, phrases 2 and 3. The dashed line represents the equal contribution curve of the two compartments. We represent here only the data for the subject 2, because he is the only subject who performs anticipation during the expiration. The Konno-Mead diagrams in figure 6.11 clearly display the pronounced sequencing of the abdominal and ribcage compartments during the first inspiration of the Beethoven excerpt : first, the abdominal volume increases and then does the ribcage one. The Konno-Mead patterns of the first inspirations of all musical excerpts are similar to these for all subjects. The inspirations between two musical phrases vary. For example, the third phrase of the Poulenc excerpt in figure 6.11, looks like a comma with smooth contours. Other patterns follow an equal contribution curve, such as the second inspiration of the Poulenc excerpt played by the subject 2. These patterns, which are also the most performed by the other subjects, seem to depend on the subject and on the musical and respiratory contexts.

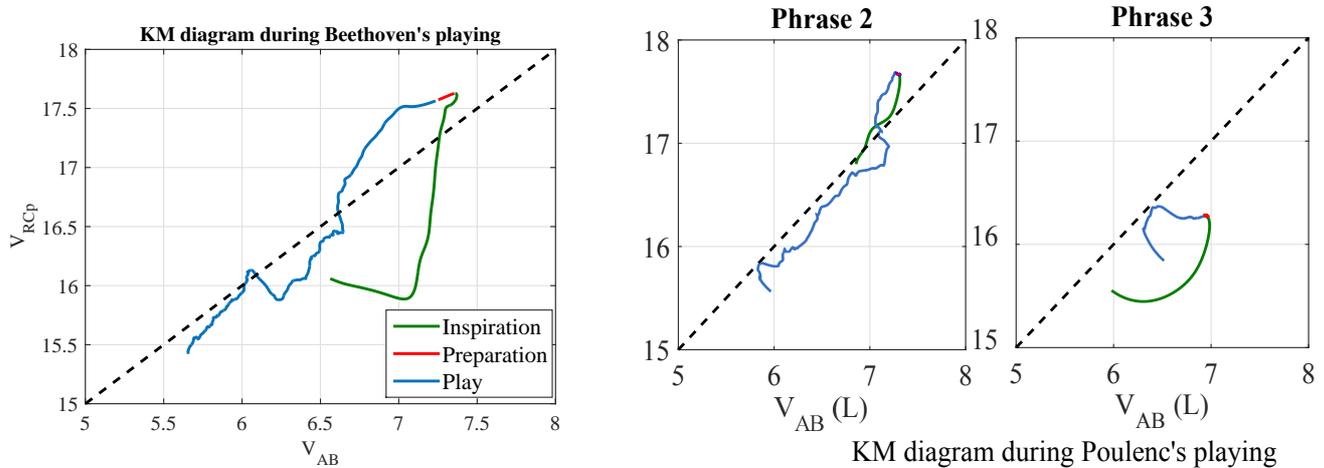


FIGURE 6.11 – Konno-mead diagrams during the Beethoven & Poulenc excerpts by subject 2. Volumes in litres : V_{RCp} - Volume of the pulmonary rib cage ; V_{AB} - abdominal volume. Dashed line represents equal contribution from both compartments.

Power developed by muscles

In order to report on the temporal and instantaneous muscular efforts, we present the power (in Watts) developed by muscles during the inspirations (figure 6.12). As subject 2 is the least disturbed by the presence of the balloons, we provide the power he develops with his diaphragm and ribcage inspiratory muscles during the inspirations of the Poulenc excerpt. The vertical dashed line indicates the maximal diaphragmatic power for each inspiration. Note that to help comprehension, only the power during the inspiratory phase is represented ; sound begins later. Figure 6.12, rows 1 & 2, shows that the power during the first inspiration is lower than one developed during the following breaths. In fact, the first inspiration is longer and the required effort is slower and smaller in terms of power (< 4 Watts). The inspiratory power developed between phrases varies between 3 and 12 Watts. The dashed vertical lines emphasize the two-phase inspirations : i.e. first, the diaphragm is activated and secondly, the inspiratory ribcage muscles are. For the sake of conciseness, only the results of subject 2 are presented here. Nevertheless, these sequenced patterns are also observed during the inspirations of the two other subjects.. Note that that the beginning of the diaphragm-power curve is not or less visible in the last three plots. This truncation is due to the fact that the inspiratory phase consists of the time period between the minimal and maximal volume during which the diaphragmatic power increases while the expiratory phase is not over, thus before the volume increases. This behavior, more specific to subject 2, is exemplified in the Konno-Mead diagram (pulmonary ribcage volume vs abdominal volume) shown in figure 6.12, row 3.

On row 3 of figure 6.12, note that the end expirations (in blue) of phrases 2, 3, 4 show an important diminution of the ribcage volume simultaneous to an increase of abdominal volume. There seems to be a transfer between the abdominal and thoracic volumes before inhalation, maybe due to the combinaison of the relaxation of abdominal muscles and the diaphragmatic pre-activation.

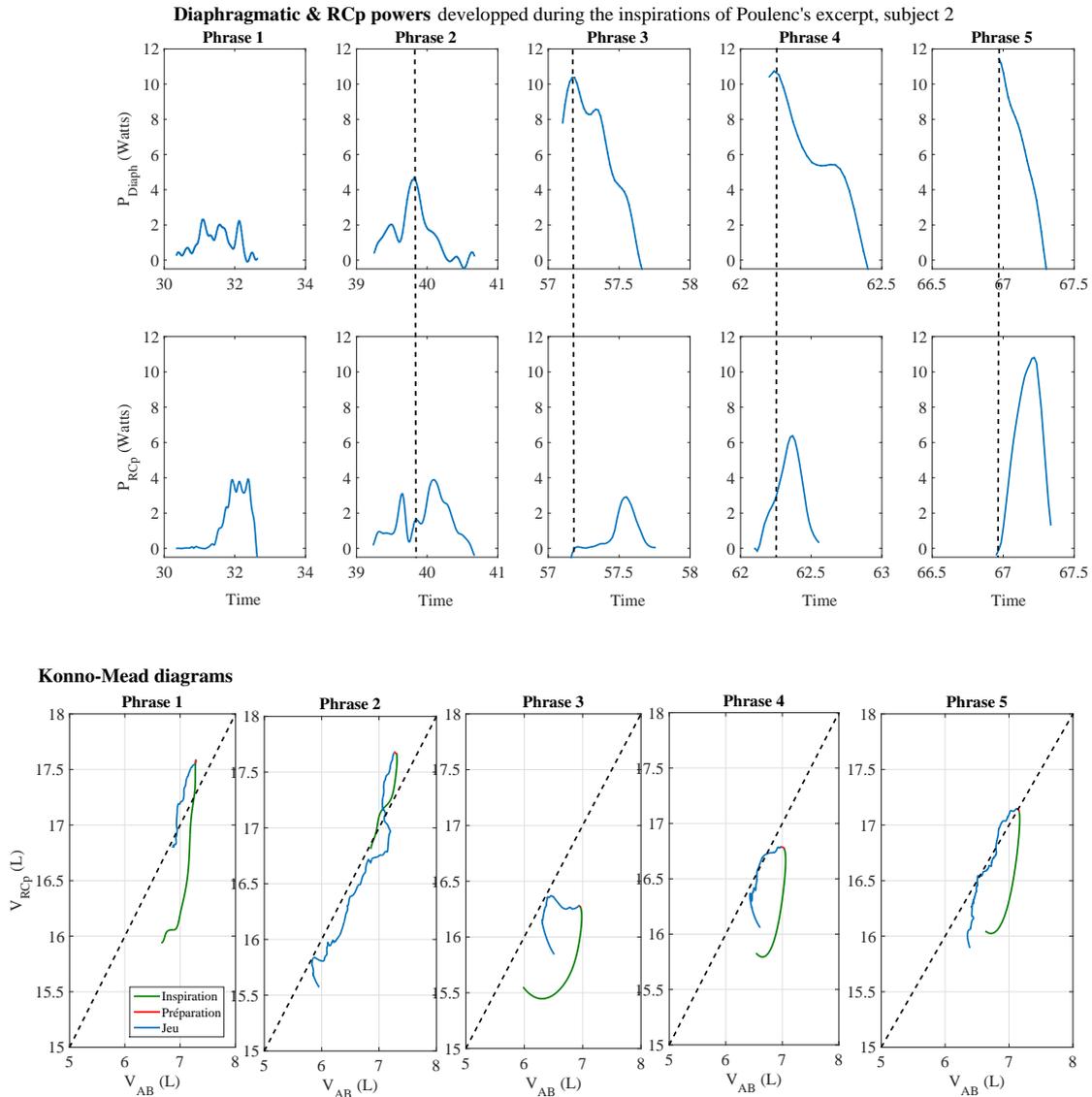


FIGURE 6.12 – Muscular power and Konno-Mead diagrams during Poulenc excerpt for subject 2. Row 1 : Power developed by the diaphragm \mathcal{P}_{Diaph} ; Row 2 : Power developed by the inspiratory ribcage muscles $\mathcal{P}_{RCp_{insp}}$. The vertical dashed line indicates the maximal diaphragmatic power. Row 3 : Konno-mead diagram during the Poulenc excerpt. The oblique dashed line indicates equal contribution of the abdominal and ribcage compartments.

In order to investigate the respiratory activities in the transition between phrases, figure 6.13 shows the pitch of the sound produced, the diaphragmatic pressure, the EMGs of the abdominal muscles and the variations of the abdominal volume for the end of the second phrase and the

beginning of the third phrase for the Poulenc excerpt played by subject 2. Figure 6.13 shows

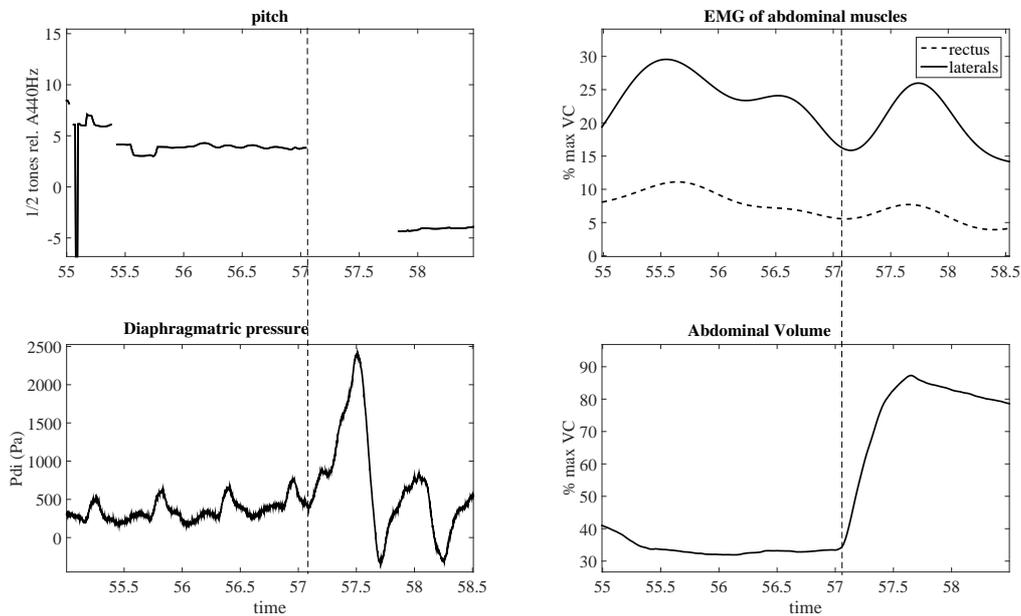


FIGURE 6.13 – Pitch, diaphragmatic pressure, abdominal volume and the EMGs of the abdominal muscles for the transition section between the second and third phrases for the Poulenc excerpt played by subject 2. The vertical line represents the end of the sound of the second musical phrase. Note slight variations in the P_{di} , EMG and volume tracings between seconds 56-57, before the end of the sound.

an anticipation of the third inspiration : i.e. the abdominal muscle activation (in particular the rectus one) decreases before the end of the sound (indicated by a dashed vertical line that corresponds to the lowest abdominal volume reached). In addition, the abdominal volume and the diaphragmatic pressure slightly increase. The relaxation of the abdominal muscles at the end of the second musical phrase facilitates the action and the move of the diaphragm. However, this phenomenon is especially clear here because of the activity of the abdominal muscles during the play. For phrases 3 and 4, as the abdominal muscles are not activated during the expiration, we do not see the muscle release which contributes to the increase of the abdominal volume, and so the action of the diaphragm.

6.4.2 Preparation before flute playing

As stated previously, preparation is defined as the evolution of the different respiratory parameters before the sound starts. This section reports the pressure and volume variations, and the corresponding respiratory system state at the starts of sound production.

Pressure variations and muscle activation before playing

As expected, during inspiration, oesophageal pressure decreases and diaphragmatic pressure augments. Figure 6.14 shows pressure variations between the minimal oesophageal pressure reached during inspiration and the one produced at the beginning of the sound for each musical phrase. As subject 2 has less oesophageal spasms, we report his results, which are also representative of the results obtained for the other subjects. In order to produce an outgoing flow, the

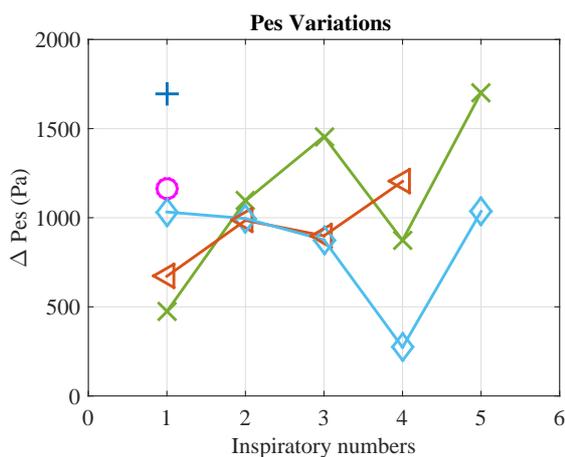


FIGURE 6.14 – Oesophageal pressure variations between the extrema reached during the inspiration and at the beginning of sound, as function of the breath numbers.

flautist must produce a shift from the negative oesophageal pressure used during inspiration to the positive one required for expiration. Therefore, oesophageal pressure variations are positive. The greatest variation occurs in the Beethoven excerpt. This may be due to the fact that a large breath is necessary to produce the long musical phrase and a high pressure is required to play the first note in the third register of the flute. The smallest oesophageal pressure variation is obtained for the fourth phrase of Syrinx excerpt. That may be explained by the fact that the third phrase ends in the same register as the beginning of the fourth phrase and by the fact that the fourth phrase is very short. Therefore, there is no need for a large change of pressure.

Figure 6.15 displays a P_{es}, V_{RCp} plane with the relaxation curve that demonstrates in what state the respiratory system is at the beginning of the sound production. Furthermore, the figure also provides the values of the trans-diaphragmatic pressures at the beginning of the sound (when the data are not disturbed by spasms). Figure 6.15 shows that all subjects' inspiratory muscles are not relaxed at the beginning of sound production as values of P_{es}, V_{RCp} are on the left of the relaxation curve. The values for subjects 2 and 3 are generally further from the relaxation curve for the first inspirations. Note that the first inspirations of subject 1 are not shown as the majority have spasms. Results suggest that subject 1 (may hold the expiration while playing the Faune as this long phrase requires low pressure in the low register. This is exemplified on the left plot of Figure 6.15) with values far from the relaxation curve. Contrarily, the values during the Beethoven excerpt are closer to the relaxation curve. This phrase is long but requires a higher pressure than the Faune, especially for the first note played in the third register with a

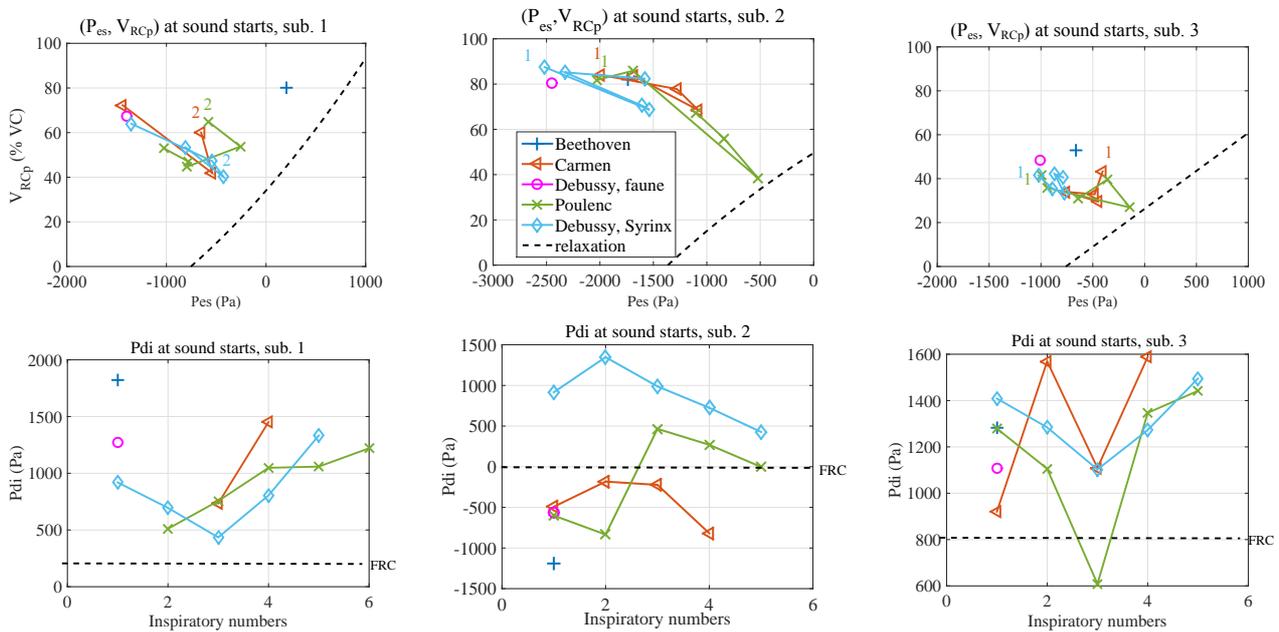


FIGURE 6.15 – Top : Plane of (P_{oes}, V_{RCp}) with the relaxation curve for each subject at the beginning of sound for all musical excerpts. Dashed line represents the relaxation curve. Bottom : Trans-diaphragmatic pressure at the beginning of the sound for eachbreath. The dashed line represents the P_{di} values at FRC.

ff nuance. The results suggest that the ribcage inspiratory muscles are not contracted as much and may contribute to the increase of pressure in the lungs.

Subject 2 begins to play at higher volumes than the other subjects and his pressure values are more distant to the relaxation curve. Conversely, subject 3 begins to play at a lower volume - below 60% of VC - and the oesophageal pressures are closer to the relaxation curve. Flautists 2 and 3 use two different strategies, while subject 1 seems to use one in between. These results suggest that subject 3 may solicit his expiratory muscles to perform these musical tasks more than flautists 1 and 2.

From the graphs on the bottom of the figure 6.15, we observe that the diaphragm is slightly activated at the beginning of the play, the dashed horizontal line representing the transdiaphragmatic value at the FRC. We do not observe any correlation between these pressure values and the musical phrases, register or time duration of the phrases, for subject 2 or 3. But, we can note for subject 1, that for the three longer phrases (Faune, Syrinx 5 and Carmen 4), the trans-diaphragmatic pressure is higher, maybe in order to prevent the expiration by not allowing the diaphragm to compress the lungs. The higher trans-diaphragmatic value is for the Beethoven excerpt, maybe because the expiratory muscles are activated at the beginning of the sound. Lastly, for subject 2 we remark abnormal values of trans-diaphragmatic pressures, below the FRC. It is possibly due to an extra-relaxation of the diaphragm at the end of the inspiration, and as the inspiratory muscles are activated, they may suck the relaxed diaphragm and create

these values.

Volume variations before playing

Finally, the volume variations of the three chest-wall compartments between the end of the inspiration (when the maximum volume is reached) and the beginning of sound production are shown in figure 6.16 for each excerpt played by subjects 1 and 2. Subject 3 results are close to those of subject 2. Figure 6.16 demonstrates that the respiratory patterns used by subjects 1

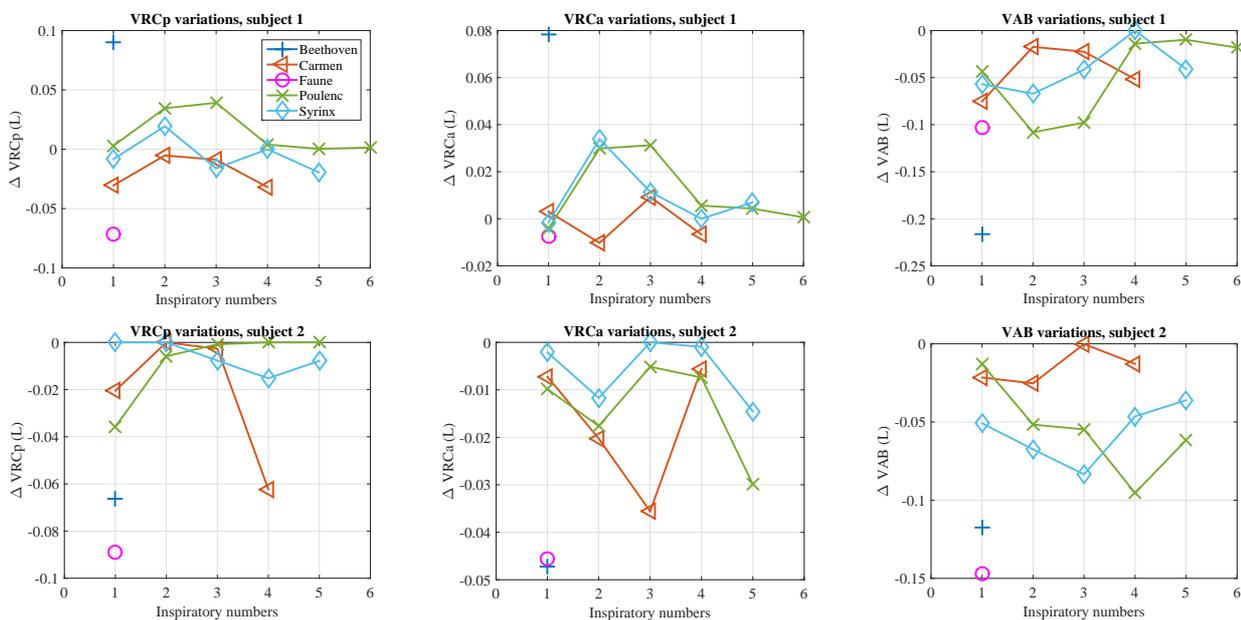


FIGURE 6.16 – Volume variations (in L) of the three chest-wall compartments V_{RCp} , V_{RCa} , V_{AB} , respectively pulmonary ribcage, abdominal ribcage and abdominal volumes, between the end of the inspiration and the beginning of sound production for all excerpts played by subjects 1 and 2.

and 2 between the end of their inspiration and at the onset of their sound are different. Subject 1 exhibits a positive volume variation most of the time for RCp and RCa volumes, whereas subject 2 always shows a negative one. Positive and negative variations respectively refer to an increase and a decrease or compression of volume. At the end of the inspiration, subject 1 results display a decrease in abdominal volume and an increase in both ribcage volumes : this suggests a transfer between the abdominal to the ribcage compartments. This strategy may be achieved by relaxing the diaphragm and/or contracting the abdominal muscles. The most extreme case is the Beethoven excerpt for which the compression of the abdominal volume may be accentuated by the action of the abdominal muscles, so a larger volume is transferred to the ribcage. The second subject does not make a transfer between the abdominal volume and the ribcage because his volume variations are always negative. Air volumes from all compartments are therefore expired.

6.5 Discussion & Conclusions

The first part of the presented results concerns the inspiration phase and the second part concerns the preparation between the inspiration phase and the sound production. Firstly, as Fuks [59] we observe that respirations mainly occur between two musical phrases, but under a physiological constraint, musicians are forced to take respiration during the musical phrase. Secondly, as expected, results show that the musicians adapt their inhalations to the musical needs. Indeed, for the Beethoven excerpt, which is a long musical phrase, musicians inspire greater air volume than during a short phrase. That means that the musician, before playing, has a long-term reading of the musical phrase.

Our results also demonstrate that a musician with a greater VC (flautist 2 here) solicits greater air volumes. But in relation to the vital capacity, the inspired volumes in percent are the same as those of subject 1 and comprise between 20% and 60% of the vital capacity. Our results are similar to the those on professional classical singers reported by Thomasson (from 30% to 70% of the VC), [124], and by Hixon, [67] (from 30% to 60% of the VC).

Additionally, our results show the inspired volumes and the duration of the first inhalations before playing are higher, at least 2s, than the ones between musical phrases that are taken faster. Thomasson, [125], also notes that the first inspirations are of a longer duration, superior to 3s, than the ones during singing, which are less than 1s.

The analysis of the work and power developed during the inspiratory phases helped understanding how the respiratory system is used during different musical excerpts played by three musicians : a) The inspiratory ribcage muscles were solicited more for long inspirations, such as the first inspiration of a musical excerpt or after a musical caesura ; b) The diaphragm was more recruited for faster inspirations such as the ones between two musical phrases. Fuks, [59] also observed bigger variations in the abdominal volume than those of the ribcage during quick inspirations between two musical phrases which may correlate to a higher diaphragm activity. Indeed, as the diaphragm is the most powerful muscle, [48], it makes sense that it is solicited more for quick inspiration.

Furthermore, we have observed a correlation between the duration of the musical phrase, the inspired volume and the work developed during the inspiration, as expected.

The study of power (work per second) provides a temporal description of the inspiration. The analysis of the power developed by the diaphragm and the inspiratory muscles during the inspiration phase along with the Konno-Mead diagrams demonstrated that the inspiration is globally performed in two steps : first, the diaphragm is activated creating an abdominal displacement and, second, the inspiratory ribcage muscles are recruited, inducing an increase of the ribcage volume. The diaphragmatic power is greater during the inspirations between two musical phrases, because of they are taken faster. One subject anticipates the next inspiration while still expiring for flute playing. At the end of the expiration, a slight augmentation of the abdominal volume is noted, as also observed by Thomasson [125] in professional singers and Fuks [59] in singing or woodwind playing. This may be due to relaxed abdominal muscles which facilitates an early action of the diaphragm. Clearly, this suggests that the musician is preparing for the next mu-

sical phrase while still expiring to perform the precedent musical phrase.

The second part of the results concerns a description of the preparation that occurred just before sound was produced. Generally speaking, the three musicians do not start playing the first note of a musical phrase at the exact moment maximal air volume is reached. As sound production requires that lung pressure increases in order to get the air out, we look into how specific muscular actions modify the pressures and volumes before sound production. The positive variations of oesophageal pressures confirm that lung pressure increases. Furthermore we note a greater variation of the oesophageal pressure for the Beethoven excerpt, as the first note of this excerpt is in the third register, the musician needs to further increase the lung pressure. When the flautist plays in the low register, the oesophageal pressure variations between the one developed during the inspiration and the one at the beginning of the sound are lower, such as for the first phrase of the Poulenc excerpt and for the fourth phrase of the Syrinx excerpt. As a conclusion we can assume that the musician performs a short-term anticipation during this preparatory phase, by adapting the respiratory state to the first note to be produced. This phenomena was also noted by Fuks [59] who reported that the respiratory system adapts to mouth pressure requirements for the specific register to be played.

The representation of the V_{RCp} & P_{es} values in the (V_{RCp} & P_{es}) plane with the relaxation curve, and the values of the diaphragmatic pressures, relative to FRC, at the beginning of sound demonstrated that for a long phrase such as the Beethoven, the Faune and for the last phrases of the Syrinx and of the Carmen excerpts, the three subjects' ribcage pressure-volume positions were the furthest from the relaxation curve. That suggests that the musicians prepare the long phrases by positioning their respiratory system in a full state using their inspiratory muscles to prevent the elastic recoil of the respiratory system and to not let the air out without control. The trans-diaphragmatic pressure results also show that the diaphragm is scarcely activated at the beginning of the sound. Subject 2 data suggest that the diaphragm is so relaxed that it is sucked upward by the inspiratory muscles of the ribcage, creating trans-diaphragmatic pressures below FRC values. This observation of diaphragm activity is in agreement with Cossette's study, [38], which reports that during flute playing, apart from the inhalations, the diaphragm is activated only during vibrato or staccati, while it is relaxed at the beginning of sound production.

At last, the analysis of volume variations between the end of the inspiration and the beginning of sound indicate that two different strategies are used by the subjects : The first is employed by subject 1, who relaxes her diaphragm after the inspiration, creating a decrease in the abdominal volume, which is transferred into the ribcage compartment. In some cases, such as for the Beethoven excerpt, the diaphragm relaxation is accompanied by the action of the abdominal muscles, creating a compression of the abdominal volume which increases lung pressure. This strategy was also observed by Vauthrin, [128], for the same excerpt. The second strategy is the same employed by the two other subjects, who do not transfer air from the abdominal compartment to the thoracic one but expire a little air quantity before playing. The two strategies adopted to increase lung pressure are therefore a) a transfer of air from the abdominal compartment

to the thoracic one accompanied by a relaxation of the inspiratory muscles and occasionally a contraction of the abdominal muscles to compress the air ; and b) a compression of the thoracic compartment mainly achieved by the relaxation of the inspiratory muscles.

These results on preparation and anticipation are in agreement with the work of Tremoureux [126] who finds a respiratory cortical activity before phonation.

This study established that music playing requires both a long-term and short-term anticipation of the musical phrase : i.e. a long-term preparation was performed by the flautists during the inspiratory phases according to the phrase duration and air requirements while a short-term plan was achieved by the flautists in order to adapt the strategies to fit the nuance and register variation requirements. The flute playing phase does not only begin when sound is produced ; nor does it when the musician inspires but before when he reads the musical score. So, the inspiratory phase is an integral part of musical playing. This may be important to consider for the training of musicians... what to do to train the musicians appropriately ?

Furthermore, this study shows pertinent indicators to describe inspiration and preparation, and could be extended by studying a greater number of participants.

Quatrième partie

Musique et interprétation

How does posture influence flute player's breathing and playing ?

Avant-propos :

L'article *How does posture influence flute player's breathing and playing ?* a été publié aux actes du congrès ISMA (International Symposium on Musical Acoustics), édition 2014. Les auteurs sont Camille Vauthrin et Benoît Fabre de l'Institut d'Alembert/LAM, UPMC Univ Paris 6, CNRS UMR 7190 ; et Isabelle Cossette de Schulich School of Music/MPBL/CIRMMT/McGill University, Montreal, Canada.

Cet article présente une étude expérimentale dont le but est de comprendre l'influence de la position (debout ou assise) du musicien sur les stratégies de contrôle respiratoire et aéro-acoustique lors du jeu musical. En effet, l'apprentissage de la flûte se fait tantôt debout lors du jeu soliste, ou tantôt assis, lors du jeu en orchestre ou en musique de chambre. Cependant, entre ces deux positions, la compliance du compartiment abdominal change, ceci étant principalement dû aux activités musculaires posturales qui sont plus importantes en position debout. Ceci mène donc à penser qu'entre les deux positions, les stratégies respiratoires peuvent évoluer et éventuellement influencer les stratégies de contrôle à l'embouchure.

Un protocole expérimental est établi pour cette étude permettant l'acquisition simultanée des paramètres aéro-acoustiques (pression buccale, géométrie des lèvres et son produit) et respiratoires (volumes d'air engagés, activités électriques des principaux muscles respiratoires) durant le jeu d'un flûtiste sur deux pièces du répertoire de la flûte traversière.

Les résultats montrent que le contrôle aéro-acoustique développé par le musicien est indépendant de la position de jeu. Par contre, les stratégies respiratoires employées par le musicien durant le jeu assis ou debout diffèrent. Le flûtiste met plus à contribution le volume abdominal en position assise, ceci parce-que ce compartiment est plus relâché dans cette position du fait que les muscles posturaux ont une activité moins importante qu'en position debout. La résistance de l'abdomen face à la descente (activation) du diaphragme est donc moindre. Indépendamment de ces variations de stratégie respiratoire lors du changement de position, le musicien s'adapte et conserve les mêmes techniques de jeu à l'embouchure, dans l'optique de jouer l'extrait musical demandé de manière similaire.

Abstract :

This study focuses on the influence of musical task and position on the preparatory gesture, respiratory patterns and the associated respiratory muscle recruitment used in flute playing. The study was triggered by the flute players and teachers claiming that the control of the playing starts during these preparatory phases. We present the experimental setup used to record simultaneously the lip positions, the activity of a few selected respiratory muscles, the chest wall compartment displacements and the associated volumes, the blowing pressure in the mouth of the player and finally, the radiated sound. Thus, the flautist plays two musical tasks, which present different complexities in two different postures (seated and standing position). The analysis of respiratory and hydrodynamical parameters show the strategy developed by the player in the case of different complex musical tasks. The data indicates a strong correlation between the duration of the musical phrase, the register at which it is played and the preparatory gesture. To play a demanding musical task, the flautist has to take into account all the difficulties before playing. Furthermore, the flute player needs to adapt his respiratory strategy to the physiologic changes due to the position changes. However these respiratory control variations do not influence the hydrodynamical parameter control, which is thus independent of the change of position. Finally, our results on the respiratory control in the seated position are consistent with the observations in the literature on forced respiratory maneuvers.

7.1 Introduction

The sound production of music instruments has significantly been studied from the physical characteristics of the instrument perspective. However, the sound produced by flute depends not only on the physical characteristics of the instrument but also on the control exerted by the musician. This is especially important when the air jet is shaped by the lips of the player (as is the case for the flute). Indeed, music performance requires the instrumentalist to develop an expert control, acquired during training. For the flautist, the control of fingerings, lips and respiratory parameters allows to play the requested pitch, amplitude and timbre associated to musical pieces.

This study focuses on the influence of a flautist’s posture on the hydrodynamical and respiratory controls during two musical tasks. As explained by Vellody at al., [129], thoraco-abdominal movements may change because of compliance variations induced by the change of posture, but these variations may also influence the respiratory control and bring the musician to develop a different strategy to play the musical task. Furthermore, if a change in respiratory control occurs, it may influence the hydrodynamical control. This needs to be verified. In brief, the first objective is to understand how the flautist’s respiratory activity and control parameters are linked together but also to the musical tasks and then, to observe the influence of posture on the respiratory and hydrodynamical controls. Simultaneous measurements of the hydrodynamical and respiratory parameters were conducted during two musical tasks that present different complexities. In a first section, we briefly present the acoustic and respiratory control parameters. The next sections present the measurements and the protocol with a brief presentation of the

two musical tasks and the flautist, the results of acoustical and respiratory measurements, and a brief discussion and conclusion.

7.2 Control parameters

7.2.1 Acoustical parameters

Flute operation can globally be described as a coupling between the hydrodynamic modes of a jet and the acoustic modes of a resonator. This passive element, coupled to the jet, provides the necessary energy to sustain the oscillation. The description commonly used in the literature, [75], [33] describes the flute as three independent blocks, figure 7.1. The three different elements

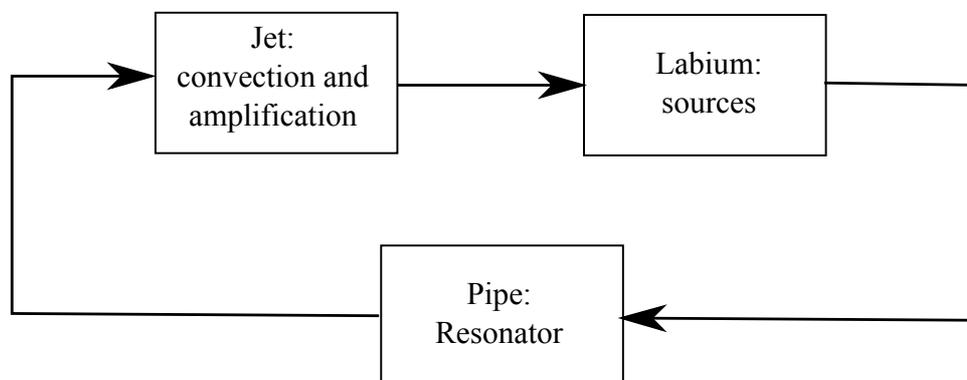


FIGURE 7.1 – General description of flute operation as three independant blocks coupled together.

(jet, sources and resonator) are supposed to interact locally. The analysis of each block is done separately and then concatenated to produce a caricature of flute operation. The acoustic resonance of the resonator has been studied by Kergomard [75], Wolfe [133] and Nederveen [99] amongst others. The importance of labium geometry and its influence on the jet or on the sound production has been studied by Coltman [33, 35], Nolle [101] and Dequand [46].

To describe the parameters of the control by the player, we focus on the jet-labium configuration. Indeed, the flute player controls both the jet characteristics and the lip to labium distance W . The jet can be described by the flow Q and the velocity U , which are both linked to the opening area A between the lips $Q = AU$. With Bernoulli's equation, $U = \sqrt{2P_m/\rho_0}$, the velocity can be estimated from the mouth pressure P_m , where ρ_0 is the air density.

These parameters can be described using dimensionless numbers : the dimensionless velocity θ , ($\theta = U/fW$, where f is the fundamental frequency of the radiated sound), the Strouhal number Str_h , ($Str_h = fh/U$, where h is the height of the flue from where the jet flows) and the Reynolds number Re , ($Re = UD/\nu$, where D is the hydraulic diameter and ν the kinematic viscosity of the fluid). The structure of the jet is directly related to the Reynolds number Re . For more detailed information, refer to Verge's [130] or Howe's [68] studies. The Strouhal number informs us on the stability of the jet, following Mattingly [90], Drazin [51], Rayleigh [111] and Nolle [101]. In the literature, a few studies by Coltman [33], and Auvray [9], discuss

the importance of using the dimensionless velocity θ as a describer of hydrodynamic operations. Playing the flute requires adjustments of these different parameters in order to guarantee the oscillation at the requested frequency and to achieve expressive intentions.

7.2.2 Respiratory parameters

Although all components of the respiratory system are essential to its good functioning, we limit our description to the main respiratory concepts and mechanisms relevant to flute playing and to the understanding of our data analysis and results. The different parameters described below include the pulmonary volumes, the main respiratory muscles and the pressure-volume curve of the respiratory system. For further information on respiratory mechanics, please see [67, 113, 87]. Figure 7.2 shows the spirometric tracings of static pulmonary volume subdivisions : Vital Capacity (VC), Residual Volume (RV), Functional Residual Capacity (FRC) and Tidal Volume (TV). Vital Capacity (VC), which corresponds to the air comprised between a maximum

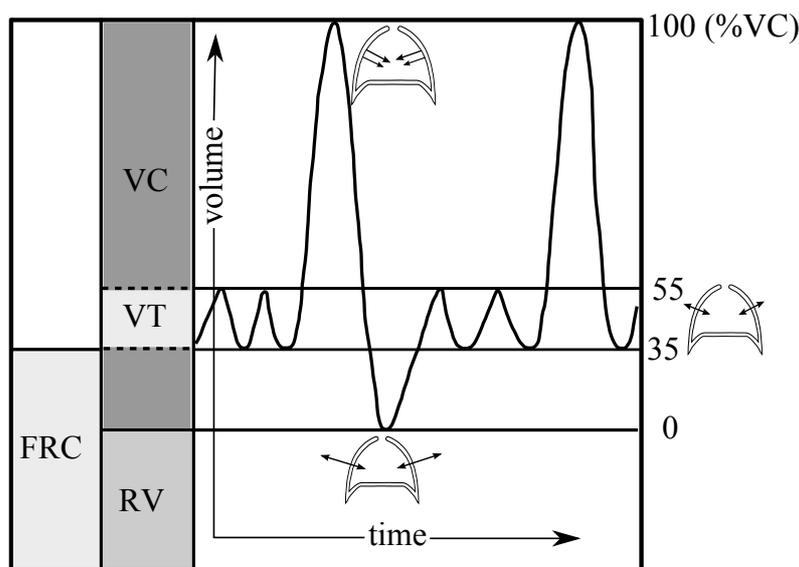


FIGURE 7.2 – Spirometric tracings of static pulmonary volume subdivisions, [3], [8]. The arrows in the small side drawings indicate the static forces exerted by the lung and the chest wall at different volumes.

inspiration and a maximum expiration, is the air available to play flute. At 100 % of VC, passive forces exerted on the system are strong enough so that, if respiratory muscles are relaxed, air naturally tends to go out. FRC volume represents the resting volume, at this volume passive forces of the lungs are equal and opposite. At 0% of VC, the volume of air that remains in the lungs is the residual volume (RV). At that volume, when muscles are relaxed, passive forces are oriented outwards. Tidal Volume (TV) commonly refers to the air used during quiet breathing. During the inspiratory phase of quiet breathing, only inspiratory muscles are activated to enlarge the chest-wall cavity and during the expiratory phase, the thorax passively returns to its resting state. During forced breathing, air displacement is considerable and requires more effort. The action of the inspiratory muscles is greater and the expiration is forced by the expiratory muscles.

7.3 Measurements and protocol

7.3.1 Measurements

One of our goals was to measure simultaneously the acoustical and the respiratory parameters. The set-up used in this experiment is the same as the one described in de la Cuadra's study, [41]. The camera device used to film the lips of the flautist was slightly modified in order to make it compatible with the OptoElectronic Plethysmography (OEP). The camera was attached to the head extremity of the flute to catch a transverse view of the lips. To catch the frontal view, a mirror was placed near the embouchure forming an angle of approximately 45 degrees with the flute. To measure the pressure in the mouth, a soft tube was connected to a calibrated differential pressure sensor. The radiated sound was measured with an external microphone placed 1 meter away from the flautist.

The respiratory set-up is the same that the one described in Cossette's study, [40]. Volumes of the chest-wall compartments are measured by the OEP system, which consists of 9 infrared video cameras tracking 89 hemispherical markers apposed to the chest wall. For the analysis of the chest-wall displacements, the chest wall is divided in three compartments : the pulmonary rib-cage compartment, the abdominal rib-cage compartment and the abdomen compartment, see figure 7.3.

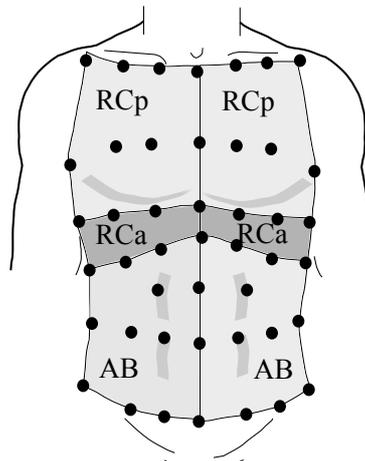


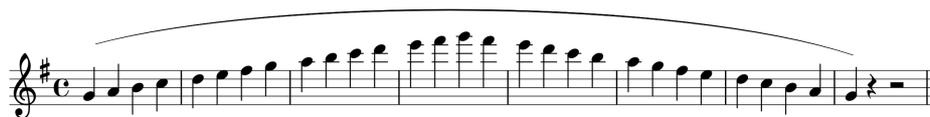
FIGURE 7.3 – Three chest-wall compartments and positions of the markers.

Selected surface respiratory muscles are measured : scalene, sternocleidomastoidian, rectus abdominus and lateral abdominal muscles (internal and external obliques and transverse combined). For information on muscles measurements, see [40]. In order to simplify data representation and comparison, respiratory volumes and muscular activity are expressed against time as a percentage of the maximal volume or the maximal activation reached during a vital capacity manoeuvre (% max activity). Our flautist has a Vital Capacity of 3.8 liters.

7.3.2 Musical tasks and presentation of the flautist

As mentioned previously, the objective is to study the control of the flautist during two musical tasks with different musical and/or respiratory complexities and, more specifically, to observe how the flautist adapts breathing and playing to the standing and seated positions. The flute player performs two musical tasks : a) a G major scale on two octaves which constitutes a practice routine for which does not require any special musical or respiratory effort and, b) a piece from the flute repertoire, Debussy’s *Prélude à l’après-midi d’un faune*, which is a demanding piece in terms of breathing. Indeed, this flute solo at the beginning of an orchestral piece is traditionally expected to be played in one breath even though its tempo is moderate and the excerpt is long. The time duration is the principal challenge, made even more demanding by the crescendo-decrescendo indicated at the end. As the flautist plays solo, a high quality and musical sound is sought. The figure 7.4 represents the score of the two musical tasks. The flautist

G major scale



Prélude à l'après-midi d'un faune



FIGURE 7.4 – Scores of the two musical tasks

studied is a woman who was 47 years old at the moment of the measurements. She was trained as a professional flute player and had an extensive playing experience (over 250 public concerts) and played daily over 20 years.

7.4 Results

Hydrodynamical and respiratory data are synchronized and represented together. The right graphs of figures 7.5 and 7.6 show measurements of radiated sound, mouth pressure P_m , area of the lips A , distance of the lips to the labium W , jet-flow Q , total volume and muscular activity, Reynolds number and dimensionless velocity θ respectively for the G scale and Debussy’s excerpt played in the standing position. The left graphs of figures 7.5 and 7.6 respectively represents the same parameters for the G scale and Debussy’s excerpt played in the seated position. On figure 7.5, the vertical lines represent the beginning of sound production and the limits between each register. The dashed horizontal line on the total volume indicates the FRC volume.

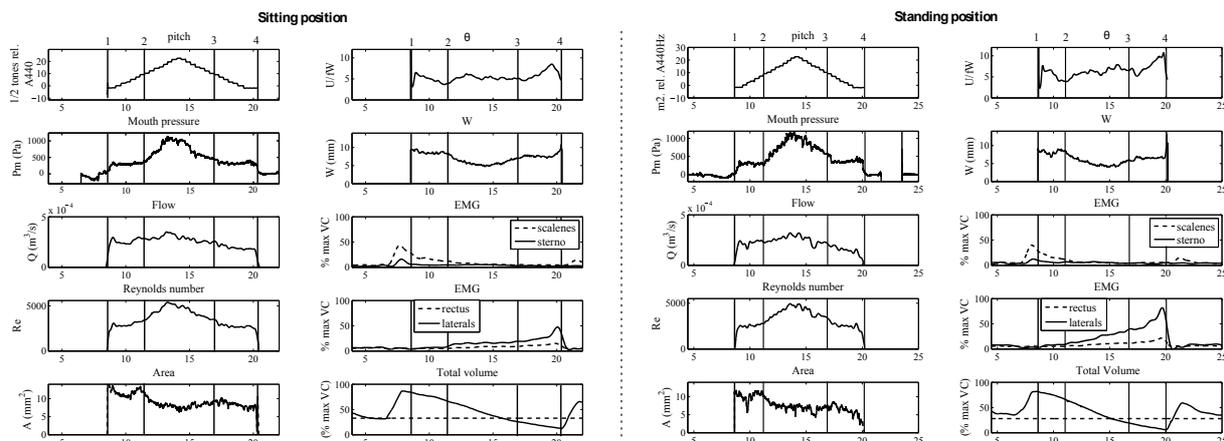


FIGURE 7.5 – Hydrodynamical and respiratory parameters for the G scale played in the seated (left) and in the standing positions (right).

G scale : Figure 7.5 shows a consistent repeatability in the hydrodynamical control parameters (P_m , Q , Re , A , θ , W) during G major scale playing in the two positions. Indeed, in both positions, mouth pressure increases by the same factor ≈ 3.6) while pitch increases by a factor 4 and inversely when pitch decreases. Area between the lips decreases in the high register to counterbalance the increase of jet velocity, and in order to keep low flow variations and to prevent an extreme increment of loudness. We also observe that W decreases in the high register (from 4 mm) to keep $\theta = U/fW$ relatively constant. A slight variation of θ is observed between the two positions, between the vertical lines 3 and 4, that may be due to the fast retreat of the lips in the standing position at the end of the play. In the two positions, a strong correlation between the flow and the Reynolds number is also noted. Finally, the activation of the inspiratory muscles seems to be similar in the two positions. Conversely, we can note a higher expiratory activity in the standing position. At the end of the G scale, the total volume is higher in the standing position (3.4 %VC) than in the seated one (12.3 %VC), which may explain the higher expiratory activity as more effort is required for a larger expiration.

Debussy's excerpt : On figure 7.6, the vertical lines represent the beginning of the sound production and the transition between the musical structures. As for the G scale, mouth pressure varies with pitch. Indeed, the two first musical bars of the excerpt are clearly different from the third one. The player seems to play the crescendo by increasing jet velocity rather than by an increase of flow. It seems that this long excerpt requires the flautist to keep (save) her air. This is clearly reflected on the flow data, which is approximately 2.8 times smaller than the one used during the G scale. The Reynolds number also follows pitch, and is smaller than for the G scale, which directly results from the smaller values of the lip area. W is kept very stable during the excerpt and θ has approximately the same pattern for the two positions. The principal difference between the two positions occurs between the vertical lines 2 and 3. During that section in the standing position, the muscular activity is minimal, thus the flautist controls the air exhaust and the flow for the decrescendo by a diminution of the lips area. In the seated position, the muscular activity is slightly higher between the vertical lines 2 and 3. The air

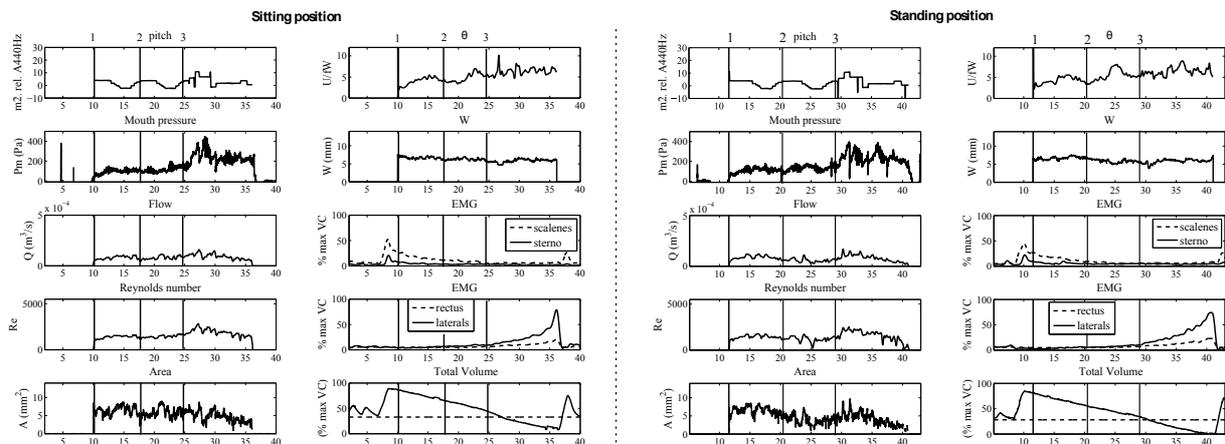


FIGURE 7.6 – Hydrodynamical and respiratory parameters for the Debussy’s excerpt played in the seated (left) and in the standing positions (right).

exhaust is then controlled by the muscular activity and not by a diminution of the lips area. In the two positions, the flow is controlled by the muscular activity in the rest of the excerpt. Furthermore, the maxima of muscles activation are higher during the Debussy’s excerpt than during the G scale, which correlates with higher inspiratory and expiratory volumes. Finally, even if the maximum activation of the laterals are similar for the two positions, we remark that in the standing position the activity is more present than in the seated position, where the lateral activation quickly increases at the end of playing. The mean of lateral activation is higher in the standing position (26%) than in the seated position (23%), from the vertical line 3 to the end of the excerpt.

Chest-wall compartment contribution :

We use a Konno-Mead diagram, [78], to show the contribution of each chest-wall compartment during inspiratory and expiratory phases of the musical tasks. Figure 7.7 represents the volume variations of the upper thorax compartment (VRC_p) versus the variations of the abdominal compartment (V_{AB}) for the two musical excerpts played in the two positions. The beginning of sound production is represented by crosses for each musical task and time evolution is noted by arrows and t indication. The oblique dotted line represents the linear function corresponding to an equal contribution of each compartment. On figure 7.7, we notice that inspiration occurs in two phases : first the Abdomen Volume increases and, second, chest-wall volume increases. Furthermore, for each musical task played in the seated position, we remark a higher inspiration, $\approx +300mL$, in V_{AB} , while the same volume is taken in VRC_p during inspiration respectively for the two postures and the same musical task. At the end of the expiration of each musical task in the seated position, the remaining pulmonary volume is higher ($\approx +300mL$ in the VRC_p) than the one for the same musical task in the standing position. Thus, the same total volume is used to perform the same musical task in the two postures. We could suppose that it is easier to play at a high Abdomen Volume in seated position. And at contrary, it should be easier to play at low VRC_p in standing position.

The higher contribution of the Abdomen Volume in the seated position decreases the slope

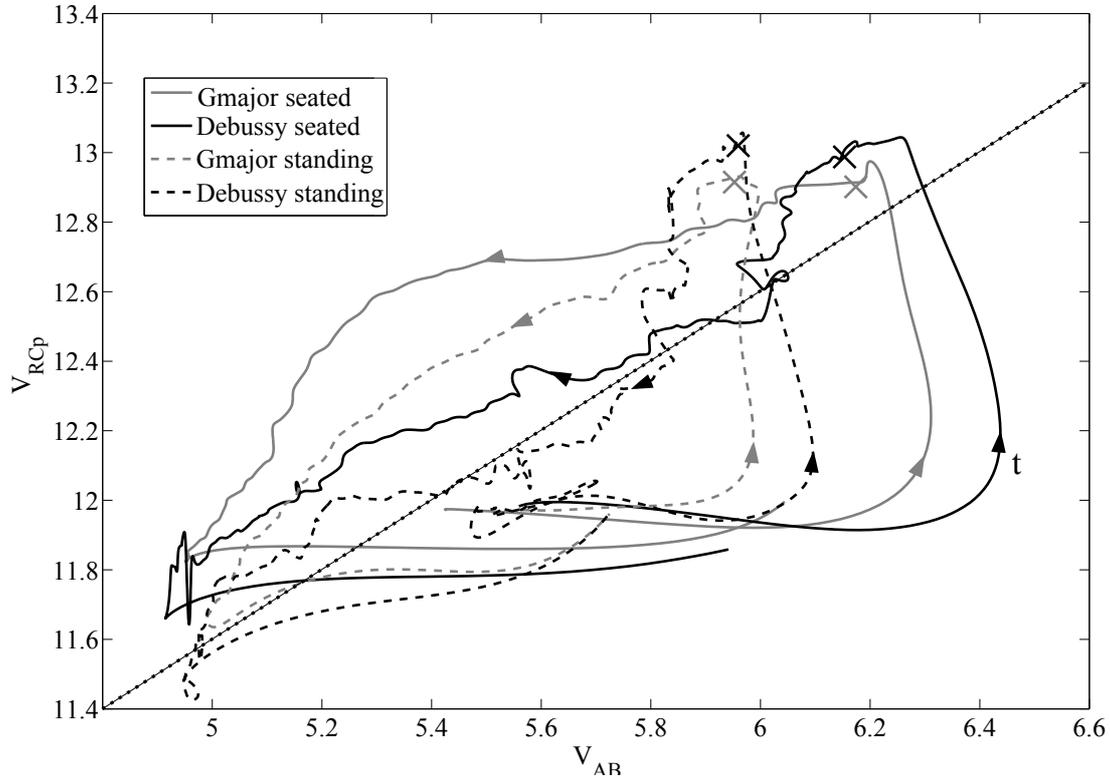


FIGURE 7.7 – Konno-Mead diagram for all the excerpts

of the curves during the expiration. However, we distinguish some resemblances between the expiratory pattern for the Debussy’s excerpt played in the two postures : the beginning of the excerpt displays a faster diminution of the upper thorax compartment. The rest of this excerpt displays a contribution of the two compartments. For the G scale played in the two postures, the resemblance is not so clear, however, the expiration is globally due to the contribution of the two compartments.

7.5 Discussion and conclusion

The combined experimental set-up is used in order to have persistent understanding of the respiratory and hydrodynamical parameters of a flautist’s performance during two musical tasks played in two different postures. Firstly, we show how the flautist needs to adapt the control parameters to perform different complexities. Indeed, a long musical excerpt requires inspiration of high air volume and a highly active control of the muscles during playing . To keep a certain stability of the dimensionless velocity, the flautist controls the distance of the lips to the labium according to the pitch and the velocity. During the expiration, the flautist also involves her respiratory muscles to perform flow control in correlation with the lip area. All of the results are consistent with the previous studies by Cossette [39, 38, 40], de la Cuadra [41], Fletcher [57] and Montgermont [95].

The analysis of the two excerpts in the two positions show that the hydrodynamical is independent of the posture and clearly repeatable. Indeed, despite the variation of posture and

despite an utilization slightly different of the respiratory system, the flautist controls her mouth in the same way. Moreover, the respiratory analysis of the two excerpts played in the two positions shows a glaring similarity : the flautist uses a larger contribution of the abdomen volume during the seated playing than during the standing one. However, the total volume commitment remains unchanged. These observations are already mentioned in the literature, especially in Johny’s study [71], which shows the influence of the posture on the thoracoabdominal movements. Indeed, the results of this study indicate a greater contribution of the abdomen volume in seated position than in standing position, especially in forced breathing (as vital capacity maneuver). Vellody et al., [129] explains that during a change of position, the gravitational forces and the force distribution of the respiratory muscles, change the compliance in the different parts of the thorax which may influence the contributions of the thoracic and abdominal volumes. This is aligned with our results.

Finally, further studies are required to further compare the hydrodynamical and respiratory parameters for musical tasks with other difficulties (register, dynamic,...) in the two different positions. As an example, high register playing requires high pressure. It would therefore be interesting to compare the different strategies used while playing in the third register of the flute.

Acknowledgments

The authors would like to thank Thomas Similowski for fruitful discussions.

Stratégies du jeu musical

8.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre à profit les connaissances acquises lors des deux parties précédentes, à la fois sur le fonctionnement acoustique de la flûte traversière et sur les stratégies respiratoires engagées par le musicien afin de comprendre les contrôles mis en œuvre par le flûtiste afin de rendre son jeu musical. Nous cherchons ici à obtenir une analyse fine et comparative du jeu de flûtistes pour des extraits issus du répertoire de la flûte traversière.

L'idée de structure musicale sera, dans l'analyse qui suit, associée à l'organisation de différents éléments musicaux, de nature rythmique, mélodique, harmonique, dynamique, ... en vue de constituer l'architecture d'une œuvre. A titre d'exemple, parmi les éléments constituant la structure d'une œuvre, nous pouvons premièrement citer les répétitions ou rappels thématiques ; à l'échelle d'une phrase ou d'une cellule musicale, ceux-ci participent à la structuration temporelle de l'œuvre. Aussi, ces éléments sont amenés à ne pas être interprétés par le musicien de manière identique selon leurs positions au sein de l'œuvre, de la phrase musicale (début, développement, fin). Deuxièmement, un autre élément important à la structure musicale d'une œuvre est la mélodie ; en effet, le rythme, les appuis, les nuances ainsi que la hauteur des notes de celle-ci sont des éléments caractéristiques de la phrase musicale. Nous pourrions également citer le tempo, les variations, l'harmonisation, les cadences,... tant d'éléments qui participent à la structure musicale d'une œuvre. Le musicien doit donc saisir tous ces éléments caractérisant la structure musicale, les comprendre afin d'interpréter l'œuvre, [64].

Au cours de son expérience musicale, le musicien apprend à analyser les œuvres musicales, en y associant, le cas échéant, divers registres émotionnels ; mais également, il apprend à contrôler son instrument afin de rendre perceptible les éléments caractéristiques de la structure musicale. Le musicien expert atteint un niveau de compétences et d'habileté pour lequel la réalisation technique d'une œuvre devient un automatisme, permettant alors au musicien de se concentrer sur la réalisation musicale. Cook, [37], définit un musicien expert comme celui ayant atteint "un niveau d'habileté par le déploiement simultané de toutes les compétences, en les soutenant et en les subordonnant à la structure d'ensemble d'une composition musicale". Le musicien expert se forge ainsi une représentation mentale de la performance qu'il souhaite produire, une certaine anticipation de la réalisation musicale.

L'interprétation musicale est à la fois liée, évidemment à la structure musicale de l'œuvre, à l'expertise du musicien, mais est également dépendante du caractère personnel du musicien. Comme le dit Sloboda, [118] : "La raison qui détermine la plupart d'entre nous à participer à une

activité musicale -qu'il s'agisse de composer, d'exécuter, ou d'écouter- réside dans la capacité qu'a la musique de susciter en nous des émotions profondes et riches de sens". L'interprétation que donne le musicien d'une œuvre musicale dépend donc également de ce que celui-ci ressent, de ses émotions, de celles qu'il a envie de transmettre... ; celles-ci étant dépendantes également de sa culture.

Ce travail cherche alors à comprendre les différents contrôles (respiratoires ou aéro-acoustiques) mis en œuvre par le musicien afin de rendre perceptible la structure musicale et son interprétation. Il est demandé au musicien de jouer cinq extraits de pièces de répertoire de la flûte traversière : l'Ouverture à Léonore de Beethoven, Carmen de Bizet, Syrinx de Debussy, le Prélude à l'après-midi d'un faune de Debussy et le deuxième mouvement de la sonate pour flûte de Poulenc. Lors du jeu de ces extraits par le musicien, différentes données aéro-acoustiques (pression buccale, géométrie des lèvres, son) et respiratoires (volumes d'air, pressions gastrique et oesophagienne, activité musculaire) sont enregistrées permettant d'estimer des paramètres (nombre de Reynolds, vitesse adimensionnée, travaux et puissances fournis, centre de gravité spectral) aidant à la compréhension du jeu du musicien.

Dans un premier temps, nous détaillons le protocole de mesure, les paramètres étudiés et présentons les extraits musicaux et les flûtistes. Dans un second temps, les résultats sont présentés sous la forme d'une analyse fine d'un extrait musical par musicien, celui-ci étant le plus riche en information par rapport à la problématique fixée. Puis des éléments d'analyse provenant des autres extraits musicaux sont présentés afin de compléter l'étude du musicien. Ensuite, une analyse du signal sonore est proposée, en relation avec les résultats obtenus durant l'analyse des stratégies du jeu des musiciens. Enfin, une discussion est proposée, comparant les différentes stratégies utilisées par les trois musiciens étudiés tout en se rapportant aux éléments de la littérature.

8.2 Protocole, paramètres étudiés, présentation des extraits musicaux et flûtistes

8.2.1 Protocole

Les paramètres respiratoires et acoustiques sont mesurés en simultané en se basant sur les protocoles de [41, 40] et [128], le protocole de mesure détaillé est expliqué en Partie III. Nous résumons ici les grandeurs mesurées.

Parmi tous les composants du système respiratoire, nous nous limitons dans cette étude à la mesure des variations des volumes d'air, aux mesures des activations des principaux muscles respiratoires ainsi qu'à la mesure des pressions oesophagiennes et gastriques qui permettent une estimation de l'activité du diaphragme [14], et des efforts produits relativement à la courbe de relaxation, expliqués aux chapitres 5 et 6.

Les paramètres aéro-acoustiques mesurés sont la pression, P_m , dans la bouche du musicien, la position des lèvres du musicien par caméra permettant d'obtenir la distance des lèvres au biseau,

W , et la surface d'ouverture des lèvres, A . Le son interne est également mesuré à l'intérieur de la tête de la flûte, à l'emplacement du bouchon. Puis, le son externe est mesuré à l'aide de deux microphones. Le protocole de mesure est alors identique à celui du chapitre 6.

8.2.2 Définition des paramètres étudiés

A partir des données mesurées sont calculés les paramètres permettant la description aéro-acoustique et respiratoire du jeu du musicien.

Paramètres respiratoires

A partir des mesures de pressions œsophagienne et gastrique, de la courbe de relaxation et de la mesure des volumes d'airs utilisés, nous pouvons définir les puissances \mathcal{P}_{RC_p} fournies par les muscles inspireurs et expirateurs du haut-thorax; et aussi la puissance \mathcal{P}_{AB} fournie par les muscles de l'abdomen. Nous rappelons ici les formules permettant le calcul de ces puissances (définies au chapitre 5) :

$$\mathcal{P}_{RC_p} = (P_{oes} - P_{relax_{oes}}).Q_{RC_p} \quad (8.1)$$

$$\mathcal{P}_{AB} = (P_{gas} - P_{relax_{gas}}).Q_{AB} \quad (8.2)$$

La puissance \mathcal{P}_{RC_p} développée par la cage thoracique haute¹ est négative lorsque les muscles inspireurs retiennent l'expiration et positive lorsque les muscles expirateurs forcent l'expiration. On définit également la puissance totale \mathcal{P}_{tot} fournie par les muscles comme étant la somme de la valeur absolue de la puissance du haut-thorax ajoutée à la puissance fournie par les muscles de l'abdomen, soit :

$$\mathcal{P}_{tot} = \mathcal{P}_{RC_p} + \mathcal{P}_{AB} \quad (8.3)$$

Paramètres aéro-acoustiques et sonores

Une partie des paramètres aéro-acoustiques utilisés dans cette étude ont déjà été présentés et définis dans le chapitre 4, nous les rappelons brièvement ici.

Paramètres aéro-acoustiques

La pression mesurée dans la bouche du musicien, nous permet d'obtenir par l'équation de Bernoulli, une estimation de la vitesse du jet d'air sortant de la bouche du musicien, $U = \sqrt{2P_m/\rho_0}$ où P_m est la surpression dans la bouche relativement à la pression atmosphérique et ρ_0 la masse volumique de l'air. En combinant cette vitesse de jet avec l'aire d'ouverture des lèvres, le débit d'air sortant $Q = A.U$ est aussi estimé.

Deux nombres adimensionnés sont également définis à partir des paramètres mesurés : le nombre de Reynolds relié à la structure du jet, celui-ci étant laminaire pour un nombre de Reynolds inférieur à 2000-3000 et turbulent au-dessus. Un jet turbulent produit un bruit large bande, qui, filtré par les résonances du tuyau, constitue une part importante des caractéristiques

1. On entend par le terme "cage thoracique haute", celui appelé précédemment en anglais "pulmonary rib-cage"

du son perçu. Le nombre de Reynolds est défini par : $Re = UD/\nu$ où D est le rayon hydraulique du jet (détaillé au chapitre 4) et ν la viscosité cinématique du fluide.

Nous définissons également la vitesse de jet adimensionnée comme étant $\theta = U/f_0W$ où f_0 est la fréquence de la note jouée. θ est également décrit au chapitre 4, nous rappelons juste ici que la théorie indique les valeurs optimales de θ au fonctionnement de l'instrument entre 4 et 7.

Le musicien au cours de son jeu, ajuste ces différents paramètres dans le but de garantir l'oscillation du jet à la fréquence souhaitée, mais aussi produit une évolution spécifique de ces paramètres dans le temps afin de réaliser des intentions expressives.

En plus des paramètres précédemment définis et afin de comparer les différentes puissances mises en jeu (respiratoires et à l'embouchure) lors de cette expérience, nous définissons deux puissances : la puissance fournie à l'instrument à la bouche de musicien et la puissance acoustique rayonnée par l'instrument. L'estimation de ces différentes puissances nous permet de comparer les puissances fournies par le système respiratoire à celles effectives produites par le musicien à la bouche et celle à la sortie de l'instrument.

Puissance fournie à l'instrument :

La puissance fournie à l'instrument \mathcal{P}_{instru} est définie comme :

$$\mathcal{P}_{instru} = P_m \cdot Q = \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} AP_m^{\frac{3}{2}} \quad (8.4)$$

Puissance acoustique rayonnée par l'instrument :

Deux microphones externes ont été placés à environ 1 mètre de la position du flûtiste, cependant la position de ceux-ci n'a pas été optimisée selon le rayonnement en champ libre de la flûte. De plus, la salle n'ayant pas de traitement anéchoïque, la détermination du rayonnement acoustique de la flûte sans réflexion serait impossible à obtenir à partir des microphones externes, notre estimation est alors ici trop limitée. Nous cherchons alors à obtenir la puissance acoustique, \mathcal{P}_{ac} , rayonnée par l'instrument à partir de la pression mesurée par le microphone placé à l'intérieur de l'embouchure de la flûte, à la place du bouchon.

Pour cela, on approxime, en basses fréquences, le rayonnement de la flûte par celui d'un tube de longueur L ouvert-ouvert, voir figure 8.1, qui rayonne aux deux extrémités. En régime

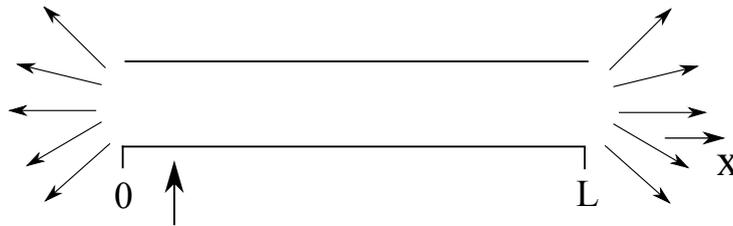


FIGURE 8.1 – Schéma d'un tube ouvert-ouvert de longueur L .

harmonique, la pression à un instant t , à une position x , peut s'écrire comme :

$$p(x, t) = (Ae^{-jkx} + Be^{jkx})e^{j\omega t} \quad (8.5)$$

ou encore pour des ondes planes, en un point quelconque :

$$p(x, t) = C \sin k(x + \delta) e^{j\omega t} \quad (8.6)$$

A partir de l'équation d'Euler $\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$, on obtient l'expression de v en régime harmonique :

$$v = \frac{jC}{\rho_0 c_0} e^{j\omega t} \cos k(x + \delta) \quad (8.7)$$

où si $x + \delta \ll 1/k \Rightarrow \cos k(x + \delta) \simeq 1$, on a alors $V = \frac{C}{\rho_0 c_0}$. De plus, on a $P = V Z_{ray}$ où V et P sont les amplitudes des pression et vitesse. Pour le calcul de la puissance, nous ne nous intéressons qu'aux composantes pression et débit en phase, c'est-à-dire qu'à la partie réelle de l'impédance de rayonnement Z_{ray} .

La puissance peut alors s'exprimer à une extrémité comme :

$$\mathcal{P}_{ac} = \frac{1}{2} S V^2 \operatorname{Re}(Z_{ray}) \quad (8.8)$$

où S est la surface de rayonnement de la flûte, et $\operatorname{Re}(Z_{ray}) = \frac{1}{4} \rho_0 c_0 k^2 r^2$ pour un tuyau mince rayonnant dans l'espace infini.

D'après Coltman [33], malgré des géométries différentes, en approximation basses-fréquences, il existe une symétrie des deux sources aux extrémités de la flûte. On peut alors multiplier l'expression (8.8) par deux afin d'estimer la puissance totale, qui s'écrit alors :

$$\mathcal{P}_{ac} = \frac{\pi r^4 C^2 k^2}{4 \rho_0 c_0} \quad (8.9)$$

où $C = \frac{p_{meas}}{\sin k(x+\delta)}$ où p_{meas} est la pression acoustique interne mesurée, et r est le rayon interne du tuyau de la flûte ($r = 9.5$ mm).

A partir des sons interne et externe mesurés, nous pouvons calculer des paramètres liés à la production sonore : le centre de gravité spectral et le rapport des amplitudes. Ces deux paramètres sont retenus comme descripteurs élémentaires du contenu spectral du son produit. Le CGS est corrélé avec la sensation de brillance du son, [103], et l'analyse des amplitudes relatives des harmoniques nous permettent de comprendre quelles harmoniques font évoluer ce dernier. Les amplitudes des six premières harmoniques sont étudiées.

Centre de gravité spectral

La présence des harmoniques est ensuite étudiée dans le son interne de l'instrument à partir du centre de gravité spectral (CGS), calculé à partir des moyennes des amplitudes pondérées par les fréquences des harmoniques selon la formule :

$$CGS = \frac{\sum_{n=1}^{n=6} A_n f_n}{\sum_{n=1}^{n=6} A_n} \quad (8.10)$$

où A_n et f_n , correspondent respectivement à l'amplitude et la fréquence de la n^{ieme} harmonique. Le CGS représente alors le centre de gravité du spectre du signal interne à la flûte.

discussion CGS ext/int à venir

Le centre de gravité spectral produit par le son de la flûte dépend bien évidemment de la note jouée, selon le doigté utilisé la réponse acoustique de l'instrument est modifiée. De plus, selon le registre joué, le contenu spectral est également différent. Par exemple, dans le premier registre, le musicien joue sur les premiers pics d'impédance de l'instrument, les harmoniques suivantes (les pics suivants) sont donc proches : octave, octave+quinte, ... et non atténuées, car le facteur de qualité est important. Les harmoniques sont donc plus présentes dans le registre bas de la flûte, et le centre de gravité spectral est plus haut que la fondamentale. Par contre, plus le registre est élevé, plus le musicien joue sur des pics d'admittance hauts dans la bande fréquentielle (deuxième ou troisième pics); les multiples de pics d'admittance suivant les pics joués étant plus espacés et à coefficient de qualité bas, le centre de gravité spectral est alors très proche de la fondamentale dans le haut du registre. Il existe donc une dépendance entre le centre de gravité spectral et la hauteur de la note jouée.

Afin de s'affranchir de la présence de la première harmonique, dont la présence est prépondérante, et afin d'obtenir une estimation du spectre de l'instrument sans celle-ci nous pouvons adimensionner le CGS par la fréquence fondamentale : CGS/f_0 .

Vibrato

Lors du jeu de la flûte, le vibrato est associé à une modulation autour de 5Hz de la pression buccale, [57]. Cette modulation génère des fluctuations de vitesse de jet, qui se traduisent par une modulation de l'amplitude et de la fréquence du son produit, ces deux caractéristiques du son étant intimement liées dans la production du son dans les flûtes, [9]. La composante oscillante du vibrato est ici isolée à la fois dans les signaux de la pression buccale et de la fréquence fondamentale du son produit.

La composante oscillante du vibrato dans la pression buccale P_m est extraite à partir d'un filtre passe-bande de Butterworth du troisième ordre, entre 3 et 8 Hz. Ces valeurs ont été choisies en accord avec la littérature, [110, 115, 122, 5].

Si on applique ce même filtre directement sur la fréquence fondamentale f_0 de la note jouée, nous obtenons des artefacts (oscillations rapides, rebondissements de filtre) sur le signal filtré dus aux changements de note qui s'effectuent très rapidement, en forme de créneaux. (Alors que ceux-ci sont effectués plus doucement dans le signal de la pression buccale). Afin de palier ces désagréments, nous extrayons alors dans un premier temps au signal de la fréquence fondamentale, la composante continue de celui-ci qui correspond aux changements de notes, soit des variations supérieures à 13 Hz. Puis nous soustrayons celui-ci au signal original afin de n'obtenir que la composante oscillante du signal d'origine. Puis, afin d'isoler les oscillations dues au vibrato, nous appliquons le même filtre de Butterworth que pour la pression buccale.

8.2.3 Présentation des extraits musicaux

Le but de ce travail est d'étudier les stratégies de contrôle du jeu des flûtistes pour des consignes musicales variées présentant des complexités respiratoires et musicales différentes. Il est demandé aux flûtistes de jouer cinq extraits musicaux différents, dont deux sont joués en une seule respiration, voir figure 8.2. Le premier extrait, *Prélude à l'après-midi d'un faune* de Debussy, est particulièrement long et joué en soliste au début de l'oeuvre, la principale difficulté étant sa durée et le crescendo-decrescendo à la fin de l'extrait. Le second extrait, *l'ouverture à Léonore* de Beethoven, est également une pièce du répertoire de la flûte ; les principales difficultés sont la durée de l'extrait, le changement de dynamique (de *ff* à *pp*) et le fait que celui-ci soit joué dans le troisième registre de l'instrument, ce qui requiert des pressions buccales particulièrement hautes.

Prélude à l'après-midi d'un faune

Debussy

Très modéré (♩ = 84-92)

Leonore Overture

Beethoven

Adagio (♩ = 60-63)

FIGURE 8.2 – Partition des deux extraits en une respiration

Il est ensuite proposé au sujets de jouer trois extraits musicaux, issus du répertoire traditionnel de la flûte traversière, où plusieurs respirations sont nécessaires mais pas nécessairement indiquées sur la partition, voir figure 8.3.

Sur la figure 8.3, le premier extrait est un passage de *Carmen* écrit par G. Bizet ; les principales difficultés de cet extrait sont la nuance *pp* permanente, dans un registre assez haut et la dernière phrase dont la durée est importante et comporte un decrescendo dans le troisième registre. Le deuxième extrait sur la figure 8.3 est le début du second mouvement de la sonate pour flûte et piano de F. Poulenc, dans lequel la nuance est globalement *p*. Cet extrait ne comporte pas de grosses difficultés en terme de longueur de phrase, par contre, certaines phrases commencent dans le troisième registre avec une nuance *pp*. Enfin, le troisième extrait de la figure 8.3 est le début de la pièce pour flûte seule *Syrinx* de C. Debussy ; étant donné qu'il n'y a pas d'accompagnement de piano pour cette pièce, le flûtiste est plus libre dans son jeu, ses respirations, [60]. La dernière phrase de cet extrait est assez longue et comporte un crescendo-decrescendo dans le troisième registre. Ces trois extraits font partie du répertoire traditionnel de la flûte traversière.

Carmen

3. Akt 1. Bild, Vorspiel

Geoges Bizet

Allegretto quasi Andantino [$\text{♩} = 60-72$]

1 Solo

pp dolcissimo

pp dim. *pp* *smorz.*

Sonate pour flûte et piano

Cantilena

Francis Poulenc

Assez lent [$\text{♩} = 52$]

p *p*

(3) (4)

4 (5) 5 (6)

10

Syrinx

La flûte de Pan

Claude Debussy

Très modéré

mf *mf* *p* *p*

Retenu

FIGURE 8.3 – Partition des trois autres extraits musicaux

Les respirations effectuées par les flûtistes sont notées par des chiffres en rouges sur chacune des partitions.

8.2.4 Présentation des flûtistes

Trois flûtistes non-fumeurs sont étudiés. Parmi ces sujets, deux femmes (Sujets 1 et 3) et un homme (Sujet 2) étaient âgés entre 25 et 49 ans au moment de l'expérience. Deux de ces sujets ont un apprentissage de flûtiste professionnel (Sujets 1 et 2), une expérience de jeu importante (au moins 250 concerts en public) et jouent régulièrement depuis 20 ans. Le troisième sujet est un joueur amateur, qui joue régulièrement en orchestre et en formation de musique de chambre.

8.2.5 Conditions de jeu

La description des équipements permettant l'acquisition des grandeurs respiratoires et aéro-acoustiques utilisées ici est détaillée lors de la partie III.

Les expériences ont été menées dans une pièce de $80m^3$ sans traitement anéchoïque, celle-ci fournissant un environnement similaire à une salle de répétition ou de cours de pratique instrumentale. Les trois musiciens ont joué durant la séance d'expérience sur la même flûte, une flûte d'étude Yamaha.

Une séance d'expérience dure approximativement deux heures et demi, la première heure étant principalement utilisée pour la préparation des sujets : le positionnement des marqueurs réfléchissants sur le thorax, le placement des ballons permettant l'acquisition des pressions oesophagienne et gastrique ainsi que le positionnement et le test des électrodes EMG. Ensuite, quelques minutes sont laissées au musicien afin qu'il s'adapte aux systèmes de mesure et se mette en condition de jeu. La phase d'enregistrement des données pendant le jeu du musicien dure environ une heure et demi. Environ quinze extraits musicaux sont enregistrés pour chaque musicien, parmi lesquels ceux sélectionnés sont présentés ici. La sélection s'effectue selon le retour des musiciens sur leur performance, le jeu est alors amené à être itéré si ceux-ci ne sont pas satisfaits. De même, le jeu peut être itéré si nous notons une mauvaise acquisition des données en direct (ouverture des lèvres cachées, pression buccale faussée, ...).

8.3 Résultats

L'analyse détaillée de tous les extraits pour chacun des sujets serait trop lourde à présenter et comme les musiciens interprètent différemment chacun des extraits, nous choisissons de présenter l'extrait musical le plus pertinent en terme de contrôle pour chacun des musiciens ; en effet le but n'est pas d'apporter une comparaison des trois interprétations musicales d'un extrait mais bien de comprendre comment au travers d'un extrait musical, le musicien rend perceptible la structure et l'interprétation musicale. À cette fin, nous montrons pour chacun des musiciens des éléments provenant de l'analyse des autres extraits afin d'appuyer l'analyse ou au contraire de montrer différentes formes de contrôles selon un contexte respiratoire ou musical différent.

8.3.1 Analyse du jeu du sujet 1

Analyse de la partition de l'extrait du deuxième mouvement de la sonate de Poulenc

Cette sonate, composée en 1957 par Francis Poulenc, comporte trois mouvements, le premier est un allegretto, le second est la cantilène présentée ici et le dernier un presto. Francis Poulenc est un compositeur du $XX^{ième}$ siècle, associé à l'époque moderne, faisant partie du groupe des six, groupe de compositeurs réagissant essentiellement contre l'impressionnisme et le wagnérisme et influencés par les idées d'Erik Satie et de Jean Cocteau.

Nous proposons ici une brève analyse musicale de la partition de l'extrait du deuxième mouvement de la sonate de Poulenc, basée sur [64]. Afin d'appuyer celle-ci, la figure 8.4, représente la partition accompagnée de la partie de piano.

Premièrement, remarquons que l'extrait est composé en Si \flat mineur, même si les altérations ne

2 Cantilena

Assez lent [$\text{♩} = 52$]

douxement baigné de pédale

FIGURE 8.4 – Partition avec piano de l'extrait du deuxième mouvement de la sonate de Poulenc

sont pas présentes à l'armature. Nous remarquons également une modulation en Ré \flat Majeur

sur les deux premiers temps de la mesure 8, puis une modulation en Fa mineur et enfin un retour en Si \flat mineur en mesure 10.

Secondement, notons que le jeu du piano est uniquement mélodique sur les deux premières mesures de l'extrait, mélodie similaire mais décalée de deux croches par rapport à celle de flûte. Puis, pour le reste de l'extrait, le piano a un rôle d'accompagnement à l'aide d'un patron de deux croches en alternance entre les mains droite et gauche. Une basse en Si \flat est prépondérante sur les mesures 3, 4, 5 et 6. Puis la basse passe sur le quatrième degré (Mi \flat) à la mesure 7 en vue de la modulation suivante, nous remarquons d'ailleurs une insistance de la phrase mélodique sur le Ré \flat . Modulation se résolvant sur les degrés (IV, V et I mesure 11). Le jeu du piano est indiqué *pp* et "doucement baigné de pédale" durant cet accompagnement. Nous notons également qu'à partir de la mesure 3, l'accompagnement harmonique du piano est composé d'une inversion des mains ; en effet, classiquement la note pédale est jouée sur les temps forts (1 et 3 dans une mesure 4/4) puis l'harmonie est ensuite fournie par la main droite ; alors qu'ici la note pédale est jouée sur les temps faibles à la main gauche après l'harmonie de la main droite. Nous pouvons remarquer aussi une accélération harmonique de cet accompagnement lors de la mesure 9, qui est d'ailleurs une mesure à 3 temps, mesure de transition avant la résolution mesure 10. Le jeu de la flûte est indiqué *p* et est composé d'une ligne mélodique avec de grandes liaisons entre 4 temps 6 temps, chevauchant toutes une ou deux barres de mesures. La modernité de Francis Poulenc se remarque notamment dans l'harmonisation et la ligne mélodique, cependant le jeu de la flûte fait appel à une technique "classique" agrémentée de trilles, mordant ou accent. Nous constatons dans cette ligne mélodique deux répétitions, mesures 6, 7 et 8, cette cellule musicale répétée est d'ailleurs assez similaire à celle de la première de l'extrait. Hormis le decrescendo indiqué sur la partition à la mesure 10, aucune autre indication de nuance n'est présente, ce qui laisse libre interprétation au musicien en fonction des phrases indiquées. Les respirations ne sont également pas indiquées sur la partition, nous avons donc laissé le libre choix aux flûtistes. Pour des raisons pratiques, le jeu de cet extrait est effectué sans accompagnement au piano. Les remarques concernant l'analyse musicale du jeu du piano sont donc à considérer comme éléments du contexte musical vis à vis du jeu des musiciens qui, tous trois, connaissaient la pièce au moment de l'expérience.

Analyse du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 1

Afin d'effectuer l'analyse des contrôles mis en jeu par le musicien 1, nous représentons en figure 8.5 la hauteur de la note jouée, les volumes d'airs utilisés ainsi que la vitesse de jet adimensionnée θ et le nombre de Reynolds Re . Nous représentons également en figures 8.6 et 8.7 les puissances mises en œuvre lors du jeu de cet extrait par le musicien 1, à savoir la puissance acoustique rayonnée, la puissance fournie à l'instrument et les puissances musculaires développées. Sont également représentées les oscillations de la pression buccale et celles de la fréquence fondamentale créées par le vibrato. Tous ces paramètres sont représentés pour chaque cycle respiratoire du musicien 1 au cours du jeu.

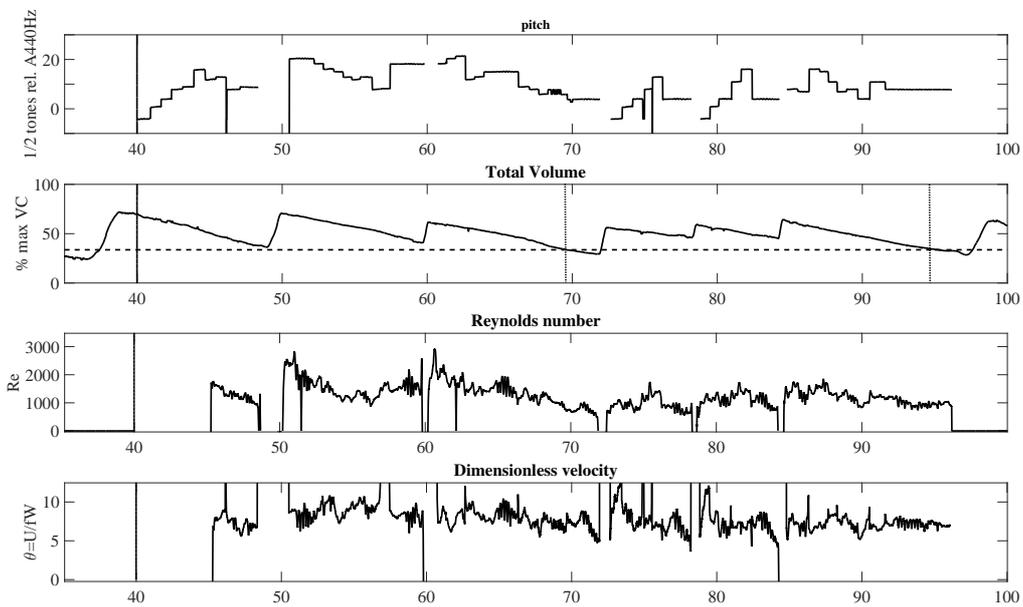


FIGURE 8.5 – Représentation de la hauteur des notes, des volumes d’air utilisés, et des nombres adimensionnés θ et Re durant le jeu de l’extrait de la sonate de Poulenc par le sujet 1. Nous remarquons que le tuyau de mesure de pression buccale est bouché jusqu’à la seconde 45, deux passages du volume total sous FRC (indiqués par la barre pointillée verticale). Nous notons de grandes valeurs de Re sur les notes aigües et une certaine corrélation de celui-ci avec les hauteurs de note.

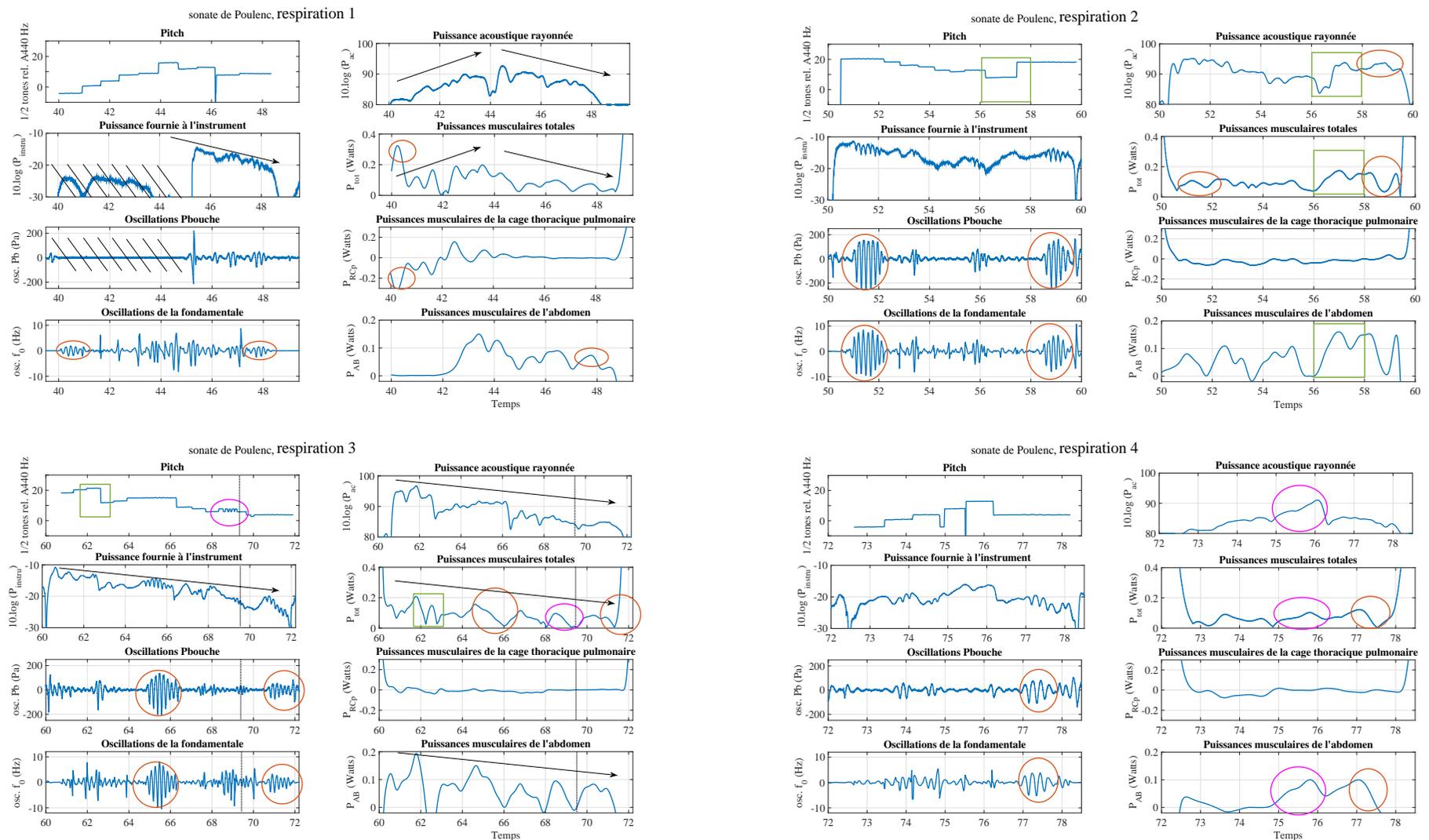


FIGURE 8.6 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, pour les respirations 1 à 4 durant le jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 1. Les éllipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de P_b et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées. Les flèches noires indiquent la structure ascendante/descendante que le musicien donne à la phrase. Les rectangles verts marquent les liaisons sur de grands intervalles et mettent en évidence l'effort associé. L'éllipse rose montre le trille et son effort associé. La partie hachurée correspond à la zone non exploitable, puisque la pression buccale est faussée à cause du cathéter bouché. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

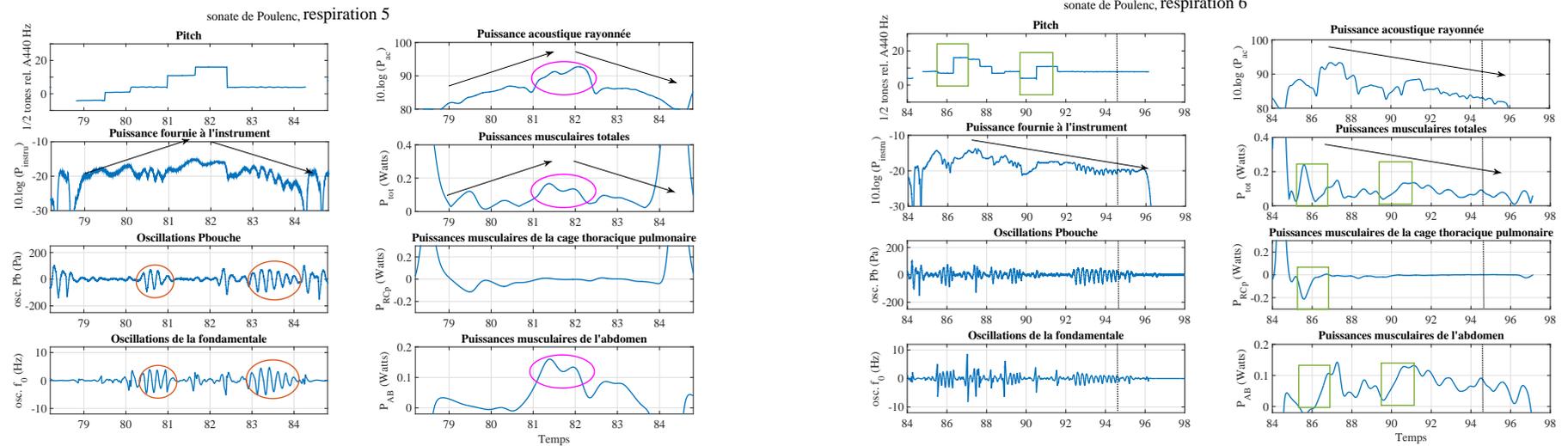


FIGURE 8.7 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, pour les respirations 5 et 6 durant le jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 1. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de Pb et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées. Les flèches noires indiquent la structure ascendante/descendante que le musicien donne à la phrase. Les rectangles verts marquent les liaisons sur de grands intervalles et mettent en évidence l'effort associé. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

Lors du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc, le musicien 1 a effectué 6 respirations, le découpage des figures est alors effectué ainsi. Sur la figure représentant la première respiration, figure 8.6 haut-gauche, nous remarquons que la mesure de la pression buccale est nulle jusqu'à la seconde 45 environ, le cathéter certainement bouché, fausse donc l'analyse de la puissance fournie à l'instrument et celle du vibrato dans la pression buccale. L'analyse des puissances musculaires montre que le musicien expire dans un premier temps en retenant l'air en contractant les muscles inspireurs jusqu'à la seconde 44, d'où une puissance négative de la cage thoracique pulmonaire. Puis, celui-ci expire en contractant les muscles expirateurs de l'abdomen, d'où une puissance musculaire positive de l'abdomen. Par contre, le musicien ne contracte quasiment pas les muscles expirateurs du haut-thorax, d'où une puissance du haut-thorax autour de zéro ou négative. Nous pouvons également noter que deux séquences de vibrato sont repérables dans les oscillations de la fréquence fondamentale et sont déclenchées par une légère activation ou relâchement des muscles, respectivement inspireurs pour la première séquence et expirateurs pour la seconde. Ces deux séquences sont indiquées sur la figure 8.6 par une ellipse rouge. Nous pouvons également noter que pour cette phrase, les patrons des puissances musculaires développées, de la puissance fournie à l'instrument et celle de la puissance acoustique rayonnée ont la même allure, repérée par les flèches noires sur la figure 8.6, montante du début de l'extrait vers la note la plus aigüe puis descendante jusqu'à la fin. Cette phrase musicale semble donc musicalement détachée de la suivante, le musicien "vise" le point culminant de la phrase sur la note la plus haute, puis redescend jusqu'à la fin de la séquence.

Les périodes d'inspiration demandent des puissances respiratoires nettement plus importantes et pour des questions pratiques et d'organisation, elles ne sont pas présentées ici, voir chapitre 6.

Le début du jeu de la séquence liée à la seconde respiration se situe dans le haut-registre de la flûte, d'où une nécessité de développer des pressions buccales plus importantes ; celles-ci sont le résultat d'une action musculaire abdominale dès le début de la séquence, d'où une augmentation de la puissance abdominale dès le début de la séquence également. Nous pouvons également remarquer un saut d'octave entre les secondes 56 et 58, repéré sur la figure 8.6 par un cadre vert, dont la montée en pression est clairement réalisée par une action des muscles abdominaux, d'où une forte montée de la puissance musculaire de l'abdomen. De plus, nous notons deux séquences de vibrato ample, en début et fin de séquence (encerclées en rouge sur la figure), celles-ci sont également contrôlées par l'action des muscles expirateurs de l'abdomen. Une certaine corrélation entre puissance acoustique rayonnée et puissance fournie à l'instrument est notable. Par contre, la corrélation avec la puissance musculaire fournie n'est pas évidente, puisque les muscles sont utilisés afin de réaliser des actions particulières sans répercussion évidente sur la puissance rayonnée ou fournie à l'instrument. Nous notons que la puissance acoustique rayonnée ne semble pas diminuer à la fin de cette séquence. En effet, la phrase musicale ne se conclut donc pas ici, la respiration entre les phrases 2 et 3 est principalement nécessaire au musicien mais ne semble pas indiquer une transition musicale.

Le jeu de la respiration 3 est également dans un registre élevé de l'instrument, d'où une puissance générée par les muscles abdominaux dès le début de la séquence. Les actions des muscles sont encore une fois très ciblées, par exemple nous pouvons noter que la descendante d'une septième à la seconde 62 (encadrée en vert), est réalisée à l'inverse du saut d'octave précédent par le relâchement des muscles abdominaux et thoraciques, d'où une diminution des puissances $\mathcal{P}_{\mathcal{R}C}$ et $\mathcal{P}_{\mathcal{A}B}$. De plus, nous remarquons deux séquences de vibrato (encadrées en rouge) générées et/ou contrôlées par une puissance abdominale. Nous pouvons également noter que la réalisation du mordant et trille de la mesure 6 est également soutenue par une activité abdominale. De plus, globalement les puissances fournies à l'instrument, acoustique rayonnée et musculaires semblent diminuer au cours de cette séquence. Le musicien montre donc l'intention de terminer la phrase mélodique commencée au début de la respiration 2, ce qui correspond à une fin de la structure musicale avant la transition amenant à la tonalité suivante. Nous pouvons également noter le passage du volume total sous FRC, repéré sur la figure 8.6 par une barre verticale pointillée. Il est alors intéressant de noter que la puissance thoracique est égale à zéro à cet instant, ce qui correspond à la "logique" respiratoire qui voudrait qu'on atteigne la FRC sans effort expirateur thoracique. De plus, nous pouvons noter des efforts expirateurs abdominaux avant que le volume total soit sous la FRC, ces actions correspondent non pas à des raisons physiologiques liées à l'expiration mais à des intentions spécifiques du jeu du musicien : vibrato, pressions (hauteur de notes) élevées.

Les phrases 4 et 5 sont identiquement écrites sur la partition du point de vue de la ligne mélodique, mais, l'harmonisation du piano change. La phrase 5 porte sur un événement musical nettement plus important que la quatrième puisqu'elle comporte une modulation. Nous remarquons certaines similarités dans le jeu du musicien, entre les phrases 1 et 5 dans lesquelles le musicien semble viser la note la plus haute, pour ensuite redescendre. Cette intention est visible à la fois dans la puissance acoustique rayonnée mais aussi dans la puissance fournie à l'instrument. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que lors de la réalisation de ces deux phrases, le musicien soutient cette intention par une activation des muscles abdominaux, représentée sur la figure par des cercles roses, certainement dans le but de faire monter la pression buccale pour obtenir la note culminante, mais peut-être aussi pour augmenter le volume sonore (particulièrement dans la phrase 5). De plus, dans chacune de ces séquences, nous pouvons remarquer des actions particulières des muscles abdominaux lors de la réalisation de vibrato (cercles rouges), en effet les muscles abdominaux sont actifs au déclenchement du vibrato et se relâchent ensuite. Ces deux phrases semblent donc être réalisées de manière assez semblable mais plus accentuée dans la cinquième. D'autre part la représentation du nombre de Reynolds et de la vitesse adimensionnée en figure 8.5 va également dans ce sens, en effet nous remarquons que les patrons des deux phrases sont quasiment identiques. Nous pouvons par ailleurs noter une certaine corrélation entre les patrons du nombre de Reynolds et celui des puissances.

Enfin, l'analyse de la sixième respiration montre encore une fois la direction que le musicien

a voulu donner à cette phrase, en effet nous pouvons noter que les puissances diminuent dans le but de conclure cet extrait, allant dans le sens de la résolution musicale. Aussi, nous pouvons noter que l'action des muscles du haut-thorax est très réduite. De plus, les sauts de hauteurs de note sont encore une fois accompagnés d'une puissance musculaire abdominale croissante, ceux-ci sont repérés par des encadrés verts.

L'analyse de l'extrait du deuxième mouvement de la sonate de Poulenc joué par le musicien 1 se poursuit par la représentation des diagrammes de Konno-Mead en figure 8.8. La représentation de ces diagrammes permet d'analyser les contributions de chacun des compartiments de la cage thoracique pour chaque cycle respiratoire. La fin de la courbe correspondant à la phrase n coïncide donc avec le début de celle de la phrase $n + 1$. L'inspiration est alors représentée en vert, la préparation en rouge et la phase de jeu en bleu. Il est alors intéressant de remarquer sur

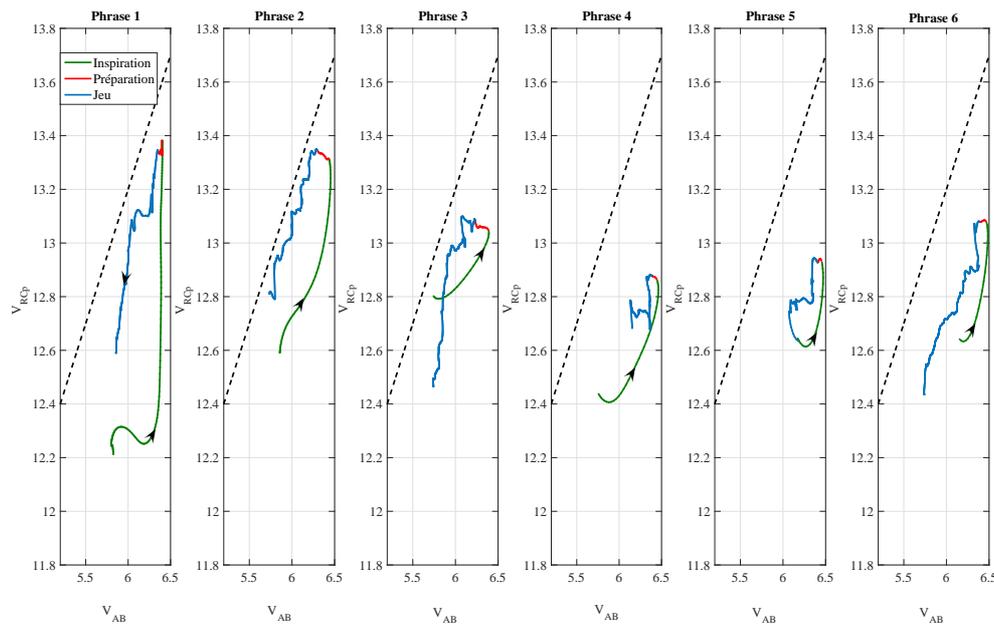


FIGURE 8.8 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le sujet 1, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps.

la figure 8.8 que les phrases 4 et 5 qui sont identiques sur la ligne mélodique de la partition et réalisées de manière similaires ont des représentations du diagramme de Konno-Mead identiques. Le musicien 1 réalise donc ces deux phrases de façon très similaire, dont le début est notamment réalisé par une diminution prépondérante du volume abdominal. Nous pouvons également noter une certaine ressemblance entre ces phrases et le début de la première phrase, en effet celle-ci est très proche mélodiquement également.

Comparaison de l'analyse avec les observations effectuées sur les autres extraits musicaux

L'analyse de chacun des extraits étant trop lourde à présenter, on se contente ici d'appuyer les observations ou de montrer les variations entre celles-ci faites sur l'extrait de Poulenc et celles sur les autres extraits musicaux étudiés.

Premièrement, nous avons noté que la réalisation du vibrato dans les autres extraits était également accompagnée d'une puissance musculaire abdominale, comme présenté dans la figure 8.9 lors de la seconde respiration de l'extrait de Syrinx. Effectivement, à partir de la figure 8.9,

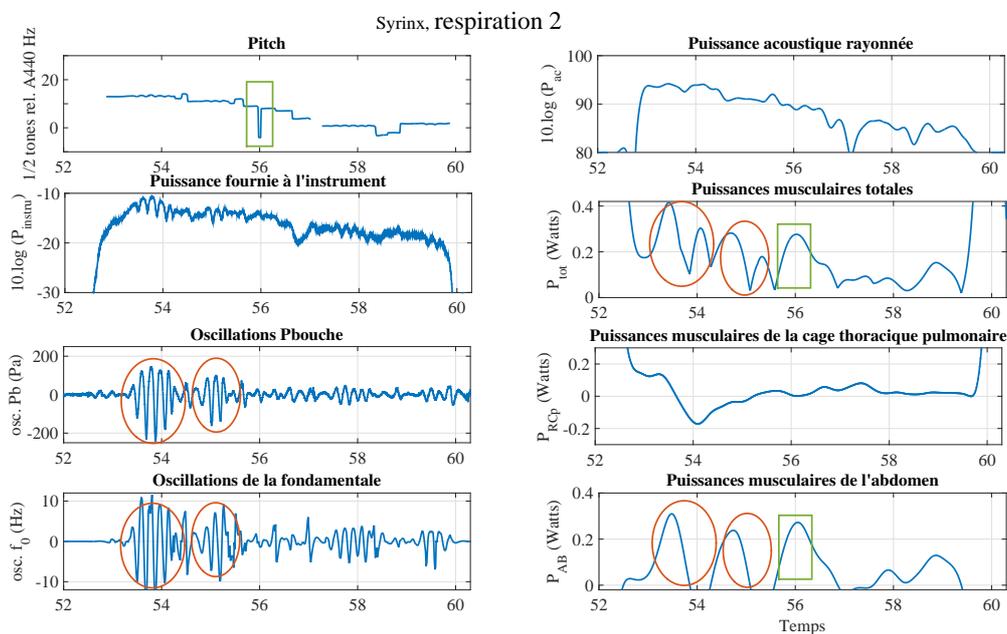


FIGURE 8.9 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, pour la respiration 2 durant le jeu de l'extrait de Syrinx de Debussy par le musicien 1. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de P_b et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées. Le rectangle vert marque une discontinuité de la détection de la hauteur de note, certainement en raison d'un transition entre deux notes un peu difficile.

nous pouvons noter que comme dans l'extrait de la sonate de Poulenc, la réalisation du vibrato est soutenue par une activité des muscles abdominaux. De plus, sur cette figure nous pouvons aussi remarquer un élément intéressant dans l'encadré vert, la discontinuité dans la hauteur de note montre que le son produit n'a pas été régulier, nous remarquons d'ailleurs une très légère baisse de la puissance acoustique rayonnée. Nous pouvons alors noter qu'à cet instant une activité des muscles abdominaux a lieu, peut-être dans le but de soutenir le son.

Nous avons également remarqué que le jeu du début de l'extrait de l'Ouverture à Léonore de Beethoven était accompagné d'un vibrato assez important, ample. Nous représentons alors celui-ci accompagné des puissances développées en figure 8.10. Premièrement, nous pouvons noter,

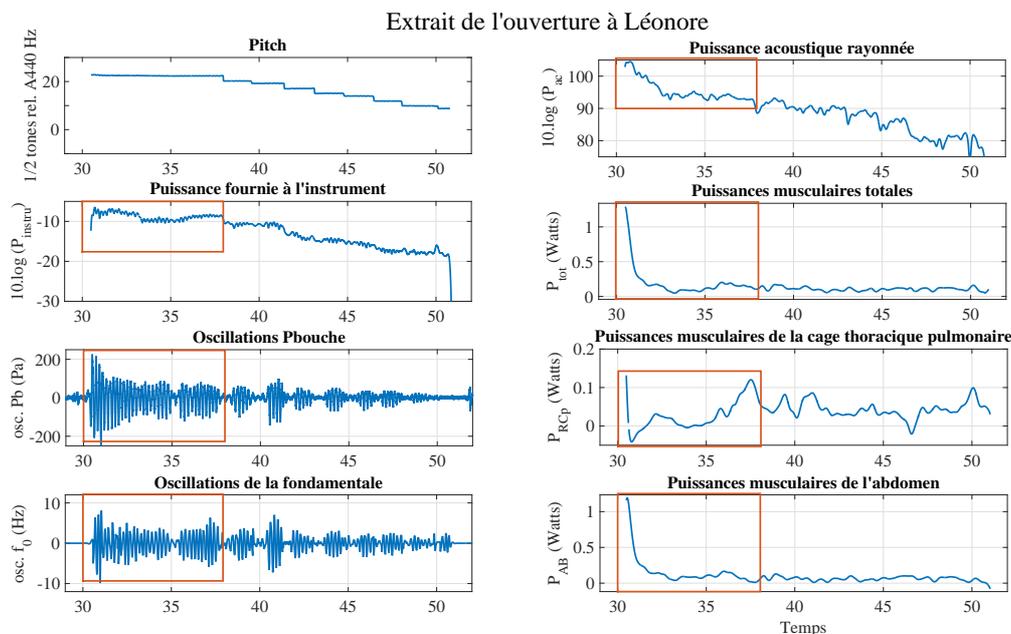


FIGURE 8.10 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, durant le jeu de l'extrait de l'ouverture à Léonore de Beethoven par le musicien 1. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de P_b et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées.

comme nous l'avons déjà observé lors du jeu de Poulenc, une activité des muscles expirateurs de l'abdomen dès le début du jeu lorsque la note demandée se situe dans le registre haut de l'instrument. Ceci est accentué ici par le fait que la nuance demandée est *ff*, et nécessite donc des pressions buccales encore plus importantes. Le premier decrescendo indiqué sur la partition dès le début du jeu est alors réalisé par un relâchement des muscles à la fois thoraciques et abdominaux. Ce decrescendo est également visible dans les puissances fournie à l'instrument et rayonnée.

Secondement, nous remarquons un vibrato important lors du jeu de cet extrait et plus particulièrement au début. De plus, nous pouvons noter que le vibrato présent sur la première note de l'extrait est découpé en deux séquences, encadrées en rouge sur la figure ; si on s'intéresse aux puissances musculaires, nous notons que la première séquence de vibrato est accompagnée d'un relâchement des muscles inspireurs du haut-thorax tandis que la seconde à partir de la seconde 35 est produite par l'action des muscles expirateurs du haut-thorax. Enfin, ce découpage en deux séquences n'est pas anodin, mais correspond à la première et à la seconde mesure de

l'extrait. En effet la première séquence de vibrato est effectuée sur la première blanche pointée, et la seconde sur la blanche suivante. Le musicien 1 indique ici le découpage temporel de cet note, et donc la structure musicale de ce début d'extrait. Enfin, nous notons que chaque note suivante de l'extrait est légèrement vibrée, et de moins en moins jusqu'à la fin ; ceci accompagnant le decrescendo global sur cette grande phrase musicale. Nous notons d'ailleurs des puissances acoustique rayonnée, produite à la bouche et musculaires globalement décroissantes.

Lors du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc, nous avons remarqué que les grands intervalles ascendants étaient réalisés par des montées en pression buccale, celle-ci étant produites par une activité des muscles abdominaux. Dans l'extrait de Carmen de Bizet, nous pouvons noter à la fin de l'extrait entre les mesures 7 et 8, un saut de sixte montante. Nous représentons alors les puissances développées lors de ce saut en figure 8.11. La représentation des puissances

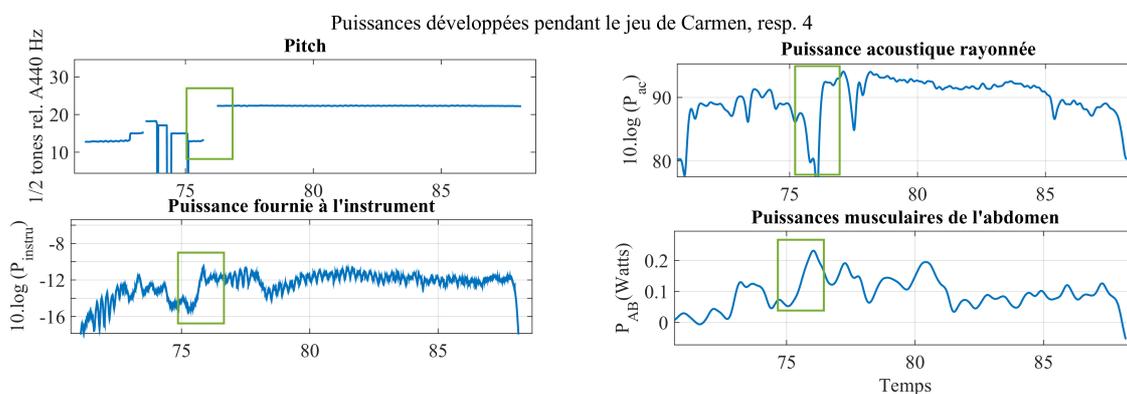


FIGURE 8.11 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), de la puissance musculaire abdominale, pour la respiration 4, durant le jeu de l'extrait de Carmen de Bizet par le musicien 1. Les rectangles verts marquent le saut de sixte montante, les activités musculaires et puissances fournies et produites associées.

développées par les muscles lors de ce saut de hauteur, nous permet encore une fois de remarquer que celui-ci est produit par une action des muscles de l'abdomen. Nous remarquons que cette action est accompagnée par une augmentation des puissances fournie à l'instrument et rayonnée.

Il a également été remarqué lors de l'analyse de l'extrait de la sonate de Poulenc une certaine corrélation entre le nombre de Reynolds et les différentes puissances développées. Nous représentons ici pour le jeu de l'extrait de Syrinx les variations du nombre de Reynolds et des différentes puissances en figure 8.12. Sur la figure 8.12, nous notons effectivement une certaine ressemblance entre les patrons du nombre de Reynolds et ceux des puissance fournie à l'instrument. La corrélation avec le patron des puissances musculaires totales est moins évidente, mais nous remarquons tout de même quelques similitudes. Certaines différences apparaissent lors d'activités musculaires particulières, lors de vibrato notamment.

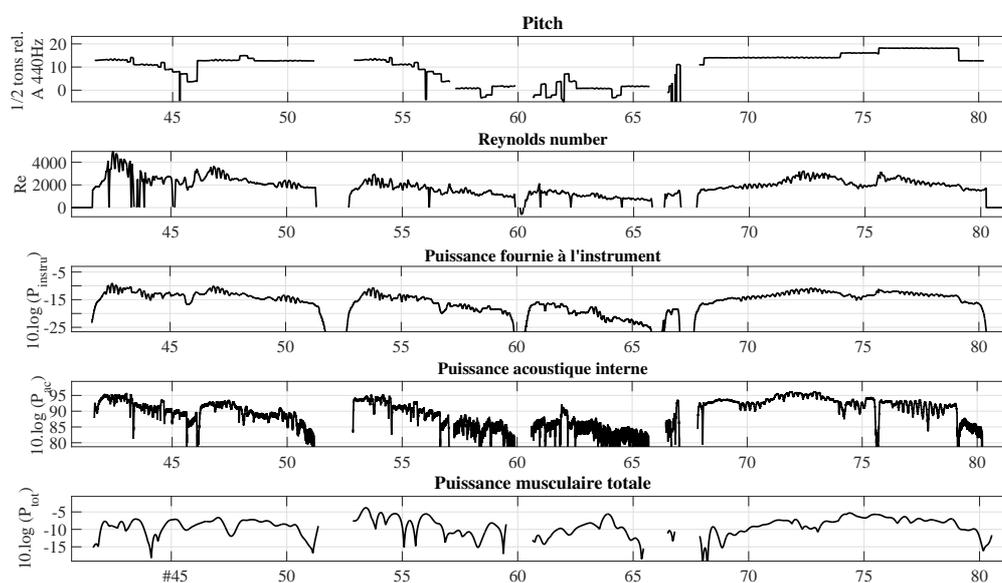


FIGURE 8.12 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), de la puissance musculaire totale et du nombre de Reynolds, durant le jeu de l'extrait de *Syrinx* de Debussy par le musicien 1. Nous notons une ressemblance entre les patrons du nombre de Reynolds et ceux des puissances fournie à l'instrument et rayonnée.

Enfin, nous avons remarqué que pour les deux phrases identiques de l'extrait de la sonate de Poulenc, les représentations des diagrammes Konno-Mead étaient également semblables. Nous proposons alors dans la même idée, d'observer les patrons des diagrammes de Konno-Mead lors de la réalisation de deux phrases identiques dans l'extrait de *Syrinx* (début des phrases 1 et 2) et dans l'extrait de *Carmen* (phrases 1 et 3), en figure 8.13. Lors du jeu de l'extrait de *Syrinx*, nous remarquons que comme pour l'extrait de Poulenc, les deux phrases similaires de l'extrait de *Syrinx* ont le même diagramme de Konno-Mead. Par contre, les deux phrases similaires de l'extrait de *Carmen* (1 et 3), ont des tracés du diagramme de Konno-Mead assez différents, surtout sur la fin de la phrase. En effet, lors de la troisième phrase, nous constatons deux contributions séquencées d'une part de l'abdomen puis du haut thorax; alors que pour la phrase 1, nous remarquons une contribution de l'abdomen puis une contribution égale des deux compartiments. Afin de comprendre ces différences, nous traçons les volumes utilisés ainsi que les paramètres adimensionnés lors du jeu de ces phrases, en figure 8.14-haut pour les deux premières phrases de *Syrinx* et en figure 8.14-bas pour les trois premières phrases de l'extrait de *Carmen*. A partir de la figure 8.14, on constate alors que du point de vue des paramètres adimensionnés les phrases similaires sont réalisées de manière assez proche pour chacun des extraits. Par contre, nous pouvons noter que les phrases 1 et 3 de *Carmen* sont réalisées à des volumes différents du cycle respiratoire, le musicien met donc plus à contribution son volume abdominal par l'action des muscles expirateurs de l'abdomen, augmentant la puissance générée par ceux-ci, d'autant

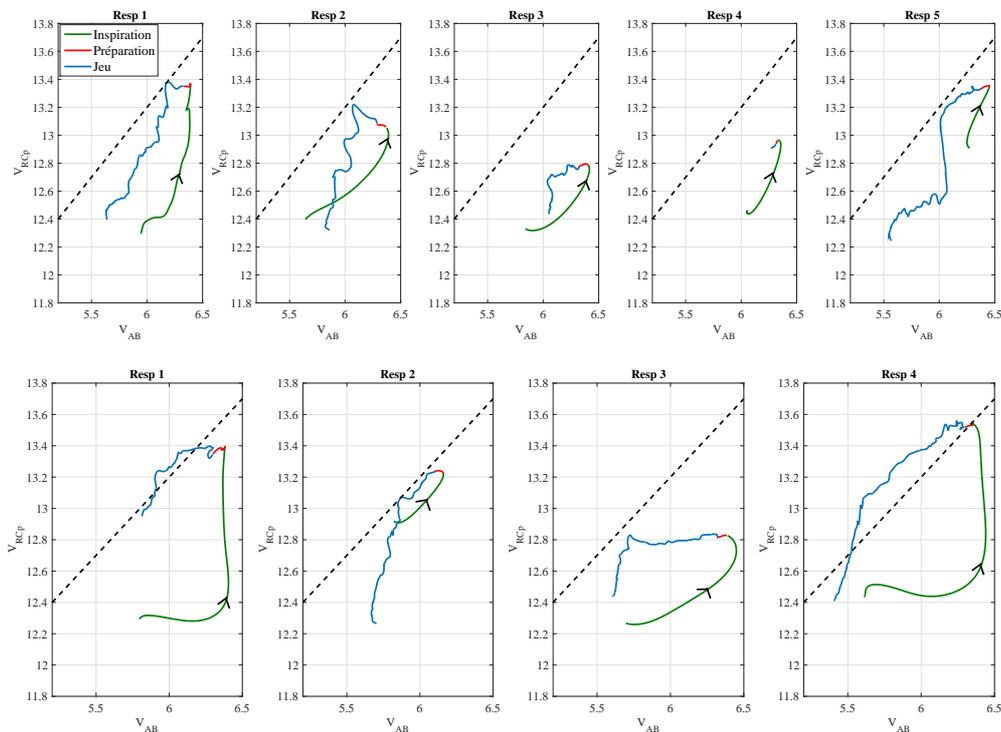


FIGURE 8.13 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu des extraits de Syrinx (haut) et de Carmen (bas) par le sujet 1, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps. La phase inspiratoire est représentée en vert, la préparation en rouge et le jeu en bleu.

plus que le volume total passe sous la valeur de la FRC. Les phrases similaires de Syrinx et celles de Poulenc sont réalisées à des valeurs de volumes assez proches.

Selon l'état respiratoire dans lequel se trouve le musicien, sa stratégie de jeu du point de vue de la contribution des volumes mis en jeu, est donc changée. Cependant, malgré ces stratégies respiratoires différentes, nous ne distinguons pas de différences majeures d'une intention musicale particulière ni dans l'indicateur qu'est le vibrato, ni dans le contrôle aéro-acoustique de l'instrument.

8.3.2 Analyse du jeu du sujet 2

L'analyse des données obtenues lors du jeu du musicien 2 montre que l'extrait le plus riche en terme de contrôles liés à la structure et l'interprétation musicales est celui de Syrinx de Debussy. De manière similaire à la démarche suivie pour l'analyse des données du premier musicien, nous présentons alors dans un premier temps une courte analyse musicale de l'extrait de Syrinx de Debussy, puis une analyse détaillée des contrôles développés par le musicien durant le jeu de cet extrait et enfin nous apportons des éléments de comparaison à cette analyse par l'étude des

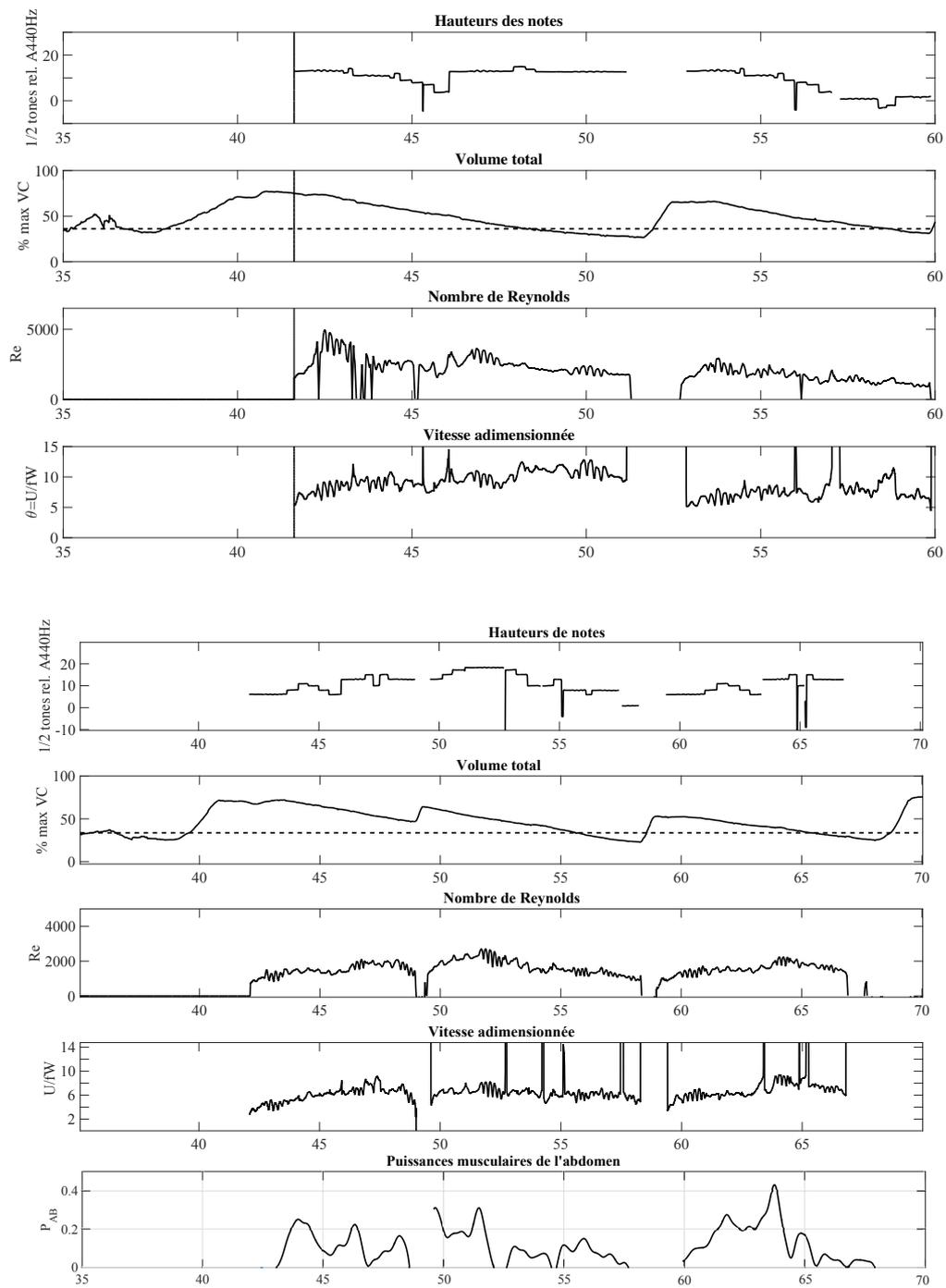


FIGURE 8.14 – Représentation des hauteurs de notes (en demi-tons relatifs au La 440Hz), des volumes d’air utilisés et des paramètres adimensionnés (nombre de Reynolds Re et vitesse de jet adimensionnée θ) durant le jeu des premières phrases des extraits de Syrinx (haut) et Carmen (bas) par le musicien 1. Pour l’extrait de Carmen est aussi représenté la puissance développée par les muscles de l’abdomen durant le jeu, en Watts.

autres extraits musicaux.

Analyse musicale de l'extrait de *Syrinx* de Debussy

Syrinx, pièce pour flûte seule composée par Claude Debussy en 1913, est jouée lors de la première scène de l'acte III de *Psyché*, de Gabriel Mourey. Elle illustre le dialogue entre deux nymphes en l'honneur du dieu Pan. Etant une pièce pour flûte seule, elle laisse une plus grande part d'interprétation au musicien.

Même si la notion de tonalité est moins forte dans *Syrinx* que dans les autres pièces analysées ici, nous pouvons estimer qu'elle est composée en Si \flat mineur. D'ailleurs la première phrase musicale, aux mesures 1 et 2 commence et termine sur cette fondamentale. La mélodie de la première phrase inclue une descendante mineure jusqu'au Re \flat (relative majeure), agrémentée d'un Mi \natural qui introduit donc un écart d'un ton entier. A la cellule de la mesure 2 est ajouté un Do \flat , élément que l'on retrouve plusieurs fois dans la pièce entière. La mesure 3 est une redite de la descente mineure de la mesure 1, dont la fin est cependant différente. La mesure 4 est composée d'une ascension chromatique du Si \flat au Ré \flat avec des triolets de passage identiques. Suit alors une transition vers un Si \natural , qui rappelle le Do \flat . Enfin, une montée chromatique de septième en Ré \flat mineur nous amène sur la phrase finale en Do \flat majeur.

Les nuances de cet extrait évoluent entre *p* et *mf*, quatre crescendo-diminuendo sont indiqués sur la partition. Dans cette édition, trois respirations sont indiquées sur la partition : à la fin de la mesure 2 après le point-d'orgue, après le premier motif mesure 4 et lors de la césure mesure 5. Le musicien 2 respecte ces premières respirations et en effectue une de plus en début de mesure 6 dans un mouvement inspiratoire global passant, au travers des respirations 4 et 5 d'un volume proche de FRC à un volume proche de 100%.

Analyse du jeu de l'extrait de *Syrinx* par le musicien 2

Nous représentons dans un premier temps en figure 8.15, les hauteurs des notes, les volumes utilisés ainsi que les paramètres adimensionnés : le nombre de Reynolds et la vitesse de jet adimensionnée lors du jeu de l'extrait de *Syrinx* par le musicien 2. Dans un second temps, nous représentons pour les respirations 1, 2, 3 et 5 (la 4 n'ayant pas grand intérêt au niveau du contrôle) les puissances produites lors du jeu de l'extrait de *Syrinx*, à savoir la puissance fournie à l'instrument, la puissance rayonnée par l'instrument et les puissances musculaires produites par les muscles ; ainsi que les variations dues au vibrato autour de la fréquence fondamentale et de la pression buccale en figure 8.16.

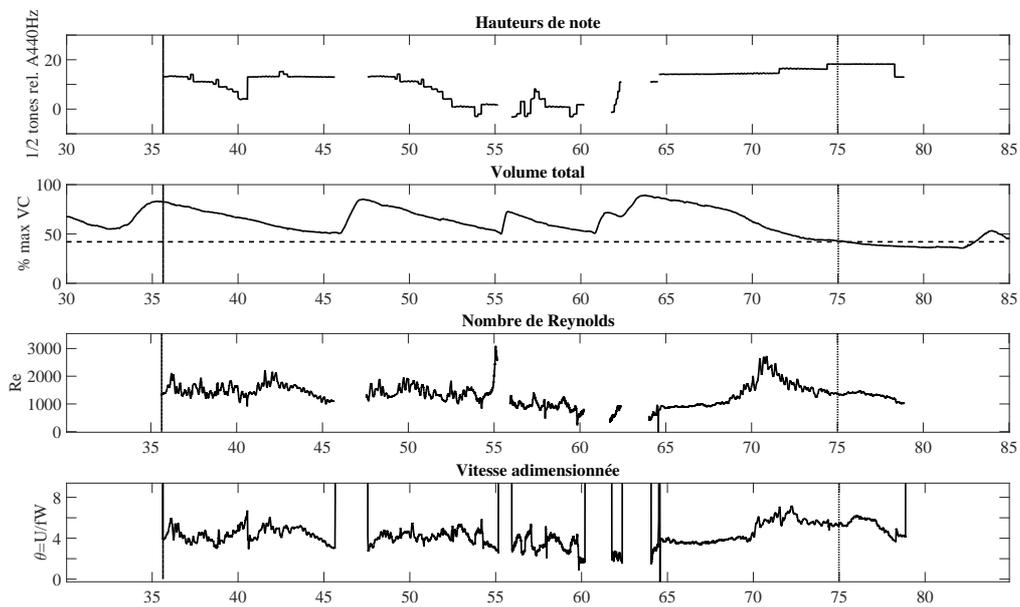


FIGURE 8.15 – Représentation de la hauteur des notes, des volumes d'air utilisés, et des nombres adimensionnés θ et Re durant le jeu de l'extrait de Syrinx par le sujet 2. Le début du son est insiqué par une barre verticale. Notons un passage du volume total sous FRC (indiqué par la barre pointillée verticale vers la seconde 75) et une certaine corrélation entre le nombre de Reynolds Re et la hauteur des notes. Le crescendo/decrescendo de la dernière phrase est également notable dans le nombre de Reynolds. Le début du son produit est insiqué par une barre verticale.

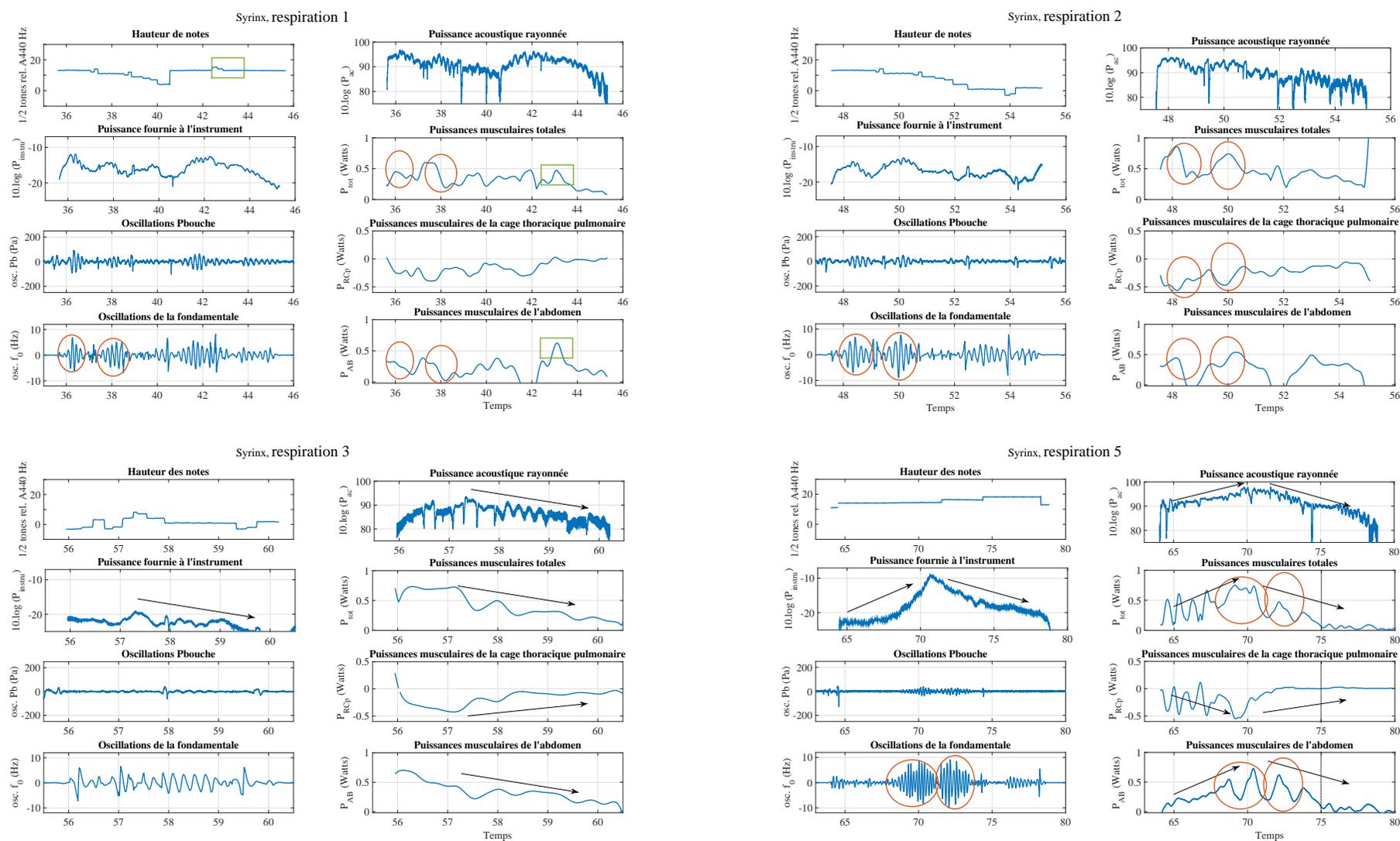


FIGURE 8.16 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, pour les respirations 1 à 3 et 5 durant le jeu de l'extrait de Syrinx par le musicien 2. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de P_b et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées. Les flèches noires indiquent la structure ascendante/descendante que le musicien donne à la phrase. Les rectangles verts mettent en évidence un effort associé à des intervalles produits dans le 3^{ième} registre de la flûte. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

Nous commençons l'étude par l'analyse des débuts des phrases 1 et 2 de cet extrait, ceux-ci étant identiques sur la partition. Sur la figure 8.15, nous notons que les patrons des paramètres adimensionnés (Re et θ) sont assez semblables pour ces deux séquences. Les variations de θ sont légèrement plus importantes durant le jeu de la première séquence. Le musicien 2 reprend une quantité d'air lors de la deuxième respiration, équivalente à celle prise pour la première. Ces deux phrases s'effectuent donc à des états respiratoires similaires. Nous représentons les diagrammes de Konno-Mead pour chacun des cycles respiratoires durant le jeu de *Syrinx* en figure 8.17. A partir de la figure 8.17, comme pour le musicien 1, l'état respiratoire est identique et la

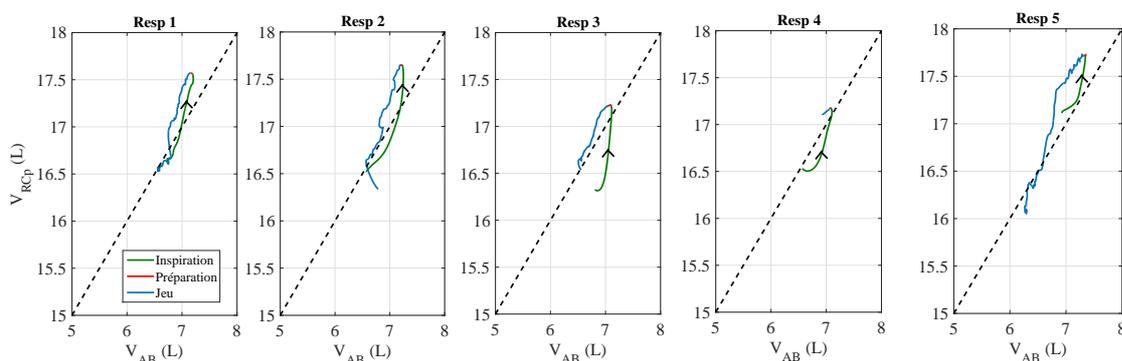


FIGURE 8.17 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu de l'extrait de *Syrinx* par le sujet 2, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps. L'inspiration est représentée en vert, la préparation en rouge et le jeu en bleu.

contribution de chacun des compartiments est équivalente pour le jeu d'une même phrase. En effet, les patrons des débuts des phrases 1 et 2 sont très proches.

Les graphes du haut de la figure 8.16 représentent les puissances développées lors du jeu des phrases 1 et 2. Nous remarquons que l'expiration est produite par un relâchement des muscles inspireurs, d'où une puissance musculaire de la cage thoracique haute négative. Aussi, nous notons une activité des muscles abdominaux dès le début du jeu, celle-ci peut être associée à la production de vibrato sur les deux croches pointées. Nous pouvons également noter une certaine corrélation entre les allures temporelles des puissances développées.

Les fins des phrases 1 et 2 sont rythmiquement proches, cependant les hauteurs des notes ont au moins une octave de différence. Des puissances musculaires un peu plus importantes sont notables à la fin de la première phrase, celle-ci étant plus aigüe. Aussi, nous notons des puissances acoustique rayonnée et fournie à l'instrument plus importantes, d'environ 5dB. A partir de la figure 8.15, notons qu'à la fin de la phrase 1, les valeurs de Re et θ diminuent de façon significative, comme à la fin de l'extrait, la puissance acoustique rayonnée diminue également nettement, sans doute une intention signifiant la fin de la phrase. Par contre, à la fin de la phrase 2, les valeurs de ces paramètres ne diminuent pas significativement, et restent donc en "suspend", possiblement car la phrase mélodique finit plus loin.

Lors du jeu de la phrase 3, en figure 8.16, nous remarquons une activité musculaire à la fois

du haut-thorax et de l'abdomen associées aux puissances développées dès le début de l'extrait. Il est surprenant d'observer ces hautes puissances abdominales alors que la tessiture de ce début d'extrait est basse. Par contre, la nuance indiquée est un crescendo et nous remarquons que la puissance acoustique rayonnée augmente de 10 dB environ en moins de 1s. Aussi, la figure 8.15 montre des variations de θ entre 3 et 6. Il est possible que le musicien 2 soutienne le crescendo et le timbre du son par un effort des muscles abdominaux. Cet engagement du volume abdominal est également visible sur le diagramme de Konno-mead, figure 8.17. Le point culminant du crescendo semble correspondre avec la note la plus haute. Suit alors un decrescendo jusqu'à la fin de cette séquence. Celui-ci est effectué par un relâchement des muscles expirateurs de l'abdomen mais aussi par les muscles inspireurs du haut-thorax, d'où une forte diminution du volume thoracique haut sur le diagramme de Konno-Mead. Notons que les patrons des puissances développées sur ce decrescendo sont assez similaires.

Enfin l'analyse du jeu de la dernière phrase de cet extrait en figure 8.16, montre distinctement la réalisation du crescendo-diminuendo des mesures 6, 7 et 8, indiqué par des flèches sur le graphe. Sur la partition 8.3, le point culminant du soufflet est indiqué sur le deuxième temps du Do \flat mesure 8. La représentation de la puissance fournie à l'instrument et la puissance rayonnée concordent clairement au même point culminant sur la fin du Do \flat . Durant la réalisation de ce crescendo, la puissance rayonnée augmente de 10dB, alors que la puissance fournie à l'instrument augmente d'un peu plus de 10dB. Les patrons de la puissance musculaire vont également dans ce sens, en effet, les muscles abdominaux sont sollicités de plus en plus durant le crescendo. Puis ceux-ci sont complètement relâchés durant le decrescendo, dont la fin est effectuée par l'élasticité des poumons, les puissances musculaires étant autour de zéro. Les patrons de la puissance développée par les muscles de l'abdomen contiennent également deux pics qui correspondent au vibrato, encerclés de rouge.

Sur la figure 8.15, le patron du nombre de Reynolds est très proche de ceux des puissances développées, en effet Re commence vers 1000 et augmente jusqu'à 3000 sur le point culminant du crescendo. Le patron de la vitesse adimensionnée θ est un peu différent, mais θ augmente de 6 à 8 autour du point culminant, possiblement associé au changement de timbre du crescendo. Enfin, la représentation du diagramme de Konno-Mead en figure 8.17, illustre la contribution de chacun des compartiments durant ce soufflet : l'obtention du point culminant de ce dernier est effectué par une grosse diminution du volume du haut-thorax alors que les début et fin du soufflet sont produits par une plus importante contribution du volume de l'abdomen.

Comparaison de l'analyse avec les observations effectuées sur les autres extraits musicaux

Nous comparons maintenant les contrôles développés par le sujet 2 lors du jeu de l'extrait de *Syrinx* à ceux mis en jeu afin de répondre à la structure musicale des autres extraits musicaux. Seuls les principaux éléments intéressants de chacun de ces extraits sont ici comparés aux observations établies lors de l'analyse de l'extrait de *Syrinx*.

Premièrement, nous avons remarqué que la production de vibrato durant l'extrait de Syrinx était souvent accompagnée de la production d'une puissance abdominale. Afin de vérifier cette hypothèse au travers de l'extrait du prélude à l'après-midi d'un faune, nous représentons pour cette phrase, les hauteurs de notes, les puissances développées et les oscillations produites autour de la fréquence fondamentale et la pression buccale en figure 8.18. A partir de la figure 8.18, nous

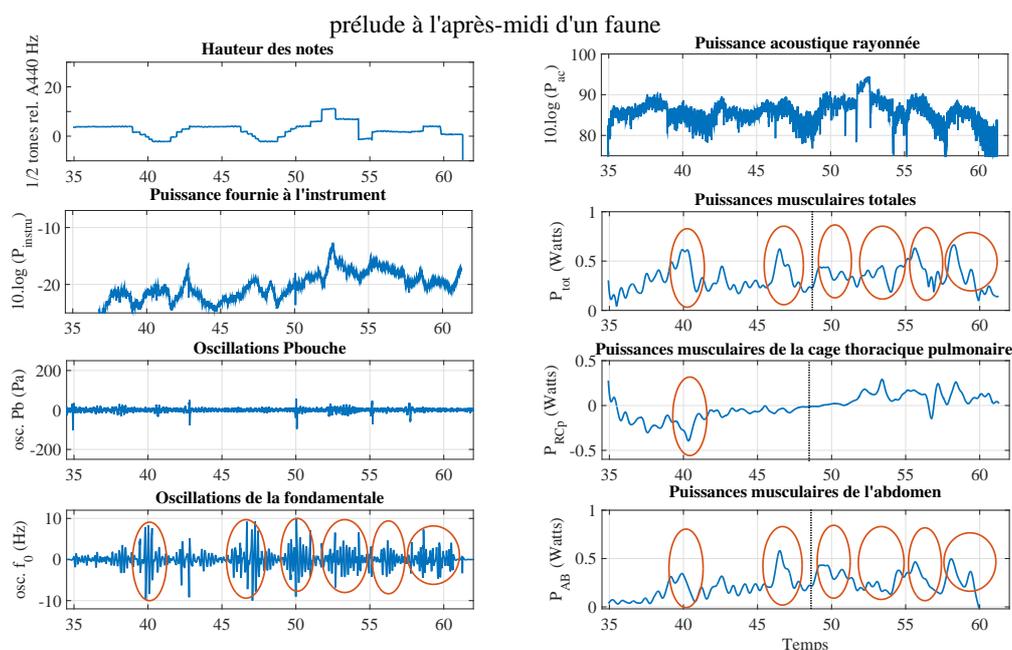


FIGURE 8.18 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, durant le jeu de l'extrait du *prélude à l'après-midi d'un faune* par le musicien 2. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato sur les oscillations de Pb et f_0 , ainsi que les activités musculaires associées. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

remarquons qu'effectivement durant le jeu de l'extrait du *prélude à l'après-midi d'un faune*, les séquences de vibrato (encadrées en rouge) sont associées à une variation de la puissance développée par les muscles ; principalement abdominale. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous FRC ; nous notons que les muscles inspireurs du haut-thorax retiennent l'expiration jusqu'à cette valeur, et ensuite, les muscles expirateurs de la cage thoracique forcent l'expiration. Etant donné la tessiture de l'extrait, le musicien n'a pas nécessité de produire de hautes pressions avant le passage du volume total sous FRC, ce qui signifie alors que les puissances abdominales développées avant la seconde 48 environ, sont uniquement des activités des muscles abdominaux particulières associées à des intentions ciblées. Cette observation vient donc confirmer notre hypothèse de départ.

Secondement, lors du jeu de l'extrait de Syrinx, les nuances étaient également produites par

des actions ou relâchements musculaires. Afin de voir si tel est le cas dans d'autres situations musicales, nous représentons, en figure 8.19, la hauteur des notes, les puissances développées et les oscillations dues au vibrato dans l'extrait de l'Ouverture à Léonore dont le début commence par un decrescendo important. Le decrescendo sur le premier Sol a lieu entre le début de l'extrait

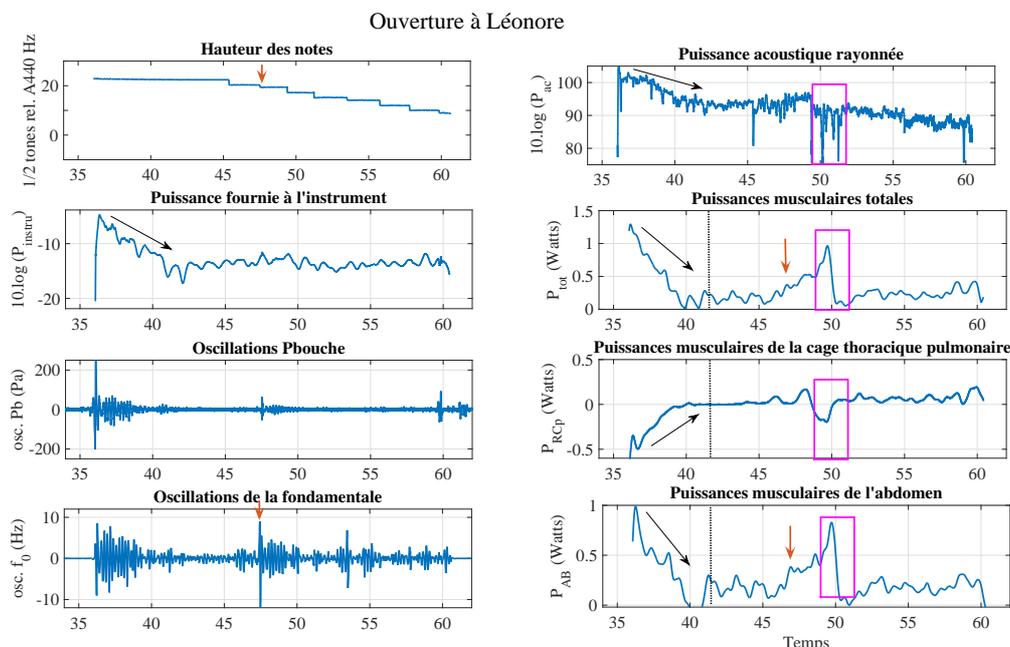


FIGURE 8.19 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1 Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, durant le jeu de l'extrait de l'ouverture à Léonore par le musicien 2. Les flèches rouges marquent le début de la troisième mesure de l'extrait, ainsi que les activités musculaires et vibrato associés. Le cadre rose marque une discontinuité dans l'attaque du Ré sur la puissance acoustique rayonnée due à un dérapage à l'attaque de la note, ainsi que l'activité musculaire associée afin de rattraper l'accident. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

et la seconde 41 environ ; à celui-ci est associé une diminution de la puissance rayonnée, mais aussi de celle fournie à l'instrument d'environ 10dB. La puissance musculaire diminue également, en effet les muscles inspireurs du haut thorax se relâchent et la puissance générée tend vers zéro. Aussi, les muscles abdominaux qui ont été activés afin de produire la première note sur-aiguë et *ff* se relâchent également, la puissance abdominale décroît également jusqu'à zéro. La production d'un decrescendo est donc ici associée à un relâchement musculaire.

Nous remarquons un autre élément intéressant sur cette figure, l'activation des muscles respiratoires juste avant la seconde 50, c'est à dire sur le Mi suraigu. Cette activation correspond également à la production d'un vibrato important par rapport à ceux produits sur les notes suivantes, d'ailleurs nous remarquons à cet instant une augmentation des puissance rayonnée et fournie à l'instrument d'environ 5dB. Cette note accentuée correspond au premier temps de la

mesure 3, ainsi qu'à un changement de liaison ; le musicien 2 souhaite faire sentir ce découpage en 2 mesures.

L'écoute de l'extrait fait entendre un léger accident à l'attaque du Ré, seconde 49, d'où une puissance rayonnée plus faible avec quelques discontinuités (encadrées en rose). Nous observons alors que le musicien 2 met rapidement à contribution ses muscles abdominaux afin de contrôler le son produit.

D'autre part, nous avons noté que pour deux phrases identiques dans *Syrinx* jouées à un volume de la capacité vitale semblable, les diagrammes de Konno-Mead et donc la contribution engagée par chacun des compartiments du thorax était semblable. Afin de comparer le contrôle utilisé pour les phrases identiques 1 et 3 de l'extrait de *Carmen*, nous représentons les hauteurs de notes, les volumes utilisés, les paramètres adimensionnés en figure 8.20 et les diagrammes de Konno-Mead en figure 8.21. Bien que le musicien joue la phrase 3 à un volume un peu plus bas

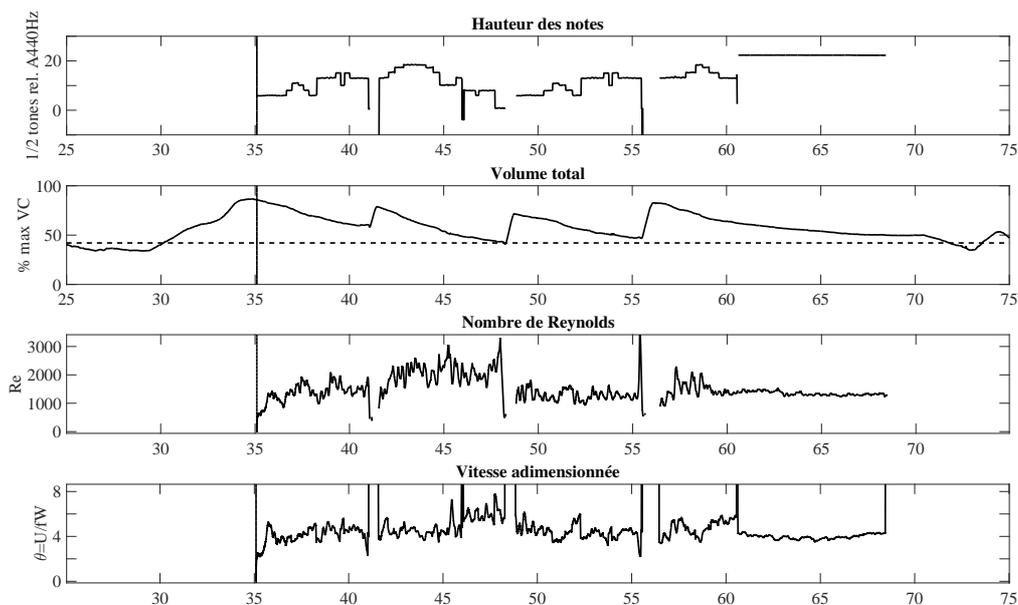


FIGURE 8.20 – Représentation de la hauteur des notes, des volumes d'air utilisés, et des nombres adimensionnés θ et Re durant le jeu de l'extrait de *Carmen* par le sujet 2. Le début du son produit est indiqué par une barre verticale. Bien que les expirations 1 et 3 débutent à des volumes respiratoires relativement semblables, l'évolution des paramètres de contrôle diffère quelque peu, notamment en raison de la position de ces phrases au sein de l'extrait.

dans l'échelle de la capacité vitale que pour la phrase 1 (figure 8.20), le diagramme de Konno-Mead (figure 8.21) démontre clairement que la contribution de chacun des volumes visibles est très semblable et met en jeu les deux compartiments.

Par contre, même si ces deux phrases sont identiques par leurs structures rythmique et mélodique, et que leur contrôle respiratoire semble assez similaire, les évolutions des paramètres de contrôle diffèrent légèrement. En effet, le nombre de Reynolds et la vitesse adimensionnée de la

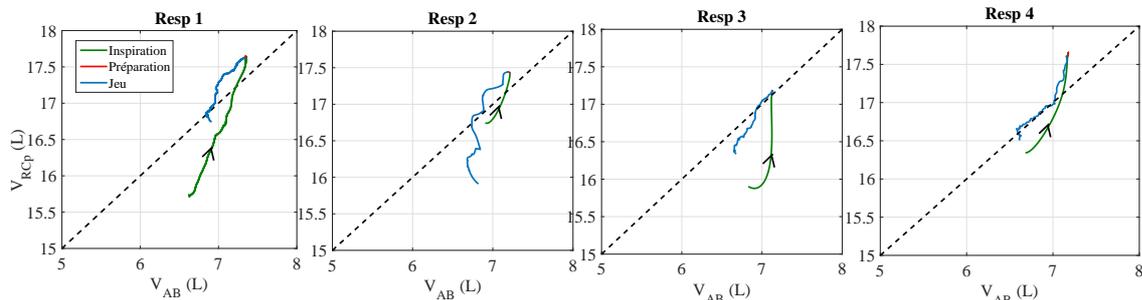


FIGURE 8.21 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu de l'extrait de Carmen par le sujet 2, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps.

première phrase tendent à croître alors qu'ils sont assez stables pour la troisième. La première réalisation est sûrement réalisée différemment compte tenu de sa position musicale dans l'extrait, en effet elle constitue également son commencement. De plus, sur la partition nous observons une coupure entre les phrases 3 et 4, ce qui n'est pas le cas entre la première et la seconde qui ne sont donc pas dans une continuité mélodique, d'ailleurs les paramètres adimensionnés continuent d'augmenter lors du jeu de cette deuxième phrase.

8.3.3 Analyse du jeu du sujet 3

L'extrait durant lequel l'analyse des données montre le contrôle le plus riche de la part du musicien 3 en termes de structure musicale et interprétation est l'extrait de Syrinx. Comme pour les autres musiciens étudiés, nous comparons une analyse détaillée de l'extrait de Syrinx joué par le musicien 3 aux observations obtenues durant le jeu des autres extraits musicaux.

Analyse du jeu de l'extrait de Syrinx

La figure 8.22 représente la hauteur des notes, les volumes utilisés, et les variations des paramètres adimensionnés Re et θ durant le jeu de l'extrait de Syrinx par le musicien 3. La figure 8.16 montre les puissances produites lors des respirations 1, 2, 3 et 5 de l'extrait de Syrinx, à savoir la puissance fournie à l'instrument, la puissance rayonnée par l'instrument et les puissances musculaires ; ainsi que les variations dues au vibrato autour de la fréquence fondamentale et de la pression buccale.

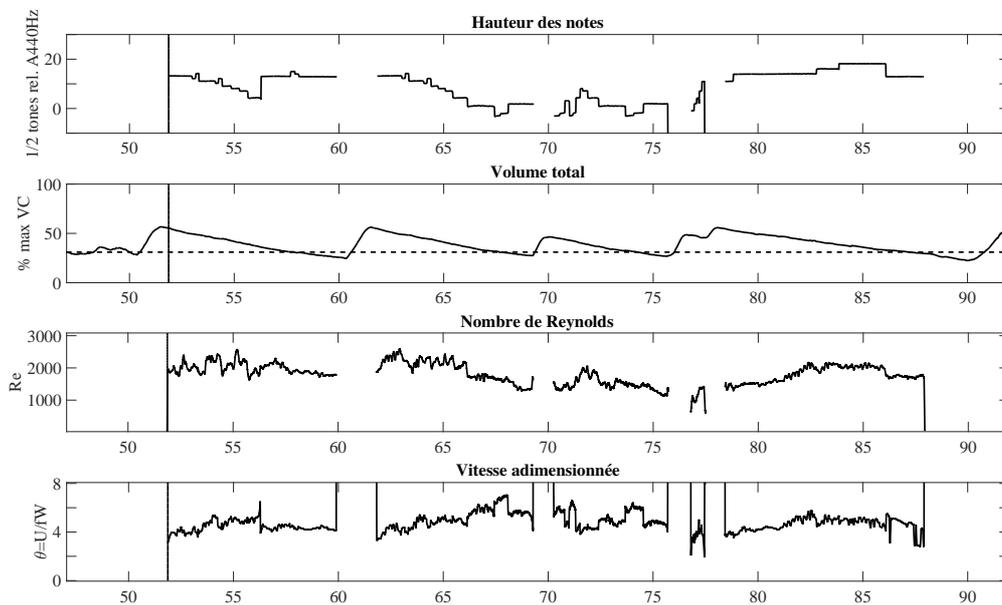


FIGURE 8.22 – Représentation de la hauteur des notes, des volumes d’air utilisés, et des nombres adimensionnés θ et Re durant le jeu de l’extrait de Syrix par le sujet 3. Le début du son produit est indiqué par une barre verticale. Les expirations 1 et 3 débutent à des volumes assez identiques, par contre l’évolution des paramètres de contrôle semble différer quelque peu, possiblement en raison de la position de ces phrases au sein de l’extrait.

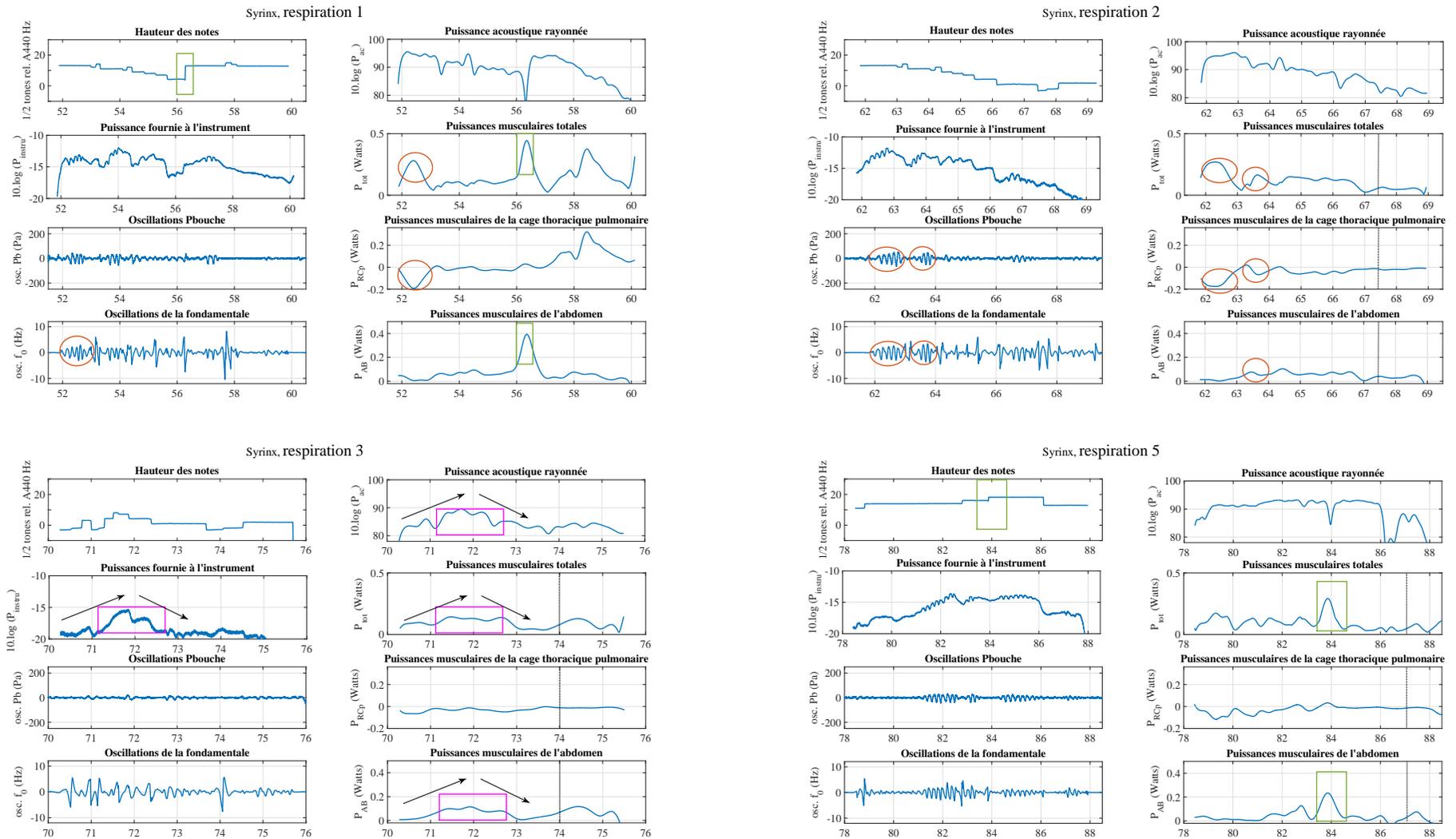


FIGURE 8.23 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l’instrument (en dB relatifs à 1 Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, durant le jeu de l’extrait de Syrinx par le musicien 3. Les flèches noires indiquent la structure ascendante/descendante que le musicien donne à la phrase. Le cadre rose marque le point culminant de la phrase 3. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato et les activités musculaires qui y sont associées. Le cadre vert indique une activité musculaire associée à une transition entre deux notes aiguës. Les barres verticales pointillées indiquent le passage du volume total sous la FRC.

En comparant le jeu des phrases 1 et 2 (figure 8.23), nous notons que les puissances développées au début de ces deux phrases sont assez similaires. En effet, du point de vue respiratoire, nous remarquons une activité particulière des muscles inspirateurs du haut-thorax sur le jeu de la première note vibrée. Pour la deuxième phrase, nous remarquons que la seconde croche pointée est vibrée, et soutenue par les muscles abdominaux, ce qui n'est pas le cas lors de la première phrase. A partir de la figure 8.22, nous remarquons que les volumes utilisés pour jouer ces deux phrases sont similaires et situés dans le même pourcentage de la capacité vitale (entre environ 30% et 60% de la capacité vitale). Les diagrammes de Konno-mead, en figure 8.24, permettent d'étudier la contribution de chacun des compartiments du thorax. Comme pour les

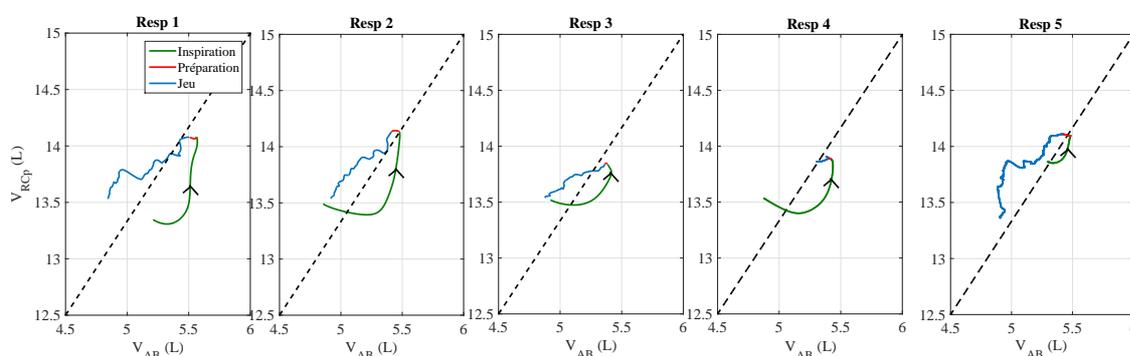


FIGURE 8.24 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu de l'extrait de Syrinx par le sujet 3, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps.

deux musiciens précédents, pour le jeu de deux phrases similaires à des volumes respiratoires équivalents, la contribution de chacun des compartiments reste la même, en effet, les patrons des débuts des phrases 1 et 2 sont très semblables.

Les fins de ces deux phrases ont une octave de différence. Nous remarquons alors que pour la fin de la phrase 1, qui est plus aigüe, les puissances développées sont plus importantes, on constate notamment un pic de puissance musculaire abdominale lors du saut de hauteur de notes à la seconde 56 (encadré en vert sur la figure 8.23). Nous notons également une montée de la puissance musculaire du haut-thorax à partir de la seconde 57, peut-être dans le but de viser la note la plus aigüe, le Do \sharp . D'ailleurs, nous notons une augmentation de la puissance fournie à l'instrument (figure 8.23) et du nombre de Reynolds (figure 8.22). Alors que les puissances développées et le nombre de Reynolds diminuent jusqu'à la fin de la phrase 2, peut-être une intention musicale de clôturer celle-ci. D'autre part, nous remarquons (figure 8.22) que θ est assez constant autour de 5 sur ces deux phrases, hormis sur les notes les plus graves de la deuxième phrase, probablement pour les "timbrer", c'est à dire ici enrichir leur contenu spectral.

Lors du jeu de la troisième phrase, la puissance rayonnée concorde clairement avec le crescendo indiqué sur la partition entre les secondes 70 et 72. Par contre, un peu différemment de ce qui est indiqué sur la partition, le crescendo s'estompe lorsque le premier Re \flat est joué bien que la puissance sonore soit maintenue. Peut-être peut-on voir ici une intention musicale particulière

sur cette note qui clôture la montée chromatique mais qui est aussi la relative majeure à la tonalité. Ce crescendo est soutenu par une activité des muscles abdominaux, encadré rose. Nous notons également que la puissance fournie à l'instrument augmente de 4dB pendant ce crescendo (7dB pour la puissance rayonnée), de même que le nombre de Reynolds (figure 8.22). Par contre, les valeurs de θ sont plus hautes pour les notes les plus graves et les variations ne suivent pas le crescendo. Il semble que le musicien souhaite timbrer les notes de passage (Fa \sharp et Sol \natural), comme à la fin de la phrase aussi. Cette augmentation de θ est soutenue par une augmentation de la puissance abdominale. Enfin, comme pour la phrase 1, nous remarquons une diminution des puissances développées et du nombre de Reynolds à la toute fin de la phrase, alors que θ est maintenu constant.

Enfin, nous nous intéressons au jeu de la phrase 5 de l'extrait de Syrinx. Le crescendo-decrescendo de cette dernière phrase est légèrement visible dans la puissance acoustique rayonnée et celle fournie à l'instrument, en effet celles-ci augmentent respectivement de 10dB et 5dB entre le début de la phrase et la seconde 82 qui correspond au point culminant, comme sur la partition. Nous remarquons que l'augmentation de ces puissances est accompagnée d'un vibrato sur le Do \natural et est dirigé par la retenue des muscles inspireurs du haut-thorax et l'action des muscles abdominaux. Ce crescendo est également traduit par une augmentation du nombre de Reynolds et de θ , figure 8.22.

Ensuite, nous notons un pic de puissance musculaire abdominale au passage du Re \flat au Mi \flat , cette transition étant peut-être un peu plus difficile. Enfin, le decrescendo s'effectue un peu plus tard que sur la partition, sur le dernier Si \flat , avec une chute de la puissance rayonnée et de θ .

Comparaison de l'analyse avec les observations effectuées sur les autres extraits musicaux

Nous poursuivons l'analyse du jeu du musicien 3 en montrant quelques observations faites durant l'analyse des autres extraits musicaux.

Premièrement, durant le jeu de l'extrait de Syrinx, nous avons remarqué que pour deux phrases identiques jouées à des volumes pulmonaires semblables, la contribution de chacun des compartiments du thorax est identique. Deux phrases de l'extrait de Carmen sont identiques rythmiquement et mélodiquement, cependant le musicien joue celles-ci à des états respiratoires différents, comme le montre la figure 8.25. En effet, à partir de la figure 8.25, nous remarquons que le jeu de la première phrase s'effectue entièrement au-dessus de la FRC alors que celui de la troisième descend plus bas. Ce changement de volume a des conséquences sur la contribution de chacun des compartiments durant l'expiration comme le démontre les diagrammes de Konno-Mead, en figure 8.26. A partir de la figure 8.26, on constate alors que le jeu au-dessus de la FRC met plus à contribution le volume haut-thoracique tandis que le jeu plus bas met plus à contribution le volume abdominale; l'expiration est alors certainement soutenue par l'action des muscles abdominaux.

Dans un second temps, nous avons noté lors du jeu de l'extrait de Syrinx que plusieurs

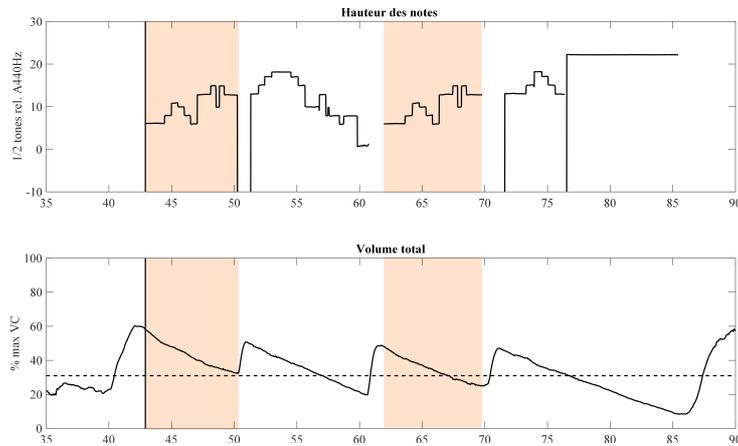


FIGURE 8.25 – Représentation de la hauteur des notes (en demi-tons relatifs au La 440Hz) et des volumes utilisés durant le jeu de l'extrait de Carmen par le musicien 3. Les phrases 1 et 3 sont surlignées en orange. Nous remarquons que les deux phrases mélodiques identiques des mesures 1 (respiration 1) et 5 (respiration 3) sont réalisées à partir de volumes respiratoires différents.

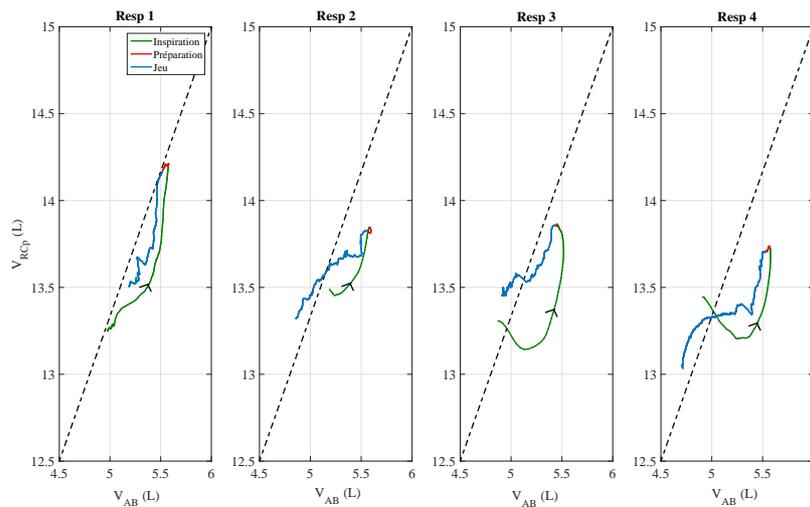


FIGURE 8.26 – Représentation des diagrammes de Konno-Mead (évolutions des volumes thoracique haut et abdominal) durant le jeu de l'extrait de Carmen par le sujet 3, pour chaque cycle respiratoire. Les flèches indiquent le sens de parcours de la courbe dans le temps. Les respirations 1 et 3 qui correspondent à des phrases mélodiques similaires, ne mettent pas, lors de leur réalisation, à même contribution les volumes de la cage thoracique.

éléments du jeu étaient accompagnés d'une activité musculaire, comme le vibrato, les sauts de hauteurs de notes ou encore les nuances. Plusieurs éléments de ce type sont présents lors du jeu de la deuxième phrase de l'extrait de la sonate de Poulenc, nous représentons alors les puissances développées et les oscillations dues au vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale durant le jeu de cette phrase, en figure 8.27. Nous pouvons noter que l'expiration est produite dans un premier temps par le relâchement des muscles inspireurs du haut-thorax puis par une activation des muscles expirateurs à la fois du haut-thorax et de l'abdomen. Aussi,

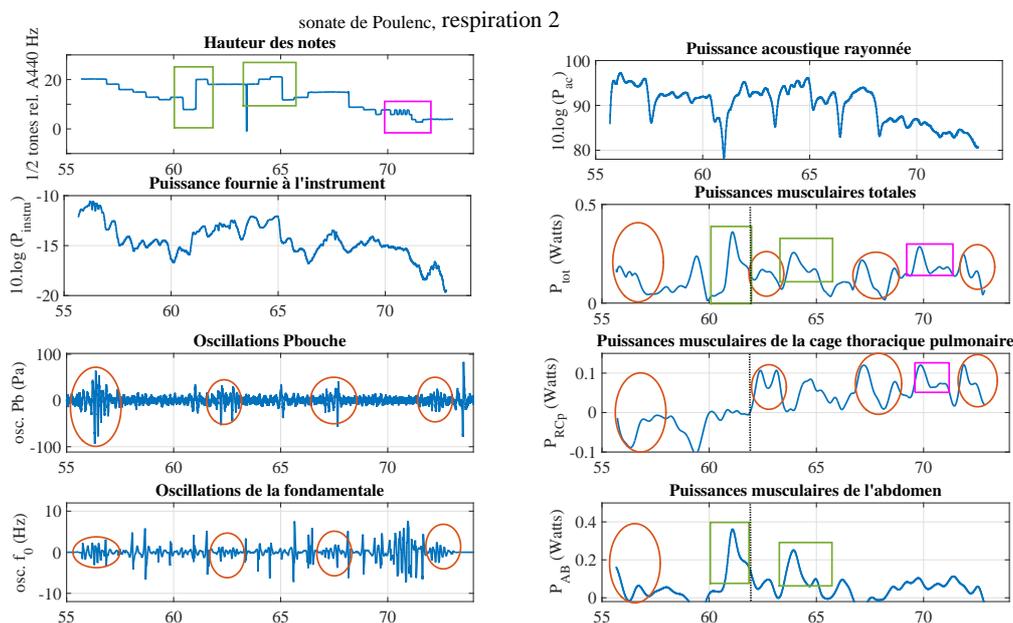


FIGURE 8.27 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes, de la puissance fournie à l'instrument (en dB relatifs à 1Watt), de la puissance acoustique rayonnée (en dB SPL), des puissances musculaires et des oscillations créées par le vibrato dans la pression buccale et la fréquence fondamentale, durant le jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 3. Les ellipses rouges marquent les séquences de vibrato et les activités musculaires associées. Le cadre rose marque le trille et l'activité musculaire associé. Les cadres verts indiquent les activités musculaires associées au saut d'octave et à la production de notes aigües. La barre verticale pointillée indique le passage du volume total sous la FRC.

nous notons des activités musculaires rapides et particulières. Celles-ci peuvent être identifiées à des éléments particuliers du jeu du musicien, en effet les activités musculaires entourées en rouge sur la figure correspondent à des productions de vibrato, celles encadrées en vert à des sauts de hauteurs de notes importants ou des notes jouées dans le sur-aigu (avec un crescendo) et enfin l'activité musculaire encadrée en rose soutient la production des trilles à la seconde 70. Toutes ces observations sont en accord avec celles faites sur l'analyse du jeu de l'extrait de Syrix, le musicien 3 n'utilise pas seulement son système respiratoire pour contrôler son expiration d'un point de vue respiratoire mais le met aussi à contribution lors d'intentions particulières du jeu musical.

Lors de l'analyse du jeu de Syrix, des variations particulières du nombre de Reynolds et de la vitesse adimensionnée ont également été remarquées comme répondant à des éléments de la structure musicale, comme les fins de phrase ou du timbrage. Nous observons alors les variations des nombres adimensionnés durant le jeu de Poulenc, en figure 8.28. D'une part, sur la figure 8.28, nous remarquons que certaines variations de nombre de Reynolds sont liées à la structure des phrases musicales. Par exemple, la première phrase débute avec un Reynolds assez bas qui augmente afin de "viser" le point culminant de la phrase puis diminue de manière importante sur

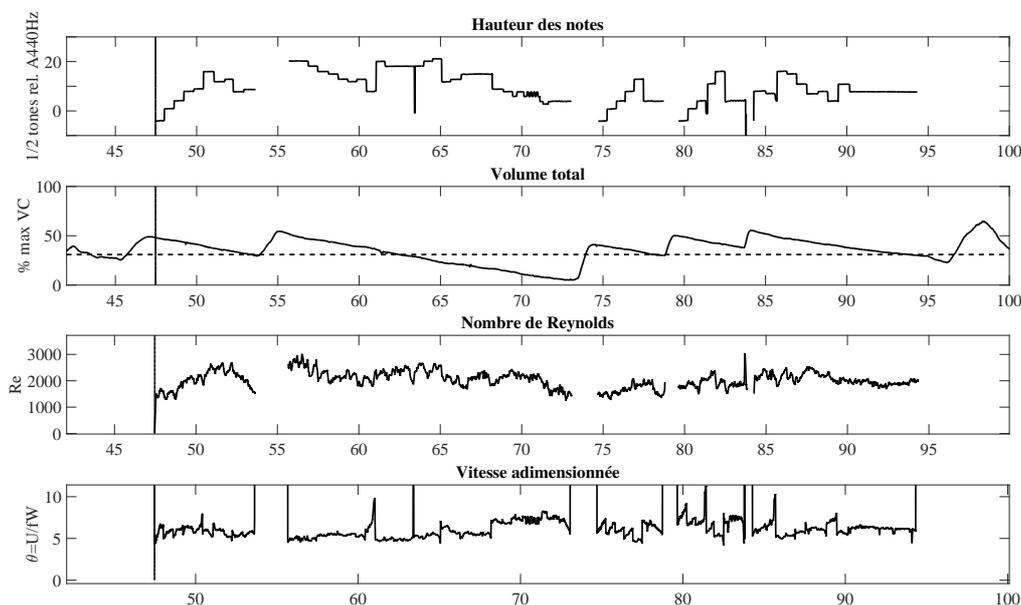


FIGURE 8.28 – Représentation des hauteurs de notes (en demi-tons relatifs au LA 440Hz), des volumes utilisés (en pourcentage de la capacité vitale) et les évolutions des paramètres adimensionnés Re et θ lors du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 3. Le début du jeu est indiqué par une barre verticale.

la fin de la phrase afin de clôturer celle-ci. Bien que les phrases 1, 3 et 4 soient assez similaires mélodiquement, les patrons du nombre de Reynolds sont assez différents. Les phrases 3 et 4 contiennent aussi une variation de celui-ci vers la note la plus haute, mais de moindre ampleur. De plus, nous ne remarquons pas de diminution importante du nombre de Reynolds à la fin des phrases 3 et 4. Comme si les phrases suivantes étaient jouées dans la continuité, les valeurs du nombre de Reynolds à la fin de ces phrases sont quasiment identiques à celles des débuts des phrases suivantes.

Quant à θ nous remarquons, sur la figure 8.28, des valeurs plus importantes (avoisinant 7) lors du jeu dans un registre bas, comme dans le cas de l'extrait de Syrinx. Dans l'extrait de Poulenc, les variations de θ sont assez faibles, entre 5 et 7, hormis pour les phrases 3 et 4 durant lesquelles θ augmente sur chaque note, chaque note est posée puis timbrée. Nous remarquons également ceci sur les sauts de hauteurs de note aux secondes 60 et 85.

8.3.4 Qu'entend-on ?

L'analyse des résultats se poursuit par l'étude de ce que l'auditeur peut percevoir, entendre ou écouter, soit le son produit. Au-delà des estimations de la puissance acoustique rayonnée, l'auditeur sera sensible aux autres qualités du son, tel que le timbre (pouvant être associé au contenu spectral du son produit) mais aussi aux éléments structurant, tels que la structure

musicale allant de la simple phrase à celle de la pièce entière, [118, 37].

Cette étude du son produit se déroule en trois temps, premièrement par l'analyse du vibrato, puis des nuances associées à la direction de la phrase musicale et enfin une analyse du spectre est proposée.

Vibrato

Le vibrato est défini comme étant un cycle de variations régulières à la fois de fréquence fondamentale, d'amplitude sonore et/ou de contenu spectral, [88, 44, 57, 69]. Cet effet est alors utilisé à des fins musicalement expressives.

A travers l'analyse du jeu des trois sujets, nous avons noté que la production de vibrato était la majeure partie du temps accompagnée par une activité musculaire. Comme expliqué lors de la présentation des paramètres étudiés et présenté lors de l'analyse des résultats, le vibrato produit par le musicien est identifiable par des oscillations dans le signal de la pression buccale ainsi que sur la détection de la fréquence fondamentale. L'analyse de cette dernière composante nous apporte alors des éléments sur les caractéristiques du son produit.

Nous analysons alors les oscillations de la fréquence fondamentale détectée à partir du son interne de l'instrument comme suit : une fois que la composante oscillante due au vibrato dans la détection de la fréquence fondamentale est extraite, on cherche les maximas locaux de celle-ci. On définit qu'il y a production de vibrato et donc une séquence vibrée, si il existe dans la bande 4-8Hz au moins 4 maximas locaux juxtaposés sur une note produite (afin de s'affranchir des potentielles erreurs dues au filtrage), ceci correspondant alors à un cycle vibratoire et non pas à un simple effet de modulation de la fréquence fondamentale. Le changement de note étant défini comme une variation de la fréquence fondamentale supérieure à 13 Hz, l'écart fréquentiel minimal entre deux notes successives dans la tessiture de la flûte étant de 15Hz. A titre d'exemple, la figure 8.29 représente la hauteur des notes ainsi que la composante oscillante due au vibrato pour le jeu de l'extrait de l'Ouverture à Léonore par le musicien 1. Les barres verticales tiretées représentent le découpage de chacune des séquences vibrées. Les croix rouges indiquent les maximas locaux de la composante oscillante. La figure 8.29 montre que durant le jeu de l'extrait de l'Ouverture à Léonore, le musicien 1 effectue 10 séquences vibrées, à des amplitudes d'oscillations variant entre 2 et 8Hz.

Le calcul de la transformée de Fourier à court terme pour chacune des séquences vibrées fournit la fréquence à laquelle l'oscillation est produite ainsi que l'amplitude de la vibration (soit l'écart à la fréquence fondamentale produit). La figure 8.30 représente pour le jeu de l'extrait de l'Ouverture à Léonore, les amplitudes et fréquences d'oscillations pour chacune des séquences vibrées. Nous remarquons que les fréquences des oscillations dues au vibrato, durant le jeu de l'extrait de l'Ouverture à Léonore par le musicien 1, se situent entre 4.5 et 5.3 Hz. Les amplitudes de ces oscillations se situent entre 0.8 et 4Hz d'écart par rapport à la fréquence fondamentale produite.

Cette même analyse du son produit est donc effectuée sur le jeu de chacun des musiciens, pour tous les extraits musicaux. Nous représentons alors pour chacun des musiciens, les distri-

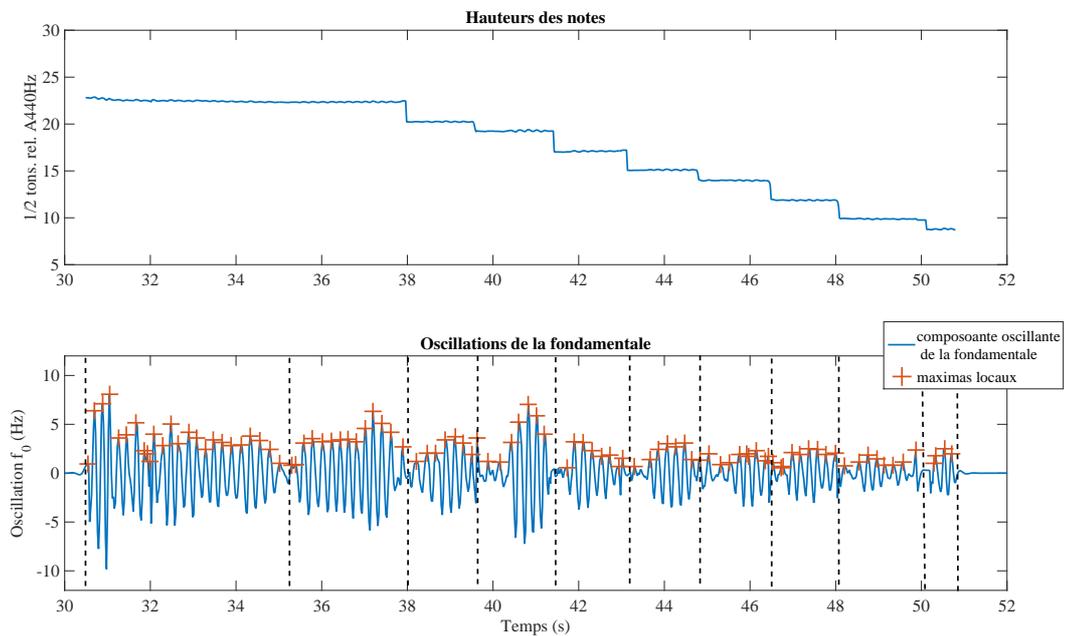


FIGURE 8.29 – Représentation en fonction du temps (en s) de la hauteur des notes (en demi-tons relatifs au La 440Hz) et de la composante oscillante due au vibrato (en Hz) issue du filtrage passe bande 4-8Hz de la fréquence fondamentale. Les croix rouges marquent les maxima locaux de la composante oscillante de la fréquence fondamentale. Les barres verticales tiretées indiquent le découpage de chacune des séquences vibrées.

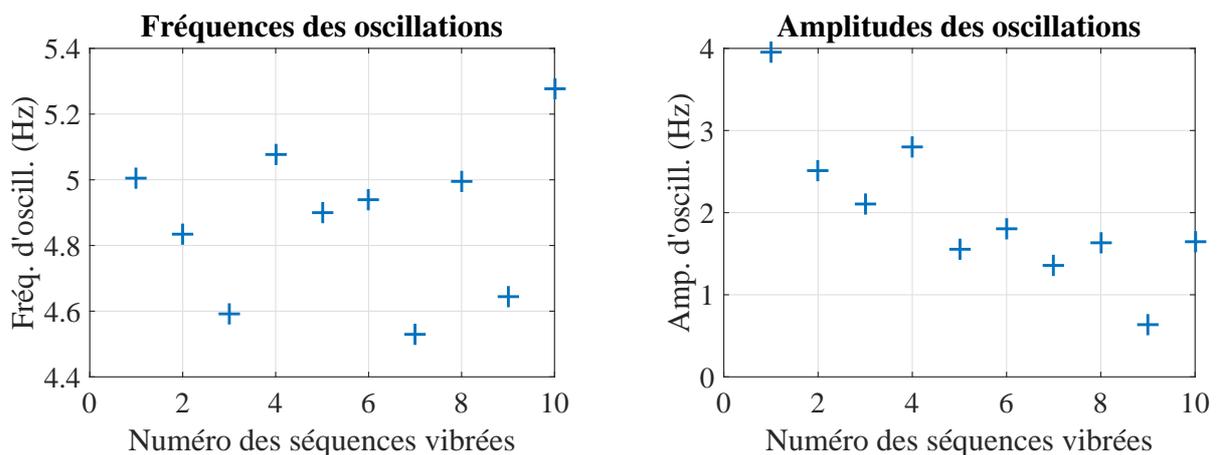


FIGURE 8.30 – Représentation pour chacune des séquences vibrées pendant le jeu de l’Ouverture à Léonore par le musicien 1, des amplitudes (droite) et fréquences (gauche) d’oscillations de celles-ci.

butions des fréquences et amplitudes des oscillations correspondantes au vibrato en figure 8.31. Nous notons qu’au cours des cinq extraits joués, le musicien 1 a effectué 76 séquences vibrées, le musicien 2, 96 et le musicien 3, 50. Pour les trois musiciens, les fréquences d’oscillation du

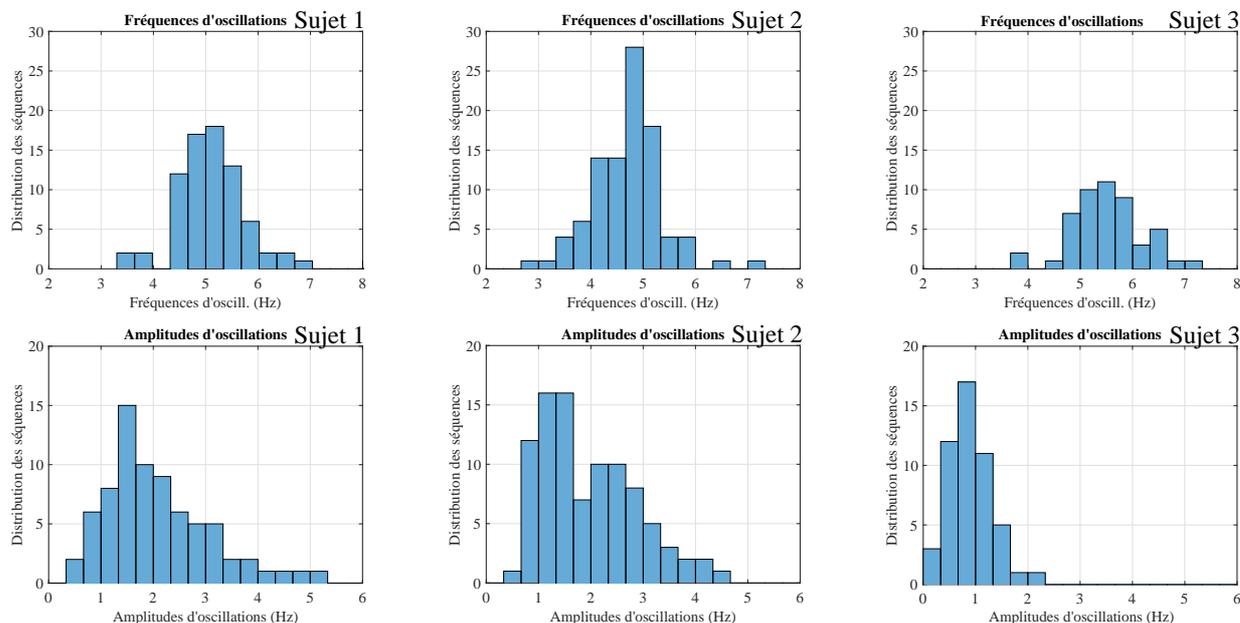


FIGURE 8.31 – Représentation de la distribution des amplitudes (bas) et fréquences (haut) des oscillations des séquences vibrées issues du jeu des cinq extraits musicaux pour chacun des musiciens.

vibrato sont prépondérantes autour de 5Hz, celles-ci s'étalant globalement entre 3 et 7Hz. De plus, les séquences vibrées des sujets 1 et 2 ont des amplitudes d'oscillation qui varient entre 0.5 et 5 Hz environ et ont pour un plus grand nombre d'entre elles, une amplitude d'oscillation entre 1 et 2Hz. Pour le sujet 3, les amplitudes des oscillations sont moins étendues, celles-ci variant entre 0 et 2.3 Hz environ, avec une majorité autour de 1Hz.

Nous nous intéressons ensuite aux éventuelles corrélations existantes entre la note jouée et les fréquences et amplitudes d'oscillation du vibrato produit. Nous représentons en figure 8.32, d'une part l'évolution des amplitudes en fonction de la fréquence d'oscillation, d'autre part l'évolution de l'amplitude d'oscillation en fonction de la note jouée et enfin l'évolution de la fréquence d'oscillation en fonction de la note jouée, ceci pour tous les extraits musicaux joués par les trois sujets. A partir de la figure 8.32, graphe de gauche, nous pouvons noter que, comme observé par la représentation des distributions, il existe un nombre plus important de séquences vibrées autour de 5Hz, de plus, pour celles-ci nous observons que la plage des amplitudes d'oscillation est plus étendue, entre 0 et 13 cents environ. Ensuite, plus la fréquence d'oscillation s'éloigne de 5Hz (plus grande ou plus petite), plus l'étendue de la plage des amplitudes d'oscillations se restreint et de manière assez symétrique; pour des fréquences d'oscillations de 3.5 ou 6.5 Hz, celle-ci est comprise entre 0 et 5 cents. Lors de cette étude aucune limite particulière n'a été fixée durant la détection du vibrato sur l'amplitude d'oscillations, cependant on peut se demander jusqu'à qu'elle valeur minimale d'amplitude d'oscillation la séquence peut être considérée comme vibrato ou juste une faible modulation de la fréquence. Il semble qu'il n'existe que très peu de valeurs en dessous d'une amplitude d'oscillation de 1 cent, ceci pourrait être un indicateur.

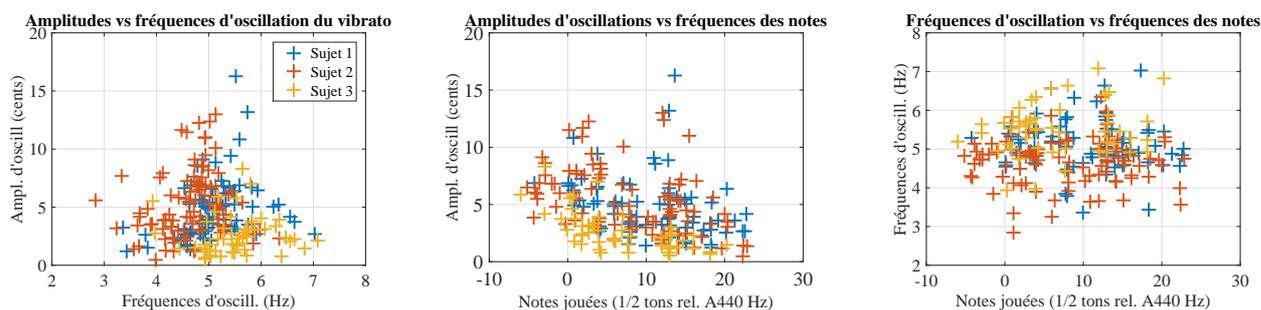


FIGURE 8.32 – Représentation de l’amplitude de l’oscillation (en cents) en fonction de la fréquence (en Hz) d’oscillation du vibrato (gauche), en fonction de la note jouée (en demi-ton relatifs au La 440Hz) (milieu), et de la fréquence d’oscillation (en Hz) du vibrato en fonction de la note jouée (droite). Ces représentations regroupent toutes les séquences vibrées des cinq extraits musicaux joués par les sujets 1, 2 et 3.

La représentation des amplitudes d’oscillations en cents en fonction de la note jouée permet une comparaison simple des écarts de hauteurs produits selon la note jouée, cent cents équivalant à un demi-ton. La tendance globale de cette représentation nous indique que les amplitudes d’oscillation par rapport à la fondamentale peuvent être plus importantes dans le registre bas de l’instrument, jusqu’à 12 cents environ (soit $1/16^{ième}$ de ton) que dans les aigus, jusqu’à 5 cents. Ceci pouvant être relié à la facture de l’instrument, voir chapitre 2 et 3, qui offre plus de mobilité aux variations de pression buccale mais aussi de distance au biseau en bas registre, les variations de l’amplitude d’oscillation sont alors plus aisément modulables en bas registre. De plus, la présence de séquences vibrées plus importantes autour de 5Hz peut être facilitée par la facture de l’instrument mais peut être aussi le fruit d’une certaine esthétique sonore, issue de la culture musicale.

Le graphe de droite de la figure 8.32 représente l’évolution de la fréquence d’oscillation du vibrato en fonction de la note jouée. A partir de cette représentation, nous ne remarquons pas de tendance particulière, les fréquences d’oscillations du vibrato semblent donc indépendantes de la note jouée.

Enfin, nous nous intéressons à l’évolution du contenu spectral durant la production de vibrato. A titre d’exemple puisque la même stratégie est employée par les trois musiciens, nous représentons en figure 8.33 l’analyse acoustique d’une séquence de vibrato extraite du *prélude à l’après-midi d’un faune* joué par le musicien 1. Sur la figure 8.33 sont représentés la hauteur des notes et le centre de gravité spectral (en demi-tons relatifs au La 440 Hz), le rapport des amplitudes des harmoniques impaires/paires ainsi que l’amplitude en dB SPL de chacune des six premières harmoniques du spectre. Nous remarquons, en figure 8.33, que la production de vibrato génère de plus grandes variations dans le CGS en comparaison de celles de la fréquence fondamentale. Nous observons que le musicien 1 joue la note sans vibrato pendant 0.5 seconde puis ensuite débute le vibrato. Cela permet de constater que le vibrato est créé par une variation

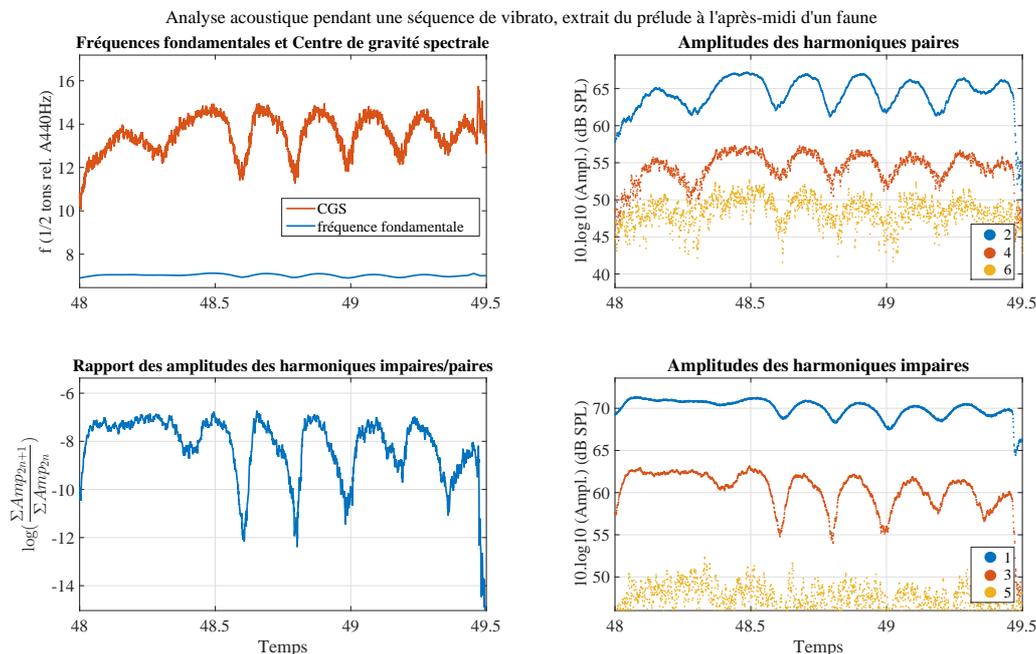


FIGURE 8.33 – Représentation des hauteurs de notes et du CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz, du rapport des amplitudes des harmoniques impaires/paires et des amplitudes des six premières harmoniques du spectre en dB SPL.

du CGS qui provient des contributions des harmoniques. Effectivement, nous notons que lors de la production de vibrato, les amplitudes des six premières harmoniques varient de façon synchrone. De plus, la représentation du rapport des amplitudes des harmoniques impaires/paires permet de constater que la production de vibrato s'accompagne d'une diminution de ce rapport, soit une chute plus importante de l'amplitude des harmoniques impaires que des paires. En effet, les variations observées sur l'amplitude de l'harmonique 3 sont de 7 dB SPL tandis que celles sur les amplitudes des harmoniques 2 et 4 sont inférieures à 5 dB SPL.

Nuances et direction de la phrase mélodique

Comme expliqué lors de l'introduction, un des éléments constituant et organisant la structure musicale d'une œuvre, est la mélodie. La flûte est un instrument monodique, utilisée explicitement, dans les extraits musicaux que nous avons étudiés, comme instrument mélodique. La mélodie peut être décomposée en phrases musicales. Ce découpage est parfois clairement indiqué par le compositeur par des indicateurs de nuances, respirations, point d'orgue ou temps d'arrêt ou d'autres fois laissé au libre arbitre de l'interprète. Ce dernier apprend lors de sa formation à placer les respirations entre les phrases afin d'utiliser l'inspiration de manière expressive, [60], cependant il peut aussi être amené à couper ces phrases par des respirations quand celles-ci sont trop demandantes en air (par leur longueur, tessiture ou nuance).

Lors de l'analyse du jeu des trois musiciens, nous avons pu noter qu'effectivement les musiciens respirent le plus possible entre ces phrases musicales, ce qui semble évident. Aussi, nous avons

pu remarquer que la puissance acoustique rayonnée était souvent un bon indicateur de fins de phrase musicale et que parmi les paramètres de contrôle gérés par le musicien, l'évolution de la puissance acoustique rayonnée était souvent reliée au nombre de Reynolds. En effet, nous pouvons reprendre de l'exemple du musicien 1 durant le jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc, celui-ci respire au milieu de la deuxième phrase musicale, au milieu de la mesure 4. Alors qu'on constate une diminution du nombre de Reynolds sur la fin des autres expirations, pour celle-ci (la deuxième) le nombre de Reynolds reste assez élevé, tout comme la puissance acoustique rayonnée qui est stoppée pour respirer mais pas diminuée avant la respiration. Nous pouvons également prendre comme exemple la première phrase de *Syrinx*, pour laquelle la fin est clairement indiquée par le compositeur (valeur longue, decrescendo, point d'orgue et annotation de respiration) à la fin de la mesure 2. Les trois musiciens diminuent alors la vitesse du jet d'air et ferment les lèvres afin de faire diminuer le nombre de Reynolds et donc la puissance acoustique rayonnée. Le nombre de Reynolds est donc un bon indicateur de contrôle utilisé par les musiciens afin de faire évoluer la puissance acoustique rayonnée par leur instrument, et donc donner une direction, une organisation de la phrase musicale.

Dans un premier temps, l'étude porte sur l'analyse des nuances, dont nous pouvons attendre qu'elles soient directement reflétées dans le nombre de Reynolds. Ce qui est effectivement le cas, par exemple au début de l'extrait de l'ouverture à *Léonore* de Beethoven, les trois musiciens effectuent le premier decrescendo sur le sol aigu par une diminution notable du nombre de Reynolds, et donc de la puissance acoustique rayonnée, en diminuant celle fournie à l'instrument. Nous représentons ici ces paramètres en figure 8.34 pour les musiciens 2 et 3, ceux du musicien 1 étant présenté dans la section précédente. A partir de la figure 8.34, nous remarquons effectivement que le decrescendo de la première note de l'extrait de Beethoven est réalisé par les musiciens par une diminution du nombre de Reynolds, et donc des puissances fournie à l'instrument et acoustique rayonnée. De plus, comme nous l'avons déjà dit dans la section précédente, lors d'une variation importante de la nuance, nous constatons une évolution importante de la puissance musculaire développée. En effet, ici le decrescendo est accompagné par une diminution de l'activité musculaire qui a été engagée avant l'attaque de la note *ff*, les muscles se relâchent donc afin de faire diminuer la pression, et donc la vitesse de jet, le nombre de Reynolds, ... Cet engagement ou désengagement musculaire lors de la réalisation de nuances a été observé pour les trois musiciens, lors de decrescendo mais aussi de crescendo. Effectivement, lors du jeu de la dernière phrase de l'extrait de *Syrinx*, un crescendo est indiqué sur le *Do b*, nous avons alors noté que les trois musiciens réalisaient celui-ci par une augmentation du nombre de Reynolds soutenue par une activité musculaire. Nous avons d'ailleurs pu remarquer que les trois musiciens respectaient la notation de la partition, le point culminant de ce crescendo étant sur la fin du *Do b*, le pic de puissance acoustique rayonnée correspondait avec cet instant. Les musiciens 1 et 2 ont d'ailleurs accompagné ce crescendo d'un vibrato jusqu'à ce point culminant. Le decrescendo suivant a été réalisé par les trois musiciens à l'image de celui de l'extrait de Beethoven. Nous nous intéressons maintenant à l'analyse acoustique du son produit pendant ce premier decrescendo au début de l'extrait. Nous représentons en figure 8.35, la hauteur de notes ainsi

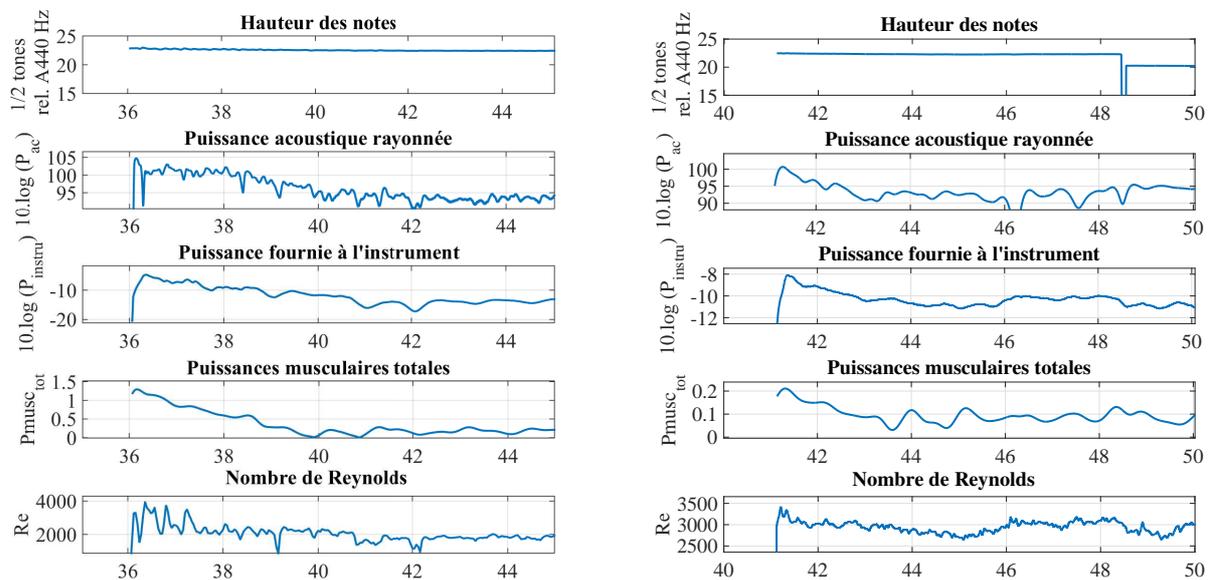


FIGURE 8.34 – Représentation des puissances fournies à l'instrument (en dB relatifs à 1 Watt), acoustique rayonnée (en dB SPL) et développées par les muscles (en Watts). Est également représenté le nombre de Reynolds et la hauteur de note (en demi-tons relatifs au La 440Hz) lors du jeu de la première note de l'extrait de l'Ouverture à Léonore par les musiciens 2 et 3.

que le CGS (en demi-tons relatifs au La 440 Hz), ainsi que les amplitudes des six premières harmoniques en dB SPL pour le jeu de la première note de l'extrait de Beethoven par le musicien 1, dans le but de comprendre l'évolution du spectre lors d'un decrescendo. Afin d'alléger le document, nous représentons uniquement les données du musicien 1, car les évolutions des différents paramètres acoustiques lors de ce decrescendo sont identiques pour le jeu des deux autres musiciens. A partir de la figure 8.35, nous pouvons noter que le decrescendo produit sur cette première note de l'extrait de Beethoven se traduit par une diminution du centre de gravité spectral du son produit, ceci étant en grande part lié aux diminutions des amplitudes des harmoniques, mais aussi à la diminution de la fréquence fondamentale de près d'un quart de ton, ce qui paraît assez important. Nous remarquons que l'amplitude de l'harmonique 2 est celle qui diminue le plus, de plus de 10 dB ; puis celle de l'harmonique 3 d'environ 10 dB et enfin l'amplitude de l'harmonique 1 diminue de 5dB environ.

Dans un second temps, l'étude se poursuit par l'analyse de la direction de la phrase musicale, qui peut également être soutenue par une activité musculaire, comme nous l'avons observé lors du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc par le musicien 1, surtout pour les respirations 4 et 5. En effet, le musicien 1 soutient par une activité musculaire la direction de la phrase musicale jusqu'à son point culminant (plus haute puissance acoustique rayonnée) puis relâche cette activité sur la fin de la phrase en diminuant la puissance rayonnée, voir en figure 8.6. On s'intéresse alors aux stratégies employées par les deux autres musiciens, on représente en figure

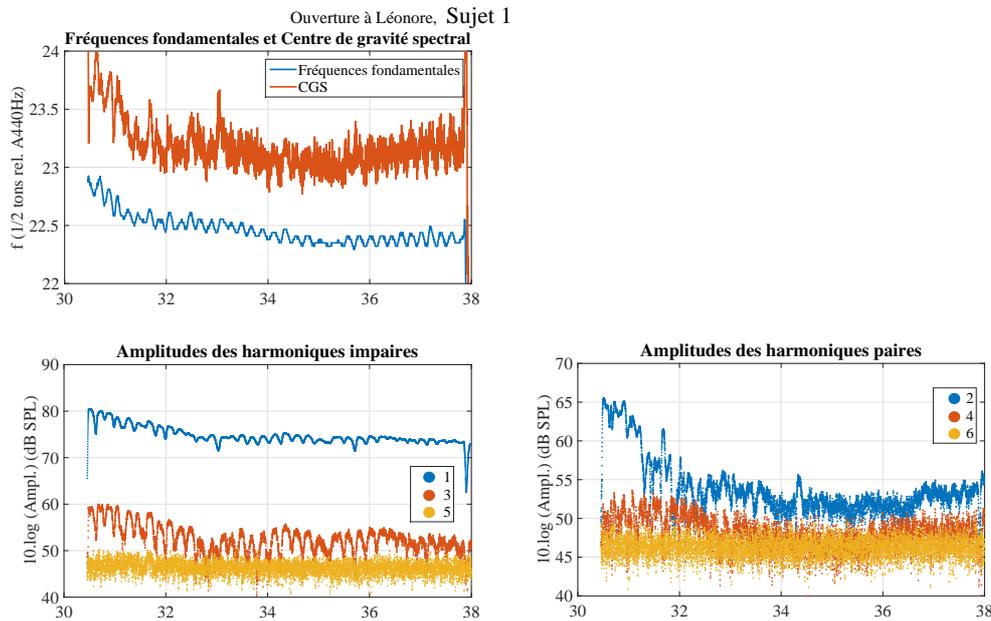


FIGURE 8.35 – Représentation des hauteurs de notes et du CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz, du rapport des amplitudes des harmoniques impaires/paires et des amplitudes des six premières harmoniques du spectre en dB SPL pour le jeu de la première note de l'extrait de Beethoven par le musicien 1.

8.36 les puissances développées pendant le jeu de la troisième respiration de Poulenc, mesure 7-8. Pour le musicien 2, la pression buccale faussée par le cathéter dans la bouche du musicien bouché, la puissance fournie à l'instrument n'est pas représentée car également faussée. A partir de la figure 8.36, nous remarquons que la stratégie employée par le musicien 3 est identique à celle du musicien 1, en effet ce musicien dirige la phrase musicale vers son point culminant, la note la plus haute en soutenant l'effort par une action musculaire, puis relâche celle-ci jusqu'à la fin de la phrase. Les allures des trois puissances développées sont assez semblables. Par contre, la stratégie utilisée par le musicien 2 est différente, celui-ci engage une activité musculaire dès le début du jeu, qu'il fait croître jusqu'à la seconde note, afin de poser l'appui sur la première note de la mesure et faire ressortir la structure rythmique, puis relâche celle-ci jusqu'à la fin de la phrase. La phrase 4 n'est pas représentée, mais les mêmes stratégies sont employées. Le musicien 2 anticipe peut-être la montée vers le point culminant, ou alors il vise la seconde note, puisque la première est à contre-temps et la seconde sur le temps. Cependant, le rendu au niveau de la puissance sonore semble être assez semblable pour les trois musiciens.

Nous pouvons maintenant nous intéresser à l'analyse du son produit pour cette phrase de l'extrait de la sonate de Poulenc, à titre d'exemple et comme celle-ci est assez semblable pour les trois musiciens, nous choisissons de représenter en figure 8.37 la hauteur de notes, le centre de gravité spectral en demi-tons relatifs au La 440Hz ainsi que les amplitudes des six premières harmoniques en dB SPL pour le jeu de la respiration 4 du musicien 1. A partir de la figure 8.37, nous remarquons que la direction de cette phrase vers le point culminant, soit la note la plus aigüe,

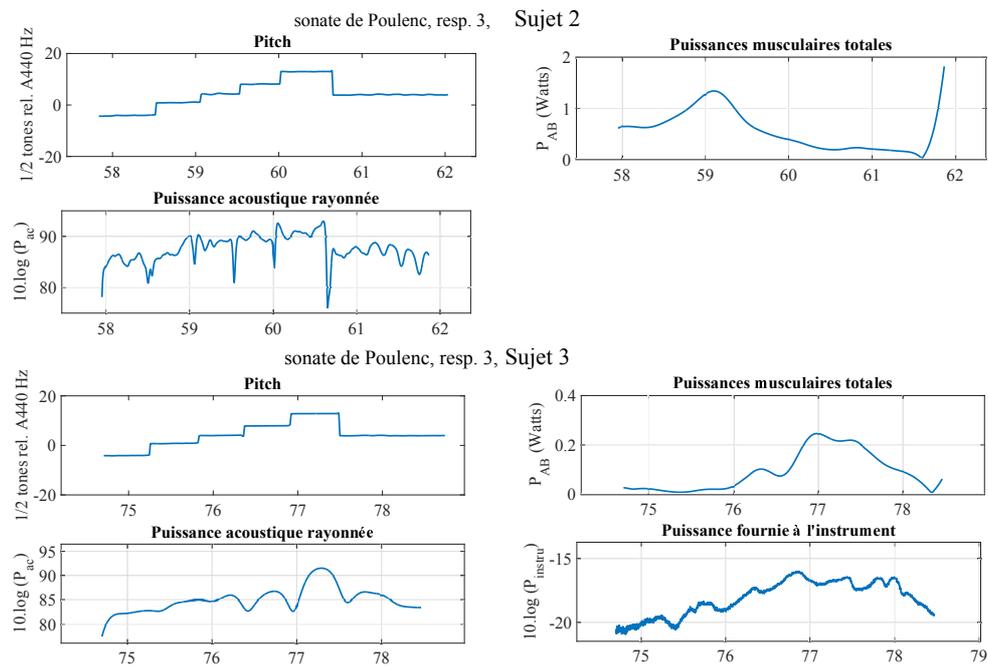


FIGURE 8.36 – Représentation des puissances développées durant le jeu de la phrase 3 de l'extrait de Poulenc par les musicien 2 (haut) et 3 (bas).

est notable dans les amplitudes des harmoniques impaires. Mais aussi, nous observons que le centre de gravité spectral, malgré les sauts de hauteur, est dirigé depuis le début de la phrase vers sa valeur la plus haute. De plus, nous pouvons noter que l'évolution de l'amplitude de la première harmonique contribue grandement à cette direction.

Contenu spectral du son produit

L'objectif est ici de comprendre quels sont les mécanismes/contrôles gérés ou non par le musicien qui participent à l'évolution du centre de gravité spectral du son produit. Comme discuté lors de la présentation des paramètres, le centre de gravité spectral dépend de la réponse acoustique de l'instrument et donc de la note jouée.

Dans un premier temps, nous menons une étude sur l'ensemble de la tessiture des extraits étudiés. Nous représentons en figure 8.38 les valeurs des centres de gravité spectraux, adimensionnés par la fréquence fondamentale, des sons internes pour toutes les notes jouées par le musicien 2 au cours de l'expérience en fonction des notes jouées en demi-tons relatifs au La 440Hz. Chaque point représente une fenêtre temporelle de 0.723ms. Ainsi, les notes qui ont été jouées le plus longtemps sur l'ensemble des extraits étudiés sont représentées par un nombre important de points, comme le Do \sharp (+4 demi-tons par rapport au La). De plus, selon le répertoire et les tonalités, des notes seront plus ou moins représentées, ce qui est le cas du Ré (+5 par rapport au La), qui n'est que peu représenté. La courbe jaune représente la courbe tendance suivie par les CGS en fonction des demi-tons (DM) : $CGS = -8.17 \cdot 10^{-6} DM^3 + 0.0015 DM^2 - 0.061 DM + 1.73$. Sur la figure 8.38, nous remarquons que les centres de gravité spectraux adimensionnés dépendent

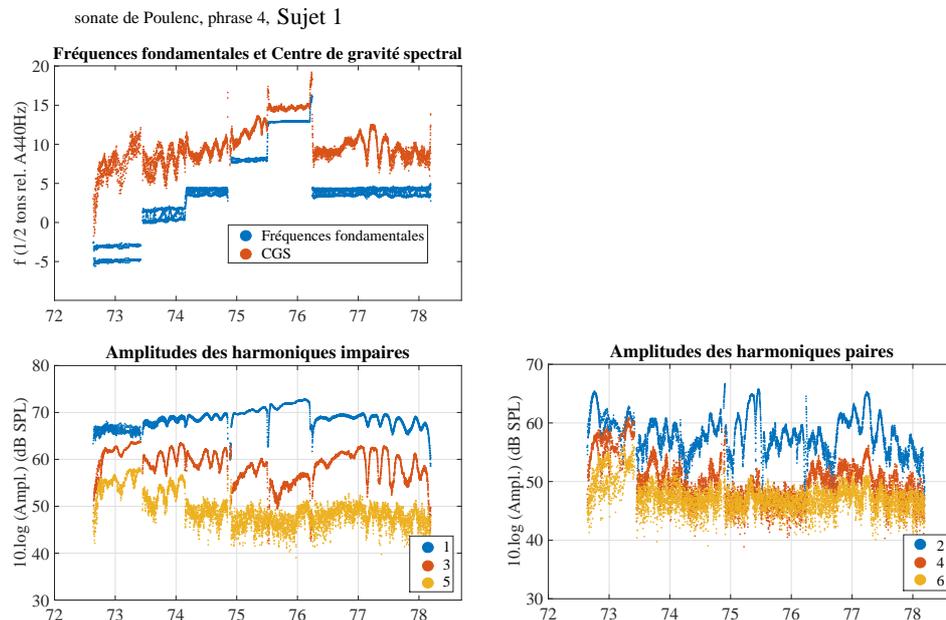


FIGURE 8.37 – Représentation des hauteurs de notes, du CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz et des amplitudes des six premières harmoniques du spectre en dB SPL pour la respiration 4 de l'extrait de la sonate de Poulenc jouée par le musicien 1. On note une détection de la fréquence fondamentale difficile sur la première note du fait de la tessiture et de la nuance de la note produite.

de la fréquence de la note jouée, selon la courbe tendance. Dans le but de centrer les variations des centres de gravité spectraux, nous divisons ceux-ci par la courbe tendance, les variations sont alors centrées autour de 1, voir en figure 8.39. Sur la figure 8.39, nous observons que les variations du centre de gravité spectral autour du centrage diminuent lorsque la fréquence de la note jouée augmente. Le musicien 2 fait donc plus évoluer le CGS dans les registres bas de l'instrument. A titre d'exemple, nous représentons les évolutions du CGS pour le jeu du musicien 2, cependant il en est de même pour les deux autres musiciens ; ceci permettant d'alléger le document.

Cette analyse globale du centre de gravité spectral permet de comprendre comment il évolue selon la tessiture, mais ne permet pas de comprendre comme le musicien est apte à le contrôler. Parmi les différents paramètres de contrôle, on sait d'après la littérature que l'enrichissement spectral peut être relié à la vitesse adimensionnée du jet. En effet, on rappelle, voir chapitre 4, que la vitesse adimensionnée du jet, θ est un indicateur du jeu sur un régime d'oscillation donné, plutôt en sous-régime pour des valeurs inférieures à 7 et en sur-régime pour des valeurs supérieures à 8, [9]. Les travaux de Blanc et Verge, [18, 130] montrent que l'augmentation de θ au-delà d'une valeur de l'ordre de 8 ou 9 s'accompagne d'un transfert d'énergie vers les harmoniques supérieures par les mécanismes de sources aéro-acoustiques. Cet enrichissement spectral est bien entendu conditionné par l'accord relatif des différents modes, du résonateur et notam-

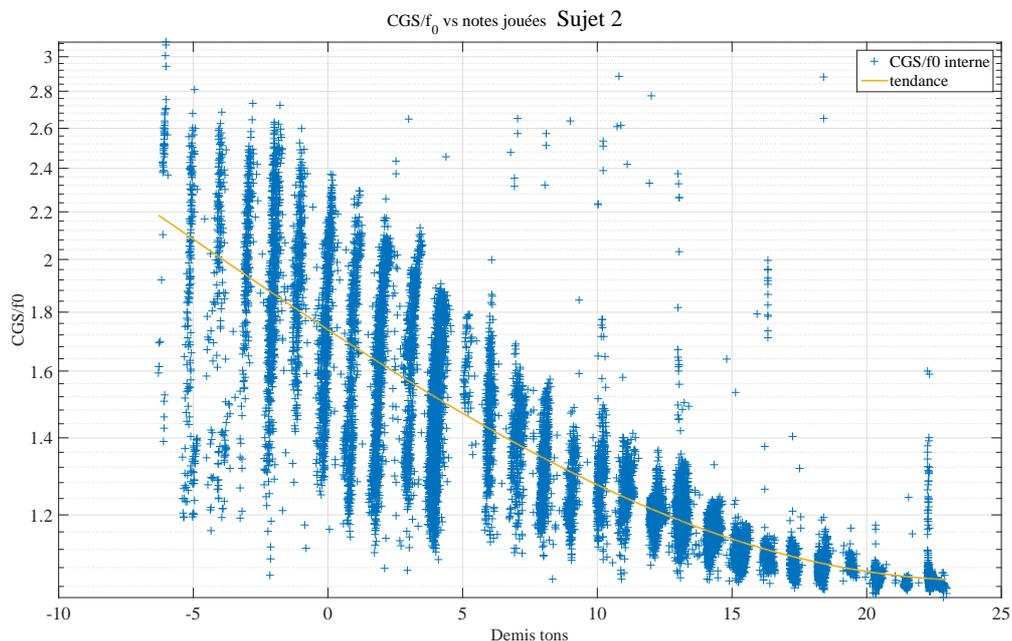


FIGURE 8.38 – Représentation des évolutions du CGS, du son interne (en Hz) adimensionné par la fréquence fondamentale en fonction des notes jouées (en demi-tons relatifs au La 440Hz) par le musicien 2 sur tous les extraits musicaux.

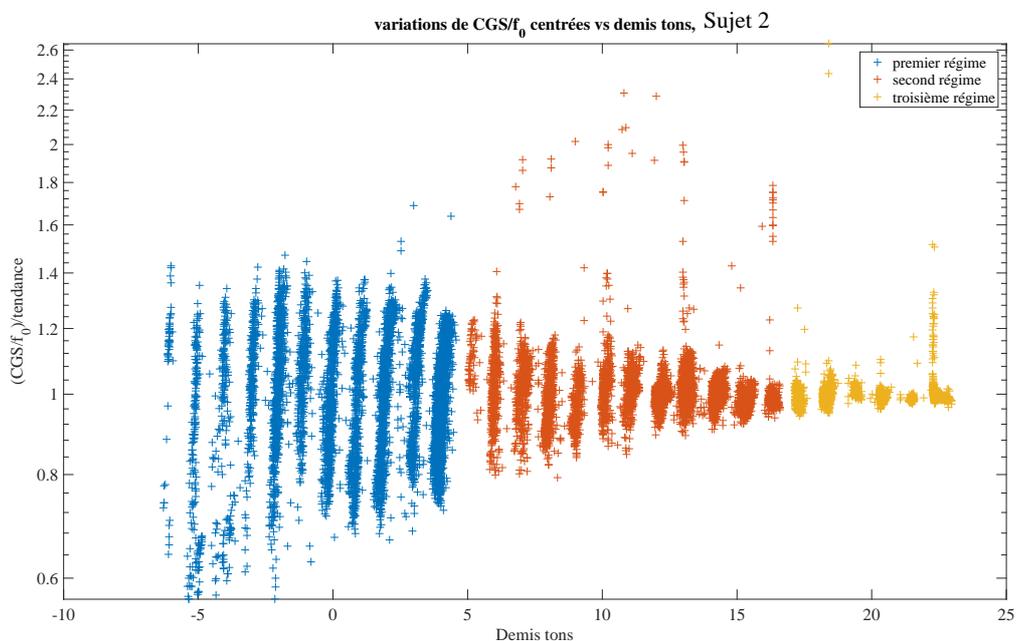


FIGURE 8.39 – Représentation des évolutions du CGS, du son interne (en Hz) adimensionné par la fréquence fondamentale, divisées par la courbe tendance en fonction des notes jouées (en demi-tons relatifs au La 440Hz) par le musicien 2 sur tous les extraits musicaux.

ment de leur harmonicité. On cherche donc ici à montrer comment l'évolution du CGS et donc de l'enrichissement spectral du son produit peut être relié à des variations de θ .

On considère alors toutes les notes jouées durant les cinq extraits musicaux par le musicien 2, et nous représentons les valeurs du CGS adimensionné et divisé par la courbe tendance en fonction de θ , en figure 8.40. La représentation de l'évolution des variations du CGS en fonction de la

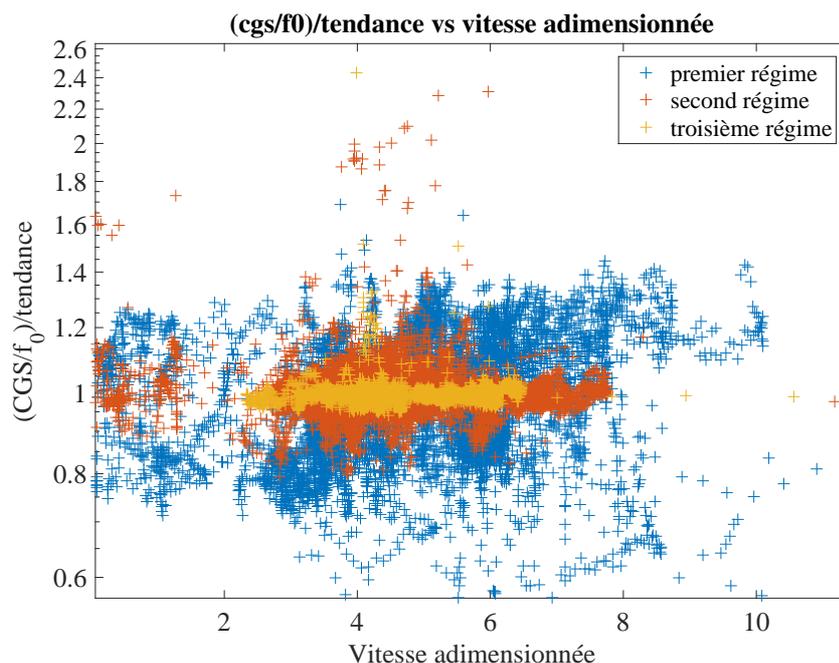


FIGURE 8.40 – Représentation des évolutions du CGS, du son interne (en Hz) adimensionné par la fréquence fondamentale, divisées par la courbe tendance en fonction de la vitesse adimensionnée, jeu du musicien 2 sur tous les extraits musicaux.

vitesse de jet adimensionnée en figure 8.40, ne montre pas de corrélation directe entre ces deux paramètres. Effectivement, même si une augmentation du CGS peut être liée à une augmentation de θ , à l'inverse certaines variations de θ ne signifient pas toujours une augmentation du CGS. Procéder à une analyse de toutes les notes jouées sans contexte n'est donc pas une solution.

Dans un second temps, nous procédons alors à l'analyse de l'évolution du centre de gravité spectral dans un contexte musical, sur des intentions spécifiques. Dans la section précédente, lors de l'analyse de la direction de la phrase mélodique, nous avons noté des évolutions du CGS sur une même note, amenant à viser le point culminant de la phrase et favorisant ainsi la perception d'une unité de la structure mélodique. Nous reprenons alors l'analyse de cette phrase, cette fois jouée par le musicien 3 à laquelle nous ajoutons la représentation de la vitesse adimensionnée en figure 8.41. A partir de la figure 8.41, nous remarquons alors, que comme pour les sauts d'octaves présentés précédemment, la montée d'arpège est ici réalisée de manière similaire par les musiciens 1 (figure 8.37) et 3. En effet, nous observons une certaine continuité du CGS. La vitesse de jet croît donc progressivement sur toute la montée mélodique. Chaque note évolue

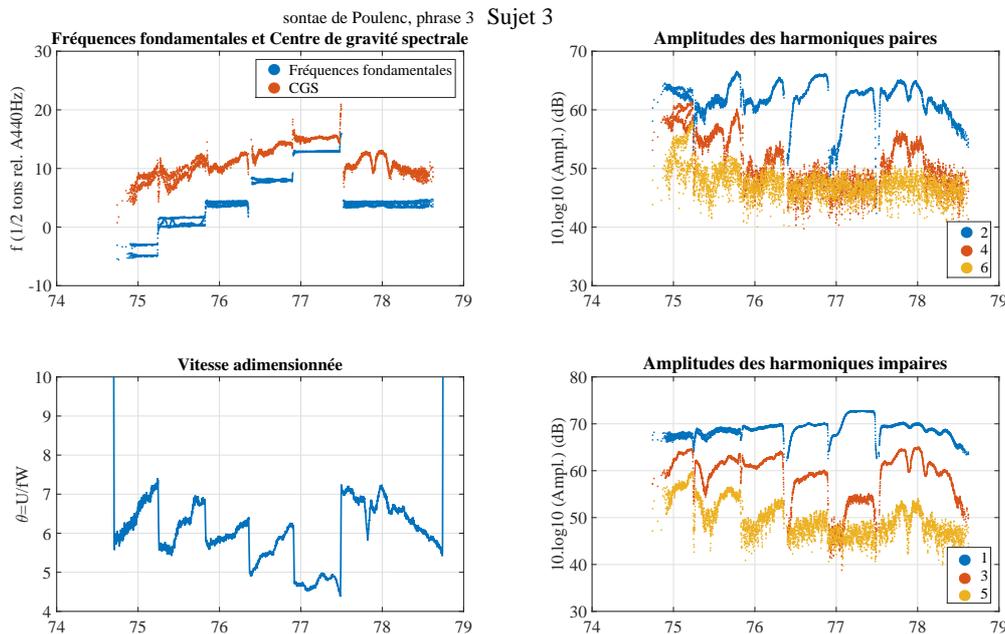


FIGURE 8.41 – Représentation des hauteurs de notes et du CGS en demi-tons relatifs au La 440Hz, du rapport des amplitudes des harmoniques impaires/paires, des amplitudes des six premières harmoniques du spectre en dB SPL et ainsi que la vitesse adimensionnée pour la respiration 3 de l'extrait de la sonate de Poulenc jouée par le musicien 3.

alors, du point de vue de sa composition spectrale, donnant la direction de la ligne mélodique montante pour toutes les notes de la figure 8.41, à l'exception des avant-dernières (sommet mélodique) et dernière notes dont l'allure est plutôt décroissante (θ et CGS), marquant la clôture de la phrase mélodique. De plus, nous constatons également que ces variations de θ provoquent des augmentations de l'amplitude de l'harmonique 2 mais également de la troisième, permettant alors au CGS de croître. Localement, il est alors ici observable qu'une augmentation du θ peut entraîner celle du CGS.

En poussant cette démarche à l'extrême, par exemple lors de sauts d'octave ou d'intervalle important, le musicien est aussi amené à conduire le son afin de rendre la perception de ceux-ci moins brutale. De plus, lors de l'analyse du jeu des musiciens, nous avons remarqué un effort musculaire spécifique lié aux sauts de grands intervalles ascendants.

Nous représentons en figure 8.42 les variations du CGS, de θ ainsi que les valeurs des amplitudes des 6 premières harmoniques lors du jeu de la seconde phrase musicale de l'extrait de la sonate de Poulenc par les musiciens 1 (haut) et 2 (bas). A partir de la figure 8.42, nous remarquons que les valeurs de θ pour le musicien 2 sont basses, certainement en raison d'un bouchage du capillaire servant à mesurer P_m . Nous notons, comme précédemment, que le CGS croît durant la note la plus basse et tend vers celui de la note la plus haute. Ceci est également accompagné par une augmentation de la vitesse adimensionnée, celle-ci est très importante pour le musicien

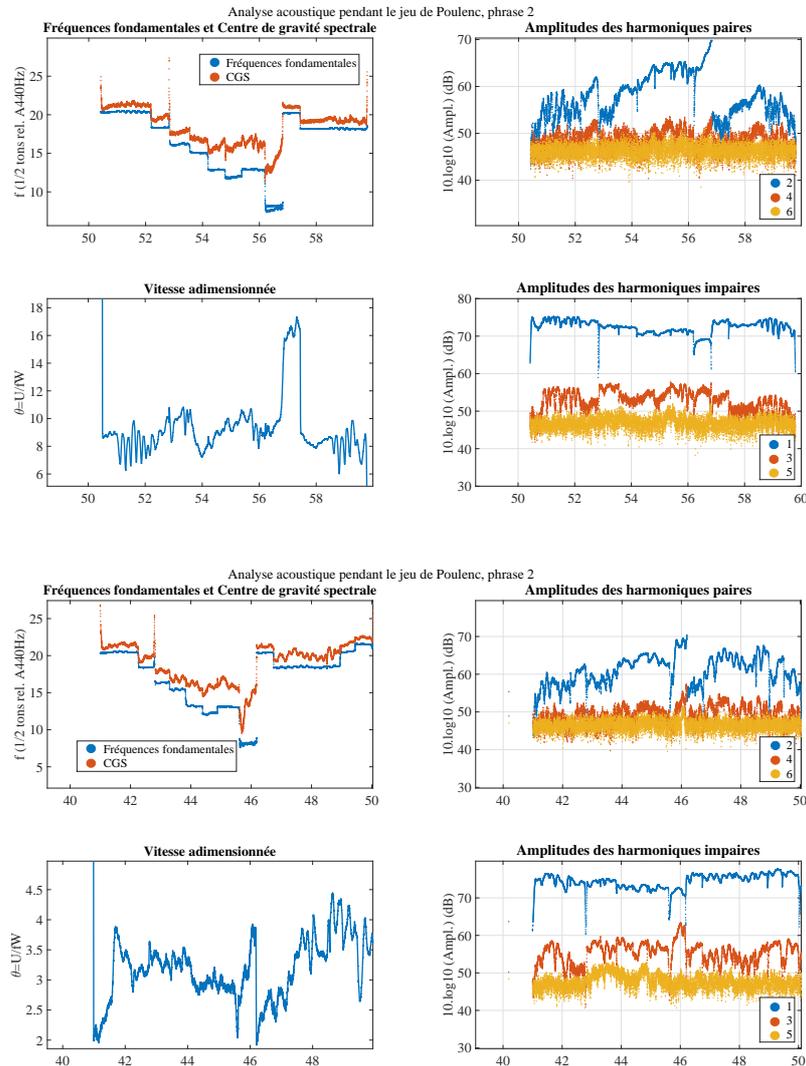


FIGURE 8.42 – Représentation des valeurs du CGS, de θ et des amplitudes des six premières harmoniques lors du jeu de la seconde phrase de l'extrait de Poulenc par les musicien 1 (haut) et 2 (bas).

1 mais permet au CGS d'avoir une valeur plus haute que celui du musicien 2 dès l'attaque de la note basse. Aussi nous pouvons observer quelle est l'harmonique qui tend à faire évoluer ce CGS; pour le musicien 1, il semble très distinct que l'augmentation du CGS est créée par une augmentation de l'amplitude de l'harmonique 2. Pour le musicien 2, nous observons une augmentation plus faible de l'amplitude de l'harmonique 2, mais aussi une augmentation de l'amplitude de l'harmonique 3. Les musiciens jouent donc ici le saut d'octave de façon à ce que le son émis ait un centre de gravité spectral le plus continu possible, au travers du contrôle de la vitesse adimensionnée.

8.4 Discussion

Le but de cette étude était de montrer comment les musiciens utilisent des éléments de leur technique de jeu, vue au travers du contrôle afin de rendre perceptible la structure musicale. Nous avons pu noter certaines stratégies de contrôle aéro-acoustique et respiratoire communes entre les trois musiciens mais aussi des stratégies individuelles. Par exemple, nous avons remarqué que la stratégie respiratoire à long terme était assez similaire chez les trois musiciens, en effet le début de l'expiration est produit par la retenue des muscles inspireurs jusqu'à ce que le système thoracique retourne à son état de relaxation, puis les muscles expirateurs (thoraciques et abdominaux) forcent la fin de l'expiration si nécessaire. Cette stratégie a également été observée par Cossette, [38]. Cependant, les trois musiciens ne jouent pas tous à des états respiratoires semblables dans l'échelle de la capacité vitale. Alors que les musiciens 1 et 2 ont tendance à favoriser l'inspiration afin de commencer chaque nouvelle expiration dans la partie haute de l'échelle de la capacité vitale, au-dessus de 60% du volume de la capacité vitale, le musicien 3 joue à des volumes plus bas sur cette même échelle, favorisant alors l'activité des muscles expirateurs lors de l'expiration. Nous observons alors des patrons des diagrammes de Konno-Mead propres à chaque musicien, les musiciens 1 et 2 mettant plus à contribution le volume haut-thoracique durant l'expiration, et le musicien 3 le volume abdominal. Par contre, nous avons montré que la réalisation d'une même phrase dans un état respiratoire semblable, par le même musicien était répétable, le musicien utilise la même stratégie respiratoire ; la répétition d'une même phrase à des états respiratoires différents engendre des stratégies musculaires divergentes alors que les stratégies aéro-acoustiques restent inchangées ; ceci pour les trois musiciens.

En plus de ces stratégies respiratoires globales, liées aux nécessités physiologiques, nous avons également observé des activités musculaires liées à des intentions particulières du jeu musical, pour les trois musiciens. Parmi les stratégies communes, nous avons noté que chacun des trois musiciens déclenche la production de vibrato par une activité musculaire particulière des muscles du haut-thorax ou de l'abdomen. Les musiciens 1 et 2 favorisant l'activité des muscles de l'abdomen et le musicien 3 celle des muscles expirateurs du haut-thorax. Les musiciens utilisent donc leur système respiratoire non seulement pour répondre à des questions de physiologie respiratoire mais aussi à des éléments musicaux particuliers et intentionnels souvent à l'aide du vibrato. Lors du jeu de l'extrait de l'Ouverture à Léonore par le musicien 1, nous avons noté que la construction du vibrato était directement liée à la carrure rythmique de l'extrait. En effet, la première note de cet extrait a une valeur de 5 temps découpée en 3 temps sur une mesure plus 2 sur la suivante. Le musicien 1 a donc organisé son vibrato suivant ce découpage, une séquence vibrée sur 3 temps, puis une autre sur 2 temps. Cette construction du vibrato est donc intentionnelle de la part du musicien, et souligne ici la carrure rythmique de l'extrait.

Une autre stratégie a été employée par le musicien 2 lors du jeu de cet extrait. En effet, ce musicien souligne une structure de l'extrait en 2 sections en produisant des séquences de vibratos plus amples et plus longues sur le premier temps des première et troisième mesures. Aussi, même si celui-ci effectue un *decrecendo* global sur tout l'extrait, nous remarquons une légère

augmentation du nombre de Reynolds, et donc de la puissance acoustique rayonnée sur le premier temps de la troisième mesure.

Ces deux musiciens font donc ici clairement entendre la vision qu'ils ont de la structure de l'extrait par le contrôle de leur instrument.

L'analyse acoustique du vibrato a ensuite montré que celui-ci était identifiable dans la fréquence fondamentale de la note jouée par des oscillations variant majoritairement à des fréquences autour de 5Hz, et des amplitudes de l'ordre de 1 à 2 Hz. Ceci étant en accord avec la littérature, [110, 115, 122, 5]. Le vibrato est également notable dans les variations du CGS, ainsi que dans l'amplitude des six premières harmoniques ; les impaires étant défavorisées par rapport aux paires pendant le vibrato.

Nous avons également pu noter lors de l'analyse du jeu des trois musiciens d'autres éléments de la structure musicale soutenus par une activité musculaire. Par exemple, la réalisation des trilles de la mesure 6 de l'extrait de la sonate de Poulenc a été soutenue par une activité abdominale de la part des trois musiciens. Un trille est réalisé par un changement de doigté assez rapide, un contrôle de la pression buccale plus fin est donc certainement nécessaire à la réalisation. Les trois musiciens utilisent la même stratégie, d'assurer le contrôle de cette pression en activant les muscles abdominaux, et donc en faisant monter le diaphragme sur les poumons afin de les compresser et donc d'avoir un meilleur contrôle de la pression produite.

Un autre élément technique pour lequel nous avons pu noter une activité particulière des muscles abdominaux est le passage de grands intervalles. Les sauts de hauteur de note nécessitent une montée de la pression buccale afin de jouer la note la plus haute. Cette montée rapide de pression buccale est réalisée par les trois musiciens par l'action des muscles abdominaux, et donc une augmentation de la puissance musculaire abdominale. En effet, comme précédemment, la contraction des muscles abdominaux pousse le diaphragme contre les poumons, ce qui tend à les compresser et donc à faire monter la pression dans les voies aériennes et dans la bouche.

Deux autres études de Cossette, [38, 39], ont également montré une activité musculaire spécifique lors de la création de hautes pressions buccales, pour le jeu de notes staccati ou octaves, mais en dehors d'un contexte musical. Cette étude, [38], a aussi montré une activité musculaire pour un des sujets lors du jeu vibrato, mais inspiratoire. Comme ici pour nos trois sujets, Cossette, [39], a aussi rapporté l'activation des muscles inspiratoires au début des phrases musicales et d'avantage des expiratoires par la suite.

Lors du jeu d'une mélodie, le musicien construit les différentes phrases musicales. Nous avons pu noter des variations des paramètres de contrôle selon la structure des phrases et notamment sur les fins de phrases. En effet, le musicien diminue la puissance acoustique rayonnée de son instrument en faisant décroître le nombre de Reynolds. Ceci avait déjà été remarqué en dehors d'un contexte musical pour une note sur laquelle un crescendo-diminuendo était effectué par de la Cuadra, [41] et Cossette [40]. Dans le cadre de cette étude, nous notons également que la production de crescendo ou diminuendo correspond respectivement soit à un engagement ou à

un relâchement musculaire.

Il a également été observé que la réalisation de diminuendo est accompagnée d'une diminution de l'amplitude des harmoniques, ainsi que du CGS au début de l'extrait de l'Ouverture à Léonore de Beethoven.

L'étude présentée ici permet d'observer ces mêmes comportements dans un contexte musical. Aussi, d'autres éléments de contrôle des flûtistes en rapport avec la structure musicale de l'extrait joué ont été notés, comme l'appui de certaines notes par un nombre de Reynolds plus élevé et donc une puissance acoustique rayonnée plus importante, ou encore la direction que le flûtiste donne à une phrase. Lors du jeu de l'extrait de la sonate de Poulenc, durant le jeu des arpèges ou octaves, nous avons également observé que la direction de la phrase était notable dans le CGS. En effet, quand celui-ci est maintenu de façon continue pendant les sauts de hauteur de note, la perception d'unité de la structure mélodique est favorisée. Nous avons également pu noter que chacun des musiciens faisait évoluer le son produit, sur une note donnée et dirigée, en terme de contenu spectral, en enrichissant celui-ci par l'augmentation de la vitesse adimensionnée. La corrélation entre ces deux paramètres a pu être établie dans un contexte musical particulier, lors des sauts de hauteur de notes. Il paraît donc qu'un moyen de faire augmenter le CGS, d'enrichir le spectre du son, ou encore de le "timbrer", est de faire croître la vitesse de jet adimensionnée θ comme l'ont déjà démontré Blanc et Verge, [18, 130].

Dans l'objectif de relier les stratégies de jeu étudiées dans ce chapitre et les résultats obtenus aux chapitres 2 et 3, nous présentons le jeu de l'extrait de *Syrinx* par le musicien 2 en figure 8.43, déjà présenté en figures 8.16 et 8.15. Cette figure montre la hauteur des notes jouées, l'écart de celles-ci à un diapason basé sur le La à 440Hz, la vitesse de jet adimensionnée θ , la pression buccale P_m , la distance des lèvres au biseau W et la puissance acoustique rayonnée. Sur la figure 8.43, nous notons que les trois Si \flat (repérés par des flèches sur la figure 8.43) joués pendant cet extrait sont à des justesses très proches, légèrement plus hautes que le diapason à 440Hz, hormis la fin du troisième Si \flat qui a tendance à baisser. Les deux premiers Si \flat sont le résultat d'un même contrôle aéro-acoustique : les valeurs de θ sont identiques. La distance des lèvres au biseau W est également similaire, ce qui indique que les fréquences de résonance passives sont très similaires. Par contre, le troisième Si \flat a une justesse qui a tendance à baisser du fait que la pression buccale diminue, dans le but de finir la phrase musicale et diminuer la puissance acoustique rayonnée. Cette chute de la pression buccale n'est alors que peu compensée par la distance des lèvres au biseau, nous remarquons sur cette note que les lèvres s'éloignent légèrement du biseau, mais cela ne suffit pas à faire remonter complètement la justesse du son produit.

Aussi, le jeu du Mi \flat de la dernière phrase (repéré par une ellipse sur la figure 8.43), montre que le decrescendo produit pour clôturer cet extrait musical est bien contrôlé au niveau de la justesse, celle-ci est très stable. Le decrescendo est visible dans la puissance acoustique rayonnée, il est produit par une chute de la vitesse de jet, via la pression buccale. Cette chute de la pression buccale, ayant tendance à faire baisser la justesse de la note jouée, est compensée par

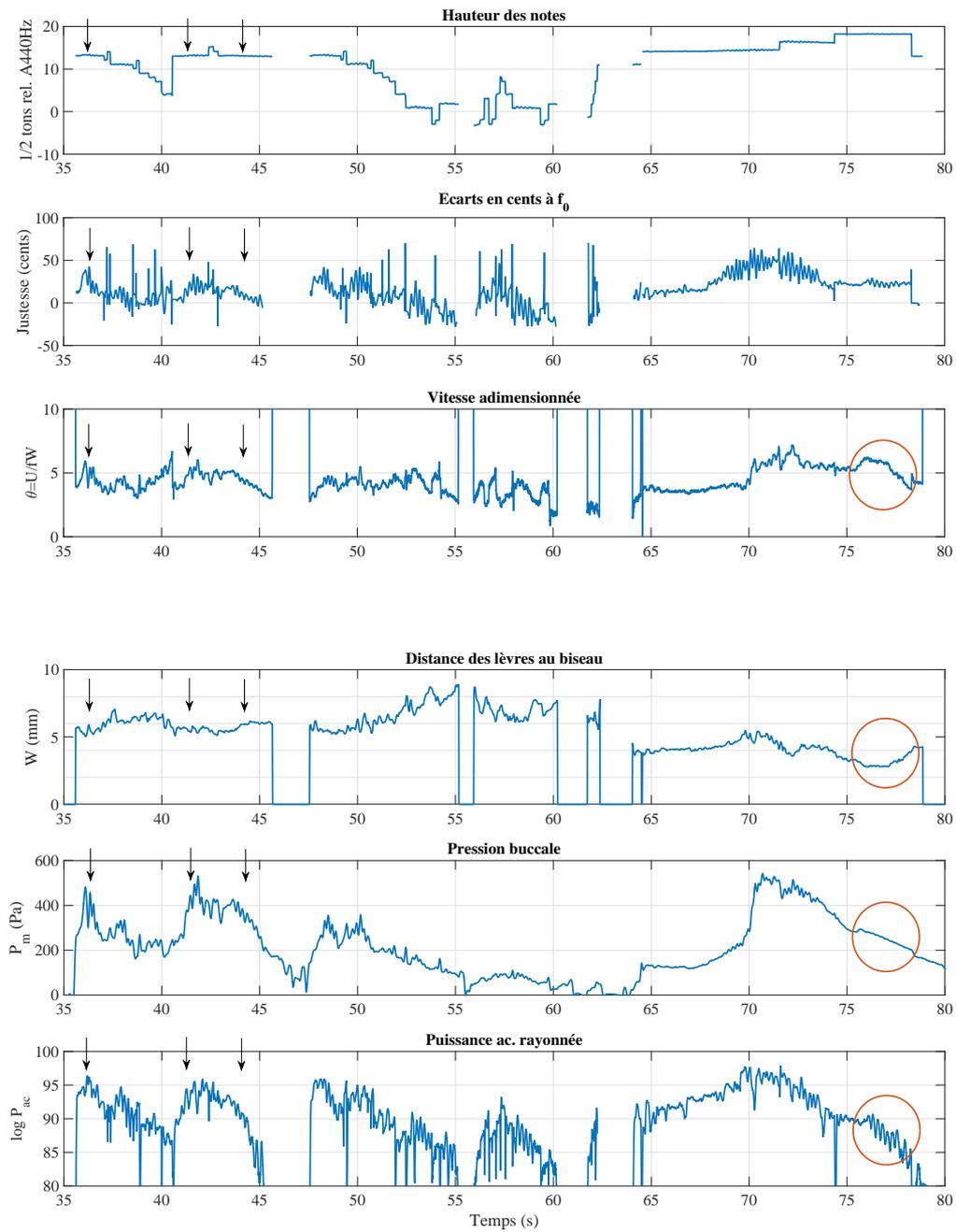


FIGURE 8.43 – Jeu de *Syrinx* par le musicien 2, sont représentés : la hauteur des notes jouées, l'écart de celles-ci à un diapason basé sur le La à 440Hz, en cents, la vitesse de jet adimensionnée θ , la pression buccale P_m , la distance des lèvres au biseau W et la puissance acoustique rayonnée. Les Si \flat du second registre sont repérés par des flèches, et le Mi \flat de la dernière phrase par une ellipse.

une augmentation de W , c'est-à-dire un éloignement des lèvres au biseau permettant de faire remonter la fréquence de la note jouée. Cette compensation dans le but de garder une justesse stable, induit une chute de la vitesse adimensionnée sur la fin de l'extrait, et donc possiblement un changement de timbre.

Cette courte analyse du jeu de l'extrait de Syrinx par le musicien 2 permet donc de mettre en lumière les stratégies développées par le flûtiste, ce dernier combinant à la fois des stratégies liées au fonctionnement aéro-acoustique de l'instrument, via le contrôle de la pression buccale et de θ , mais aussi au fonctionnement passif de celui-ci en corrigeant la justesse du son produit via la position des lèvres à l'embouchure, selon la pression de jeu produite.

Les musiciens utilisent donc des stratégies de contrôles respiratoire et aéro-acoustique dans le but de structurer un extrait musical et de l'interpréter, les auditeurs percevant ces intentions à minima par le biais de la fréquence de la note jouée, par le contenu spectral du son produit, ainsi que par la puissance acoustique rayonnée. La question d'identifier ce qui est perçu par l'auditeur reste difficile à étudier. Il possède certes la capacité d'analyser les évolutions de puissance sonore et/ou de contenu spectral du son produit qu'il écoute. Cependant, les efforts expiratoires observés qui accompagnent des éléments importants de la structure musicale pourraient laisser imaginer une perception plus globale : l'auditeur se centrerait sur la perception des intentions et donc des efforts spécifiques produits par l'instrumentiste plutôt que sur l'analyse des propriétés acoustiques du son. Les neurones miroirs discutés en [94, 65], apparaissent comme un mécanisme perceptif qui confirmerait cette hypothèse.

Cinquième partie

Conclusions et perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion

Après avoir pris connaissance de la consigne musicale proposée, le musicien construit sa stratégie d'interprétation, qui se traduit sous la forme de contrôles instrumentaux : gestion du temps, séquençage des actions respiratoires et des mouvements des différentes parties de son corps : membres, doigts, lèvres, langue, ...

Dans le jeu des instruments à vent, une part de ce contrôle reste difficilement visible, car intérieur au corps : la respiration. Cette particularité en rend difficile d'une part l'enseignement, le maître fait alors référence à des sensations internes en utilisant des représentations imagées ; et d'autre part l'analyse scientifique, qui doit faire appel à des techniques empruntées au domaine médical.

L'instrumentiste, après de nombreuses années d'apprentissage, intègre dans sa stratégie les possibilités et les limites de son système respiratoire, mais aussi les qualités et les défauts de son instrument. L'étude des stratégies d'un instrumentiste doit donc nécessairement intégrer des connaissances détaillées de la réponse acoustique de l'instrument, du système respiratoire et des utilisations spécifiques qui en sont faites par les instrumentistes à vent. La méthode retenue dans notre travail a été d'analyser, au travers d'une étude de type conception, la réponse acoustique de l'instrument puis, l'utilisation du système respiratoire, résumée sous la forme d'un petit modèle. Enfin, l'interface entre système respiratoire et instrument a été analysée en détail, tant du point de vue de son influence sur la réponse acoustique de l'instrument que de celui du contrôle. Une fois ce travail effectué en détail, le jeu musical est abordé et son analyse intègre tous les éléments cités précédemment, mettant en lumière à la fois les stratégies à long terme (celui de la phrase musicale, quelques dizaines de secondes) et à court terme (celui d'une inspiration ou de l'accentuation spécifique d'une note de la phrase).

Notre travail porte sur le jeu de la flûte et se centre progressivement sur le jeu de la flûte traversière dans un contexte musical des *XIX^{ième}* et *XX^{ième}* siècles. Ce travail a cherché à rendre compte, de manière précise et détaillée, des stratégies développées par trois musiciens dans le jeu de la flûte ; aucune analyse statistique des stratégies utilisées par un panel de flûtistes conséquent ne peut donc être envisagée. Une compréhension fine des contrôles développés par le musicien selon la consigne musicale permet cependant de comparer trois stratégies individuelles. Les principales conclusions de ce travail de thèse sont résumées ci dessous.

L'acoustique linéaire, un moyen de modéliser les fréquences de résonance d'un nouvel instrument : La première étude présentée porte sur l'apport de l'acoustique linéaire lors de la conception ou de l'évolution d'un instrument a montré que la modélisation donne des informations pertinentes sur les fréquences de résonance de l'instrument. En effet, chaque variation de la géométrie de l'instrument (perce, diamètre des trous, longueur des cheminées, longueur du cylindre, ...) peut être traduite par une variation de la fréquence de résonance.

Cette étude a également montré comment la modélisation peut accélérer la création des premiers prototypes, en limitant le nombre d'essais et donc de pièces rebutées. La collaboration avec le facteur de flûtes est également importante, les discussions apportant réponse aux limitations données par la facture (par les outils ou pièces, clés, anneaux, utilisés). Aussi, cette étude a permis de définir des doigtés de jeu pour la troisième octave, en effet même si le système "Boehm" utilisé est le même que celui de la flûte traversière, la géométrie de la quena étant différente, notamment sa perce, les doigtés du troisième registre ont dû être adaptés. Dans cette étude aucune hypothèse n'est faite à priori sur l'influence des lèvres sur les fréquences de résonance. Cet élément étant indispensable à la modélisation, des comparaisons entre fréquences passives (prédites ou mesurées) et les fréquences en jeu ont permis d'intégrer la présence des lèvres dans la modélisation, au titre d'une correction de longueur sur le cylindre principal. Cette méthode fait donc implicitement l'hypothèse que le comportement de l'instrumentiste est répétable, et cela même lors de petites variations de facture entre deux prototypes successifs. La mesure de l'influence des lèvres a donc fait l'objet de la suite du travail.

La position des lèvres du musicien à l'embouchure peut être assimilée à une correction de longueur dans la définition de l'impédance de rayonnement de l'embouchure : Une part importante de l'étude menée au chapitre 2 a été de développer un protocole expérimental permettant la mesure de l'impédance de l'instrument en condition de jeu, le travail présentant les apports et limitations dues à ce protocole. Une fois ce protocole opérationnel, les résultats obtenus par cette étude montrent que la présence du musicien à l'embouchure modifie l'impédance de rayonnement de celle-ci, ayant pour conséquence une diminution des fréquences de résonance d'au moins 70 cents. Le musicien, au cours de son jeu musical, est amené à modifier la position de ses lèvres, notamment pour contrôler les changements de régime, ces variations de position ont donc pu être analysées et traduites en correction de longueur dans l'impédance de rayonnement à l'embouchure. Les choix du facteur concernant l'harmonicité de l'instrument sont donc possiblement reflétés dans les stratégies de jeu développées par les musiciens.

Les flûtistes contrôlent la justesse en jeu en modifiant leurs contrôles de la pression buccale et de la distance des lèvres au biseau, révélant l'idée d'une position confortable de jeu : Les flûtistes, en plus d'ajuster la pression buccale pour contrôler les changements de régime et les intentions musicales, utilisent la position des lèvres à l'embouchure comme moyen de contrôle de la justesse du son produit. Les résultats apportés par l'étude du contrôle des musiciens face à un désaccord de l'instrument ont montré que le flûtiste contrôle la justesse du son produit en découvrant l'embouchure afin de faire monter la fréquence fondamentale du son produit, et inversement pour la faire baisser comme on pouvait s'y attendre au vu des résultats du chapitre 2. Mais aussi, le musicien, dans un souci de garder des valeurs de la vitesse de jet adimensionnée optimales et donc des conditions de jeu optimales, fait varier la pression buccale produite en simultané avec la position des lèvres. A partir de ce dernier point, il a été montré qu'il existe un "accord" de l'instrument, c'est-à-dire une position de la coulisse pour laquelle le contrôle est facilité, apportant au musicien plus de possibilités pour faire évoluer ces deux paramètres dans le but d'effectuer les changements de régime, mais aussi à des

fins expressives : nuances et contenu spectral. Nous avons montré que le musicien est capable d'ajuster, dans des limites qui varient en fonction de la tessiture, la hauteur des sons produits. Ces résultats sont à mettre en perspective des contraintes discutées lors de la conception de la quena chromatique. Nous avons montré qu'un désaccord trop extrême de l'instrument entraînait un inconfort dans le jeu du musicien, notamment des puissances fournies à l'instrument et des consommations d'air élevées, ceci augmentant les efforts respiratoires fournis par l'instrumentiste, tout en altérant le son produit (hautes valeurs du nombre de Reynolds). Ces efforts respiratoires produits sont donc le sujet principal de la seconde partie.

Les contrôles respiratoires et aéro-acoustique sont développés de manière coordonnée par le musicien lors du jeu musical : La première étude expérimentale menée s'intéresse au contrôle et aux stratégies respiratoires et aéro-acoustiques globales, employées par les musiciens au cours du jeu musical. Les résultats de l'étude du chapitre 4 indiquent et confirment une forte coordination dans le jeu du flûtiste entre les contrôles que ce dernier effectue à la bouche et l'action sur son système respiratoire. En effet, il a été noté que le contrôle du débit d'air, qui est directement corrélé avec la dynamique de jeu, est à la fois effectué par des variations de l'ouverture des lèvres, et des variations de pression buccale, ces dernières étant directement contrôlées par le système respiratoire, et les actions musculaires. Un modèle simple du système respiratoire du flûtiste a ensuite été proposé, liant les volumes d'air et les variations de pression buccale aux activités musculaires mesurées ou déduites, comme l'activité du diaphragme, muscle principal de la respiration dont l'action n'avait pas été mesurée. Un des objectifs de la suite du travail a donc été de développer un protocole permettant la mesure de l'activité du diaphragme. Aussi, cette étude a permis de comprendre que les efforts musculaires produits durant le jeu étaient à apprécier en pressions produites relatives à la courbe de relaxation de la cage thoracique, la poursuite du travail a donc pris cette direction, cherchant alors à déterminer les pressions développées relatives aux courbes de relaxation de chacun des compartiments (thoracique et abdominal).

Le musicien organise, avant la production sonore, son jeu musical à long et court termes, via l'inspiration et la préparation au jeu : Les résultats du chapitre 6 montrent en premier lieu une vision à long terme du jeu pendant la phase d'inspiration, en effet comme on peut s'y attendre, les volumes d'air inspirés sont corrélés aux durées d'inspiration et aussi aux volumes utilisés pendant l'expiration, c'est-à-dire la production du son. De plus, les résultats montrent différentes stratégies respiratoires, les muscles de la cage thoracique étant mis plus à contribution lors d'inspiration lente (donc les premières) et le diaphragme plus sollicité lors des inspirations rapides (en jeu). Ces stratégies globales peuvent varier légèrement d'un musicien à l'autre, notamment par le fait que certains musiciens jouent à plus hauts volumes (dans la capacité vitale) que d'autres. En second lieu, la phase de préparation, intervenant après l'inspiration et avant le son produit est nécessaire afin de faire monter la pression et donc favoriser l'expiration. Cette phase vise la production à court terme, c'est-à-dire les premières notes produites. En

effet, selon les premières notes indiquées sur la consigne musicale, leur tessiture ou leur nuance, les pressions à générer varient. Les musiciens préparent donc leur jeu en conséquence, soit en retenant l'expiration en privilégiant l'activité des muscles inspireurs afin de maintenir la cage thoracique ouverte et ainsi générer des basses pressions ; ou alors en relâchant ces muscles, et parfois même en activant les muscles expirateurs de l'abdomen, les musiciens font monter la pression produite pour obtenir des notes du troisième registre ou effectuer des nuances *ff*.

Les contrôles aéro-acoustiques du jeu sont indépendant de la position de jeu du musicien, le contrôle respiratoire est adapté. L'étude expérimentale du chapitre 7 a cherché à comprendre comment le musicien adapte son jeu, et notamment ses stratégies respiratoires et aéro-acoustiques à différentes positions de jeu. Les résultats montrent que le contrôle aéro-acoustique développé par le musicien est indépendant de la position (assise ou debout) dans laquelle il joue. Par contre, le contrôle respiratoire est, lui, modifié, le flûtiste mettant plus à contribution le volume abdominal en position assise. En effet, en position assise les muscles posturaux de l'abdomen sont relâchés, la résistance de l'abdomen à la descente du diaphragme est donc moindre. Cette étude montre qu'indépendamment de la variation du contrôle respiratoire due au changement postural, le musicien conserve les mêmes techniques de jeu à l'embouchure, dans le but de jouer de façon similaire l'extrait musical demandé. Cela montre une certaine adaptation du musicien à la position de jeu, cela montre également qu'il paraît plus facile de solliciter la phase inspiratoire en position assise, ce qui semble contraire à l'idée des musiciens selon laquelle ils disposent de plus d'air en position debout.

Les musiciens utilisent leur système respiratoire pour structurer musicalement une pièce : Les résultats obtenus lors de l'étude expérimentale menée au chapitre 8, montrent que les musiciens développent des stratégies respiratoires globales, liées au jeu de la phrase à long terme, celles-ci étant liées également à leur physiologie ou habitude respiratoire de jeu. De plus, nous avons montré que les musiciens développent des stratégies respiratoires particulières liées à des intentions musicales ou à la structure de la phrase musicale. En effet, le musicien déclenche le vibrato par une activité musculaire particulière (du haut-thorax ou de l'abdomen selon le musicien) ; la construction de ce vibrato pouvant être reliée à la structure de la phrase, notamment au découpage temporel musical interprété par le musicien. La structure musicale de la phrase, sa dynamique peut également être interprétée, dirigée par le soutien musculaire, les résultats montrant une certaine corrélation entre puissances musculaires développées, puissance fournie à l'instrument et puissance acoustique rayonnée. Ces éléments musicaux, dont la production est soutenue ou déclenchée par une activité musculaire sont directement notables dans le son produit en terme de puissance sonore rayonnée et de contenu spectral. Il a d'ailleurs été montré dans des contextes musicaux particuliers, comme la direction d'une phrase ou un grand intervalle de hauteur de notes, que les variations de contenu spectral, que l'on peut associer à la brillance du son, sont pilotées par des variations de la vitesse de jet adimensionnée, elle-même en partie contrôlée par la pression buccale produite.

Perspectives

Le travail présenté dans ce document concerne l'étude de l'interaction entre le musicien et son instrument et notamment des contrôles développés par l'instrumentiste, en relation avec les libertés et contraintes apportées par la facture. Ces travaux laissent entrevoir différentes directions de travail, afin d'approfondir notre connaissance des instruments de la famille des flûtes.

Acoustique & facture instrumentale :

Les études présentées dans ce document autour de la réponse acoustique de la flûte, montrent une relation directe entre la réponse acoustique et la facture instrumentale. Nombreux éléments de la facture de la flûte nécessitent, du point de vue de la modélisation, d'être mieux modélisés. Dans ce sens l'étude du rayonnement à l'embouchure de la flûte pourrait être approfondie, par exemple en s'intéressant à l'influence de la morphologie de la bouche sur le rayonnement.

Aussi, en poursuite de l'étude menée sur le contrôle de la justesse, on pourrait poursuivre l'idée qu'il existe une position de la coulisse pour laquelle le jeu est plus confortable. Cette notion de "jeu confortable ou inconfortable" pourrait être approfondie en estimant les efforts (travaux/puissances) respiratoires fournis par les muscles. Cette expérience pourrait être répétée, en changeant la justesse de l'instrument par d'autres moyens (position du bouchon, géométrie du cône). A cela pourrait également s'ajouter l'analyse d'autres situations pour lesquelles le jeu du musicien pourrait se voir perturbé, comme différents réglages de la flûte (mauvais bouchage de tampons, ...).

D'autres éléments de facture, liés à des compromis, de fabrication peuvent être également analysés dans le but d'être compris et (peut-être) améliorés, comme le trou du do ♯, celui-ci étant un compromis entre un trou de note et un trou de registre, en résultant une sonorité différente et une justesse compromise lors du jeu du do ♯. Des recherches pourront également être menées et sont en cours sur l'influence du matériau de la perce des instruments en bois, de sa porosité et de son état de surface sur les caractéristiques acoustiques de l'instrument. Enfin, au regard de la difficulté dans laquelle se trouvent les recherches en acoustique musicale qui visent à étudier les instruments occidentaux de prestige, des recherches pourront être menées sur des instruments à facture simple, tant par leur matériau et que par leurs procédés de facture. Leur simplicité facilitant alors leur compréhension et leur modélisation, il sera alors plus aisé de cerner les traits pertinents de leur facture et de leur fonctionnement acoustique. Dans ce sens, il est donc important que le dialogue entre les acteurs de la facture instrumentale et les acteurs de la recherche soit maintenu et développé, ces discussions favorisant la naissance de nouvelles problématiques autour de la recherche instrumentale.

Interaction musicien-instrument :

Le travail présenté dans ce document a également montré que le musicien est capable de développer un contrôle extrêmement fin de son instrument, cela reposant sur les connaissances que le musicien a de son instrument. Inclure le musicien dans les processus de recherche, comme sujet

d'étude mais aussi comme acteur de la recherche paraît également indispensable. Les études présentées dans ce document amènent nombreux éléments de compréhension sur les techniques et stratégies de contrôles développées par le musicien au cours du jeu musical, cependant celles-ci peuvent être encore approfondies.

En effet, l'action des lèvres, relative au contrôle du débit d'air sortant de la bouche pourrait être analysée plus finement, notamment en mesurant l'action des muscles faciaux par des petits capteurs EMGs. Cette activité pourrait alors être mise en relation avec la puissance fournie à l'instrument ou la résistance à l'embouchure. Un nouveau protocole de mesure de la surface d'ouverture des lèvres pourrait également être pensé, à l'image de l'étude de De la Cuadra [42], dans le but d'en améliorer la détection ; en effet, lors du jeu dans le troisième registre de la flûte ou sur des instruments plus petits, il est difficile de trouver l'inclinaison de la camera par rapport à la flûte permettant la visualisation complète du trou d'embouchure.

La recherche sur les stratégies développées par le musicien pourrait également s'étendre à d'autres instruments de la famille des flûtes. En effet, il serait intéressant de comprendre comment le musicien adapte ses contrôles respiratoires et acoustiques en fonction de la taille de l'instrument. Cette étude pourrait d'ailleurs être menée également d'un point de vue facture, comme cela a été fait sur les flûtes à bec [18], sur comment celle-ci évolue entre le piccolo et la flûte basse, le piccolo n'étant pas juste un modèle réduit de la flûte basse, les éléments de facture évoluant entre ces deux instruments, tout en laissant le contrôle du musicien accessible.

Une autre manière de compléter le travail effectué dans cette thèse pourrait être, maintenant que les descripteurs des stratégies respiratoires ont été étudiés, d'étendre les études effectuées à un nombre plus important de sujet. Il conviendrait tout de même de trouver la manière d'automatiser l'analyse des résultats, ceci passant évidemment par le choix de descripteurs statistiquement pertinents.

Une fois que les stratégies respiratoires et aéro-acoustiques du flûtiste seraient analysées à la fois finement et sur un nombre plus importants de sujets, il serait alors possible de compléter le modèle de flûtiste présenté dans ces travaux. En effet, le modèle pourrait alors prédire quelles stratégies de contrôle va utiliser le musicien pour répondre à une tâche musicale donnée. On tend alors dans ce cas vers une problématique inverse, dont le but serait d'arriver au vue de la tâche musicale demandée, et connaissant le musicien (ou du-moins ses caractéristiques physiologiques), à prédire les stratégies que celui-ci emploieraient pour jouer l'extrait demandé. On pourrait également se poser une autre problématique inverse, est-on capable à partir d'un enregistrement sonore et de la partition de déduire les stratégies employées par le musicien ? Quelques éléments présentés dans ce travail amènent vers cette idée, à travers l'évolution des paramètres acoustiques ...

Pédagogie instrumentale :

Nous avons explicité le fait, dans le chapitre 1, que des retombées pouvaient être attendues dans

le domaine de la pédagogie instrumentale, mais on pourrait également voir ces retombées comme des perspectives de travail. En effet, toutes les stratégies respiratoires et à la bouche éclaircies durant ce travail de thèse pourraient être transmises au domaine de la pédagogie instrumentale. Cela permettrait d'apporter aux enseignants, une connaissance structurée du système respiratoire et de son utilisation par les instrumentistes, leur permettant ainsi de développer leurs discours pédagogiques, à l'image du travail de Lefebvre de Rieux, [81]. Ce travail, entre scientifique et enseignant, part évidemment du dialogue (à poursuivre) avec les professeurs de flûte traversière, mais va aussi peut-être jusqu'au développement d'outils pédagogiques. Un des premiers outils pédagogiques qu'utilise le musicien est le miroir, mais on pourrait penser à aller plus loin, notamment à développer un dispositif permettant de mesurer en instantané différents paramètres de contrôle de manière non-invasive. Un retour de la mesure de ces paramètres pourrait alors être effectué en direct sur un écran. De cette idée, pourrait alors découler plusieurs applications, ludiques et pédagogiques permettant alors à l'élève flûtiste une certaine compréhension de son corps et un apprentissage de comment contrôler celui-ci dans le but de répondre à une tâche musicale ou un exercice. Cet outil permettrait également de clarifier des concepts liés au jeu de la flûte qui sont pour l'heure actuelle enseignés mais assez mal compris, ou expliqués.

Vers la physiologie respiratoire :

Enfin, durant ce travail de thèse il a été remarqué des stratégies respiratoires individuelles aux flûtistes, cette analyse des stratégies personnelles pourraient être poursuivie, notamment par l'analyse des patrons liés à la respiration, dans le cadre du jeu de la flûte, mais aussi dans le but de comprendre si ces patrons ne sont pas non plus notables lors de la respiration de repos ou lors d'autres exercices respiratoires : la parole, le chant, ...

D'autre part, du point de vue du domaine de la physiologie respiratoire, les musiciens à vent peuvent être considérés comme des experts de la respiration. En effet, ceux-ci ont généralement appris depuis leur plus jeune âge à maîtriser leur respiration. Des études dans le domaine ont montré que la respiration pouvait être reliée à une activité corticale particulière, notamment lors de respirations volontaires telles que la parole, ou le sniff. Il serait alors intéressant de poursuivre ces études sur les flûtistes ou autres musiciens à vent afin d'étudier les activités corticales en jeu, mais aussi lors d'exercice classique de parole ou de sniff pour comparaison.

Sixième partie

Annexe

Physiologie respiratoire

Même si tous les composants du système respiratoire sont essentiels à son bon fonctionnement, nous présentons, dans ce chapitre, les fondamentaux de physiologie et mécanique respiratoire associés au jeu de la flûte. Le texte présenté ici est basé sur les livres de Busquet, Campignon, Souchard et Struyf, [25, 28, 120, 121]. Parmi les différents procédés régissant la respiration, nous portons ici notre attention sur les volumes d'air entrant ou sortant des poumons, ainsi que les activités musculaires ou élastiques associées.

Nous décrivons dans un premier temps l'appareil respiratoire, puis les propriétés de la cage thoracique et de l'abdomen, et notamment l'action des muscles associés à la respiration.

A.1 L'appareil respiratoire

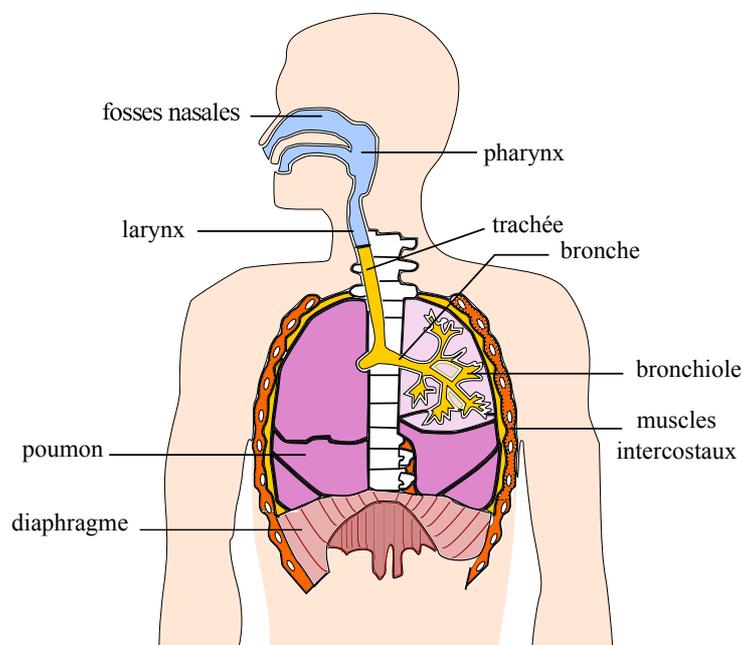


FIGURE A.1 – Schéma représentatif de l'appareil respiratoire, inspiré de [70].

L'appareil respiratoire, présenté en figure A.1 est constitué d'un ensemble d'organes et de tissus qui participent à la respiration, c'est à dire aux échanges d'oxygène et de dioxyde de carbone entre les cellules et le monde extérieur. L'appareil respiratoire est composé de voies respiratoires, permettant les échanges d'air entre l'atmosphère et les poumons, celles-ci comprenant :

- la cavité nasale et la bouche : qui filtrent, réchauffent et humidifient l'air
- le pharynx, qui relie les cavités nasales et buccales au larynx (passage de l'air) et à l'oesophage (passage des aliments)
- le larynx, qui amène l'air dans la trachée, aiguille les aliments dans l'oesophage et permet la phonation par la présence des cordes vocales
- la trachée, amenant l'air du larynx aux deux bronches principales, est mobile et flexible.

Puis, viennent ensuite les voies intrapulmonaires (ou arbre bronchique) qui amènent l'air des voies respiratoires jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Celles-ci comprennent les bronches et les bronchioles. Les bronches principales droite et gauche se subdivisent en bronches secondaires, puis tertiaires ... ceci jusqu'au 23^{ième} ordre. Les bronchioles correspondent aux conduits aériens de diamètre inférieur à 1mm, celles-ci se subdivisant en bronchioles terminales, de diamètre inférieur à 0.5 mm. Ces bronchioles terminales rejoignent alors les bronchioles respiratoires, les plus fines, qui se prolongent en conduits alvéolaires, puis se terminent en grappes d'alvéoles pulmonaires : les saccules alvéolaires, chacune composée de plusieurs alvéoles pulmonaires où siègent les échanges gazeux. La zone respiratoire est composée de deux organes spongieux et élastiques, les poumons, qui renferment chacun environ 350 millions d'alvéoles pulmonaires et occupent la partie du thorax laissée libre par le médiastin (espace abritant le coeur, les vaisseaux sanguins, les bronches, l'oesophage, ...); et aussi de la plèvre, double feuillet séreux : la plèvre pariétale qui tapisse la paroi thoracique, et la plèvre viscérale qui adhère à la surface externe des poumons. Ces deux plèvres délimitent une mince cavité : la cavité pleurale qui contient le liquide pleural. Son rôle est de réduire la friction des poumons contre la paroi thoracique pendant la respiration, et aussi de prévenir de la séparation des deux feuillets pleuraux : les feuillets de la plèvre glissent l'un contre l'autre, mais la tension superficielle du liquide pleural résiste fortement à leur séparation d'où une adhésion forte de chaque poumon à la paroi thoracique lorsque les muscles inspiratoires agissent, permettant l'ouverture de ceux-ci lors de l'inspiration.

A.2 Définition de la cage thoracique

La cage thoracique est une cage osseuse, représentée en figure A.2 est composée par :

- le rachis thoracique en arrière sur la ligne médiane, composé de 12 vertèbres
- le sternum, en avant sur la ligne médiane
- les côtes, à l'arrière, latéralement et en avant, au nombre de 12 paires. Les arcs costaux faisant la jonction entre le rachis et le sternum.

La cage thoracique est reliée à plusieurs structures osseuses : latéralement, elle est connectée avec chacune des deux ceintures scapulaires, et le rachis thoracique est prolongé en haut par le rachis cervical, et en bas par le rachis lombaire. La forme de la cage thoracique est celle d'un tronc de cône à grande base inférieure et à la circonférence supérieure étroite et peu mobile, livrant

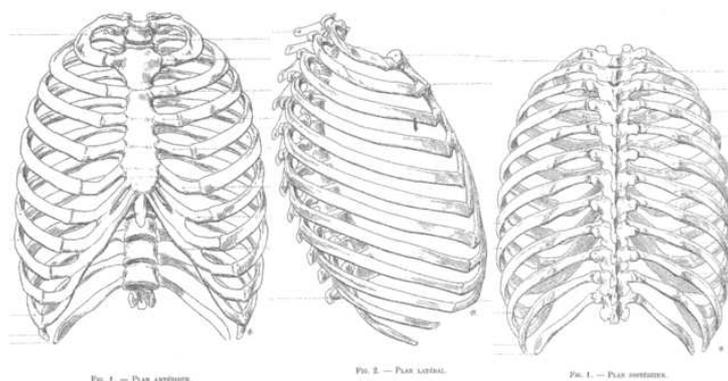


FIGURE A.2 – Schéma représentatif de la cage thoracique, issu de [112].

le passage des organes importants (vaisseaux sanguins et lymphatiques, trachée et oesophage). De plus, la cage thoracique est constituée de douze paires de côtes qui se répartissent en deux groupes : les sept premières paires (en partant du haut) sont nommées les « côtes sternales » (ou vraies côtes) et sont reliées directement au sternum par leur cartilage, les cinq suivantes, dites asternales peuvent être décomposées en deux sous-groupes : les côtes K8 à K10 sont nommées les « fausses côtes » et leur cartilage ne rejoint pas le sternum mais celui des côtes sus-jacent et les côtes K11 et K12 sont appelées « côtes flottantes » et se terminent par un cartilage libre.

La cage thoracique joue un double rôle de protection pour les organes qu'elle renferme, et de soufflet pour la ventilation, par l'action des muscles qui lui sont attachés. Ceux-ci sont présentés par la suite.

A.3 Définition de l'abdomen

Chez l'être humain, l'abdomen correspond à la région située entre la cage thoracique en haut et la cavité pelvienne (contenant les viscères appartenant à l'appareil digestif (rectum), les appareils urinaire et reproducteur), il peut être schématiquement divisé en deux parties : la cavité abdominale et le rétropéritoine. La cavité abdominale, en avant, contient la majorité des organes du système digestif : le foie, l'intestin grêle, l'estomac, le pancréas, le côlon et la rate. Le rétropéritoine, en arrière, contient une partie du système urinaire : les reins, les glandes surrénales et des vaisseaux sanguins.

L'abdomen a une forme de cylindre vertical dont la partie supérieure est séparée de la cage thoracique par le diaphragme. La cavité abdominale n'est pas matériellement séparée de la cavité pelvienne, cette séparation est théorique et définie par l'entrée du bassin et par la limite péritoine reposant sur les organes pelviens. La cavité abdominale est limitée en avant et en dehors par une ceinture musculaire faite de croisement de plusieurs muscles abdominaux décrits par la suite, et limitée, en arrière, par le rachis lombaire, et pour la face antérieure, par les dernières côtes flottantes.

A.4 Muscles associés à la respiration

Premièrement, il convient de différencier la respiration pendant le jeu d'un instrument à vent de la respiration de repos. Au repos, lors de l'inspiration, l'air entre dans les poumons par l'action des muscles qualifiés d'inspirateurs (scalènes, sterno-cléido-mastoïdiens, diaphragme,...), puis à l'expiration les poumons retournent à leur état de repos par leur simple élasticité, permettant ainsi l'évacuation de l'air. Lors du jeu d'instruments à vent, et plus particulièrement ceux ne nécessitant pas de très hautes pressions, l'expiration est contrôlée par les muscles inspirateurs qui dans un premier temps permettent de retenir l'écrasement des poumons dû à leur élasticité, puis dans un second temps par l'action des muscles expirateurs qui favorisent la sortie de l'air. Nous allons alors décrire les principaux muscles agissant lors de la respiration, dont la plupart est représentée en figure A.3.

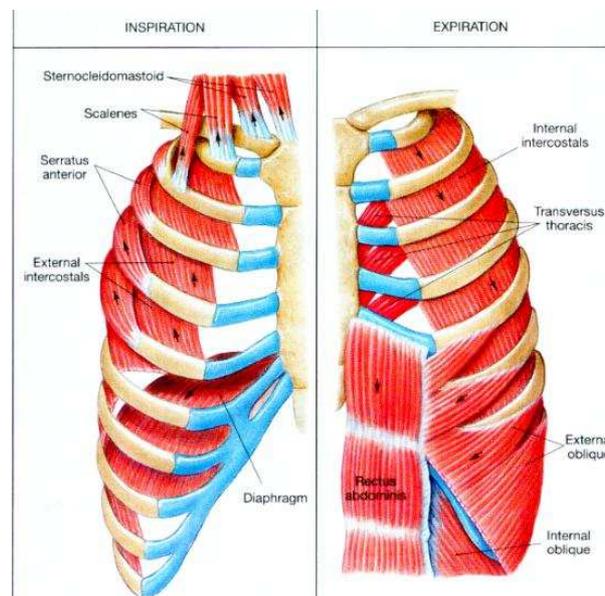


FIGURE A.3 – Schéma représentatif des principaux muscles agissant durant la respiration, [70]

Les muscles sont répartis en groupe, les muscles d'un même groupe assurent des fonctions voisines. Ces muscles sont dits alors agonistes, ceux qui effectuent le mouvement inverse sont dits antagonistes. Lors d'un mouvement lent, lors de la contraction (raccourcissement) des muscles agonistes, les muscles antagonistes sont relâchés et étirés. Au cours de mouvement plus rapide, les muscles antagonistes jouent un rôle modérateur sur l'action des agonistes. Ils participent au contrôle de la vitesse, de l'amplitude et de la précision du mouvement engendré par les muscles agonistes.

La plupart des mouvements font intervenir l'action d'un ou plusieurs muscles, ces derniers sont alors dits synergistes. Lors de la contraction du muscle principal, les muscles synergistes effectuent le même mouvement que celui-ci (agoniste) ou réduisent les mouvements inutiles ou indésirables (antagonistes fixateurs). Lorsque des muscles synergistes immobilisent un os, ils sont appelés muscles fixateurs ou stabilisateurs. Les muscles fixateurs interviennent lorsqu'un

mouvement exige une certaine force nécessitant un point d'appui solide.

Les muscles du thorax proprement dit sont essentiellement ceux de la respiration, cependant ils ne sont pas dissociables de l'ensemble fonctionnel du tronc et vont participer à d'autres fonctions que celle de la dynamique respiratoire (stabilité, ou encore mobilité de l'axe, coordination centre-extrémités, ...).

A.4.1 Muscles inspireurs

Le diaphragme

Le muscle inspireur principal est le diaphragme, celui-ci est un grand muscle, innervé par le nerf phrénique, en forme de coupole concave vers le bas, situé à la jonction entre les cavités thoraciques et abdominales. Le diaphragme est constitué de tendons et muscles attachés au bas du sternum, aux côtes basses et à la colonne vertébrale. Ses insertions postérieures étant plus basses que les antérieures, la coupole diaphragmatique est légèrement basculée vers l'arrière, de plus, l'hémicoupole droite, répondant à la présence du foie au-dessous, est légèrement plus haute que la gauche (qui, elle répond à la présence du cœur au-dessus).

Le diaphragme laisse le passage à l'aorte (entre ses piliers, contre la colonne lombaire), à la veine cave (au niveau du centre phrénique), et à l'œsophage (entre les fibres musculaires, en partie postérieure). Outre ces points spécifiques de passage, divers accolements faciaux ou ligaments rendent les organes tout à fait solidaires du diaphragme, soit qu'ils sont posés dessus (cœur, poumons), soit qu'ils y sont suspendus (estomac, foie, colon transverse).

L'action du diaphragme durant la respiration va alors s'adresser spécifiquement aux poumons, dont la base est accolée à la face supérieure du diaphragme par l'intermédiaire de la plèvre pariétale, et qui vont être entraînés en expansion ou compression selon la phase respiratoire.

Durant l'inspiration, la contraction des fibres musculaires du diaphragme se traduit par un abaissement et aplatissement de la coupole, créant ainsi une dépression au niveau thoracique et l'appel d'air dans les poumons. Ce mouvement d'aplatissement de la coupole a pour conséquence la poussée des viscères abdominaux devant et vers le bas, produisant alors un mouvement du ventre vers l'extérieur. Puisque les côtes flottantes et fausses côtes sont plus souples du fait que leur cartilage n'est pas directement relié au sternum, l'action du diaphragme facilite alors leur mouvement, déplacement alors le volume abdominal latéralement. Les côtes sternales sont moins mobiles, le mouvement engendré par l'action du diaphragme est alors crânial (en direction de la tête)/caudal (vers les pieds). Ces mouvements sont par ailleurs aussi dépendant de la posture, de l'activité musculaire posturale et donc des forces résistives à ces déplacements.

Par son action et grâce à sa mobilité, le diaphragme assure la fonction vitale et automatique de la respiration au repos. Il joue également un rôle dans des événements tels que la toux, le rire, les pleurs. Lors du jeu d'instruments à vent ou de phonation ou chant, le diaphragme est alors sollicité de façon plus « contrôlée » et parfois plus intense.

Les scalènes

Les scalènes sont constitués de trois faisceaux de muscles joignant les vertèbres cervicales C2/3-C6 aux deux premières côtes. Ces muscles ont une action primordiale durant l'inspiration en favorisant l'expansion de la cage thoracique en élevant les deux premières côtes afin de contrebalancer la contraction du diaphragme et empêchant ainsi un effondrement de la cage thoracique. La contraction de ces muscles engendrent principalement un mouvement de pompe, tirant les poumons vers le haut, mais aussi un mouvement d'anse de sceau dû aux insertions dorsoventrales de ces muscles. Chez le sujet sain, les scalènes sont actifs pendant l'inspiration de repos et forcée. Les scalènes sont également sollicités lors de mouvements de rotation, d'inclinaison de la tête ou encore lors d'un fléchissement du cou.

Les sterno-cléido-mastoïdiens

Le muscle sterno-cléido-mastoïdien est un muscle pair du cou, tendu verticalement, entre la clavicule et le sternum en bas et la mastoïde de l'os temporal et l'os occipital en haut. Il se divise en deux chefs, dont chacun comporte deux terminaisons. Le muscle sterno-cléido-mastoïdien contient donc un chef sternal, associé au sternum, et un chef claviculaire, associé à la clavicule. Du fait de ses attaches, la contraction de ce muscle soulève la cage thoracique, et le sternum et augmente alors le volume de la cage thoracique d'où un rôle de muscle inspiratoire accessoire, régulièrement sollicité lors d'inspiration forcée.

Le muscle sterno-cléido-mastoïdien permet également la flexion, l'inclinaison homolatérale et la rotation controlatérale de la tête.

Les intercostaux externes

Un muscle intercostal est situé dans l'espace intercostal, c'est-à-dire entre deux côtes adjacentes. Les muscles intercostaux sont organisés en deux couches avec, de l'extérieur vers l'intérieur, les muscles intercostaux externes (inspirateurs) et internes (expireurs). Il existe alors onze paires de chacun d'entre eux. Les fibres des intercostaux externes sont obliques, dirigées en bas et en avant, l'action respiratoire de ces muscles est secondaire, ceux-ci favorisant l'écartement des côtes entre elles durant l'inspiration et les solidarissant lors de mouvement globaux. L'action de ces muscles étant plus importante dans la région dorsale.

Muscles accessoires :

Parmi les muscles accessoires et secondaires à la respiration, nous pouvons citer d'autres muscles intervenant en cas d'effort intense ou de détérioration du système respiratoire : les muscles trapèze, pectoraux et dentelés.

A.4.2 Muscles expireurs

Les muscles expireurs (actifs uniquement lors de respiration forcée) peuvent être classés en deux catégories, selon leur localisation et leur rôle : les muscles de la ceinture abdominale et les muscles thoraciques.

Muscles thoraciques

Les muscles thoraciques entraînent la fermeture des côtes et de l'ensemble du thorax. Parmi les muscles thoraciques, nous pouvons citer :

- les intercostaux internes, situés aux mêmes endroits que les externes, ces muscles sont dirigés dans l'autre sens, leurs fibres sont obliques, en bas et en arrière. L'action de ces muscles rapprochent les côtes entre elles et les solidarisent.
- le muscle triangulaire du sternum est lui situé à l'intérieur du thorax sur la face postérieure des côtes et du sternum, en faisceaux obliques en haut et en dehors, lorsqu'il est actif, il abaisse les côtes sur le sternum.
- les petits dentelés postéro-inférieurs disposés dans la partie postérieure du thorax, obliques en bas et en dedans, provoquent l'abaissement des côtes.

La contraction des expirateurs costaux favorise la fermeture active du thorax, accentuant la fermeture des côtes basses, leurs actions étant plus importante dans la direction caudale dans les interspaces des côtes.

Muscles de la ceinture abdominale

Les muscles de la ceinture abdominale sont composés des muscles dit abdominaux auxquels sont associés les carrés des lombes. Leurs actions sont décrites ici avec le bassin supposé fixe. Les muscles abdominaux forment la paroi abdominale en trois plans :

- le transverse de l'abdomen, en profondeur. Ses fibres sont globalement horizontales se dirigeant vers la ligne blanche et font le tour de l'abdomen, les fibres inférieures partant de l'arcade fémorale jusqu'au pubis. Par son action il réduit le diamètre de la taille et s'associe aux actions des autres abdominaux pour la flexion entre thorax et bassin.
- les obliques, en plan moyen. Les grands obliques (externes), en action bilatérale, font la flexion du tronc et la fermeture de côtes basses. Les petits obliques (internes), en action bilatérale, font la flexion du tronc et la fermeture du bas du thorax. Les obliques, en action unilatérale, participent à l'inclinaison et à la rotation du thorax sur le bassin.
- les grands droits de l'abdomen, en superficie, font la flexion du tronc sur le bassin et participent au recul des viscères.

Le carré des lombes se situe en plan profond et postérieur, il ferme l'espace postérieur entre le thorax, le bassin et les lombaires. En action bilatérale, il abaisse les côtes basses.

Les muscles expirateurs de l'abdomen ont d'importantes fonctions de mouvement du tronc (flexion, rotation), mais leur principale action est reliée à la respiration par la compression du contenu abdominal. Les muscles abdominaux sont les plus puissants de l'expiration et jouent un rôle important lors d'expiration forcée en déplaçant le diaphragme vers le haut dans le thorax, et faisant ainsi diminuer le volume pulmonaire.

Aussi, durant des inspirations importantes, ou des expirations forcées, il est également possible de noter l'action du muscle alae nasi, muscle abaisseur de l'aile du nez. Son action permet alors de prévenir le risque de collapsus des voies aériennes en faisant décroître la résistance des voies aériennes et nasales, [76].

A.5 Propriétés statiques du système respiratoire

On s'intéresse dans cette partie aux mécanismes permettant l'entrée et la sortie d'air des poumons. Les variations de pression dans les poumons et les voies aériennes créent des gradients de pression et régulent la ventilation pulmonaire. Ces variations de pression sont provoquées par des variations de volume des cavités thoraciques par l'action des muscles qui en se contractant, créent des forces actives déformant la structure du système respiratoire. La respiration dépend également des forces passives agissant sur le système : élasticité, tension de surface et gravité qui tendent à amener les poumons à leur état de repos. Le mouvement de rappel du système respiratoire résulte alors des états respectifs de repos des poumons et de la cage thoracique. La figure A.4 montre la courbe statique (théorique) pression-volume du système respiratoire (Prs) incluant à la fois les comportements des poumons (Pl) et de la cage thoracique (Pw). Sur cette courbe sont représentées les variations de pressions à différents volumes, sans action musculaire, c'est-à-dire les variations de pressions engendrées par les forces passives (élasticité, ...). La figure A.5 représente les tracés spirométriques des subdivisions des volumes pulmonaires : Capacité pulmonaire totale (TLC), Capacité Vitale (VC), Volume Résiduel (RV), Capacité Inspiratoire (IC), Capacité Fonctionnelle Résiduelle (FRC), Volume Inspiratoire de Réserve (IRV), Volume de repos (TV) et le Volume Expiratoire de réserve (ERV).

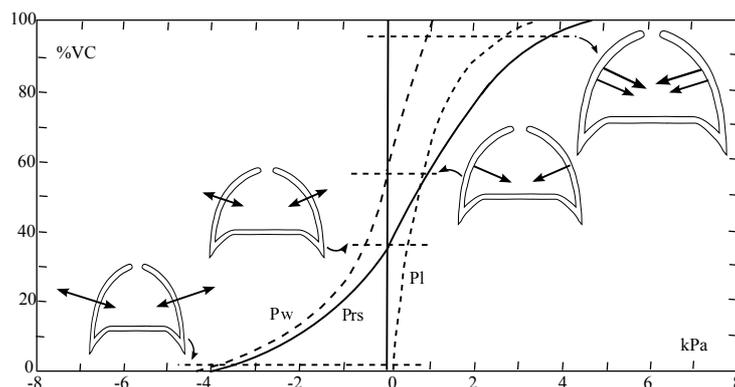


FIGURE A.4 – Schéma de la courbe statique pression-volume des poumons (Pl), de la cage thoracique (Pw) et du système respiratoire total (Prs) durant la relaxation. Les flèches dans les dessins des poumons indiquent les forces statiques exercées par les poumons et la cage thoracique à différents volumes. Figure issue de [3, 8].

Les pressions et les forces passives évoluent selon les volumes pulmonaires. Lorsque les poumons sont remplis d'air (à TLC), les forces passives s'exerçant sur eux sont très fortes (générant des pressions de l'ordre de 4000Pa) et, si les muscles sont relâchés, l'air sera expiré jusqu'au volume de repos (FRC). Au repos (FRC), les forces passives des poumons et de la cage thoracique

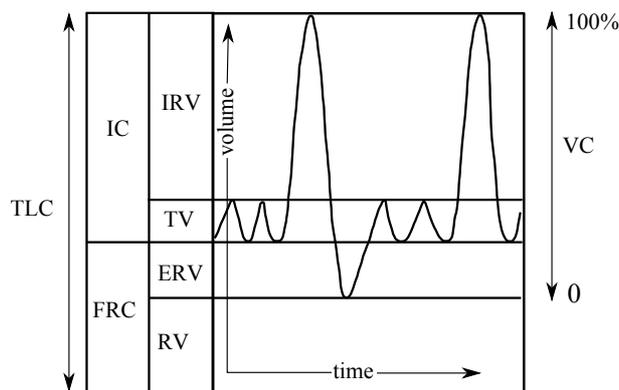


FIGURE A.5 – Schéma des tracés spirométriques des subdivisions des volumes pulmonaires : Capacité pulmonaire totale (TLC), Capacité Vitale (VC), Volume Résiduel (RV), Capacité Inspiratoire (IC), Capacité Fonctionnelle Résiduelle (FRC), Volume Inspiratoire de Réserve (IRV), Volume de repos (TV) et le Volume Expiratoire de réserve (ERV). Figure adaptée de [3, 8].

sont égales et opposées. Maintenant, lorsque l'air des poumons est au maximum expulsé, il reste dans les poumons un volume d'air appelé volume résiduel. A ce volume, lorsque les muscles sont relâchés, les forces passives sont orientées à l'extérieur des poumons et tendent à faire rentrer l'air dans les poumons jusqu'au volume de repos. Le volume d'air compris entre le maximum de volume inspiré (TLC) et le volume résiduel est appelé Capacité Vitale et correspond à la quantité d'air disponible pour jouer d'un instrument à vent. Le volume de repos (TV) correspond lui au volume d'air utilisé pendant la respiration au repos.

Bibliographie

- [1] Applied Acoustics Systems : <https://www.applied-acoustics.com/>
- [2] ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *American Thoracic Society/European Respiratory Society : American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* **166,4** (2002, Aug. 15) 518–624
- [3] E. Agostoni, H. Rahn : Abdominal and thoracic pressures at different lung volumes. *Journal of Applied Physiology* **15,6** (1960) 1087–1092.
- [4] E. Agostoni, G. Sant’ambrogio, H. Del Portillo Carrasco : Electromyography of the diaphragm in man and transdiaphragmatic pressure *Journal of Applied Physiology* **15** (1960) 1093–1097.
- [5] C. d’Alessandro, M. Castellengo : The pitch of short-duration vibrato tones *Journal of Acoustical Society of America* **95** (1994) 1617
- [6] A. Aliverti : Metodi e tecniche innovative per lo studio della meccanica respiratoria. *PhD thesis Politecnico di Milano* (1996).
- [7] A. Aliverti, I. Iandelli, R. Duranti, S. J. Cala, B. Kayser, S. Kelly, G. Misuri, A. Pedotti, G. Scano, P. Sliwinski, S. Yan, P. T. Macklem : Respiratory muscles dynamics and control during exercise with externally imposed expiratory flow limitation. *Journal of Applied Physiology* **92** (2002) 1953–1963.
- [8] A. Aliverti, G. Ghidoli, R. L. Dellaca, A. Pedotti, P. T. Macklem : Chest wall kinematic determinants of diaphragm length by optoelectronic plethysmography and ultrasonography. *Journal of Applied Physiology* **94** (2003) 621–630.
- [9] R. Auvray, B. Fabre, P. Y. Lagrée : Regime change and oscillation thresholds in recorder-like instruments. *Journal of Acoustical Society of America* **131** (2012).
- [10] R. Auvray : Hydrodynamique et acoustique des instruments de la famille des flûtes : influence du système d’alimentation sur la production du son *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie* (2013)
- [11] C. Badr, M.E. Elkins, and E. Ellis : The effect of body position on maximal expiratory pressure and flow. *Aust J Physiother*, **48** (2002) 95–102.
- [12] A. Bartolo, C. Roberts, R.R. Dzwonczyk, E. Goldman : Analysis of diaphragm EMG signals : Comparison of grating vs. subtraction for removal of ECG contamination *Journal of Applied Physiology* **80** (1996) 1898–1902.
- [13] A.H. Benade : Fundamentals of Musical Acoustics : Second, Revised Edition. *Dover Books on Music. Dover Publications* (2012).

- [14] J. O. Benditt MD : Oesophageal and gastric pressure measurements. *Respiratory Care* **50,1** (2005) 68–77.
- [15] K. Berger : Respiratory and articulatory function in wind instrument performance. *Journal of Applied Physiology* **20,6** (1965) 1217–1221.
- [16] K. Berger : Electromyographic recording during wind instrument performance. *Annals of the New York Academy of Sciences* **155,1** (1968) 297–302.
- [17] S. Bilbao : Numerical sound synthesis : Finite difference schemes and simulation in musical acoustics *John Wiley and Sons, Chichester, UK ISBN 978-0-470-51046-9* (2009)
- [18] F. Blanc : Production de son par couplage écoulement/résonateur acoustique *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie* (2009)
- [19] R. Blevins : Applied fluid dynamics handbook. *Malabar : Krieger publishing company* (1992) 570.
- [20] P. Bolton : <http://www.flute-a-bec.com/>
- [21] A. Bouhuys : Pressure-flow events during wind instrument playing. *Annals of the New York Academy of Sciences* **155, 1** (1968) 264–275.
- [22] A. Bouhuys : Lung volumes and breathing patterns in wind-instrument players. *Journal of Applied Physiology* **19, 5** (1964) 967–975.
- [23] A. Bouhuys : Sound-power production in wind instruments. *Journal of Acoustical Society of America* **37, 3** (1965) 453–456.
- [24] M. Bruneau : Fundamentals of acoustics *ISTE* (2010)
- [25] L. Busquet : Les chaînes musculaires *Frison Roche* (1998, tome 2)
- [26] S. Cala, C. Kenyon, G. Ferrigno, P. Carnevali, A. Aliverti, A. Pedotti, P. T. Macklem, D. Rochester : Chest wall and lung volume estimation by optical reflectance motion analysis. *Journal of Applied Physiology* **81** (1996) 2680–2689.
- [27] E. J. M. Campbell : The respiratory muscles and the mechanics of breathing. *Quarterly Journal of Experimental Physiology and Cognate Medical Sciences, London : Lloyd-Luke* **43, 2** (1958) 231–231.
- [28] P. Campignon : Respir ' Actions P. Campignon (1996)
- [29] M. Castellengo : Contribution à l'étude expérimentale des tuyaux à bouche *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie* (1976)
- [30] M. Castellengo, B. Fabre, C. Dale : The contemporary transverse flute and the shakuhachi : Convergences *Contemporary Music Review* **8, 2** (1994) 217–237

-
- [31] D. Chadeaux : Interaction musicien/instrument : le cas de la harpe de concert *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie* (2012)
- [32] A. de Cheveigne, H. Kawahara : YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. *Journal of the Acoustical Society of America* **111**, 4 (2002) 1917–1930.
- [33] J.W. Coltman : Resonance and sounding frequencies of the flute. *Journal of Acoustical Society of America* **40**,1 (1966) 99–107.
- [34] J. Coltman : Sounding mechanism of flute and organ pipe. *Journal of Acoustical Society of America* **44** (1968) 983–992.
- [35] J. Coltman : Jet drive mechanisms in edge tones and organ pipes. *Journal of Acoustical Society of America* **60** (1976) 725–733.
- [36] J. Coltman : Time-domain simulation of the flute. *Journal of Acoustical Society of America* **92**,1 (1992) 69–73.
- [37] N. Cook : A Guide to Musical Analysis *Oxford University Press* (1994)
- [38] I. Cossette, P. Sliwinski, P. T. Macklem : Respiratory parameters during professional flute playing. *Respiration Physiology* **121** (2000) 33–44.
- [39] I. Cossette, P. Monaco, A. Aliverti, P. T. Macklem : Chest wall dynamics and respiratory muscle recruitment during flute playing. *Respiratory Physiology and Neurobiology* **160**,2 (2008) 187–195.
- [40] I. Cossette, B. Fabre, V. Freour, N. Montgermont, P. Monaco : From breath to sound : Linking respiratory mechanics to aeroacoustic sound production in flutes. *Acta Acustica united with Acustica* **96** (2010) 654–667.
- [41] P. de la Cuadra, B. Fabre, N. Montgermont, C. Chafe : Analysis of flute control parameters : A comparison between a novice and an experienced flautist. *Acta Acustica united with Acustica* **94**,5 (2008) 740–749.
- [42] P. de la Cuadra, B. Fabre : Measuring lips control on flute-like instruments using active vision *Proceedings of Meetings on Acoustics* (2013)
- [43] J.P. Dalmont, C. Nederveen, V. Dubos, S. Ollivier, V. Meserette, E. te Sligte : Experimental determination of the equivalent circuit of an open side hole : Linear and non linear behaviour. *Acta Acustica united with Acustica* **88**,4 (2002) 567–575.
- [44] M. Debost : Une simple flute ... *Van de Velde* (1996)
- [45] V. Debut, J. Kergomard, F. Laloë : Analysis and optimisation of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator. *Applied Acoustics* **66** (2005) 365–409.
- [46] S. Dequand : Duct Aeroacoustics : From technological applications to the flute. *Techn. Univ.*, 2000.

- [47] D. Devie : Le tempérament musical, philosophie, histoire, théorie et pratique *Librairie Musicale Internationale*, (2004)
- [48] A. de Troyer and S. H. Loring : Action of the respiratory muscles, volume 3. *Handbook of Physiology, The Respiratory System, Mechanics of Breathing* (1986).
- [49] A. de Troyer, P. A. Kirkwood, T. A. Wilson : Respiratory action of the intercostal muscles. *Physiological Reviews* **85** (2005) 717–756.
- [50] V. Dubos, J. Kergomard, A. Khiettabi, J. P. Dalmont, D. H. Keefe, C. J. Nederveen : Theory of sound propagation in a duct with a branched tube using modal decomposition *Acustica Acta Acustica* **85** (1999) 153–159
- [51] P.G. Drazin and W.H. Reid : Hydrodynamic Stability. *Cambridge Mathematical Library. Cambridge University Press* (2004).
- [52] A. Ernoult, B. Fabre, S. Terrien, C. Vergez : Experimental study of attack transients in flute-like instruments *ISMA, Le Mans, France* (2014)
- [53] P. Eveno : L'impédance d'entrée pour l'aide à la facture des instruments de musique à vent : mesures, modèles et lien avec les fréquences de jeu. *Thesis, UPMC* (2012).
- [54] B. Fabre, A. Hirschberg, A. P. J. Wijnands : Vortex shedding in steady oscillation of a flue organ pipe. *Acta Acustica united with Acustica* **82** (1996) 863–877.
- [55] Fabre, B. : Les bois : Résonateurs *JPPIM* (2000)
- [56] W. O. Fenn, A. P. S. : Statics of the respiratory system in : Handbook of physiology, section 3, vol 1. *American Physiological Society* (1964) (Handbook of Physiology : A Critical, Comprehensive Presentation of Physiological Knowledge and Concepts).
- [57] N. H. Fletcher : Acoustical correlates of flute performance technique. *J. Acoust. Soc. Am.* **57,1** (1975).
- [58] V. Freour : Acoustic and Respiratory Pressure Control in Brass Instrument Performance *PhD thesis's report, Mc Gill University* (2013) .
- [59] L. Fuks, J. Sundberg : Respiratory inductive plethysmography measurements on professional reed woodwind instrument players. *TMH-QPSR* **39, 1-2** (1998) 19–42.
- [60] J. Galway : Flute *Yehudi Menuhin Music Guide* (2003).
- [61] L. Garcia : Rôle de l'embouchure dans la sonorité des flûtes à encoche. *Master's thesis, CNSM* (1996).
- [62] M. Green, J. Road, G. C. Sieck, T. Similowski : Tests of respiratory muscle strength *American Thoracic Society/European Respiratory Society* (2001) 528–542
- [63] G. Groove : Dictionary of music and musicians *Macmilan* (2001)

-
- [64] G. Guillard : Manuel pratique d'analyse auditive *Transatlantiques* (1996)
- [65] A. F. D. C. Hamilton, S. T. Grafton : Goal representation in human anterior intraparietal sulcus. *The Journal of Neuroscience* **26,4** (2006) 1133–1137.
- [66] B. Fabre, A. Hirschberg : Physical modeling of flue instruments : A review of lumped models. *Acta Acustica united with Acustica* **86** (2000) 599–610.
- [67] T. Hixon : Respiratory function in singing : A primer for singers and singing teachers. *Redington Brown LLC* (2006).
- [68] M. S. Howe : Contributions to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute. *Journal of Fluid Mechanics* **71** (1975) 625–673.
- [69] G. Jochen : The Vibrato : with particular consideration given to the situation of the flutist *Regensburg, Germany : Gustav Bosse Verlag* (1981)
- [70] M. D. Johnson : Human Biology : Concepts and Current Issues *Benjamin Cummings* (2014).
- [71] A. Johnny, G. Maurits : Normal thoracoabdominal motions. *Am J Respiratory Critical Care Medicine* **151** (1995) 399–405.
- [72] D.H. Keefe : Theory of the single woodwind tone hole. *Journal of Acoustical Society of America* **72,3** (1982) 676–687.
- [73] D.H. Keefe : Acoustical wave propagation in cylindrical ducts : transmission line parameter approximations for isothermal and non-isothermal boundary conditions *Journal of Acoustical Society of America* **75,1** (1984) 58–62.
- [74] J. Kergomard, A. Garcia : Simple discontinuities in acoustic waveguides at low frequencies : critical analysis and formulae *Journal of Sound and Vibration* **114, 3** (1987) 465–479.
- [75] A. Chaigne, J. Kergomard. : Acoustique des instruments de musique. *Collection Echelles. Belin* (2008).
- [76] P. S. Kingman, C. F. O’Cain, A. S. Slutsky : Alae nasi activation and nasal resistance in healthy subjects *Journal of Applied Physiology* **52,6** (1982) 1432–1437
- [77] L. E. Kinsler : Fundamentals of acoustics *Wiley* (2000)
- [78] K. Konno and J. Mead. : Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing. *Journal of Applied Physiology* **22,3** (1967) 407–422.
- [79] D. Laporta, A. Grassino : Assessment of transdiaphragmatic pressure in humans *American physiological society* (1985) 1469–1476.
- [80] A. Lefebvre : Computational Acoustic Methods for the Design of Woodwind Instruments. *Thesis, Mc Gill University* (2010).

- [81] A. Lefebvre de Rieux : Le piccolo pour tous *Mémoire enseignement CSNMDP* (2015)
- [82] E. Leipp : Acoustique et Musique *Masson* (1980)
- [83] J. C. Leroux, J. P. Dalmont : A new impedance sensor for wind instruments *Journal of Acoustical Society of America* **123**, **5** (2008) 3014–3014.
- [84] J. C. Leroux, M. Pachebat, J. P. Dalmont : A new impedance sensor for industrial applications *Acoustics 2012* (2012).
- [85] G. Le Vey. : A non optimization-based method for reconstructing wind instruments bore shape. *Acoustics 2012* (2012).
- [86] YM. Luo, MI. Polkey, RA. Lyall, J. Moxham : Effect of brachial plexus co-activation on phrenic nerve conduction time *Thorax* **54** (1999) 765–770.
- [87] P. T. Macklem, A. Fishman, J. Mead : Handbook of Physiology : A critical, comprehensive presentation of physiological knowledge and concepts. Respiratory system. Mechanics of breathing. *American Physiological Society* (1986).
- [88] S. J. Maclagan : A dictionary for the modern flutist *Scarecrow Press, INC* (2009)
- [89] R. R. Mankbadi : Transition, turbulence and noise : Theory and applications for scientists and engineers. The Springer International Series in Engineering and Computer Science Series. *Kluwer, Boston, MA* **207** (1994).
- [90] G.E. Mattingly, W.O. Criminale : Disturbance characteristics in a plane jet. *The Physics of Fluids* **14**, **11** (1971) 2258–2264.
- [91] M. Meissner : Aerodynamically excited acoustic oscillations in cavity resonator exposed to an air jet. *Acta Acustica united with Acustica*, **88**, **2** (2002) 170–180.
- [92] R. Meylan : La flûte *Payot* (1974)
- [93] JM. Miller, J. Moxham, M. Green : The maximal sniff in the assesment of diaphragm function in man *Clin Sci* **69** (1985) 91–96.
- [94] I. Molnar-Szakacs, K. Overy : Music and mirror neurons : From motion to 'e'motion *Oxford University Press* **1** (2006) 235–241
- [95] N. Montgermont, B. Fabre, and P. de la Cuadra : Flute control parameters : Fundamental techniques overview. *International Symposium on Musical Acoustics* (2007).
- [96] N. Montgermont, B. Fabre, and P. De La Cuadra : Gesture synthesis : Basic control of a flute physical model. *Journal of Acoustical Society of America* **123**, **5** (2008) 3797.
- [97] Musée National de la Slovénie : <http://www.nms.si/>
- [98] Henan museum : <http://www.chnmus.net/>

-
- [99] C.J. Nederveen, J.K.M. Jansen, and R.R. Hassel : Corrections for woodwind tone-hole calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, **84** (1998) 957–966.
- [100] C.J. Nederveen : Acoustical Aspects of Woodwind Instruments. *Northern Illinois University Press* (1998).
- [101] A. W. Nolle : Sinuous instability of a planar air jet : Propagation parameters and acoustic excitation. *Journal of Acoustical Society of America* **103,6** (1998)
- [102] Pafi, projet ANR-08-CORD-0016 : <http://www.pafi.fr/>
- [103] G. Peeters, B. L. Giordano, P. Susini, N. Misdariss, S. McAdams : The Timbre Toolbox : Extracting audio descriptors from musical signals *Journal of Acoustical Society of America* **130** (2011) 2902
- [104] V. Pettersen, K. Bjorkoy, H. Torp, R. H. Westgaard : Neck and shoulder muscle activity and thorax movement in singing and speaking tasks with variation in vocal loudness and pitch. *Journal of Voice* (2004) 623-634.
- [105] A.D. Pierce : Acoustics : An introduction to its physical principles and applications *Journal of Acoustical Society of America* (1989)
- [106] G.R. Plitnik and W.J. Strong : Numerical method for calculating input impedances of the oboe. *Journal of Acoustical Society of America* **3,65** (1979) 816–825.
- [107] E. Poirson : Prise en compte des perceptions de l'utilisateur en conception de produit. Application aux instruments de musique de type cuivre. *PhD thesis, Ecole centrale de Nantes* (2005)
- [108] A. Powell : The flute *Tale University Press, New Haven and London* (2003)
- [109] H. Rahn, A. B. Otis, L. E. Chadwick, W. O. Fenn : The pressure-volume diagram of the thorax and lung. *American Journal of Physiology–Legacy Content* **146,2** (1946) 161–178
- [110] L. A. Ramig, T. Shipp : Comparative measures of vocal tremor and vocal vibrato *Journal of Voice* **1,2** (1990) 162–167
- [111] J.W.S.B. Rayleigh and R.B. Lindsay : The theory of sound. *Number vol. 2 in Dover Books on Physics. Dover* (1945).
- [112] P. Richer : Traité d'anatomie artistique *Bibliothèque de l'image* (1996)
- [113] C. Roussos, P. T. Macklem : The thorax. *Dekker, The thorax* (1985).
- [114] C. Ségoufin : Production du son par interaction écoulement/résonateur acoustique *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie* (2000)
- [115] T. Shipp, E. T. Doherty, S. Haglund : Physiologic factors in vocal vibrato production *Journal of Voice* **4,4** (1990) 300-304

- [116] S. A. Shea, R. L. Horner, A. Guz : The persistence of a respiratory ‘personality’ into stage IV sleep in man *Respiration Physiology* **80**, **1** (1990) 33–44
- [117] C. Sinderby, S. Friberg, N. Comtois, A. Grassino : Chest wall muscle cross talk in canine costal diaphragm electromyogram *Journal of Applied Physiology* **81** (1996) 2312–2327.
- [118] J. Sloboda, I. Deliège : Perception and cognition of music *Psychology Press Ltd Publishers* (1997)
- [119] J. O. Smith : III. Handbook of signal processing in acoustics *Springer ISBN 978-0-387-77698-9* (2008)
- [120] Ph. E. Souchard : Le diaphragme *Maloine* (1980)
- [121] D. G. Struyf : Les chaînes musculaires et articulaires *ICT GDS*
- [122] J. Sundberg : Acoustic and psychoacoustic aspects of vocal vibrato *STL-QPSR* **35**,**2-3** (1994) 45–68
- [123] S. Terrien : Instruments de la famille des flûtes : analyse des transitions entre régimes *PhD thesis, Aix-Marseille Université* (2014)
- [124] M. Thomasson, A. Sundberg : Lung volume levels in professional classical singing *Log Phon Vocol* **22** (1997) 61–70.
- [125] M. Thomasson, A. Sundberg : Consistency of inhalatory breathing patterns in professional operatic singers. *Journal of voice* **15**, **3** (2000) 373–383.
- [126] L. Tremoureux, M. Raux, A. Ranohavimparany, C. Morelot-Panzini, P. Pouget, T. Similowski : Electroencephalographic evidence for a respiratory-related cortical activity specific of the preparation of prephonatory breaths. *Journal of Respiratory Physiology & Neurobiology* **204** (2014) 64–70.
- [127] D. J. Tritton : Physical fluid dynamics *Clarendon Press., Oxford Science Publ.* (1988).
- [128] C. Vauthrin, B. Fabre, I. Cossette : How does a flute player adapt his breathing and playing to musical tasks? *Acta Acustica united with Acustica* **101** (2015).
- [129] V.P. Vellody, W. S. Nassery, W. S. Druz, and J. T. Sharp. : Effects of body position change on thoracoabdominal motion. *Journal of Applied Physiology* **45** (1978) 581–589.
- [130] M. P. Verge, B. Fabre, A. Hirschberg, A. P. J. Wijnands : Sound production in recorder like instruments. I. Dimensionless amplitude of the internal acoustic field. *Journal of Acoustical Society of America* **96** (1997).
- [131] M.P. Verge : Acoustic of confined jets. *PhD thesis, Eindhoven University of Technology* (1995).

-
- [132] W. Tamas : Caractérisation de flûtes par leur admittance d'entrée *Rapport de stage, UPMC, Paris 6* (2009)
- [133] J. Wolfe, J. Smith, J. Tann, N.H. Fletcher : Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes. *Journal of Sound and Vibration* **243**, **1** (2001) 127–144.
- [134] C. Zwicker and C. W. Kosten : Sound absorbing materials. *Elsevier, New York* (1949).

Résumé

Cette thèse présente une étude acoustique des instruments de musique de type flûte, enrichie par l'analyse de la respiration chez les flûtistes. Le flûtiste acquiert au cours de son parcours musical un contrôle expert du jeu de son instrument. Les contrôles développés par le musicien dépendent des libertés et contraintes apportées par son expertise musicale, sa physiologie respiratoire, la consigne musicale et la réponse acoustique de la flûte. Etudier les techniques de jeu nécessite de considérer le flûtiste et son instrument comme un ensemble. D'une part, ce travail porte sur l'étude de la réponse acoustique de la flûte à travers deux études : l'une concernant l'apport de l'acoustique linéaire lors de la conception d'un nouvel instrument par un facteur, l'autre portant sur l'influence de la position des lèvres du flûtiste. Ce travail permet de mettre en lumière les irrégularités du comportement acoustique de la flûte selon le doigté et amène à étudier comment le flûtiste les compense. D'autre part, nous étudions les stratégies respiratoires développées par le musicien au cours du jeu, afin d'obtenir une analyse et une compréhension fines des relations entre les paramètres de contrôle respiratoires et aéro-acoustiques dans un contexte musical. Nous répondons à deux questions : comment le flûtiste adapte sa respiration aux consignes musicales, et quand commence le jeu musical. Enfin, nous nous sommes intéressés aux efforts respiratoires développés par le musicien, en termes de travail et puissance. Une nouvelle question est posée : comment le flûtiste met à profit son système respiratoire afin de réaliser et/ou de faire entendre une intention musicale.

Abstract

This thesis presents an acoustical study of flute-like instruments, which is developed by the analysis of flautist's breathing. The flautist acquires during his musical background an expert control of his instrument. The control developed by the musician directly depends on the freedoms and constraints provided by the musician musical expertise, his respiratory physiology, the musical tasks and the acoustic behavior of the flute. Studying the playing techniques requires us to consider the flautist and the instrument as a whole. First, this work focuses on the study of the acoustic response of the flute through two studies : one on the contribution of the linear acoustics in the design of a new instrument with a flute-maker, the other on the influence of the position of the flautist's lips. This work allows us to highlight irregularities in the acoustic behavior of the flute according to the fingerings, and leads us to study how the flautist compensates them. Secondly, we study the respiratory strategies developed by the musician while playing, in order to obtain detailed analysis and understanding of relationships between respiratory and aeroacoustic control parameters in a musical context. We answer two questions : how does a flute player adapt his breathing and playing to musical tasks, and when does the musical playing begin. Finally, we were interested in the respiratory efforts developed by the musician, in terms of work and power. A new question is asked : how does the flautist use his respiratory system in order to achieve and/or to highlight a musical intention.