



**HAL**  
open science

## **Des données multi-instrumentales, multilingues, normales et pathologiques aux maquettes tridimensionnelles statiques**

Angelique Amelot

### ► **To cite this version:**

Angelique Amelot. Des données multi-instrumentales, multilingues, normales et pathologiques aux maquettes tridimensionnelles statiques. Sciences de l'Homme et Société. Université de Lorraine, 2025. <tel-05599063>

**HAL Id: tel-05599063**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-05599063v1>**

Submitted on 23 Apr 2026

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



# HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

délivrée par l'Université de Lorraine

École Doctorale SLTC

Présentée et soutenue publiquement le **vendredi 5 décembre 2025**  
par **Angélique Amelot**

---

## Des données multi-instrumentales, multilingues, normales et pathologiques aux maquettes tridimensionnelles statiques

---

Garant : M. Yves LAPRIE, Directeur de Recherche  
LORIA, Université de Lorraine

Devant la commission d'examen formée de :

- Mme. Maria-Gabriella DI BENEDETTO, Professeure, *Sapienza University of Rome* - Rapporteur
- M. Fabrice HIRSCH, Professeur, *Praxiling, Université de Montpellier Paul-Valéry* - Examineur
- M. Slim OUNI, Professeur, *LORIA, Université de Lorraine* - Président
- M. François PELLEGRINO, Directeur de Recherche, *DDL, Université Lumière Lyon 2* - Rapporteur
- M. Rudolph SOCK, Professeur, *LiLPa, Université de Strasbourg* - Examineur
- Mme. Alice TURK, Professeure, *University of Edinburgh* - Rapporteuse
- M. Didier DEMOLIN, Professeur émérite, *LPP, Université Sorbonne Nouvelle* - Invité



# Remerciements

Je remercie tout d'abord mon garant d'habilitation, Yves Laprie, qui a accepté de diriger ce travail et m'a offert la chance de participer à plusieurs de ses projets de recherche, une expérience des plus enrichissantes.

Je remercie les membres du jury, Alice Turk, Fabrice Hirsch, François Pellegrino, Slim Ouni, Rudolph Sock qui ont accepté spontanément de relire et d'évaluer ce document de synthèse.

Une pensée particulière pour Maria-Gabriella pour sa gentillesse et son sourire contagieux. Merci d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.

Je remercie vivement Jacqueline Vaissière, mon ancienne directrice de thèse, pour son soutien constant et sa motivation déterminants dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également Patricia (une amie fidèle) et Didier qui m'ont encouragée à achever ce travail et qui n'ont eu de cesse de m'apporter leur soutien jusqu'au point final.

Un énorme merci à Shinji, qui m'a appris tout ce que je pense savoir. Il m'a donné le goût de l'expérimental et de la rigueur, et j'espère un jour être un peu à sa hauteur.

Une pensée également pour Lise, Stéphane et Robin qui m'ont toujours accueillie chaleureusement à Foch et qui m'ont guidée dans mes recherches.

Je remercie chaleureusement Amélie pour son soutien indéfectible et sa patience face à mes idées parfois loufoques.

Merci à Dwidou, qui m'a laissé croire que c'était facile de se servir d'une imprimante 3D... Merci à toi de m'avoir tant aidée dans ces débuts "difficiles"...

Ce travail n'aurait pu aboutir sans la curiosité des étudiants, dont les échanges et réflexions ont souvent été à l'origine de nouveaux projets.

Je remercie l'ensemble des membres du Laboratoire de Phonétique et Phonologie, un environnement humain et stimulant qui a grandement contribué à l'épanouissement de mon travail.

## Remerciements

---

Je termine ces remerciements par ma famille, la vraie et celle que je me suis choisie. Merci à vous d'être toujours là pour moi et de me soutenir quoi qu'il arrive. Une immense reconnaissance à Patrick pour ta patience et ta disponibilité, et à Mickaël, qui apporte toujours la bonne humeur dans notre maison. Merci à vous deux de rendre chaque jour plus lumineux.

*A mon père,*



# Table des matières

Table des figures	viii
Liste des tableaux	xvii
Avant-Propos	1
Introduction	3
0.1 La première représentation des sons de parole	3
0.2 De la description des sons du langage à la phonétique expérimentale	4
0.3 Instruments et expérimentations au service de la recherche en phonétique	6
<b>1 Chapitre 1 : Contexte</b>	<b>9</b>
1.1 Mon poste d'ingénieur de recherche au LPP	9
1.2 Le LPP et la plateforme physiologique	10
1.2.1 Le LPP	10
1.2.2 Historique de la plateforme du LPP	11
1.2.3 La plateforme du LPP en 2024	13
<b>2 Chapitre 2 : Développement d'instruments et de protocoles expérimentaux</b>	<b>15</b>
2.1 Développement d'instruments	16
2.1.1 Le PhotoNasographe (PNG)	16
2.1.2 L'électroPhotoGlottoGraphe	23
2.1.3 L'AeroMask	32
2.2 Mise en place de protocoles expérimentaux au service de la recherche	45
2.2.1 Adaptation d'instruments : Le Nasomètre	45
2.2.2 Adaptation d'instruments et protocoles de mesure : Les différentes mesures liées à la nasalité (accéléromètre piézoélectrique microphone électret miniature)	49
2.2.3 Élaboration de scripts informatiques à l'usage des chercheurs et des étudiants	56
2.3 Valorisation du patrimoine scientifique	63
2.3.1 Mon implication	64
2.3.2 Restauration du matériel	64
2.3.3 Inventaire du matériel	64
2.3.4 Valorisation	65
<b>3 Chapitre 3 : Activités de Recherche</b>	<b>71</b>
3.1 Activités de recherche liées à la production de la nasalité	72

3.1.1	Nasalité et « multiparamétrique » . . . . .	73
3.1.2	Nasalité et pathologie . . . . .	89
3.2	Données expérimentales et français langue étrangère (FLE) . . . . .	95
3.3	Activités de recherche liées aux mécanismes laryngés . . . . .	98
3.3.1	electroPhotoGlottographe (ePGG) <i>vs.</i> Électroglottographe (EGG) . . . . .	99
3.3.2	Campagnes d'enregistrement avec l'ePGG et premiers résultats . . . . .	100
3.3.3	EGG et FLE . . . . .	102
3.3.4	Larynx et qualité de voix . . . . .	103
3.4	Langues rares . . . . .	104
3.4.1	Langues Tibéto-Birman . . . . .	104
3.4.2	ikema . . . . .	112
3.4.3	nasa yuwe . . . . .	115
3.4.4	mbugu et iraqw . . . . .	115
3.5	Chant . . . . .	116
3.5.1	Cantu in Paghjella de Corse . . . . .	120
3.5.2	Human BeatBox (HBB) . . . . .	121
3.6	Henri IV . . . . .	124
3.7	Une approche collaborative de la recherche . . . . .	129
<b>4</b>	<b>Chapitre 4 : Activités transverses</b> . . . . .	<b>131</b>
4.1	Activités d'enseignement . . . . .	131
4.2	Encadrement d'étudiants et recrutements . . . . .	134
4.2.1	Master et mémoire d'orthophonie . . . . .	134
4.2.2	Stagiaires . . . . .	136
4.2.3	Doctorants . . . . .	137
4.2.4	Post-Doctorants . . . . .	139
4.3	Projets financés . . . . .	141
4.3.1	Participation à des projets financés . . . . .	141
4.3.2	Porteur de projets financés . . . . .	142
4.4	Comité national de la recherche scientifique . . . . .	148
4.5	Comité régional d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail . . . . .	150
4.6	Assistant de prévention . . . . .	150
4.7	Réseaux . . . . .	151
4.7.1	GDR-Lift . . . . .	151
4.7.2	Focus Linguistique . . . . .	151
<b>5</b>	<b>Chapitre 5 : Projet de Recherche</b> . . . . .	<b>153</b>
5.1	Multi-instrumentation . . . . .	153
5.1.1	L'acquisition de données multi-instrumentales synchronisées pour décrire les phénomènes de parole . . . . .	155
5.1.2	Description des protocoles pour la constitution d'une base de données multi-instruments . . . . .	160
5.2	Données Multilingues . . . . .	162
5.3	Aspect clinique . . . . .	163
5.4	Les maquettes physiques tridimensionnelles statiques . . . . .	165
5.4.1	Description du protocole de détournage . . . . .	165
5.4.2	Protocole pour la réalisation de la maquette . . . . .	166

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Bibliographie</b>	<b>169</b>
<b>Annexe</b>	<b>181</b>

# Liste d'abréviations

<b>ANR</b> Agence Nationale de la Recherche . . . . .	xvii
<b>AP</b> Assistant de Prévention . . . . .	150
<b>ATER</b> Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche . . . . .	xvii
<b>ATR</b> Advanced Telecommunication Research Institut . . . . .	11
<b>BNF</b> Bibliothèque Nationale de France . . . . .	63
<b>CNAM</b> Conservatoire National des Arts et Métiers . . . . .	65
<b>CNRS</b> Centre National de la Recherche Scientifique . . . . .	9
<b>CAO</b> Conception Assistée par Ordinateur . . . . .	38
<b>CRHSCT</b> Comité Régional d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail . . . . .	150
<b>CRLAO</b> Centre de recherches linguistiques sur l'Asie orientale . . . . .	146
<b>DAB</b> Débit d'Air Buccal . . . . .	xiii
<b>DAN</b> Débit d'Air Nasal . . . . .	xiii
<b>dB</b> Décibels . . . . .	xi
<b>DEA</b> Diplôme d'Études Approfondies . . . . .	131
<b>DMOP</b> Dystrophie musculaire oculopharyngée . . . . .	71
<b>DUPALF</b> Diplôme Universitaire de Phonétique Appliquée à la langue Française . . . . .	95
<b>EEG</b> Électroencéphalographie . . . . .	41
<b>EFL</b> Empirical Foundations of Linguistics . . . . .	141
<b>EGG</b> Électroglottographe . . . . .	iii
<b>EMA</b> Articulatographe Electromagnétique . . . . .	2
<b>EMG</b> Électromyographie . . . . .	145
<b>EMGs</b> Électromyographie de surface . . . . .	13
<b>ePGG</b> electroPhotoGlottographe . . . . .	iii
<b>ESAPVI</b> Établissement d'une Plateforme pour l'Analyse de la Parole avec Visualisation et Instrumentation . . . . .	viii
<b>ESPCI</b> École Supérieure de Physique et Chimie Appliquées . . . . .	116
<b>EVA</b> Evaluation Vocale Assistée . . . . .	145

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>F4SCT</b> Formations spécialisées de service en matière de santé, de sécurité et des conditions de travail . . . . .	150
<b>FLE</b> Français Langue Étrangère . . . . .	71
<b>HBB</b> Human BeatBox . . . . .	72
<b>HDR</b> Habilitation à Diriger les Recherches . . . . .	155
<b>HNR</b> Harmonic to Noise Ratio . . . . .	111
<b>HEGP</b> Hôpital Européen Georges Pompidou . . . . .	2
<b>Hz</b> Hertz . . . . .	58
<b>IA</b> Intelligence Artificielle . . . . .	143
<b>IADI</b> Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle . . . . .	144
<b>IRM</b> Imagerie par Résonance Magnétique . . . . .	2
<b>ILPGA</b> Institut de Linguistique et de Phonétique Générales et Appliquées . . . . .	6
<b>INJS</b> Institut National des Jeunes Sourds de Paris . . . . .	7
<b>INSERM</b> Institut national de la santé et de la recherche médicale . . . . .	144
<b>ITA</b> Ingénieurs et personnels Techniques d’Appui à la recherche . . . . .	10
<b>IVP</b> Insuffisance vélo-pharyngée . . . . .	71
<b>LLACAN</b> Langage, Langues et Culture d’Afrique, UMR8135 . . . . .	42
<b>LACITO</b> Langues et Civilisation à Tradition Orale, UMR7107 . . . . .	42
<b>LED</b> Diode ElectroLuminescente . . . . .	ix
<b>LEGI</b> Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels . . . . .	145
<b>LNMB</b> Laboratory of Neurophysiology and Movement Biomechanics . . . . .	40
<b>Loria</b> Laboratoire lorain de recherche en informatique et ses applications . . . . .	144
<b>LPC</b> Linear Predictive Coding . . . . .	xii
<b>LPP</b> Laboratoire de Phonétique et Phonologie . . . . .	viii
<b>MFCC</b> Mel Frequency Cepstral Coefficients . . . . .	46
<b>nm</b> nanomètres . . . . .	24
<b>PEP2</b> Plateforme d’Étude Physiologique de la Parole . . . . .	viii
<b>PNG</b> PhotoNasoGraphe . . . . .	viii
<b>HCERES</b> Haut Conseil d’Évaluation de la Recherche et de l’Enseignement Supérieur . . . . .	11
<b>MDR</b> Maison de la Recherche . . . . .	xii
<b>ORL</b> Otorhinolaryngologiste . . . . .	11
<b>OQ</b> Quotient d’Ouverture . . . . .	xv
<b>PCI</b> patrimoine culturel immatériel . . . . .	72
<b>PEP2</b> Étude Physiologique de la Parole . . . . .	viii
<b>PGG</b> PhotoGlottoGraphe . . . . .	viii
<b>PNS</b> Polypose Nasosinusienne . . . . .	71
<b>RMS</b> RootMeanSquare . . . . .	xi

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>SST</b> Sauveteur Secouriste du Travail . . . . .	150
<b>UMR</b> Unité Mixte de Recherche . . . . .	10
<b>UPSID</b> UCLA Phonological Segment Inventory Database . . . . .	107
<b>US</b> Ultrason . . . . .	116
<b>V</b> Volt . . . . .	ix

# Table des figures

1	Première représentation graphique des phénomènes de parole d'après [Rosalpelly 1876], P-125, P.n. : Pression nasale, V.l : Vibrations laryngées et M.l. : Mouvements des lèvres. . . . .	4
1.1	Les premiers instruments constituant la plateforme Étude Physiologique de la Parole (PEP2) (Vincent et al., 2010 : 4). . . . .	12
1.2	Instruments composant la plateforme physiologique du Laboratoire de Phonétique et Phonologie (LPP) et dont j'ai la responsabilité. . . . .	14
2.1	Représentation du PhotoNasoGraphe (PNG)1, figure inspirée des descriptions que l'on trouve dans Maeda et al., 2008, [Maeda 2008]. . . . .	17
2.2	Représentation du PNG2, [Vaissière 2010]. . . . .	17
2.3	Le détecteur de lumière LS400 de Texas instrument avec ses dimensions, [Maeda 2008].	18
2.4	Ampoule en tungstène utilisée pour le PNG1, [Maeda 2008]. . . . .	18
2.5	Schéma du modèle pharynx-vélu comprenant : en haut, le détecteur de lumière (LS400), en bas, l'ampoule. Le modèle peut être fermé par une lamelle noire en plastique représentant l'ouverture ou la fermeture du conduit nasal, [Maeda 2008].	19
2.6	Schéma montrant la différence de quantité de lumière capté par le détecteur en lien avec l'ouverture du port vélopharyngé simulée. a) simulation de l'ouverture dans le modèle pharynx-vélu b) résultats du détecteur, [Amelot 2009]. . . . .	19
2.7	a) position de la lampe et du détecteur, D représente la variation de la distance liée au déplacement du capteur. b) Résultats obtenus par le détecteur avec une ouverture à 3,6 cm <sup>2</sup> et une distance pour D allant de 2,5 cm à 7,5 cm, [Amelot 2009].	20
2.8	Résultats des mesures de l'angle de sensibilité du détecteur dans 3 conditions. En rouge : capteur dans une gaine, en noir : capteur seul et en bleu capteur poli, [Amelot 2009]. . . . .	20
2.9	Exemple de données obtenues avec le PNG couplé à un nasofibroscope, PNG2. Du haut vers le bas : spectrogramme, signal acoustique (microphone), ouverture du port vélopharyngé (OV) obtenue avec le PNG2 et mouvements du voile du palais (MV) obtenus avec les données vidéos issues du nasofibroscope, [Amelot 2009]. .	21
2.10	Exemple de données acquises par Rita Demasi pour sa thèse, les données sont visualisées et analysées à l'aide d'un script Matlab que j'ai développé, [Demasi 2023].	22
2.11	Comparaison des deux systèmes : PhotoGlottoGraphe (PGG) (à gauche) <i>vs.</i> ePGG (à droite), [Vaissière 2010]. . . . .	23
2.12	Éclairage retenu pour le système ePGG, rapport Établissement d'une Plateforme pour l'Analyse de la Parole avec Visualisation et Instrumentation (ESAPVI), 2019.	24
2.13	Première version du système de fixation avec les LED infra-rouge, rapport ESAPVI, 2019. . . . .	25

2.14	Signal acoustique en haut et données issues de l'ePGG en bas pour le mot [haku- kusi], d'après [Vaissière 2010]. . . . .	25
2.15	Configuration pour acquérir simultanément (1) en haut, le signal audio, (2) images provenant d'une endoscopie vidéo à grande vitesse (4000 images/s) : (2a) Image d'origine, (2b) Image filtrée, (2c) Aire glottique détectée et (2), Aire Glottique transcrite en pixels., (3) Signal ePGG, (4) EGG (tâches 1 et 2), d'après [Amelot 2018]. . . . .	27
2.16	Extrait des normalisations des données ePGG et de l'aire glottique pendant la production de [i] pour le locuteur 2 (la ligne bleue représente données ePGG et la ligne rouge correspond aux extractions de l'aire à la glotte issues de la vidéo-endoscopie à grande vitesse (4000 images/s), d'après [Amelot 2018]. . . . .	27
2.17	Exemple de données obtenues : 1. Images issues du nasofibroscope, 2. Signal acous- tique, 3. Signal de l'ePGG et 4. Signal de l'EGG. La ligne rouge indique là où l'image du milieu (1.) a été extraite et les deux lignes pointillées respectivement l'image de droite et celle de gauche (1.), locuteur 2 qui a prononcé la phrase : « il a dit asa asa asa trois fois », d'après [Amelot 2018]. . . . .	28
2.18	Signal acoustique (en haut), signal ePGG (milieu) et signal EGG pour la suite /isi/. La glotte est maximale ouverte eu centre acoustique de la consonne /s/, d'après [Amelot 2018]. . . . .	29
2.19	ePGG adapté sur une maquette mécanique simulant les vibrations des plis vo- caux. a) Réplique rigide motorisée, b) réplique auto-oscillante pilotée par flux d'air, d'après [Bouvet 2017]. . . . .	30
2.20	Signal ePGG (en Volt (V)) moyen en fonction de la distance source-capteur (d) pour la réplique entraînée par flux avec 2 et 3 couches d'épaisseur représentant les plis vocaux, d'après [Bouvet 2017]. . . . .	30
2.21	Signal ePGG (en V) moyen moyen en fonction de l'orientation de la source, d'après [Bouvet 2017]. . . . .	30
2.22	Seconde version du système permettant de fixer les Diode ElectroLuminescente (LED) et le capteur de l'ePGG, imaginé et dessiné à partir de Fusion 360 puis imprimé en résine semi-rigide via l'imprimante FormLabs disponible au labora- toire. Les flèches indiquent la latitude de position des deux éléments : capteur et LED. . . . .	32
2.23	Système AeroMask utilisé au LPP : Masque à mailles fines et souples (fibre de papier) pour mesurer le débit d'air oral et nasal. Le masque est équipé d'un séparateur étanche à l'air qui délimite les deux cavités, en avant des narines et de la bouche, d'après [Vaissière 2010]. . . . .	33
2.24	Système d'isolation choisi pour les locuteurs enregistrés pour le travail de re- cherche d'Amélie Elmerich. Cette figure montre également un pont de nez. . . . .	35
2.25	Enregistrement de la voyelle /a/ par un sujet équipé de l'AeroMask : signal acoustique en haut et débit d'air total en bas. À gauche : masque sans isolant et sans pont de nez, au milieu : masque avec isolant et sans pont de nez et à droite ; masque avec isolant et pont de nez, d'après [Elmerich 2024b]. . . . .	36
2.26	Triangle vocalique, de deux locutrices, obtenu à partir d'un enregistrement acous- tique équipées de l'AeroMask, d'après [Elmerich 2020c]. . . . .	37

## TABLE DES FIGURES

---

2.27	La matrice de confusion obtenue à partir des tests de perception. V = voyelle, pVp = voyelle dans le contexte /p/, ACOUSTIC = microphone seul, FIBER = AeroMask, EVA = EVATM, ROTH = masque de Rothenberg, (n=76), d'après [Elmerich 2023c]. . . . .	37
2.28	Première version de séparation des cavités orale et nasale. A gauche : masque avec la séparation nasale porté par un sujet, à droite : exemple de données pour le mot « apnée », au milieu : intérieur du masque avec le placement de la séparation, rapport ESAPVI, 2019. . . . .	38
2.29	Exemple de séparation mise dans le masque qui permet de séparer le flux d'air buccal du flux d'air nasal. . . . .	39
2.30	Accessoire pour maintenir le bandeau autour de la tête ainsi que les élastiques assurant un bon maintien et une bonne étanchéité du masque sur le visage de la personne. . . . .	39
2.31	Accessoires utilisés pour l'AeroMask que j'ai dessinés pour qu'ils s'adaptent parfaitement aux spécificités du masque. 1. Visse percée sur toute sa longueur pour que le tube de débit soit relié au capteur de débit ; 2, écrou pour maintenir la visse ; 3, écrou par 2 mis de chaque côté du masque pour limiter les fuites ; 4, adaptateur pour mettre un tube de pression dans le masque et un autre qui relie le capteur de pression. . . . .	39
2.32	Copie d'écran du logiciel DataAcquisition Live.m. . . . .	40
2.33	Copie d'écran du logiciel AeroVisu.m. . . . .	41
2.34	Exemple de gabarit propre à une forme de séparation. . . . .	42
2.35	Pour exemple, liste du matériel fourni pour la mission de Didier Demolin en juillet 2024. . . . .	43
2.36	Exemple d'un fichier .xlsx préparé en vue d'une mission de terrain. . . . .	43
2.37	Exemple des données remplies dans le fichier .xlsx qui sont ensuite utilisées dans le script de AeroVisu.m. . . . .	44
2.38	Nouvelle version d'isolant posée autour du masque pour favoriser l'isolation. . . . .	44
2.39	Prototypage de la nouvelle séparation plus souple et plus ergonomique dessiné fin 2024. . . . .	44
2.40	« Nasomètre » : Système que j'ai élaboré à gauche à l'aide de deux microphones et en utilisant la plaque fournie par le KayPentax et schéma montrant le principe d'utilisation du système KayPentax à droite. . . . .	46
2.41	Exemple d'alignement obtenu à partir du script TransiCheck. Plus la ligne pointillée en rouge est rectiligne meilleur est l'alignement. . . . .	47
2.42	Exemple de données du Nasometer comparées aux mesures du "Nasomètre" obtenues avec CompNasoMicro : en rouge le signal acoustique obtenu par le microphone situé au niveau de la bouche, en bleu celui obtenu par le microphone situé au niveau du nez et en noir la courbe de Nasalance. . . . .	47
2.43	Exemple des données obtenues à partir du script Praat Visudata : à gauche : boîte de dialogue qui doit être remplie avec les paramètres voulus, à droite : exemple de signaux obtenus (en rouge données du Nasometer ; 1. acoustique 2.RMS et 3. Nasalance brute, en bleu données du « Nasomètre » ; 1. acoustique 2.RMS et 3. nasalance brute et en noir pointillé valeurs extraites du logiciel KayPentax représentant les valeurs normalisées de nasalance en %). . . . .	48

2.44	Exemple de la plaque qui a été dessinée par mes soins et qui sera imprimée à l'aide d'une imprimante 3D. . . . .	49
2.45	Schéma montrant le placement l'accéléromètre piézoélectrique pour capter les vibrations nasales d'après [Vaissière 2010]. . . . .	50
2.46	Exemple de signaux obtenus après la calibration du microphone et de l'accéléromètre piézoélectrique d'après [Brkan 2012]. . . . .	51
2.47	Exemple de script Praat qui permet d'extraire la valeur de RootMeanSquare (RMS) du signal, d'après [Bustamante 2014]. . . . .	51
2.48	Illustration du microphone miniature utilisé pour mesurer l'acoustique à l'intérieur de la cavité nasale. . . . .	53
2.49	Écouteur Intra-auriculaire utilisé pour capter les vibrations nasales, d'après [Montagu 2007]. . . . .	54
2.50	Ensemble des instruments utilisés en simultanément pour cette étude, d'après [Audibert 2011]. . . . .	55
2.51	Distribution des valeurs moyennes des z-scores des 6 mesures de nasalité calculées sur les classes phonétiques pour 4 locuteurs, d'après [Audibert 2011]. . . . .	55
2.52	Exemple de positionnement des pastilles (en gris sur la figure) pour un locuteur colombien, d'après [Bustamante Arango 2021]. . . . .	57
2.53	Illustration d'un script de détection de pastilles qui a été utilisé dans la thèse de David Bustamante-Arango, d'après [Bustamante Arango 2021]. . . . .	57
2.54	Mouvements des lèvres lors de la production de la séquence « Vous dites aintoune six fois » (en gras la partie visible sur le signal acoustique) par une apprenante espagnole de niveau avancé. De haut en bas pour chaque panneau : signal acoustique, ouverture labiale, et écartement des lèvres, d'après [Bustamante Arango 2021].	58
2.55	Illustration du script permettant d'extraire des coupes spectrales des signaux acoustiques oral et nasal. En noir le signal acoustique oral et en bleu le signal acoustique nasal, d'après [Elmerich 2024b]. . . . .	59
2.56	Du haut vers le bas : signal acoustique oral, nasal du logatome [ada] ainsi que les coupes spectrales oral (rouge) et nasal (bleu) sur [a] (V1) en a., [d] en b. et [a] (V2) en c., ainsi que sur la droite, un tableau reprenant les valeurs des harmoniques en Décibels (dB) sur le signal oral et nasal, avant chirurgie (droite), après chirurgie (gauche), d'après [Elmerich 2023a]. . . . .	59
2.57	Illustration du casque HyperHelmet développé dans le cadre du projet i-Treasures et utilisé par Song Ying dans le cadre de son mémoire de Master 1. . . . .	60
2.58	Illustration du script VisuUSCAM pour un locuteur chinois apprenant le français et produisant le mot « thym ». . . . .	60
2.59	Image extraite sur laquelle il est possible de repérer le dos de la langue, la position des points est ensuite retranscrite sur Excel. . . . .	61
2.60	Illustration du script Matlab Aire aux Lèvres. . . . .	61
2.61	Illustration du script Matlab de découpage nommé VisuCutPrint. . . . .	62
2.62	Exemple de figure obtenue en sortie du script VisuCutPrint et sauvée en .eps. . . . .	63
2.63	Pince Nasale de Zund-Burguet (1903), a) les parties manquantes comme la boule et le tuyau ont été dessinées et imprimées en 3D, b) la pince retrouvée après nettoyage, c) la pièce d'origine. . . . .	64
2.64	Exemple de fiche standardisée pour chaque instrument afin de aussi précisément que possible l'instrument retrouvé. . . . .	66

## TABLE DES FIGURES

---

2.65	Copie d'écran du site d'inventaire du matériel du LPP qui cible sur les instruments anciens. . . . .	67
2.66	a) Plateau de jeu, b) jeu complet mis en place et utilisé à la journée porte ouverte de la Maison de la Recherche (MDR) de la Sorbonne Nouvelle en 2023. . . . .	67
2.67	Le pion bleu qui compose le jeu, ainsi que les différents accessoires à gagner pour reconstruire le personnage, modélisés en 3D à partir de Fusion 360 et imprimés en 3D : a : personnage, b : oreille, c : nez et d : langue. . . . .	68
3.1	Schéma montrant le cas idéal de synchronisation entre les événements lors de la production d'un phonème nasal, d'après [Clements 2015]. . . . .	73
3.2	Exemple de données obtenues pour le locuteur masculin, d'après [Amelot 2006c].	75
3.3	Tracés idéalisés des courbes de débit d'air nasal (en rouge) et de débit d'air oral (en bleu), en fonction des cas les plus fréquemment trouvés. . . . .	76
3.4	Exemple de production d'anticipation du flux d'air nasal pour la locutrice 2 produisant la phrase « c'est bon » en parole spontanée, d'après [Amelot 2006b].	78
3.5	Positionnement du fibroscope pour la visualisation des mouvements du vélum, d'après [Amelot 2003]. . . . .	78
3.6	Prononciation de la même séquence /ma/ par deux locuteurs francophones, a : pas de mouvements visibles des parois vélo-pharyngées, b : mouvements vélares verticaux et horizontaux visibles, d'après [Amelot 2003]. . . . .	79
3.7	Schéma qui résume les mouvements d'abaissement du voile du palais et l'apparition du flux d'air nasal durant la production de la consonne nasale, d'après [Amelot 2004b]. . . . .	80
3.8	Schéma résumant le mouvement du voile du palais durant la production d'une séquence CVNC (monophthongue) en portugais brésilien, d'après [Lovatto 2008].	81
3.9	Schéma résumant le mouvement du voile du palais durant la production d'une séquence CVGNC (diphthongue) en portugais brésilien, d'après [Demasi 2019]. . .	82
3.10	Position des six bobines fixées sur les locuteurs durant l'acquisition des données EMA, d'après [Amelot 2007b]. . . . .	83
3.11	Valeur moyenne et écart-type pour les consonnes orales, les voyelles orales, les consonnes nasales et les voyelles nasales pour les deux locuteurs, d'après [Amelot 2007b]. . . . .	84
3.12	Exemple de la hauteur du voile du palais pour cinq voyelles orales du français (/i/, /u/, /e/, /o/ et /a/) produites par deux locuteurs, d'après [Amelot 2007b].	84
3.13	Hauteur du voile du palais en fonction des voyelles orales ou nasales, suivies et ou précédées par la consonne nasale /n/ pour deux locuteurs, d'après [Amelot 2007b].	85
3.14	Exemple de données obtenues avec le PNG2 sur un locuteur francophone. La courbe bleue est issue du PNG, la courbe rouge est issue des données fibroscopies, la courbe verte est la F0. . . . .	86
3.15	Schéma idéalisé résumant mes recherches sur les mouvements du voile du palais et l'ouverture du port vélo-pharyngé. . . . .	87
3.16	Logatome prononcé par une locutrice de haut en bas et de la gauche vers la droite : spectrogramme, signal acoustique, ouverture du port vélo-pharyngé, mouvement du voile du palais, dérivée des mouvements, coupe spectrale prise au milieu de la voyelle nasale et les différentes couleurs illustrent un décalage dans le temps pour la mesure spectrale, Linear Predictive Coding (LPC) . . . .	88

3.17	Données d'un locuteur souffrant de dystrophie musculaire avec une fuite nasale importante (loc5patho), d'après [Amelot 2006a]	92
3.18	a) Graphique des moyennes en l/s de Débit d'Air Nasal (DAN) et Débit d'Air Buccal (DAB) sur [m] et [n] en préopératoire (bleu), postopératoire (rouge) pour le patient M1 et pour les témoins T1 et T4 (vert et violet), b) Graphique des moyennes en l/s de DAN et DAB sur [m] et [n] en préopératoire (bleu), postopératoire (rouge) pour le patient M2 et pour les témoins T1 et T4 (vert et violet), d'après [Elmerich 2020b]	93
3.19	a) Du haut vers le bas : signal acoustique oral, nasal du logatome [ada] ainsi que les coupes spectrales oral (rouge) et nasal (bleu) sur [a] (V1) en a., [d] en b. et [a] (V2) en c., ainsi que sur la droite, un tableau reprenant les valeurs des harmoniques en dB sur le signal oral et nasal, avant chirurgie (1), après chirurgie (2), d'après [Elmerich 2020b]	94
3.20	Exemples de tracés obtenus pour le syntagme « en attendant le banquet » prononcé par un sujet témoin masculin. De haut en bas : spectrogramme ; signal acoustique ; signal issu de l'accéléromètre piezoélectrique ; signal issu de l'EGG, d'après [Pillot-Loiseau 2010a]	96
3.21	Durée des voyelles (msec) : comparaison locuteurs bosniaques/français, d'après [Brkan 2011]	96
3.22	Pourcentage de nasalité à partir de la moyenne en % du RMS durant la voyelle : comparaison entre les locutrices bosniaques et les locutrices françaises, d'après [Brkan 2011]	97
3.23	a) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [a] et de [ã] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus) ; b) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [ɛ] et de [ẽ] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus) ; c) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [o] et de [õ] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus), d'après [Bustamante 2014]	98
3.24	Extrait des données pour la voyelle de [i] pour le locuteur 2, de haut en bas : signal acoustique, GA (Glottal area, ou Aperture Glottique), ePGG et EGG pour lequel la courbe est inversée, d'après [Amelot 2018].	100
3.25	Signal de l'ePGG (en bas) et acoustique (haut) pour les /asa papa sa/, /asa kaka sa/ et /asa titi sa/ produites par le locuteur 4, d'après [Elie 2019].	101
3.26	Signal de l'ePGG (en bas) et acoustique (haut) pour la séquence /asa a/f/a afa/, d'après [Elie 2019].	101
3.27	Schémas idéalisés d'ouverture glottique selon la consonne, d'après les différentes études faites avec l'ePGG.	102
3.28	Pourcentage de voisement de /b/ et /d/ (moyenne et écart-type) pour trois locutrices françaises (fr) et trois locutrices taïwanaises (tw), d'après [Landron 2013].	103
3.29	Coupes IRM sagittales : voix modale, voix craquée, [ʔ] (GS), et [ʕ] (ES) ; [i]-contexte. e = épiglote ; ff = pli ventriculaire ; ss = espace sous-glottique ; t = langue ; tf = pli vocal (vrai) ; v = ventricule. Gauche = avant. Encadré rouge = illustration de la position glottique dans les quatre modalités, d'après [Moisik 2015].	104
3.30	Localisation des langues rares sur lesquelles j'ai eu l'opportunité de travailler, carte obtenue à partir de OpenStreetMap, ODbL.	105

3.31 Répartition des consonnes et des voyelles de l'ersu, d'après [Chirkova 2015]. . . . .	105
3.32 Palatographie statique pour voir les points de contact des consonnes dans les mots / z̥ɛ/ "sauvage", / zo/ "gronder" et / zo/ "adoucir", d'après [Chirkova 2015].	106
3.33 Signal acoustique, spectrogrammes, EGG, DAN et DAB pour les paires minimales /pho/ 's'échapper' vs. /Npho/ 'voler'; /thwa/ 'mule' vs. /Nthwa/ 'être tranchant', d'après [Chirkova 2015]. . . . .	106
3.34 Signal acoustique, EGG, DAN et DAB pour les mots /m̥ɛ/ (« medecine » et /mɛ/ (« bamboo ») produit par le locuteur de xumi, d'après [Chirkova 2019]. . . . .	107
3.35 Signal acoustique, EGG, DAN et DAB pour le mot /fĩ/ (« légume ») produit par le locuteur de xumi, d'après [Chirkova 2019]. . . . .	108
3.36 Signal acoustique, EGG, DAN et DAB pour le mot /ma/ (« à partir ») produit par un locuteur birman à gauche et signal acoustique, DAN et DAB pour le mot /m̥e/ (« grain de beauté ») produit par un locuteur tibétain à droite, et un locuteur du khan à gauche, d'après [Chirkova 2019]. . . . .	109
3.37 Signal acoustique, DAN et DAB pour le mot /na/ (« nez ») produit par un locuteur tibétain, d'après [Chirkova 2019]. . . . .	109
3.38 Répartition des consonnes du baima, d'après [Chirkova 2022]. . . . .	110
3.39 Triangle vocalique des voyelles du baima, d'après [Chirkova 2022]. . . . .	110
3.40 Voyelles de l'ikema, d'après [Shinohara 2023]. . . . .	112
3.41 Consonnes de l'ikema, d'après [Shinohara 2023]. . . . .	112
3.42 Durée des segments consonantiques /n/ dans /nada/ (« larmes »), /nn/ dans /nna/ (« coquille en spirale ») et /ṅn/ dans /ṅna/ (« corde »), d'après [Shinohara 2023]. . . . .	113
3.43 Illustration du mot /mmu/// (« nuage ») géminée consonne nasale sourde suivie d'une consonne nasale sonore en ikema produite par le locuteur 4; spectrogramme, signal acoustique issu du microphone, signal DAB non filtré, signal DAB filtré, signal DAN non filtré et signal DAN filtré, d'après [Shinohara 2023].	114
3.44 Illustration du mot /mma/ (« mère ») géminée consonne nasale sonore suivie d'une consonne nasale sonore en ikema produite par le locuteur 4; spectrogramme, signal acoustique issu du microphone, signal DAB non filtré, signal DAB filtré, signal DAN non filtré et signal DAN filtré, d'après [Shinohara 2023].	114
3.45 Exemple de données en nasa yume produites par un locuteur et copie d'écran qui script développé en Matlab pour la synchronisation et l'analyse des données, d'après [Demolin 2016]. . . . .	115
3.46 Vue d'ensemble du système de capture du tractus vocal pour les rares cas de sous-utilisation du chant. Six capteurs (à gauche) capturent le mouvement de cinq événements physiques : (1) la langue, (2) les lèvres, (3) l'onde acoustique de la parole, (4) la résonance nasale, (5) les cordes vocales et (6) les muscles respiratoires. Chaque instrument est traité (au milieu) et enregistré numériquement (à droite), d'après [Al Kork 2014]. . . . .	117
3.47 a) Casque multi-capteurs : 1) Bandeau réglable, 2) Support de réglage de la hauteur de la sonde, 3) Plate-forme réglable de la sonde US, 4) Caméra labiale avec réglage de la proximité et de l'orientation, 5) Microphone. b) Schéma de l'emplacement des capteurs hors casque : accéléromètre piézoélectrique et l'EGG. C) Schéma de l'emplacement de la ceinture respiratoire, d'après [Al Kork 2014].	118

3.48	Interface utilisateur d’acquisition de données RTMaps, montrant l’enregistrement et la visualisation simultanés des images ultrasoniques de la langue, de la vidéo des lèvres et des quatre capteurs analogiques, d’après [Al Kork 2014]. . . . .	119
3.49	(Gauche) Capture d’écran de i-THAN pour l’enregistrement de la voyelle chantée soutenue /i/ d’un Paghjella corse. Les images de la lèvre et de la langue; de haut en bas : le signal acoustique, la forme d’onde EGG (bleu) et son dérivé (vert), le signal piézoélectrique. (Droite) Figure d’analyse montrant de haut en bas : le spectrogramme à bande étroite, la fréquence fondamentale (F0) de la parole directement sur le signal EGG et la fréquence du fondamentale utilisée pour calculer le Quotient d’Ouverture (OQ), la F0 dans une échelle de notes musicales et l’OQ, d’après [Crevier-Buchman 2014a]. . . . .	119
3.50	Valeur moyenne et écart-type des fréquences des formants (Hz) F1 à F4 pour les voyelles isolées parlées et chantées. La ligne en gras autour de 3000 Hz est située entre F3 et F4, où le formant de chant est attendu, d’après [Crevier-Buchman 2015a]. . . . .	121
3.51	De haut en bas : oscillogramme, spectrogramme, débit d’air oral et débit d’air nasal pour sept sons charleston s’apparentant au mécanisme d’un clic, d’après [Pillot-Loiseau 2020]. . . . .	123
3.52	À Gauche : l’image endoscopique montrant le plan glottique et à droite image obtenue au scanner de la tête momifiée. . . . .	124
3.53	Étude et reconstitution du larynx de la tête momifiée d’Henri IV. . . . .	125
3.54	Modélisation du sinus maxillaire gauche avec le méat prêt à être imprimé puis excité acoustiquement. . . . .	126
3.55	Graphique reprenant les mesures et intégrant les valeurs de Henri IV en fonction de la base de données de Howell, 1973 (hommes et femmes séparés). . . . .	127
3.56	Reconstruction de la tête d’Henri IV et modélisation du conduit vocal en jaune sur l’image. . . . .	128
3.57	Copie d’écran du script Matlab en cours d’achèvement pour la modélisation acoustique du conduit vocal. . . . .	129
4.1	Localisation sur la carte des enregistrements effectués en juillet 2024 ainsi que la répartition des langues acquises. . . . .	139
4.2	Nombre de locuteurs et instruments utilisés pour les langues enregistrées en 2024 (1ère mission de terrain) et à enregistrer. . . . .	140
4.3	Différence de OQ (en pourcentage) chez les locuteurs masculins pour les mots /nô/ ‘inside’ – /nō/ ‘sky’ – /nò/ ‘exist’. . . . .	140
4.4	Membres de la section 34 pour le mandat de 2020-2025. . . . .	149
4.5	Évolution de l’intitulé de la section 34 « Sciences du langage » de 1949 à 2024. . . . .	149
5.1	Différents instruments disponibles au LPP : avantages et inconvénient, couplage et situation d’enregistrement possibles. . . . .	154
5.2	La chaîne de la communication verbale : les différentes phases du message parlé dans son trajet du cerveau du lecteur à celui de l’auditeur [Denes 1960] p.4. . . . .	155
5.3	Schéma représentant les différents processus physiologiques activés durant la production d’un énoncé. . . . .	156
5.4	Signal acoustique et spectrogramme du logatome [ama] prononcé par un locuteur féminin. . . . .	157

5.5	Signal acoustique, spectrogramme, schémas de l'activité musculaire du levator palatini, mouvements du voile du palais, ouverture du port vélo-pharyngé, ouverture du conduit buccal, répartition des flux d'air oral et nasal durant la production du logatome [ama] par une locutrice. Les tracés schématiques hors Activité musculaire qui est déduite d'après les travaux de [Bell-Berti 1976], sont liés à une synthèse de mes précédentes recherches ( [Amelot 2004a] ; [Amelot 2007a] ; [Amelot 2008] ; [Demasi 2016]). . . . .	159
5.6	Langues enregistrées en 2024 avec les instruments. . . . .	163
5.7	Exemple de données issues d'un scanner sur un patient et détourage de la cavité nasale avec les sinus. Affichage obtenu à partir du logiciel ITK-Snap d'après [Elmerich 2024a]. . . . .	166
5.8	A gauche illustration Maquette 3D de la voyelle /i/ ; à droite banc pour créer la source acoustique surmonté de la maquette 3D de /a/. . . . .	167
5.9	Exemple d'un sinus maxillaire gauche d'un locuteur obtenu à parti du Scanner et modélisé puis imprimé en 3D, l'ostium a été rajouté artificiellement. . . . .	167

# Liste des tableaux

3.1	Une typologie sommaire de la place des sons nasals dans les systèmes phonémiques, avec des indications de fréquence dans un large échantillon de langues du monde, d'après [Clements 2015]. . . . .	74
3.2	Logatomes constituant le corpus pour l'étude de la nasalité des diphtongues en portugais brésilien, d'après [Demasi 2019]. . . . .	82
3.3	Mesures de DAN et DAB pour l'ensemble des locuteurs, d'après [Amelot 2006a].	91
3.4	Moyenne, écart-type, médiane, minimum, maximum des scores de nasalance pour chaque type de stimulus du corpus, d'après [Fersing 2024]. . . . .	94
3.5	Type de phonation selon les débuts de syllabe et les tons. T = obstruente non aspirée dévoisée, Th = obstruente non voisée aspirée, D = obstruente voisée (non nasalisée), ND = occlusive pré-nasalise ou affriquée, S = sonorante, V = voyelle, d'après [Chirkova 2022]. . . . .	111
3.6	Valeurs calculées de la fréquence de résonance des sinus maxillaires droit et gauche de la tête momifiée d'Henri IV. . . . .	126
4.1	Tableau regroupant les enseignements principaux effectués en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) (2003-2005). . . . .	132
4.2	Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2011 et 2014. . . . .	132
4.3	Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2015 et 2023. . . . .	133
4.4	Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2023 et 2025. . . . .	133
4.5	Tableau récapitulatif de l'ensemble des étudiants de Master que j'ai encadrés ou co-encadrés. . . . .	136
4.6	Tableau récapitulatif des stagiaires que j'ai encadrés depuis 2015. . . . .	137
4.7	Tableau récapitulatif des projets financés auxquels j'ai participé. . . . .	142
4.8	Tableau reprenant les différents partenaires de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) Full3DTalkingHead. . . . .	145
4.9	Tableau reprenant les différents partenaires de l'ANR PhoTon. . . . .	147
4.10	Répartition des personnes en fonction des trois groupes de travail. . . . .	151



# Avant-Propos

*« Tout ce je sais, c'est que je ne  
sais rien »,*

---

Socrate

En 2004, je mettais le point final à mon travail de thèse, ([ici](#)). Le titre se voulait ambitieux : « Étude aérodynamique, fibroscopique, acoustique et perceptive des voyelles nasales du français », [[Amelot 2004a](#)]. Ce travail avait pour objectif de trouver les liens entre les différents aspects de la nasalité. Vingt ans plus tard, les mêmes questionnements se posent encore, et les expérimentations que j'ai pu mener autour du problème de la nasalité, seule, avec des collègues ou des étudiants, m'ont apporté quelques affirmations que je présente dans ce document de synthèse.

Beaucoup des expérimentations menées ont surtout été un point de départ d'interrogations qui n'ont fait que croître intellectuellement toutes ces années. En confrontant le problème de la nasalité à différents protocoles, à des langues autres que le français, comme le portugais brésilien ou des langues rares comme le baima et l'ikema qui comportent des singularités phonétiques, à l'étude de certaines pathologies, et à des analyses à partir de maquettes statiques tridimensionnelles pour exciter acoustiquement le conduit vocal, j'ai élargi mon champ de recherche démarré durant ma thèse.

Le développement instrumental m'a aussi ouvert le champ à d'autres thématiques de recherche plus éloignées sur les comportements laryngés ou encore sur le chant.

Cette habilitation à diriger les recherches est pour moi l'occasion d'expliquer mes démarches, les instrumentations et les différents protocoles expérimentaux que j'ai mis en place pour essayer de mieux appréhender les processus physiologiques liés à la production de la parole. Ceux-ci impliquent la description des mouvements du voile du palais lors de la production des phonèmes nasals et le lien de l'ouverture du port vélopharyngé avec les autres articulateurs. Je me suis aussi intéressée à modéliser en trois dimensions les sinus pour calculer leur impact sur l'acoustique et faire ainsi le lien avec les pathologies impliquant une mauvaise irrigation des sinus. Enfin, j'ai développé ou participé à développer des instrumentations et déployer des expérimentations permettant d'analyser l'ouverture glottique durant la production des certains phonèmes.

Toutes ces démarches, le développement d'instruments et le déploiement de protocoles expérimentaux ont pour but de faire le lien entre les différentes étapes, phonologique, physiologique, articulatoire, aérodynamique, acoustique et perceptive de la production d'un phonème. Il n'existe pas une relation linéaire entre ces différents processus et c'est d'autant plus vrai

pour les phénomènes liés à la nasalité. L'abaissement du voile du palais, induit par une activité musculaire est un événement nécessaire à la production de la nasalité mais non suffisant à la production du flux d'air nasal. L'existence d'un flux nasal n'est pas nécessaire au couplage oro-nasal (on peut créer des sons nasals sans flux nasal). Le couplage oro-nasal est nécessaire à la modification acoustique du signal oral, qui est à l'origine de la nasalité. Une fois tous ces processus mis en place, quel est le statut de la perception du phonème nasal lui-même ?

Étudier l'ensemble de ces aspects semble fondamental à la compréhension des mécanismes langagiers. Les recherches qui jalonnent ce travail ont été l'objet de nombreuses expériences, de rencontres, d'invitations, et de longues discussions entre collègues. Celles-ci n'ont pas toujours abouti à une solution concrète aux problèmes, mais elles ont toujours été très enrichissantes et ont fait progresser la réflexion. J'ai eu l'opportunité depuis mon travail de thèse de collaborer avec Jacqueline Vaissière et Shinji Maeda, qui ont toujours été là pour moi et qui pris le temps de m'apprendre tant de choses que ce soit en acoustique, en aérodynamique, et en physiologie. Shinji Maeda a même pris le temps de m'enseigner les bases de l'électronique nécessaires aux instrumentations. Ma formation a été complétée quand Kiyoshi Honda est venu au LPP par l'intermédiaire du projet Établissement d'une Plateforme pour l'Analyse de la Parole avec Visualisation et Instrumentation [ESAPVI](#). Le rapport du projet est disponible ([ici](#)).

Au début de ma thèse, je me suis intéressée à la parole spontanée. J'ai régulièrement été invitée à Kiel par le professeur Klaus Kohler, qui m'a donné accès à des bases de données me permettant de me familiariser avec les phénomènes, il me semblait important de tenter d'expliquer ces phénomènes de réduction en cherchant à comprendre les mécanismes physiologiques sous-jacents et notamment voir ce qui se passe aérodynamiquement dans la production des phonèmes pour aboutir à ces réductions. La découverte de l'aérodynamique m'a donné l'opportunité d'aller étudier un semestre à Berkeley avec le professeur John Ohala. Ce dernier m'a permis de mieux comprendre les enjeux de la physiologie et de l'aérodynamique dans la parole. Un séjour au laboratoire d'Aix-Marseille, auprès de Bernard Teston m'a permis d'apprendre à mieux interpréter les données aérodynamiques de la parole. Plusieurs enregistrements faits à Bruxelles avec Didier Demolin m'ont permis d'appréhender les enregistrements de pression et faire le lien avec les débits. Lise Crevier-Buchman m'a ouvert les portes de son cabinet à l'hôpital Européen Georges Pompidou Hôpital Européen Georges Pompidou ([HEGP](#)), et nous avons pu faire grâce elle beaucoup de nos expériences et tester les limites des données « multi-instruments » invasives et non-invasives. Solange Rossato à Grenoble, a eu la gentillesse de me faire confiance et j'ai pu me former à la prise de données à partir d'un articulographe électromagnétique Articulographe Electromagnétique ([EMA](#)). Yves Laprie à Nancy, m'a montré l'importance des données Imagerie par Résonance Magnétique Imagerie par Résonance Magnétique ([IRM](#)) pour la parole et a eu la patience de m'expliquer comment appréhender la modélisation articuloire et acoustique.

Mon parcours professionnel est jalonné de rencontres qui m'ont apporté tellement de choses. Merci à toutes ces personnes qui ont pris beaucoup de leur temps pour partager un peu de leur passion et m'expliquer tant de choses qui me sont toujours tellement utiles dans mon parcours professionnel quotidien.

# Introduction

*La représentation des sons de parole est une préoccupation très ancienne. L'introduction retrace rapidement les premières représentations de parole, jusqu'à la naissance de la phonétique expérimentale introduite par Rousselot. Elle établit le parallèle entre la représentation graphique des phénomènes physiologiques de parole par Rousselot et leurs propriétés acoustiques, ce qui constitue le fondement de mes travaux de recherche.*

Le premier philosophe à s'être intéressé aux phénomènes sonores fut qu'Aristote, qui avait déjà une perception correcte du lien entre le son et le mouvement. Au XVème siècle, Marin Mersenne et Galileo Galilei (Galilée) se concentrèrent sur la nature du son et de son mouvement. Mersenne se préoccupa plus particulièrement de l'acoustique musicale [Mersenne 1636]. Ils se partagèrent la découverte de la corrélation entre la hauteur d'un son et le nombre de vibrations. Leurs travaux furent transformés en formules mathématiques d'abord par Daniel Bernoulli en 1727 puis par Joseph Fourier en 1811. Mersenne fut également pionnier de la notion d'expérimentation : il souhaitait inventer des méthodes d'essais et de tests, pour que les expériences soient objectives et reproductibles. Le passage des formules mathématiques à la représentation graphique est impulsé par Thomas Young en 1807, physicien anglais qui fut le premier à représenter graphiquement les vibrations d'un son à ses étudiants [Young 1807]. Jules Etienne Marey décrit le procédé de Young comme étant également le point de départ de la chronophotographie [Marey 1878] p.110, qui consistait à prendre plusieurs photos dans un intervalle de temps très court. Cela constitue le point de départ de la représentation des phénomènes articulatoires de la parole tels que nous les connaissons actuellement. Cette méthode a notamment été utilisée par Hector-Victor Marichelle pour décrire les sons à partir de la lecture labiale [Marichelle 1902]. Cette approche de la description des sons de la parole ne fut pas retenue par le précurseur de la phonétique expérimentale, Pierre Jean Rousselot, plus connu sous le nom d'abbé Rousselot, qui lui préférera les analyses via le kymographe et les inscripteurs des mouvements des organes de parole.

## 0.1 La première représentation des sons de parole

Au milieu du XIXème siècle, les travaux de Marey font grand bruit au Collège de France. Il propose une méthode de représentation graphique de l'ensemble des phénomènes expérimentaux, physiologiques et biologiques [Marey 1868]. Une délégation de la Société de linguistique de Paris, conduite par son président Léon Vaisse, s'est rendue au Collège de France pour savoir si cette nouvelle méthode pouvait s'appliquer à la représentation des sons de la parole. Marey confia cette tâche à l'un de ses étudiants, Charles Léopold Rosapelly qui fut assisté par Louis

Havet, alors secrétaire de la Société Linguistique de Paris. Nous leur devons les premières représentations graphiques des mouvements des lèvres, des vibrations du larynx et des mouvements indirects du voile du palais [Rosapelly 1876].

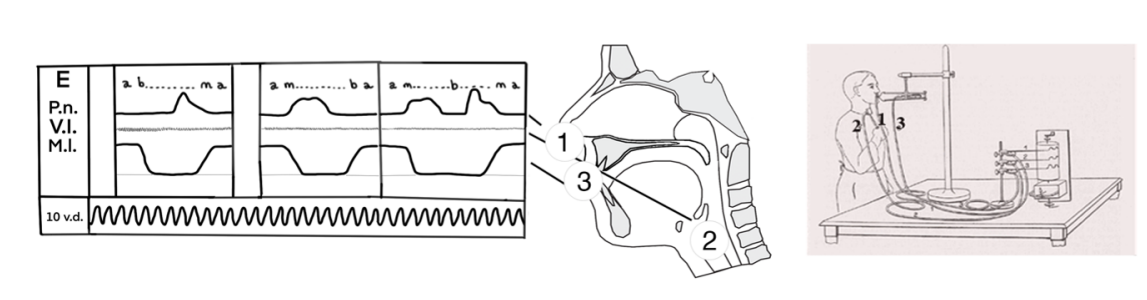


FIGURE 1 – Première représentation graphique des phénomènes de parole d’après [Rosapelly 1876], P-125, P.n. : Pression nasale, V.l. : Vibrations laryngées et M.l. : Mouvements des lèvres.

Marey et Rosapelly s’intéressèrent un temps aux sons de parole, ce qui se traduit pour Marey par la publication de plusieurs articles sur les instruments utilisés pour l’inscription des phénomènes phonétiques, comme les mouvements des lèvres durant la production de certaines voyelles [Marey 1898] où il distinguait déjà les méthodes directes et indirectes. Rosapelly délaissa un temps son poste de médecin spécialiste de la digestion à la Salpêtrière pour se consacrer à l’étude des sons de parole et travaillera rapidement à l’amélioration des instruments exploratoires avec Rousselot [Teston 2010].

## 0.2 De la description des sons du langage à la phonétique expérimentale

Les premières études « phonétiques » décrivant les sons de parole datent de deux mille ans : les Prâticâkya qui sont des hymnes Védiques (chants sacrés), sont minutieusement décrits. Le but était de bien prononcer les textes sacrés car on attribuait à leur récitation des effets miraculeux qu’aurait détruits une seule faute commise en prononçant ces précieuses paroles [Baudry 1864].

En France, comme dans d’autres pays, l’étude de la prononciation de la langue est liée à la grammaire. C’est ainsi qu’en 1680, le père Laurent Chifflet, dans la seconde partie de son ouvrage *Essay d’une parfaite grammaire de la langue française*, fut pionnier dans la description de la « bonne » prononciation du français [Chifflet 1680]. La grammaire comparée étudie simultanément la syntaxe et la prononciation de la langue. Il faut attendre le milieu du XIX<sup>ème</sup> et la publication de Fran Miklošič en 1852 pour trouver une distinction claire entre « Grammatik » et « Lautlehre » [Miklošič 1852]. Le mot allemand « Lautlehre » est à l’origine du mot « phonétique » et de sa confusion avec le mot « phonologie ». Rousselot en page 2 de son ouvrage *Principes de phonétique expérimentale* (1897) indiquera dans une note de bas de page :

*« La phonétique doit son nom à MM. Bréal et Baudry. Les introducteurs de cette science dans notre pays ont longtemps hésité entre les*

*deux appellations phonétique et phonologie* ». [Rousselot 1897] p.2

Frédéric Baudry utilisera le terme de phonétique qu'il définira comme « ...l'observation minutieuse des variations de sons que le voisinage d'une lettre fait subir à une autre variation... » [Baudry 1864], p. 9). Baudry était le maître de Michel Bréal et pourtant en 1866, quand celui-ci fournit sa traduction de l'ouvrage de Franz Bopp, il introduit le mot phonologie pour évoquer les lois phoniques et le mot phonétique n'y apparaît pas [Bopp 1866].

C'est pourtant à cette époque que le terme de phonologie sera, pour un temps, abandonné. Le terme de « phonétique » sera mis à l'honneur par Rousselot qui en fera une « science des sons du langage » et la nommera « phonétique expérimentale ». Il voit en la phonétique le point de départ d'une phonétique physiologique qu'il nommera « expérimentale » à partir de 1889, il s'en explique dans son ouvrage « Principes de phonétique expérimentale » [Rousselot 1897]. Rousselot, qui avait pour maître Gaston Paris, pensait que son oreille ne suffisait pas pour une transcription parfaite des sons. Comme sa thèse se voulait être une description des sons du patois de Celledrouin, il souhaitait être le plus précis possible.

*« Une expérimentation mécanique, me dit M. Gaston Paris, peut seule donner la sécurité. On a fait des essais dans le laboratoire de Marey. Voyez. »* [Rousselot 1922], p. 7

Albert Dauzat explique que le mot « expérimental » associé au mot « phonétique » a été vivement critiqué [Dauzat 1908]. Cette distinction entre phonétique et phonologie a souvent divisé le monde scientifique. Ferdinand Carton, dans la préface du livre « Un siècle de phonétique expérimentale » retrace les discussions et les changements opérés autour de cette terminologie [Vilain 2010]. Quoi qu'il en soit, il est clair qu'en parlant de phonétique expérimentale, Rousselot voulait faire de cette nouvelle approche, une science à part entière au même titre que la physique ou la biologie. Quand on sait toutes les disciplines auxquelles Rousselot s'est initié pour étudier les sons de parole, on comprend pourquoi il tenait tant à cette appellation. Rousselot a en effet suivi les cours de physique de son ami Edouard Branly, il s'intéresse aux instruments de Rudolph Koenig, il rencontre en 1885, Charles Verdin, le constructeur des instruments de Marey, ainsi que Rosapelly qui l'initie aux principes de l'inscription des phénomènes phonétiques. Rousselot a utilisé des instrumentations déjà existantes. Il est également connu pour en avoir construit lui-même. Avec l'aide de Jules Deseilligny, il crée en 1886 un premier appareil qu'il nommera « Inscription électrique de la parole », et qui sera le point de départ du kymographe de Rousselot. Le kymographe comme l'ont pensé Marey et Rousselot, a connu plusieurs évolutions et sera utilisé dans les laboratoires de phonétique jusque dans les années 60 [Teston 2010].

Rousselot (1897), dans son ouvrage Principes de Phonétique Expérimentale, écrit qu'un phonéticien doit être à la fois observateur et historien. En listant les différents chapitres de son ouvrage, on se rend compte qu'il nomme tous les champs qui incombent à cette science nouvelle : éléments acoustiques de la parole, moyens naturels d'observation et d'expérimentation, moyens artificiels d'expérimentation, analyse physique de la parole, organes de la parole, analyse physiologique de la parole, application de problèmes de phonétique, emploi de la méthode expérimentale dans l'enseignement des langues étrangères et correction des vices de prononciation [Rousselot 1897]. On ne peut douter en reprenant toute cette liste de la volonté de

Rousselot de faire de la phonétique une science à part entière et complète.

Même si on doit à Rousselot le terme d'expérimental, la description physique des sons n'en était pas à ses débuts. La description des ondes sonores avait déjà le vent en poupe : Jean-Marie-Constant Duhamel développe en 1840 le vibrographe et montre des tracés confirmant le lien entre vibrations et hauteur. Koenig, qui séjourne à Paris autour de 1850 va révolutionner les mesures d'acoustique avec ses appareils qui permettront de mesurer la hauteur, le timbre, la propagation et les vibrations des sons [Koenig 1889]. Marichelle profite de l'engouement pour le phonographe et des prémisses de la chronophotographie pour décrire les voyelles du français de manière révolutionnaire associant les sons et les images des lèvres [Marichelle 1897]. René Marage est le premier à faire une représentation modélisée statique des voyelles du français [Marage 1900].

### 0.3 Instruments et expérimentations au service de la recherche en phonétique

La phonétique expérimentale comme voulue par Rousselot a donné un apport fondamental à la description des sons de parole. Les sons de parole sont maintenant décrits du point de vue physiologie, articulatoire, acoustique et perceptif. Elle a permis aux phonéticiens de se rapprocher des sciences de l'ingénieur. Dans l'ouvrage de 1897, on constate que Rousselot était en mesure d'étudier graphiquement l'ensemble des organes (lèvres, langue, mâchoire, voile du palais, larynx) utilisés dans la production de parole et d'en faire une description acoustique fine. Quand il décrit les sons de parole, il fait une distinction qui me semble judicieuse et que je reprendrai dans ce document : 1. la méthode graphique qui s'intéresse à la fonction physique et physiologique et 2. la méthode acoustique [Rousselot 1897].

A la mort de Rousselot en 1924, la phonétique expérimentale, à Paris, subit une période de vaches maigres, Jean Poirot considéré comme un prodige de la phonétique expérimentale meurt la même année. Le successeur attendu de Rousselot, Jean-Marie Meunier meurt soudainement quatre ans plus tard. Le laboratoire de phonétique expérimental au Collège de France fermera ses portes dans la foulée, Joseph Chlumsky étant parti enseigner la phonétique à Prague et Adolphe Zünd-Burguet se consacrant à la rééducation avec son Gymnase de la voix. Adrien Millet succéda à Rousselot à l'Institut Catholique publie plusieurs ouvrages, mais n'a pas eu le rayonnement de son maître. On attendait beaucoup de l'Institut de Phonétique de Paris, connu sous le nom actuel d'Institut de Linguistique et de Phonétique Générales et Appliquées Institut de Linguistique et de Phonétique Générales et Appliquées (ILPGA), qui fut dirigé par Hubert Pernot à la suite de Poirot. Pernot occupé par le musée du son et par les enseignements, délaisse la phonétique expérimentale. La phonétique expérimentale comme voulue par Rousselot est en perte de vitesse à Paris. Le clou sera enfoncé à la nomination de Pierre Fouché, qui avait une « allergie » à la technologie et laissait Marguerite Durand un peu seule dans son laboratoire sans trop vraiment s'intéresser à ses recherches [Léon 2010].

Heureusement, Rousselot avait créé des émules et un engouement pour cette science nouvelle : des laboratoires de phonétique voyaient le jour un peu partout en France et dans le monde. Dans la continuité des travaux de Rousselot, on notera pour la France les apports de Maurice Grammont à Montpellier, où il décrit dans son traité de Phonétique toute l'importance des

instruments. Les travaux et les étudiants de Théodore Rosset permettront de maintenir la phonétique expérimentale à Grenoble, ou encore à Strasbourg grâce à Georges Straka.

La phonétique, en tant que science, doit beaucoup aux pathologies. Beaucoup de personnes œuvrant pour son développement étaient à l'origine enseignants à l'Institut National des Jeunes Sourds de Paris Institut National des Jeunes Sourds de Paris (INJS), comme Bréal. Et comment ne pas citer les travaux de Alexander Melville Bell (1858) lui-même professeur dans un institut pour les sourds [Bell 1858]. D'après Teston en 2009, l'apparition de la phonétique clinique coïncide, avec le développement de l'éducation à l'oralité des enfants sourds et des travaux de Jean-Conrad Amman au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, [Teston 2009]. Rousselot à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle avait compris l'intérêt scientifique de la parole pathologique pour la phonétique. Ses liens avec les cliniciens ont permis de développer la phonétique clinique. Suzanne Borel-Maisonny, une de ses étudiantes verra dans son enseignement le fondement de l'enseignement de l'orthophonie [Borel-Maisonny 1970]. À la suite de Suzanne Borel-Maisonny, deux cliniciens, dans la période contemporaine, Claude Chevré-Muller et Jean-Claude Lafon, ont participé au développement et à l'animation de la phonétique clinique.

Selon Rousselot en 1911 page 15 :

*« Et le titre d'expérimentale appliqué à une phonétique qui emploie ces procédés, ne peut lui être légitimement contesté. Et le serait-il, le nom d'instrumentale ne conviendrait pas. Car la phonétique expérimentale, on vient de le voir, ne limite point ses moyens d'action à l'emploi seul des appareils. Tout procédé qui lui permet de mieux connaître les sons du langage et de résoudre les multiples problèmes qu'elle se pose, fait partie de son arsenal : elle n'a qu'une ambition, se rapprocher le plus possible de son but et par tous les moyens qu'elle peut imaginer. » [Rousselot 1911]*

Après lecture de ce paragraphe, je pense que mes travaux se situent, le plus modestement du monde, dans la continuité des travaux de Rousselot. Je ne souhaite pas alimenter le débat sur le terme de phonétique expérimentale ; je lui préfère, comme Teston, le terme de phonétique instrumentale même s'il est un peu réducteur [Teston 2010]. Je montrerai dans ce document que j'utilise, dans le sillage de Rousselot et de bien d'autres chercheurs après lui, les méthodes graphique et acoustique pour décrire les sons de parole. Les instruments modernes apportent la possibilité de quantifier de grandes masses de données. La méthode graphique peut se découper de la même manière en analyse physiologique et physique des sons. Si l'on définit l'analyse physiologique comme la description de tous les organes impliqués dans la fonction de parole, j'ai privilégié l'analyse physiologique dans mes recherches. Et si par physique, on se réfère à la notion d'aérodynamique et d'acoustique, alors je pense que ces résultantes sont indissociables de la physiologie. La méthode acoustique qui, pour Rousselot, était l'évaluation et le contrôle des données par les diapasons, les résonateurs, les appareils de synthèse et les champs auditifs, a aussi bien évolué. L'informatique a contribué à rendre ce champ plus accessible à tous les chercheurs.

Ce document comprend cinq chapitres. Le premier chapitre est un résumé de mon environnement de travail comme ingénieur de recherche. Le deuxième chapitre est consacré au

développement d'instruments et l'élaboration de protocoles expérimentaux. De ce chapitre découle le troisième chapitre qui retrace les différentes recherches que j'ai menées avec ces mêmes instruments et protocoles. Le quatrième chapitre concerne le volet enseignement et direction d'étudiants ainsi que toutes mes activités transverses. Le cinquième chapitre donne un aperçu de mes projets de recherche et tient lieu de discussion générale.

# Chapitre 1 : Contexte

*J'ai été recrutée comme Ingénieur de Recherche en tant qu'expert en développement d'expérimentation (C1B42) au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et affectée au LPP en 2011. Ce chapitre va décrire mon environnement de travail au LPP ainsi que les différentes tâches que j'y effectue. Une partie de ce chapitre est également consacrée à l'histoire de la plateforme physiologique du laboratoire.*

## 1.1 Mon poste d'ingénieur de recherche au LPP

Avant même de parler de mes activités de recherches, d'enseignement et d'encadrement, il m'apparaît important de décrire les activités que j'exerce en lien avec le poste d'ingénieur de recherche que j'occupe actuellement. Mon curriculum vitae détaillé est accessible ([ici](#)).

Après ma thèse ([ici](#)), qui m'a permis de découvrir plusieurs techniques instrumentales utilisées en phonétique comme la fibroscopie et l'aérodynamique, j'ai obtenu un poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche [ATER](#) et trois contrats post-doctoraux pour lesquels j'ai été amenée à développer des instruments et des protocoles expérimentaux.

À la suite d'un concours externe, j'ai été recrutée au [CNRS](#) en 2011 comme Ingénieur de Recherche dans la branche d'activité professionnelle liée aux Sciences de l'Ingénieur et à l'Instrumentation Scientifique ([BAP C](#)). J'ai été affectée au [LPP](#) en décembre de la même année. La fiche de poste liée au concours mis en place pour ce poste était assez similaire à la fiche C1B22, réactualisée en [C1B42](#) par le [CNRS](#).

La mission principale pour laquelle j'ai été recrutée était liée au développement de la plateforme physiologique du [LPP](#), appelée Plateforme d'Étude Physiologique de la Parole [PEP2](#). Cette plateforme a vu le jour grâce à l'obtention d'un financement du [CNRS](#) pour un équipement mi-lourd par Jacqueline Vaissière en 2007.

La fiche de poste indiquait que l'ingénieur avait en charge d'assurer la conception, la mise en œuvre, l'utilisation et la maintenance de dispositifs expérimentaux spécialisés dans le domaine de la parole. L'ingénieur aura la responsabilité de la plateforme physiologique du [LPP](#) qui comprend des dispositifs permettant l'acquisition de données sur la production et la perception de la parole.

A mon arrivée sur le poste en 2011, mon rôle a donc été de gérer cette plateforme : 1. faire l'inventaire du matériel existant, 2. accroître le nombre d'instruments, 3. former les personnes qui en font la demande et 4. déployer des outils pour faciliter la synchronisation, l'acquisition

et l'analyse des données. On peut trouver sur le site du [LPP](#) des modes d'emploi, vidéos de présentation et certains scripts que j'ai mis en place en lien avec la plateforme physiologique du laboratoire ([ici](#)).

Au fil des années, mon activité au sein du laboratoire s'est diversifiée. L'arrivée, en 2020, d'un ingénieur de recherche en informatique ([BAP E](#)) m'a permis de me concentrer sur l'instrumentation, soulagée des activités de maintenance informatique et du site web. J'ai pu ainsi diversifier mes activités de recherche et augmenter significativement les développements expérimentaux en lien avec les analyses physiologiques et acoustiques de la voix et de la parole, et démarrer une nouvelle activité liée à la conception 3D assistée par ordinateur. En 2023, le directeur du [LPP](#), Cédric Gendrot et moi-même avons retravaillé quelque peu ma fiche de poste pour la rendre plus en adéquation avec les tâches qui me sont confiées actuellement. Ma fiche de poste détaillée et actualisée en 2023 est accessible ([ici](#)).

Un organigramme élaboré en 2023 ([ici](#)) donne un aperçu des différentes activités qui m'incombent pour l'année 2022-2023, année prise à titre d'exemple. Mes activités, en tant que personnel d'appui à la recherche, consistent majoritairement en le développement d'instruments et en le déploiement de protocoles expérimentaux pour aider les chercheurs, enseignants-chercheurs et étudiants à acquérir et exploiter des données de voix ou de parole.

Le deuxième chapitre de ce document sera dédié à la description de ces deux volets. Je décrirai dans le troisième chapitre mes activités de recherche, qui sont pour la plupart étroitement liées à mes fonctions d'ingénieur BAP C décrites dans le deuxième chapitre.

## 1.2 Le LPP et la plateforme physiologique

*Article de référence : Vaissière, Jacqueline, Kiyoshi Honda, Angélique Amelot, Shinji Maeda, et Lise Crevier-Buchman. « Multisensor Platform for Speech Physiology Research in a Phonetics Laboratory », [Vaissière 2010] The Phonetic Society of Japan, 2010 ([ici](#)).*

### 1.2.1 Le LPP

Le [LPP](#) est une Unité Mixte de Recherche (UMR7018 / Université Sorbonne Nouvelle), créée en 1973. Il est devenu une Unité Mixte de Recherche ([UMR](#)) en 2001. Depuis mon arrivée, le laboratoire a été dirigé alternativement par Jacqueline Vaissière et Annie Rialland, puis par Pierre Hallé, Cédric Gendrot et depuis septembre 2023 par Rachid Ridouane. Les professeurs de phonétique en place ont été successivement Jacqueline Vaissière (1990-2013), puis Didier Demolin (2014-2023) et actuellement Cédric Gendrot, et Claire Pillot. En 2023, le laboratoire accueille 52 membres : 9 chercheurs, 10 enseignants-chercheurs, 3 Ingénieurs et personnels Techniques d'Appui à la recherche ([ITA](#)) et 29 doctorants. L'organigramme structurel à la date du 1er juin 2023 est disponible ([ici](#)).

Le laboratoire est rattaché à la section 34 du [CNRS](#). Il est spécialisé dans la recherche et l'enseignement en phonétique, phonologie et le traitement automatique de la parole. Les recherches s'organisent autour de six grandes thématiques : 1. Langues du monde : description et modélisation, 2. phonétique clinique, voix et parole atypiques, 3. Variation, organisation temporelle et traitement de la parole, 4. Acquisition et multilinguisme, 5. Traitement automatique de la langue et linguistique de corpus et 6. Les fondements expérimentaux de la phonétique.

Ces thématiques ont été refondues à la suite du Haut Conseil d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Haut Conseil d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (HCERES) de 2024, les nouvelles thématiques pour le prochain quinquennat sont visibles sur le site web du LPP ([ici](#)).

Le laboratoire est hébergé sur deux sites : l'université Sorbonne Nouvelle ([ici](#)) et Hôpital Foch à Suresnes ([ici](#)) (anciennement à l'HEGP), dans le service des docteurs Stéphane Hans et Lise Crevier-Buchman, tous les deux titulaires d'un doctorat de Phonétique, soutenu au LPP. Jusqu'en 2022, le laboratoire était hébergé au 19 rue des Bernardins, 75005 Paris.

Un lieu chargé d'histoire, l'ILPGA et le LPP sont les héritiers des Archives de la parole créées par Ferdinand Brunot avec l'aide de l'industriel du phonographe et du cinéma Émile Pathé en 1911 à la Sorbonne. Ces archives ont constitué le cœur de l'Institut de Phonétique de l'Université de Paris qui est ensuite devenu le Laboratoire de Phonétique et des Archives de la Parole. En 1928, les archives et le laboratoire s'installent au 19 rue des Bernardins, 75005 Paris. Ancienne école de filles, le bâtiment a été prêté par la mairie de Paris, sous le nom de Musée de la Parole et du Geste ([ici](#)). Ces locaux furent une grande richesse patrimoniale pour notre unité et notre champ disciplinaire. J'ai contribué à l'élaboration d'un article qui retrace l'historique de l'ILPGA depuis 1911 jusqu'en 1950. L'article traite de l'histoire de l'institut et des enseignements qui y étaient dispensés. La seconde partie de cet article est consacrée à la carrière de Marguerite Durand, [Fougeron 2023], disponible ([ici](#)).

Les enseignants-chercheurs, les chercheurs, les ingénieurs et les étudiants se trouvaient tous au même endroit, rue des Bernardins. Cette proximité géographique créait un endroit très propice à la recherche en phonétique.

En juillet 2023, les portes du 19 rue des Bernardins se sont définitivement fermées. La partie enseignement de l'ILPGA a été déplacée sur le nouveau campus Nation de l'Université Sorbonne Nouvelle. Le LPP a déménagé à la Maison de la Recherche MDR 4 rue des Irlandais, 75005 Paris. Ce déménagement fut pour moi le point de départ d'une nouvelle activité de recherche passionnante en collaboration avec Didier Demolin que je décris dans le chapitre 4.

### 1.2.2 Historique de la plateforme du LPP

En 2008, le LPP, alors sous la direction de Jacqueline Vaissière, s'est vu confier par le CNRS la constitution d'une plateforme physiologique. Nommée PEP2, cette plateforme a pu voir le jour via l'obtention d'un équipement «mi-lourd» [Vaissière 2007]. Il s'agissait de créer une plateforme technologique pour l'étude acoustique et physiologique de la parole normale et pathologique.

Un article dont je suis coauteur, rédigé en 2010, présente les premiers instruments constituant cette plateforme [Vincent 2010] disponible ([ici](#)). La figure 1.1 présente les neuf premiers instruments à l'origine de PEP2.

En 2010, une chaire d'excellence senior a permis la venue de Kiyoshi Honda au LPP, ESAPVI. Kiyoshi Honda a une longue expérience de la phonétique clinique au moyen de techniques de visualisation et d'instrumentation. Il fut chef de département de l'Imagerie biophysique aux Laboratoires des Sciences de l'Information Humaine d'Advanced Telecommunication Research Institut (ATR) Institut, (Kyoto, Japon). Il est spécialiste réputé en phonétique instrumentale et expérimentale. Il souhaitait travailler en profitant de son statut de médecin Otorhinolaryngologiste (ORL) et de ses expériences sur la phonétique instrumentale, dans un



FIGURE 1.1 – Les premiers instruments constituant la plateforme PEP2 (Vincent et al., 2010 : 4).

triple milieu à la fois clinique, phonétique et technique que représente le LPP.

Cette chaire a permis l’enrichissement instrumental de la plateforme. Quatre points sont à noter pour situer le contexte de ce contrat et les avancées réalisées grâce à celui-ci : 1. la mise à disposition, de la communauté des chercheurs linguistes et des praticiens, de données acoustiques, aérodynamiques, physiologiques, articulatoires et perceptives comme condition préalable à de véritables progrès dans le domaine de la parole ; 2. le caractère fondamentalement multi-paramétrique de la prise de ces données ; 3. la nécessité du caractère non invasif de certaines instrumentations ; 4. la particularité des besoins et du contexte du LPP.

Le côté technique du projet a été élaboré conjointement par Kiyoshi Honda, Shinji Maeda et sept participants, dont moi :

- **Personnel technique** : Angélique Amelot (ingénieur), Coralie Vincent (ingénieur), Gwenaëlle Lo Bué (gestionnaire) pour la gestion du budget et le recrutement personnel ;
- **Médecins diplômés de phonétique (niveau thèse)** : Lise Crevier-Buchman (ex-thésard LPP, CNRS et médecin ORL à l’HEGP), Stéphane Hans (ex-thésard LPP, médecin ORL à l’HEGP). Les docteurs Lise Crevier-Buchman et Stéphane Hans de HEGP dirigent la partie clinique du projet de visualisation laryngée par fibroscopie à grande vitesse et de mesure aérodynamique de la parole par pneumotachographe ;
- **Spécialiste de la parole** : Shinji Maeda (CNRS - France Télécom), Jacqueline Vaissière (Professeur, directeur du LPP. Jacqueline Vaissière avait été chargée par Shinji Maeda et Kiyoshi Honda d’exprimer les besoins phonétiques ;
- **Ingénieur** : Van Minh Nguyen (génie électrique, 6 mois à temps plein à partir de juin 2010) pour l’amélioration du circuit de photoglottographie d’origine pour atteindre un rapport signal/bruit plus élevé.

Pour ce projet, Kiyoshi Honda est à l’origine du développement de sept tâches. La description complète des activités est disponible dans le résumé du rapport d’ESAPVI, disponible ([ici](#)). Les tâches sur lesquelles j’ai collaboré sont indiquées en gras et seront décrites plus en détails dans le chapitre suivant :

- Tâche 1 : Guide de la lumière pour la vidéo à haute vitesse avec un nasolaryngoscope. Light guide for high-speed video with nasolaryngoscope ;
- **Tâche 2 : Amélioration de l'éclairage extérieur et photoglottographie de détection. Refinement of external lighting and sensing photoglottography ;**
- Tâche 3 : Mise au point de techniques d'IRM. Development of dynamic magnetic resonance imaging (cine-MRI) techniques ;
- Tâche 4 : Électromyographie de surface (EMGs) avec une électrode d'aspiration sur mesure. Surface electromyography (sEMG) with a custom suction electrode ;
- Tâche 5 : Affinement de la sono-nasographie (SNG) à l'aide d'un microphone à murmure non audible
- **Tâche 6 : Raffinement du masque de pneumotachographe pour la mesure du débit oral et nasal. Refinement of pneumotachograph mask for oral and nasal flow measurement ;**
- **Tâche 7 (liée à la tâche 6) : Protocole et méthode pour mesurer la pression sous-glottique. Protocole/method for subglottal air pressure measurement with plethysmograph.**

Un article dont je suis coauteur a été publié à la suite de ce projet pour valoriser la plateforme [Vaissière 2010], disponible ([ici](#)).

### 1.2.3 La plateforme du LPP en 2024

En 2023, après l'obtention : 1. un contrat mi-lourd, 2. du projet [ESAPVI](#), 3. du Labex-EFL (Empirical Foundations of Linguistics), avec notamment l'axe 6 : Acoustic and Physiological Data for Multi-sensor Investigation of Normal Speech que j'ai codirigé puis dirigé de 2009 à 2018, 4. du projet européen [i-Treasure](#), 5. des [ANR Artspeech](#) et [Full3DTalkingHead](#) (dont je suis responsable scientifique pour le [LPP](#)), 6. de deux contrats de valorisation : « Les modélisations tridimensionnelles pour la comprendre la production des sons du langage » et « Distribution de l'AeroMask : système d'acquisition de données aérodynamiques et acoustiques en simultané », (dont je suis coordinateur) et 7. d'un projet innovant (« La compréhension du rôle des cavités nasales et des sinus dans la parole : un apport majeur pour la nasalité ») obtenu par Amélie Elmerich, qui a permis les tests, l'élaboration et l'achat de nouveaux instruments, la plateforme physiologique du [LPP](#) est constituée des instruments présentés dans la Figure 3. Cette figure permet de schématiser la plateforme du [LPP](#) et montre que la richesse de celle-ci qui réside notamment dans le fait que chaque organe de parole peut être exploré :

- Chaque organe participant à la production de la parole peut être étudié à partir d'un ou plusieurs instruments ;
- Plusieurs instruments disponibles uniquement au [LPP](#) ;
- La plateforme comporte des instruments invasifs et non invasifs, il est aisé de choisir de faire son étude avec l'un ou l'autre ;
- Il y a une bonne répartition entre les instruments permettant une observation directe et ceux impliquant une observation indirecte.

Du point de vue de l'instrumentation, cette plateforme présente une originalité, car elle intègre des capteurs aux principes physiques variés et des objets de mesure complémentaires.

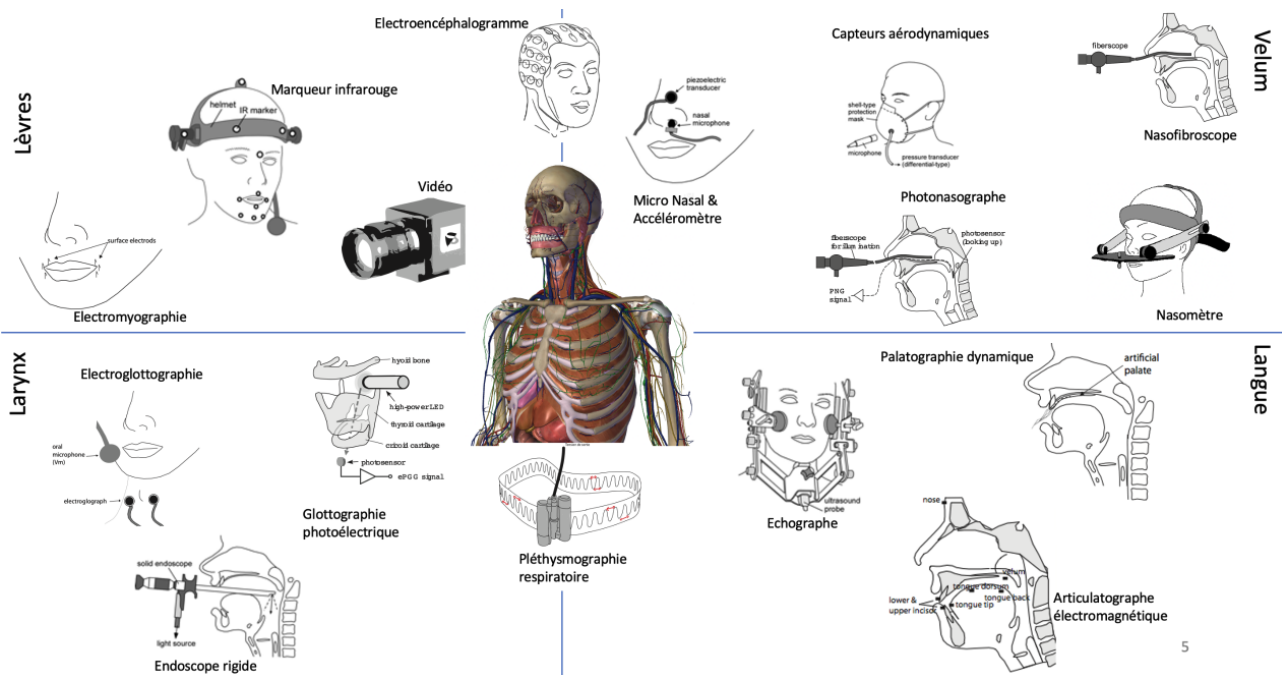


FIGURE 1.2 – Instruments composant la plateforme physiologique du LPP et dont j’ai la responsabilité.

Actuellement, les instruments de la plateforme sont localisés à deux endroits : à la MDR et à l’hôpital Foch. Les techniques d’instrumentation non invasives sont à la MDR, ouvertes à un large public. Les techniques peu ou plus invasives, couramment utilisées dans le contexte hospitalier à des fins de diagnostic, sont disponibles pour la recherche des membres du LPP et de leurs associés, et sont situées à l’hôpital Foch. Elles sont réalisées sous la supervision des membres de l’équipe qui sont également praticiens hospitaliers, comme Lise Crevier-Buchman et Stéphane Hans.

J’ai développé ou contribué à développer certaines des instrumentations présenté dans la figure ci-dessus. L’ensemble sera décrit dans le chapitre suivant.

## Chapitre 2 : Développement d'instruments et de protocoles expérimentaux

*Dans ce chapitre deux, je présente les instruments sur lesquels j'ai travaillé pour les mettre à la disposition des chercheurs ainsi que les protocoles que j'ai mis en place pour les assister dans leur acquisition de données. J'ai développé un instrument : le PNG et j'ai participé au développement l'ePGG et l'AeroMask. Le PNG est un instrument invasif qui permet d'évaluer l'ouverture du port vélopharyngé. J'ai développé deux versions du PNG, l'une basée sur une ampoule en tungstène et l'autre utilisant la lumière froide d'un nasofibroscope. L'ePGG est un système non invasif qui permet de prendre des mesures d'ouverture de la glotte en continu pendant la parole. J'ai contribué à la mise en place des tests de validation et a travaillé à l'amélioration du système de fixation des capteurs et à l'utilisation de capteurs plus sensibles. L'AeroMask est un masque acoustiquement transparent qui permet d'enregistrer le flux et la pression d'air d'un locuteur de manière simultanée avec la pression acoustique. J'ai contribué à l'amélioration de l'étanchéité du masque, à la création d'une séparation pour isoler le flux d'air oral et nasal, au développement de logiciels d'acquisition et de visualisation des données. L'ensemble de ces développements a été publié dans de nombreux articles scientifiques. Les instruments décrits ici sont assez uniques dans notre communauté et apportent des informations précieuses pour l'étude de la parole et de la production vocale. Je continue à développer et à améliorer ces instruments afin de les rendre plus performants et accessibles à une plus large communauté de chercheurs. Mon rôle d'ingénieur de recherche consiste également à mettre en place ces protocoles expérimentaux et outils informatiques adaptés aux besoins des projets du laboratoire. En tant que personnel d'appui à la recherche, j'ai développé divers protocoles expérimentaux et scripts informatiques pour répondre aux besoins des chercheurs et des étudiants du laboratoire. J'ai notamment adapté et amélioré le "Nasomètre", un système de mesure de la nasalité, en collaboration avec des orthophonistes. J'ai également comparé différentes techniques de mesure de la nasalité à l'aide d'accéléromètres et de microphones. Pour l'analyse de données articulatoires, j'ai conçu des scripts Matlab permettant de traiter les mouvements des lèvres et de la langue. J'ai développé un script Matlab pour visualiser et analyser les signaux acoustiques oraux et nasaux, mettant en évidence des différences chez certains patients. J'ai créé un script Matlab permettant d'aligner des données audio et vidéo synchronisées, utilisé notamment pour étudier l'articulation des voyelles nasales par des apprenants chinois. J'ai aussi conçu un script de détection de l'aire inter-labiale à partir d'images vidéo. Mes scripts sont régulièrement utilisés par les étudiants et chercheurs du laboratoire, et certains sont disponibles en open source. J'envisage de développer des versions Python de ces scripts afin de les rendre plus accessibles. Enfin depuis 2022, après la découverte fortuite d'instruments utilisés en phonétique expérimentale à la fin du XIXème siècle à l'institut de phonétique de Paris, je me suis lancée dans la restauration et la valorisation de ce patrimoine scientifique.*

Comme indiqué dans le chapitre 1, mes activités sont scindées entre la recherche, le développement d'instruments et la mise en place de protocoles expérimentaux. Dans ce chapitre

2, je vais détailler mes apports instrumentaux et expérimentaux en lien avec les thématiques scientifiques du laboratoire. L'ensemble des instrumentations et des expérimentations que je vais décrire ici est visible sur mon [portfolio](#). Ce dernier m'a permis d'illustrer la plupart des éléments décrits dans ce chapitre par des photos et des démonstrations vidéos. Il contient également certains scripts avec leur mode d'emploi (libres de téléchargement) que j'ai implémentés pour les protocoles expérimentaux.

## 2.1 Développement d'instruments

### 2.1.1 Le PhotoNasographe (PNG)

*Article de référence : Amelot, Angélique. « Dispositifs d'imagerie pour l'observation de l'activité vélopharyngée », 65. Hermès, 2009, [Amelot 2009], disponible ([ici](#)).*

#### 2.1.1.1 Mon implication

En 2005, j'ai doté la plateforme physiologique du LPP de cette instrumentation. Ce premier développement m'a permis d'acquérir des bases en électronique. J'ai conçu l'instrument, et j'ai appris à mes dépens les subtilités de la soudure et de l'électronique sous la supervision toujours bienveillante de Shinji Maeda. J'ai ensuite mis en place le banc de test, la calibration et l'ensemble des scripts informatiques nécessaires à son utilisation. Le PNG est une instrumentation invasive qui évalue l'ouverture du port vélopharyngé. Son principe de fonctionnement repose sur la détection de la lumière. Il consiste en une source de lumière placée au-dessus du port vélopharyngé dans la cavité nasale et d'un photodétecteur situé en dessous au niveau du pharynx (ou inversement).

#### 2.1.1.2 Mes collaborations

Shinji Maeda, Kiyoshi Honda, Patricia Basset, Jacqueline Vaissière et Lise Crevier-Buchman (pour les prises de données en milieu hospitalier).

#### 2.1.1.3 Description de l'instrument

A la fin de ma thèse, je me suis intéressée au système de photodétection utilisé par John Ohala [Ohala 1971]. Cet instrument, nommé par son inventeur le Photo-Naso-graph, permet d'observer l'espace d'ouverture et de fermeture du port vélopharyngé. L'ouverture du port vélopharyngé est évaluée par l'intensité de la lumière qui passe à travers le port vélaire (transillumination vélaire). Nous avons élaboré deux systèmes : l'un similaire à de John Ohala (1971) et l'autre ressemble à celui de RM Dalston (1982), ([Dalston 1982]; [Ohala 1971]). Les deux systèmes se distinguent par la source de lumière utilisée. Sur le principe de l'instrument décrit par Ohala et celui décrit par Dalston, j'ai construit deux systèmes.

**2.1.1.3.1 Le Photonasographe1** Le premier système que l'on peut nommer PNG1 est composé d'un tube flexible transparent (gaine de nasofibroscope) où sont intégrés de deux composants : une source de lumière et un photo-capteur. Il est introduit dans l'une des narines, ce système et est similaire à celui de John Ohala, 1971. L'ampoule miniature en tungstène

illumine la cavité au-dessus du vélum tandis qu'un petit photo-capteur capture la lumière lorsque l'ouverture vélaire est effective.

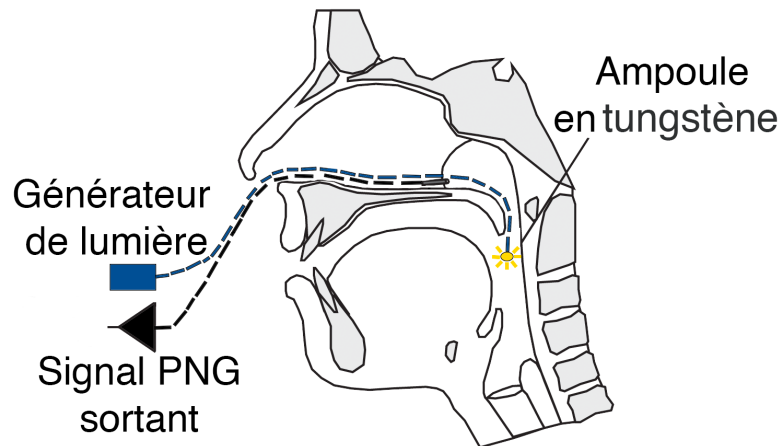


FIGURE 2.1 – Représentation du PNG1, figure inspirée des descriptions que l'on trouve dans Maeda et al., 2008, [Maeda 2008].

**2.1.1.3.2 Le Photonasographe2** Pour le second, que l'on peut nommer PNG2, l'ampoule miniature est remplacée par la lumière froide du nasofibroscope. Le nasofibroscope est utilisé pour éclairer la cavité nasale, et un tube séparé avec un photo-capteur, placé dans le pharynx, détecte la lumière lorsque le port vélopharyngé est ouvert. Cette méthode utilisant la nasofibroscopie permet l'enregistrement vidéo en simultané avec les mouvements vélaire (détection du point le plus élevé du voile du palais à partir de la cavité nasale).

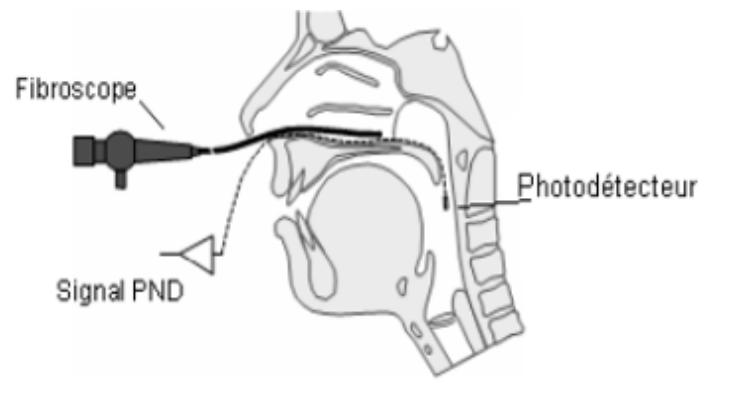


FIGURE 2.2 – Représentation du PNG2, [Vaissière 2010].

#### 2.1.1.4 Mon apport

Afin de décrire le travail que j'ai effectué pour ces instruments, je résume deux publications majeures ( [Amelot 2009] ; [Maeda 2008]), disponibles ([ici](#)) et ([ici](#)).

### 2.1.1.5 Fiche technique

Le PNG1 et le PNG2 ont en commun le modèle de détecteur de lumière (LS400 de Texas instrument). Ce capteur a l'avantage d'être d'un diamètre très petit (1,5 mm). Son extrémité est terminée par une partie bombée ce qui peut réduire l'angle de détection. Dans la partie 2.1.1.8, je décrirai l'importance de l'angle dans pour l'ouverture du port vélopharyngé.

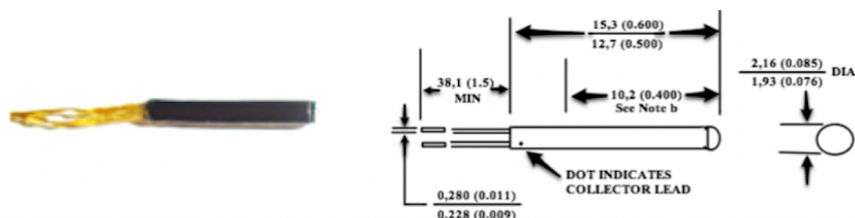


FIGURE 2.3 – Le détecteur de lumière LS400 de Texas instrument avec ses dimensions, [Maeda 2008].

Pour PNG1, similaire au système de Ohala, le détecteur de lumière est couplé à une ampoule miniature en tungstène. Le détecteur de lumière et l'ampoule sont insérés dans une gaine flexible transparente utilisée généralement avec le fibroscope pour l'hygiène lors de la passation des examens médicaux (cf. Figure 5). Pour le PNG1, le capteur de lumière est inséré dans la cavité nasale et l'ampoule qui diffuse la lumière dans la partie arrière du pharynx qui donne sur la cavité buccale. L'ampoule doit être alimentée en 12 V.



FIGURE 2.4 – Ampoule en tungstène utilisée pour le PNG1, [Maeda 2008].

Shinji Maeda a construit un boîtier permettant d'alimenter le capteur, modifier son gain et modifier sa sensibilité afin de le remettre à zéro si besoin. Pour tester PNG1, j'ai construit deux maquettes : 1. une boîte noire et 2. un modèle pharynx-vélum en bois. Avec ces deux éléments, j'ai pu tester l'effet de l'ouverture, de la distance et de l'angle du capteur.

Je résume ci-dessous les principaux résultats obtenus avec le PNG1 en simulation.

### 2.1.1.6 Résultat 1 : Diamètre de l'ouverture entre le détecteur et l'ampoule

Les résultats liés à la taille de l'ouverture sont obtenus à partir des mesures sur les maquettes 1. boîte noire et 2. modèle pharynx-vélum en bois. La sortie du photo-détecteur, en V liée à l'ouverture, obtenue par la position de la lamelle (Figure 2.5) est quasi linéaire. Une très faible ouverture (environ 0,9 cm<sup>2</sup> sur notre modèle, noté h sur la Figure 2.6) peut être détectée par le capteur de lumière. Les tests sur le modèle permettent d'affirmer que le photo-détecteur utilisé

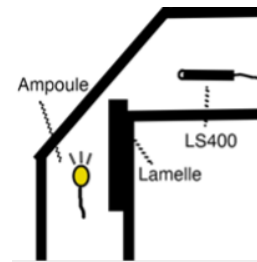


FIGURE 2.5 – Schéma du modèle pharynx-vélu comprenant : en haut, le détecteur de lumière (LS400), en bas, l’ampoule. Le modèle peut être fermé par une lamelle noire en plastique représentant l’ouverture ou la fermeture du conduit nasal, [Maeda 2008].

permet de mesurer une faible ouverture du port vélopharyngé, et donc indique assez fidèlement le début de l’ouverture vélaire durant la parole.

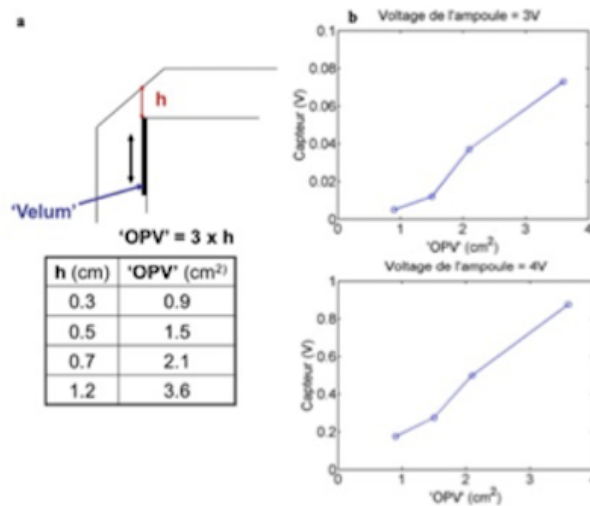


FIGURE 2.6 – Schéma montrant la différence de quantité de lumière capté par le détecteur en lien avec l’ouverture du port vélopharyngé simulée. a) simulation de l’ouverture dans le modèle pharynx-vélu b) résultats du détecteur, [Amelot 2009].

### 2.1.1.7 Résultat 2 : Distance entre le détecteur et l’ampoule

Les tests sur les maquettes 1 et 2 ont permis de montrer que l’augmentation ou la diminution de la distance entre la lumière et le capteur n’ont pas d’influence sur la sensibilité du photo-détecteur. Quand le gain de la lampe est de 4 V, la sortie du photo-détecteur (V) est plus ou moins constante indépendamment de la distance entre les deux. Néanmoins, pour avoir des résultats comparables entre les enregistrements, il est important de contrôler la distance entre les deux éléments pour qu’elle soit toujours sensiblement la même.

Si la distance ne semble ne pas avoir d’influence, j’ai constaté que la forme de la lentille du capteur modifie sensiblement la quantité de lumière capté par celui-ci. Ainsi les mesures en simulation ont montré que le photo-détecteur aura une meilleure sensibilité quand son extrémité

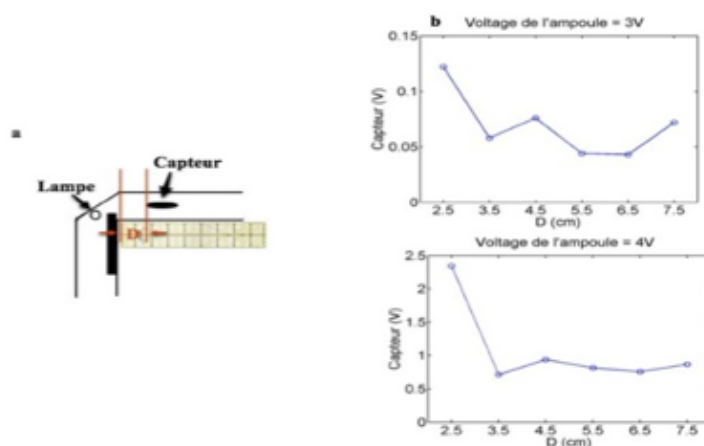


FIGURE 2.7 – a) position de la lampe et du détecteur,  $D$  représente la variation de la distance liée au déplacement du capteur. b) Résultats obtenus par le détecteur avec une ouverture à  $3,6 \text{ cm}^2$  et une distance pour  $D$  allant de  $2,5 \text{ cm}$  à  $7,5 \text{ cm}$ , [Amelot 2009].

sera polie, réduisant ainsi l'effet bombé de la lentille, celle-ci sera ainsi dirigée directement vers la zone lumineuse.

### 2.1.1.8 Résultat 3 : Angle du capteur

Il est apparu dans les différents tests sur les maquettes qu'il est nécessaire que le photodétecteur soit positionné de telle sorte qu'il puisse capter la lumière venant directement sur la lentille ou au maximum avec un angle à  $20^\circ$ .

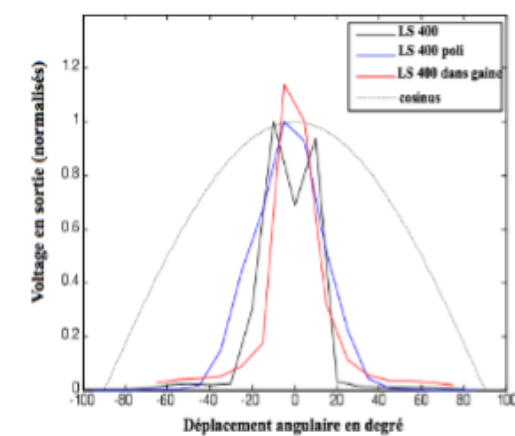


FIGURE 2.8 – Résultats des mesures de l'angle de sensibilité du détecteur dans 3 conditions. En rouge : capteur dans une gaine, en noir : capteur seul et en bleu capteur poli, [Amelot 2009].

Ces tests sur les maquettes ont permis de faire une première validation du PNG1. L'élaboration du PNG2 a permis de poursuivre les tests liés au capteur. Je vais résumer les principaux tests mis en place pour PNG2 ci-dessous.

### 2.1.1.9 Photonaso2 in vivo

Pour les tests et validations *in vivo*, j'ai utilisé le PNG2 (Figure 2.2). Les mesures ont été faites directement sur deux sujets féminins. Comme indiqué dans la partie 2.1.1.8, le photodétecteur, avec l'extrémité polie, est inséré dans la cavité nasale et positionné en dessous du voile du palais. Un nasofibroscope équipé d'une caméra, est inséré dans l'autre narine, pointant vers la paroi pharyngée postérieure pour illuminer la cavité nasale. Il permet d'éclairer le cavum et d'enregistrer, à l'aide de la caméra les mouvements haut-bas du voile du palais. Le signal acoustique a été enregistré par un microphone cravate (Sony ECMT15). Les deux signaux ont été acquis simultanément par un système d'acquisition multipistes. Cette dernière expérience a permis de valider définitivement le capteur de lumière choisi. Les résultats ont également montré que la durée du mouvement complet du voile du palais (abaissement maximum - élévation maximum) est plus longue que la phase d'ouverture du port vélopharyngé, et est plus longue que la durée acoustique de la voyelle nasale, pour les deux locuteurs. Je détaillerai plus en détail ces résultats dans le Chapitre 3.

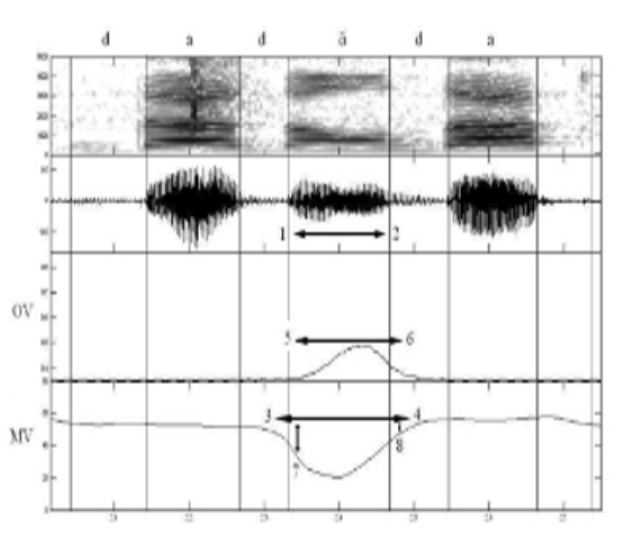


FIGURE 2.9 – Exemple de données obtenues avec le PNG2 couplé à un nasofibroscope, PNG2. Du haut vers le bas : spectrogramme, signal acoustique (microphone), ouverture du port vélopharyngé (OV) obtenue avec le PNG2 et mouvements du voile du palais (MV) obtenus avec les données vidéos issues du nasofibroscope, [Amelot 2009].

Le PNG2 a été utilisé par plusieurs chercheurs du laboratoire sur des sujets francophones et sur des locuteurs parlant le portugais brésilien.

### 2.1.1.10 Utilisateurs

Le PNG2 a été utilisé par deux doctorantes, Rita Demasi et Liane Lovatto qui ont travaillé toutes les deux sur le portugais brésilien. Des chercheurs du laboratoire, Jacqueline Vaissière et Patricia Basset ont travaillé sur la comparaison des données issues du PNG2 avec celles obtenues par le nasofibroscope. Pour toutes ces personnes, j'ai expliqué le principe de fonctionnement du PNG2. Jacqueline Vaissière et Patricia Basset ont enregistré quatre locuteurs francophones. J'ai assisté Lise Crevier-Buchman dans les prises de leurs données et j'ai fourni à toutes les scripts

Matlab permettant d’analyser l’ensemble des données issues du PNG2 et de la nasofibroscopie. Les scripts sont disponibles ([ici](#)).

Rita Demasi a pu analyser les voyelles nasales et les diphtongues nasales du portugais brésilien. Je suis coauteur de deux publications, dans des actes de colloque qui ont permis de présenter les premières expérimentations et valider l’instrument avec une langue autre que le français ( [Demasi 2016] ; [Demasi 2019]), disponibles ([ici](#)) et ([ici](#)). Les deux articles examinent les mouvements du vélum pendant la production des diphtongues nasales avant et arrière [ẽ ï], [ã õ] en portugais brésilien. Je reviendrai dans le Chapitre 3 sur les résultats obtenus.

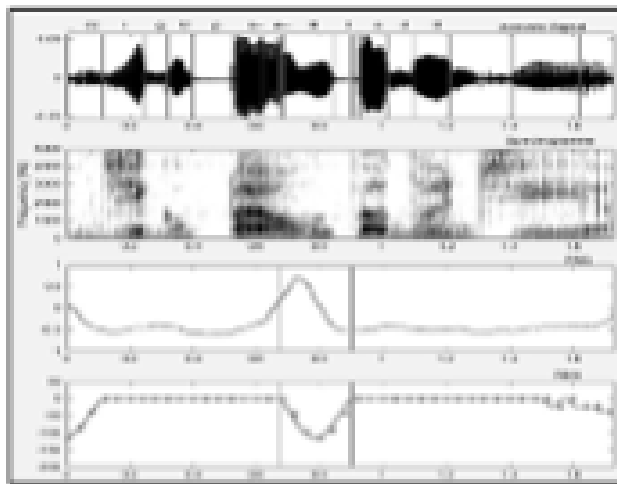


FIGURE 2.10 – Exemple de données acquises par Rita Demasi pour sa thèse, les données sont visualisées et analysées à l’aide d’un script Matlab que j’ai développé, [Demasi 2023].

En 2023, Rita Demasi a soutenu sa thèse « Dynamic modeling of the velopharyngeal trajectory in Brazilian Portuguese nasal diphthongs ». Je faisais partie de son jury.

Liane Lovatto a enregistré deux locuteurs avec le PNG2 et a réalisé des communications pour lesquelles je suis coauteur, en lien avec la hauteur du voile du palais disponibles ([ici](#)) et ([ici](#)). Malheureusement, elle a abandonné son travail de thèse, et les données enregistrées n’ont pas été complètement exploitées, ( [Lovatto 2007] ; [Lovatto 2008]).

### 2.1.1.11 Projet à court et moyen terme

Nous avons pour projet, avec Jacqueline Vaissière, Patricia Basset et Lise Crevier-Buchman de mener une importante campagne d’enregistrements originaux en 2024, afin de compléter les acquisitions faites avec le PNG1 et le PNG2 et ainsi confirmer plusieurs hypothèses que je décris dans le Chapitre 3. Nous souhaitons enregistrer au moins quatre locuteurs, deux hommes et deux femmes, prononçant des logatomes et des mots du français contenant des consonnes et des voyelles nasales dans différentes positions dans le mot, en faisant varier la qualité de voix, la ligne mélodique et son intensité. Nous chercherons pour la production de la nasalité à montrer l’influence de l’entourage sur l’ouverture, la position du phonème, la qualité de voix, le profil mélodique et l’intensité (ce qui n’a jamais été fait encore à ce jour).

Cet instrument est, à mon avis, assez unique ; il n’y a pas à ma connaissance de laboratoire de phonétique qui en utilise. Prendre/reprendre des données est une nécessité pour valoriser cet

instrument et qu'il soit une valeur ajoutée pour l'équipe et pour mieux décrire les phénomènes de nasalité.

## 2.1.2 L'électroPhotoGlottoGraphe

Article de référence : Amelot, Angélique, Darshan Sathiyarayanan, Shinji Maeda, Kyioshi Honda, et Lise Crevier-Buchman. « Validation of a noninvasive system to observe glottal opening and closing external PhotoGlottoGraph (ePGG) ». In 11th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, 2018, [Amelot 2018], disponible (ici).

Instrument inventé par Kiyoshi Honda sur lequel j'ai travaillé notamment pour la mise place des tests de validation. Je travaille toujours sur cet instrument avec Shinji Maeda pour améliorer la détection de lumière avec des capteurs plus sensibles et je teste des systèmes de maintien de l'appareil sur le cou des locuteurs. En partant du constat que le PGG est un dispositif invasif basé sur la transillumination, Kiyoshi Honda et Shinji Maeda ont souhaité développer un instrument non invasif permettant de prendre des mesures d'ouverture de la glotte en continu durant les phases de parole. Ils ont élaboré un premier système nommé ePGG [Honda 2006].

### 2.1.2.1 Mon implication

Kiyoshi Honda et Shinji Maeda ont fait appel à moi au début du développement de l'instrument pour le tester en enregistrant différents locuteurs dans différentes conditions. Je les ai aidés en envisageant des améliorations. J'ai ensuite progressivement pris la main sur l'appareil, en travaillant notamment sur le système de fixation des capteurs et sur des capteurs de plus grande sensibilité.

### 2.1.2.2 Mes collaborations

Kiyoshi Honda, Shinji Maeda, Van Minh Nguyen (ingénieur recruté 6 mois à temps complet via le projet ESAPVI), Yves Laprie, Xavier Pelorson, Annemie Van Hirtum, Anne Bouvet, Darshan Sathiyarayanan, Rémi Guisse.

### 2.1.2.3 Description de l'instrument

L'ePGG est un système basé sur le principe de la transillumination (capteur couplé à un détecteur de lumière) mais contrairement aux instruments conventionnels. Il est non-invasif.

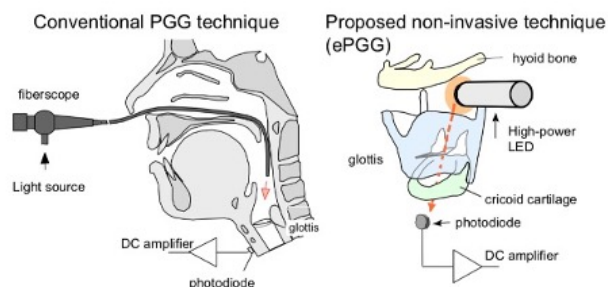


FIGURE 2.11 – Comparaison des deux systèmes : PGG (à gauche) vs. ePGG (à droite), [Vaisière 2010].

La figure 2.11, à gauche, illustre le problème du PGG : il est invasif et la présence d'un tube contenant un nasofibroscope entrave l'articulation nécessaire à la production de certains phonèmes postérieurs. L'ePGG offre un moyen alternatif pour la transillumination de la glotte en plaçant la source ainsi que le capteur de lumière à l'extérieur. Ce système est non invasif et permet d'articuler n'importe quel phonème. Il peut être utilisé pour repérer les ouvertures de la glotte durant la production de phonèmes, il peut également être utilisé pour explorer la fonction de respiration, l'insuffisance glottale due à une pathologie laryngée, ou à des mouvements involontaires anormaux du larynx liés à des troubles neuromoteurs, comme le bégaiement. De plus, il peut être utilisé dans le cadre d'une étude de la déglutition.

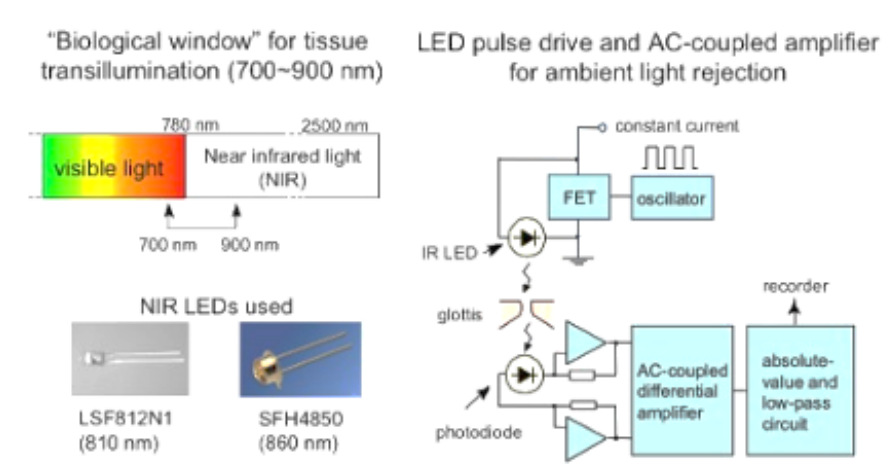


FIGURE 2.12 – Éclairage retenu pour le système ePGG, rapport ESAPVI, 2019.

La Figure 2.12 illustre le choix de l'éclairage utilisé pour l'ePGG. Ce choix est lié à la volonté de rejeter l'effet de la lumière ambiante sur l'ePGG, tout en tenant compte du fait que la « fenêtre biologique » pour transilluminer les tissus humains se situe entre 700 et 900 nanomètres (nm).

Une LED à haute puissance, infra-rouge, est utilisée comme source de lumière. Elle est placée à la surface du tissu cervical, entre l'os hyoïde et le cartilage thyroïdien, pour éclairer de manière diffuse la paroi de la cavité hypopharyngée. La lumière incidente qui traverse la glotte ouverte, sur la paroi de l'hypoglotte ou de la trachée, est détectée à l'aide d'une photodiode placée à la surface du cou, juste à l'extrémité basse du cartilage thyroïde, sous les plis vocaux. La figure 2.13 illustre le choix de placement sur le cou du locuteur ainsi que la position de la lumière.

La figure 2.14 présente des exemples de tracés obtenus avec l'ePGG pour un locuteur japonais. La glotte s'ouvre légèrement pendant la production de [h] avec une vibration des plis vocaux maintenue, et se ferme seulement vers la fin de [a] qui le suit. Dans les syllabes suivantes, la glotte montre une seule grande ouverture pour [s]. La courbe montre clairement le dévoisement des voyelles hautes en dialecte de Tokyo : les deux voyelles /i/ et /u/ sont dévoisées lorsqu'elles sont entourées de consonnes sourdes, par exemple, [k], [s], et [t] dans cet énoncé. Le mot [hakusi] est connu comme l'un des cas irréguliers où la voyelle [a] peut être supprimée. L'ePGG permet d'observer une telle variation unique de la production de syllabes concaténées et représenter les mouvements d'ouverture et de fermeture de la glotte en parole continue.

Le gain de la lumière est contrôlé par un boîtier qui a été fabriqué par Kyioshi Honda, et

LED-sensor assembly for signal stability and users' convenience

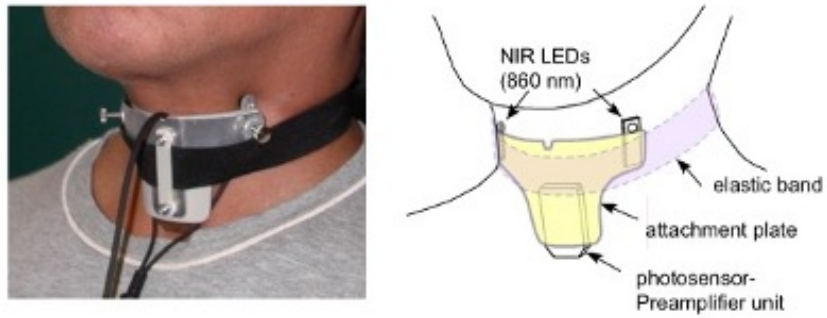


FIGURE 2.13 – Première version du système de fixation avec les LED infra-rouge, rapport ESAPVI, 2019.

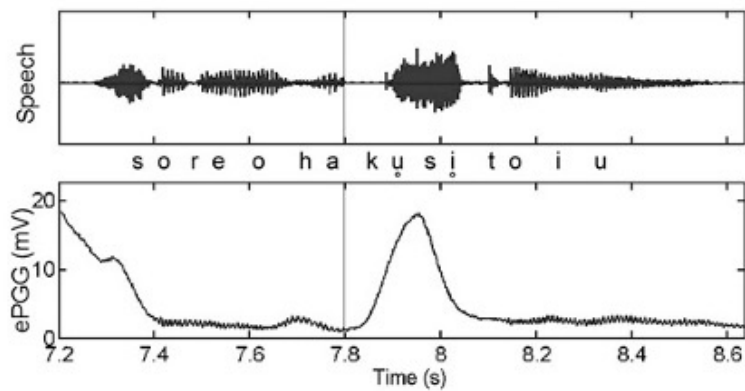


FIGURE 2.14 – Signal acoustique en haut et données issues de l'ePGG en bas pour le mot [hakusi], d'après [Vaissière 2010].

qui permet d'augmenter ou diminuer l'intensité de la lumière selon le locuteur. Les tests menés ont clairement montré que tous les locuteurs n'avaient pas une réaction similaire au passage de la lumière à travers la peau. Certains locuteurs ont une peau plus « transparente » à la lumière, tandis que d'autres présentent un tissu adipeux du cou trop épais pour donner des résultats satisfaisants.

Kiyoshi Honda a testé deux approches : l'une pour limiter l'angle de la source lumineuse en ajoutant un court guide de lumière et l'autre pour annuler le trajet latéral de la lumière en appliquant des impulsions de lumière inversée sur la peau sous l'unité LED. Des problèmes peuvent survenir chez des sujets avec un cou court (il suffit parfois de leur demander de pencher la tête un peu en arrière pour résoudre le problème). Shinji Maeda et moi-même retravaillons sur ce procédé que nous ne trouvons pas optimal et trop locuteur dépendant.

Il existe une dérive du signal au cours du temps, qui peut être éliminée avec des sessions d'enregistrements suffisamment courtes et/ou l'utilisation d'une phrase cadre toujours identique. Enfin, les quotients de fermeture de la glotte obtenus avec l'ePGG ne peuvent pas être calibrés avec exactitude. La quantité de lumière récupérée par le capteur dépendra de la quantité de lumière émise, qui peut varier selon les individus.

#### 2.1.2.4 Mon apport

Avant l'obtention de l'ANR ArtSpeech (2016-2020), mon apport sur l'ePGG consistait essentiellement à seconder l'ingénieur Van Minh Nguyen dans la prise de données sur des locuteurs, afin de tester le dispositif et de réfléchir à un moyen d'isoler le capteur de la lumière ambiante au maximum. Une de mes missions en lien avec l'ANR ArtSpeech a été de reprendre en main l'ePGG, de mettre en place des tests de validation et d'enregistrer des locuteurs. Trois tests ont été réalisés pour valider l'instrumentation. Les tests sur la réplique mécanique du larynx ont été menés en collaboration avec Annemie Van Hirtum et Xavier Pelorson du Gipsa-Lab.

#### 2.1.2.5 Comparaison des données de l'ePGG avec des données endoscopiques et des données EGG

Seules des données endoscopiques permettent d'évaluer l'ePGG. Darshan Sathiyarayanan, un étudiant en master à l'Université Paris-Saclay, s'est présenté spontanément au LPP pour faire un stage et travailler avec moi sur l'ePGG. Il m'a assistée dans la mise en place de ces tests d'évaluation. Ces tests ont fait l'objet d'une publication en 2018, disponible ([ici](#)), [Amelot 2018].

Le premier test a consisté à valider et à calibrer les valeurs de sortie de l'ePGG sur deux locuteurs. Les données de l'ePGG ont été comparées avec les données d'images vidéos endoscopiques à haute vitesse (4000 images/sec) et un enregistrement avec un EGG. Les données acoustiques (microphone), les données de EGG (accolement des plis vocaux), les données de photoluminescences (ePGG) et les images vidéo (endoscopiques haute vitesse montrant la glotte) ont été acquises simultanément. La complexité de l'appareillage a forcément contraint le corpus, cette étude a été menée sur un homme et une femme produisant la voyelle [i] à l'isolée.

Le but était :

1. de valider les signaux de l'ePGG en les comparant avec les données endoscopiques filmant la vibration des plis vocaux et des données d'accolement des plis vocaux issus de l'EGG ;
2. de comprendre les relations entre les mouvements des plis vocaux et le degré d'ouverture de la glotte indiqué par l'ePGG et l'accolement des plis vocaux évalué par l'EGG.

Cette étude a permis de montrer que l'ePGG donne des indications sur l'oscillation des vibrations des plis vocaux durant la production de sons voisés, mais il donne également des indications sur l'abduction/adduction de la glotte durant la production de consonnes.

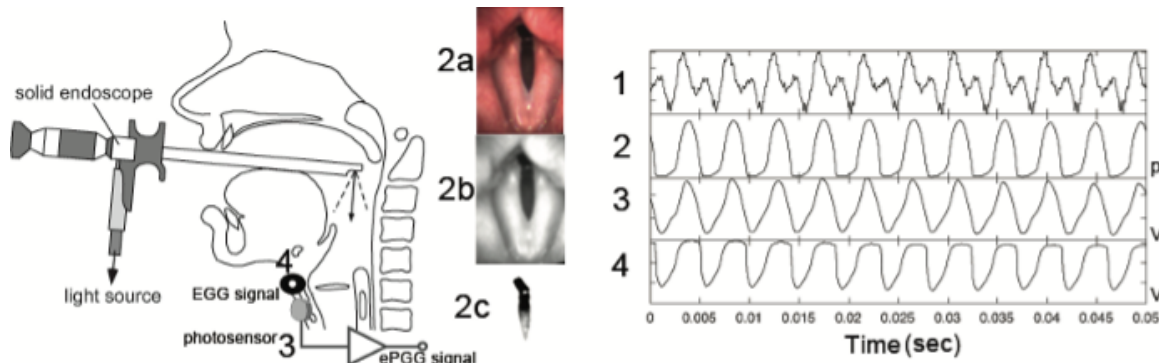


FIGURE 2.15 – Configuration pour acquérir simultanément (1) en haut, le signal audio, (2) images provenant d’une endoscopie vidéo à grande vitesse (4000 images/s) : (2a) Image d’origine, (2b) Image filtrée, (2c) Aire glottique détectée et (2), Aire Glottique transcrite en pixels., (3) Signal ePGG, (4) EGG (tâches 1 et 2), d’après [Amelot 2018].

La figure 2.15 illustre le dispositif mis en place. L’endoscope filme la vibration des plis vocaux, et la lumière émise par celui-ci est captée par le capteur de l’ePGG. L’EGG donne une indication de l’accolement des plis vocaux durant la production de la voyelle [i] pour cette expérimentation. Les trois signaux sont enregistrés simultanément à l’aide d’une carte d’acquisition multicanaux (DataTranslation). J’ai développé un script Matlab, disponible (ici) qui permet d’isoler les images issues de l’endoscopie, de récupérer l’aire entre les plis vocaux en pixels, et qui est ensuite retranscrite sous forme de courbe (2 sur la figure 2.15). Les acquisitions avec les trois instruments ayant été réalisées simultanément, il a été possible de superposer les données pour les comparer.

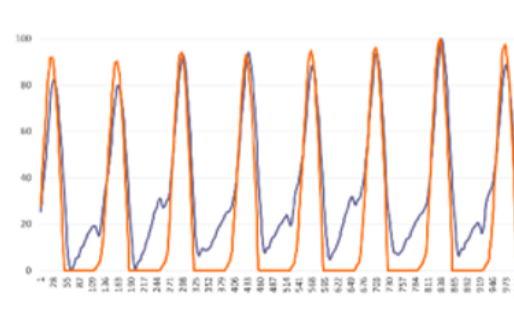


FIGURE 2.16 – Extrait des normalisations des données ePGG et de l’aire glottique pendant la production de [i] pour le locuteur 2 (la ligne bleue représente données ePGG et la ligne rouge correspond aux extractions de l’aire à la glotte issues de la vidéo-endoscopie à grande vitesse (4000 images/s), d’après [Amelot 2018].

La figure 2.16 illustre la superposition entre les données de l’ePGG (en bleu) et les données de l’aire glottique obtenues via l’endoscopie (en rouge). Les deux courbes ainsi obtenues sont

proches. Sur le tracé rouge, il est possible d'identifier le début de la fermeture ainsi que le quotient de la glotte fermée, lorsque que la courbe est égale à zéro, c'est un peu plus difficile à partir de la courbe bleue.

### 2.1.2.6 Comparaison des données de l'ePGG avec des données nasofibroscopiques et des données EGG

Pour ce test de validation, l'endoscope a été remplacé par le nasofibroscope permettant d'acquérir des données de parole continue mais limitées à 25 images/sec. Les deux mêmes locuteurs que pour la validation précédente 2.1.2.5 ont enregistré des séquences de logatomes contenant des fricatives et des voyelles [a i u] dans des phrases cadres comme par exemple : « dites isi trois fois ».

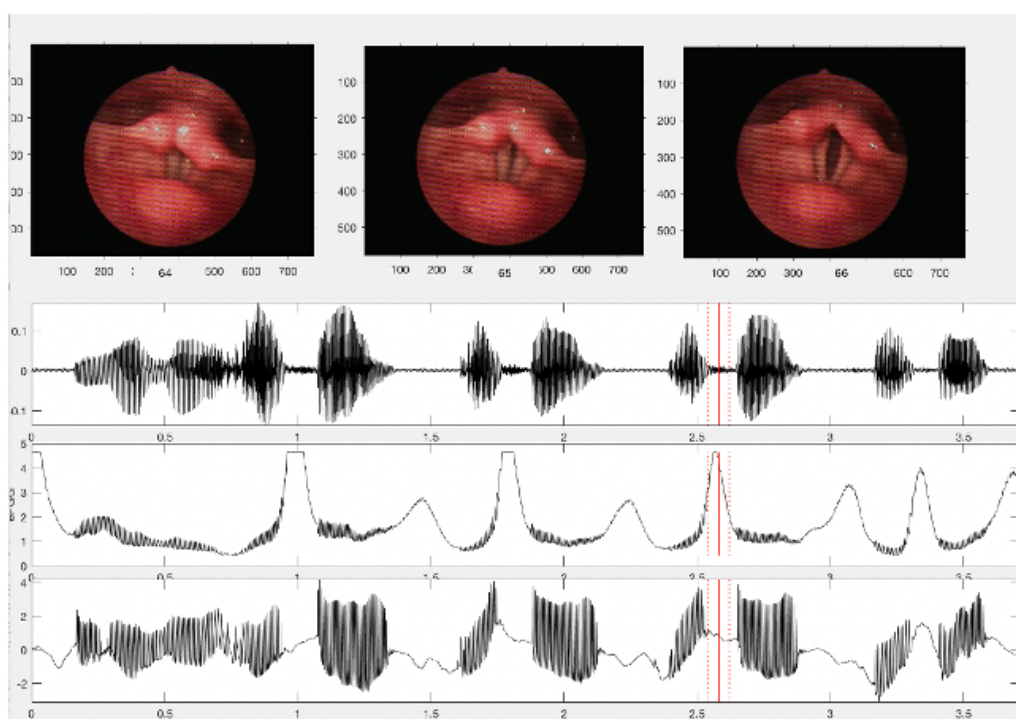


FIGURE 2.17 – Exemple de données obtenues : 1. Images issues du nasofibroscope, 2. Signal acoustique, 3. Signal de l'ePGG et 4. Signal de l'EGG. La ligne rouge indique là où l'image du milieu (1.) a été extraite et les deux lignes pointillées respectivement l'image de droite et celle de gauche (1.), locuteur 2 qui a prononcé la phrase : « il a dit asa asa asa trois fois », d'après [Amelot 2018].

Cette expérience a montré que l'ePGG peut répondre non seulement à l'oscillation des vibrations des plis vocaux, mais également à l'abduction/adduction de la glotte durant la production des consonnes. Par exemple, lors de la production d'une fricative non voisée, l'ePGG peut fournir des données interprétables montrant une ouverture glottique, les informations fournis par l'EGG durant cette consonne sont moins informatives, comme illustré à la figure 2.18.

La figure 2.18 montre que l'ePGG apporte des informations de deux types : 1. l'ouverture glottique et 2. la vibration des plis vocaux. Ces informations montrent l'importance d'un tel

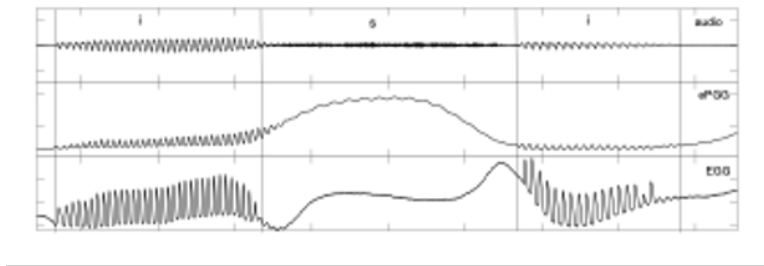


FIGURE 2.18 – Signal acoustique (en haut), signal ePGG (milieu) et signal EGG pour la suite /isi/. La glotte est maximale ouverte au centre acoustique de la consonne /s/, d’après [Amelot 2018].

instrument, ce qui en fait un instrument unique en son genre. Les données de vibration (accoulement) sont obtenues avec un EGG, et il est possible de voir les mouvements d’ouverture glottique avec un PGG, mais elles sont rarement obtenues de pair avec un seul de ces instruments.

La qualité non-invasif de l’ePGG permet de l’utiliser sans la supervision d’un médecin ce qui n’est pas le cas avec le PGG.

L’ensemble de ces tests nous a permis de valider l’ePGG, celui-ci permet d’acquérir des données comparables aux données de l’EGG et de l’endoscope, avec une plus grande précision et de manière non invasive.

### 2.1.2.7 Tests sur deux répliques mécaniques du larynx

En collaboration avec Anne Bouvet, Annemie Van Hirtum et Xavier Pelorson, nous avons testé l’ePGG sur deux répliques mécaniques du larynx disponibles au Gipsa-lab. La première réplique est composée de deux demi-cylindres rigides en oscillation forcée contrôlés par un moteur pas à pas. La seconde est commandée par un flux d’air et utilise des tubes en latex remplis d’eau pour reproduire les plis vocaux en auto-oscillation. La zone glottique variable dans le temps est mesurée avec précision pour les deux répliques. Les résultats expérimentaux sont comparés aux enregistrements obtenus avec l’ePGG afin d’évaluer la corrélation entre les mesures obtenues sur les répliques mécaniques avec les mesures obtenues sur le signal de l’ePGG. Cette caractérisation est utilisée pour proposer un étalonnage de l’ouverture glottique en fonction des paramètres affectant le signal ePGG (distance, angle, peau, tissu, réglage du système, etc.). Cette recherche a abouti à deux publications dont je suis coauteur ([Bouvet 2017]; [Bouvet 2019]), disponibles (ici) et (ici).

La modulation de la zone glottique étudiée expérimentalement sur la réplique de larynx mécanique montre que la corrélation entre le signal ePGG et la mesure de l’aire glottique est supérieure à 85%. Une méthode d’étalonnage du système ePGG est ensuite proposée, permettant d’estimer au mieux la position du photo-détecteur par rapport aux LED.

La modulation de la zone glottique étudiée expérimentalement sur une réplique de larynx mécanique entraînée par un moteur et sur une réplique de larynx mécanique entraînée par un flux d’air montre que la corrélation entre le signal ePGG et la mesure de l’aire glottique est supérieure à 85%. Une méthode d’étalonnage du système ePGG est ensuite proposée, permettant d’estimer au mieux la position du capteur par rapport aux LED.

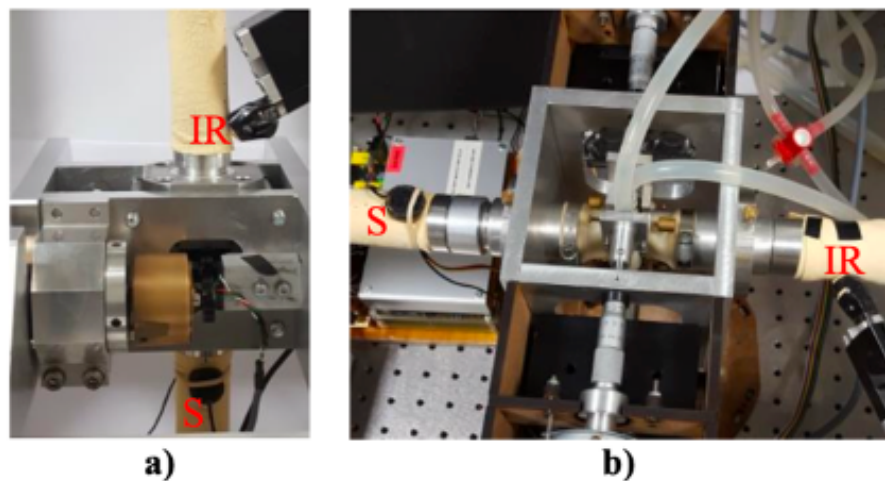


FIGURE 2.19 – ePGG adapté sur une maquette mécanique simulant les vibrations des plis vocaux. a) Réplique rigide motorisée, b) réplique auto-oscillante pilotée par flux d’air, d’après [Bouvet 2017].

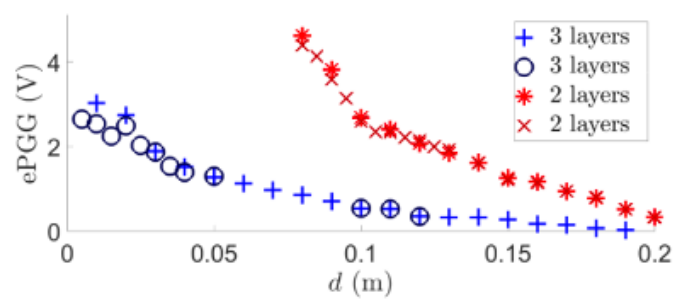


FIGURE 2.20 – Signal ePGG (en V) moyen en fonction de la distance source-captur (d) pour la réplique entraînée par flux avec 2 et 3 couches d’épaisseur représentant les plis vocaux, d’après [Bouvet 2017].

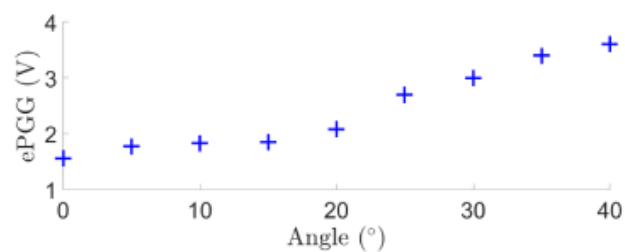


FIGURE 2.21 – Signal ePGG (en V) moyen moyen en fonction de l’orientation de la source, d’après [Bouvet 2017].

La figure 2.20 montre que l'ePGG s'avère efficace sur les répliques mécaniques. L'intérêt de ces dispositifs sont que nous avons un contrôle exact du degré de l'ouverture. La figure 2.21 indique quant à elle que l'ePGG est sensible à l'orientation et que plus le capteur est positionné face à la lumière, plus il captera le signal avec efficacité.

Les avantages de l'ePGG sur les autres techniques sont :

- instrument non invasif, possibilité de faire les expériences dans un laboratoire de phonétique, avec un grand nombre de sujets ;
- tous les sons peuvent être étudiés (et non plus seulement les sons antérieurs comme avec le PGG) ;
- instrument polyvalent pour observer à la fois les vibrations des plis vocaux et les grands mouvements d'abduction/adduction glottiques lors des transitions entre une consonne et une voyelle.

Il reste encore du travail pour continuer d'améliorer cette instrumentation. Les publications comme celle de Eli et al. (2019), à laquelle j'ai collaboré, est disponible ([ici](#)), sont prometteuses et montrent que cet instrument peut apporter des informations précieuses sur les gestes glottiques et leur coordination [Eli 2019]. Je parlerai de cet article dans le Chapitre 3.

### 2.1.2.8 Utilisateurs

Plusieurs chercheurs du LPP ont utilisé cet instrument pour leur recherche, ainsi que des personnes extérieures au laboratoire : Takeki Kamiyama, Rachid Ridouane, Hyunsoon Kim, Jiayin Gao, Benjamin Elie, etc. ( [Eli 2019] ; [Gao 2011] ; [Kamiyama 2011] ; [Hyunsoon 2017] ; [Ridouane 2012]).

### 2.1.2.9 Direction

Comme indiqué dans la partie 2.1.2.5, j'ai dirigé Darshan Sathiyarayanan pour un stage de Master. J'ai également recruté et supervisé Rémi Guisse, en tant ingénieur électronicien à temps partiel durant un an pour dupliquer l'ePGG.

### 2.1.2.10 Projets à court, moyen et long terme

Plusieurs personnes du laboratoire souhaitent mener des études avec l'ePGG dans les mois à venir, notamment Rachid Ridouane, Jacqueline Vaissière, Jiayin Gao. L'objectif est de leur proposer une version fonctionnelle en 2025.

Des améliorations sont nécessaires pour pallier aux inconvénients évoqués dans la partie 2.1.2.3. Shinji Maeda et moi-même travaillons sur une nouvelle version de l'ePGG pour y remédier.

Pour ce nouveau développement (ePGG2), nous travaillons sur une amélioration du trajet latéral de la lumière en développant un procédé d'éclairage plus diffus et plus puissant. Nous avons également changé le photo-détecteur par un modèle plus sensible. Nous avons opté pour un capteur de la marque Vishay, sensible à 900 nm.

Contrairement à la version précédente, nous ne souhaitons plus filtrer la lumière. Dans la version 1, le module a été créé pour filtrer autant que possible la lumière ambiante au risque de perdre des informations liées à l'ouverture glottique. Nous avons pris le parti de minimiser l'exposition du photo-détecteur à la lumière ambiante, en utilisant un dispositif de fixation

recouvert de vantablack (noir absolu). Nous avons également modifié le système des LED, n'utilisant désormais qu'une seule LED tenue manuellement pour une meilleure orientation.

Indépendamment de ces nouveaux développements, je travaille également sur le design du système de fixation pour permettre une plus grande mobilité du capteur et de la LED, (cf. figure 2.22). Une première version avait été pensée par Rémi Guisse en 2018 que j'ai depuis améliorée pour rendre le système souple et adaptable à plus grand nombre de locuteurs.

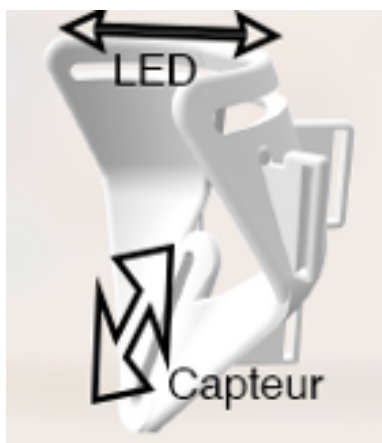


FIGURE 2.22 – Seconde version du système permettant de fixer les LED et le capteur de l'ePGG, imaginé et dessiné à partir de Fusion 360 puis imprimé en résine semi-rigide via l'imprimante FormLabs disponible au laboratoire. Les flèches indiquent la latitude de position des deux éléments : capteur et LED.

Le modèle de fixation ci-dessus est disponible en deux tailles (un modèle femme et un modèle homme). Il est imprimé en résine semi-rigide (Formlabs 80A) sur l'imprimante 3D Formlabs du LPP. Il permet de mettre plusieurs LED en parallèle si nécessaire (pour les personnes qui ont un tissu adipeux très épais). Il sera recouvert de vantablack pour une meilleure isolation de la lumière ambiante. Ces adaptations devraient permettre de s'adapter au mieux à la morphologie des différents sujets. Comme la distance entre le capteur et les LED est connue avec ce système de fixation, l'ePGG devrait être ainsi plus facile à calibrer.

### 2.1.3 L'AeroMask

*Article de référence : Amelot, Angélique, Elmerich, Amélie, Maeda, Shinji et Lise Crevier-Buchman. « Présentation d'un masque acoustiquement transparent pour la prise de données aérodynamiques ». Journées d'études PhonLim, Limoges, [Amelot 2023a].*

L'AeroMask est une instrumentation permettant d'enregistrer le flux et la pression d'air d'un locuteur de manière simultanée avec la pression acoustique. Instrument inventé par Shinji Maeda et Kiyoshi Honda pour lequel j'ai largement contribué à son amélioration notamment pour l'étanchéité en lien avec le débit, élaborer une séparation permettant de séparer le flux d'air oral et nasal et le doter de deux logiciels d'enregistrement et de visualisation.

#### 2.1.3.1 Mon implication

Il y a eu six étapes dans l'élaboration de cet instrument. La première a consisté à trouver un masque qui avait les propriétés requises pour faire office de pneumotachographe. Cette étape a

été réalisée par Kiyoshi Honda et Shinji Maeda. La deuxième étape a consisté à élaborer une carte d'acquisition multipiste compatible avec des capteurs de pression extrêmement précis, responsabilité qui a incombé à Shinji Maeda. Les étapes trois à six m'ont été confiées. L'étape trois consistait à trouver un moyen d'isoler le flux d'air oral et nasal à l'intérieur du masque. L'étape quatre a consisté à améliorer l'étanchéité du masque. Pour l'étape cinq, je me suis attelée à élaborer un logiciel d'acquisition en temps réel ainsi qu'un logiciel de visualisation. Enfin, j'ai travaillé sur les embouts permettant de mesurer également la pression intra-orale.

### 2.1.3.2 Mes collaborations

Shinji Maeda, Kiyoshi Honda, Amélie Elmerich, qui fut doctorante au LPP. Elle a été chargée de tester le matériel, et de me seconder dans le travail sur le design des séparations.

### 2.1.3.3 Description de l'instrument

Les pneumotachographes à pression différentielle nécessitent un capteur de pression capable de mesurer la pression atmosphérique et la pression présente dans une embouchure. Le limiteur de débit agit comme une légère résistance au flux d'air permettant ainsi de quantifier la pression différentielle. Le limiteur peut-être soit un tube rempli de tiges très fines soit un fin maillage métallique ([Fleisch 1925]; [Lilly 1950]). Pour le système développé au LPP, un masque en fibre de papier, normalement utilisé comme masque anti-poussière, fait office de maillage, et son tressage remplit la fonction de limiteur d'embouchure. Grâce à ce système, il est possible d'acquérir des données aérodynamiques et acoustiques en simultanément, sans perturber l'acoustique de la parole. Le masque choisi est souple et n'entrave donc pas les mouvements de la mâchoire.

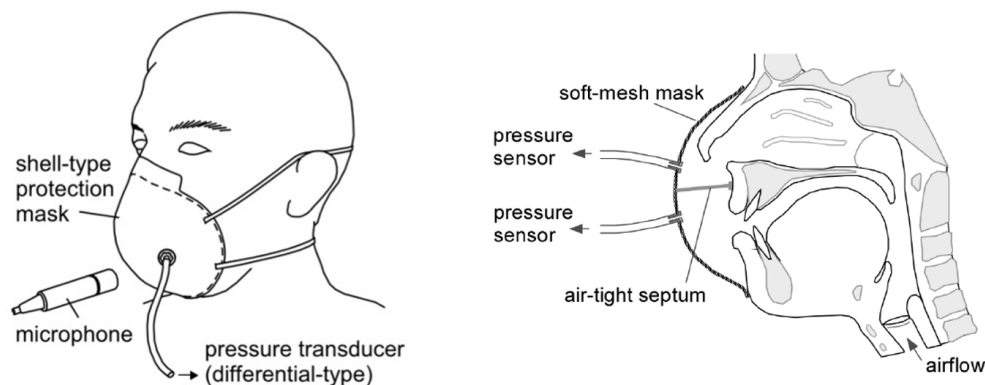


FIGURE 2.23 – Système AeroMask utilisé au LPP : Masque à mailles fines et souples (fibre de papier) pour mesurer le débit d'air oral et nasal. Le masque est équipé d'un séparateur étanche à l'air qui délimite les deux cavités, en avant des narines et de la bouche, d'après [Vaissière 2010].

L'instrumentation complète actuelle se compose du masque, d'une séparation en résine souple aux normes médicales imprimée à l'aide d'une imprimante 3D, d'une carte d'acquisition permettant d'enregistrer plusieurs canaux en simultanément, d'un script développé en Matlab permettant d'enregistrer les données avec visualisation temps réel. Le script est disponible ([ici](#)), et d'un autre script également développé en Matlab pour la visualisation des données ([ici](#)).

La séparation à l'intérieur du masque permet de diviser le flux d'air nasal du flux d'air oral. Chacune des cavités ainsi formées dans le masque est connectée à un tube qui sert à quantifier la pression interne ("pressure sensor"). La différence de pression entre la cavité et l'air extérieur permet de calculer le débit d'air (flux d'air) en unité de l/s après une procédure d'étalonnage simple.

#### 2.1.3.4 Limites des systèmes existants avant l'AeroMask

Pour les autres systèmes (Rothenberg, EVA<sup>tm</sup>, *etc.*) permettant d'acquérir des données de flux d'air durant la parole, le signal acoustique est fortement déformé. Ils ont l'avantage d'avoir une bonne pression différentielle, mais ils ont l'inconvénient majeur d'utiliser un masque rigide, qui crée une cavité acoustique en avant de la bouche et des narines. L'effet acoustique lié à cette cavité est équivalent à un filtre passe-bas. Les conséquences sont importantes pour l'étude de la parole : les signaux acoustiques enregistrés ne peuvent pas être utilisés ni pour l'analyse du signal produit, ni pour des expériences de perception. Les embouts nasals proposés par EVA<sup>tm</sup> peuvent potentiellement parasiter le signal acoustique issu du nez. De plus, le masque rigide implique une forte contrainte sur l'articulation des phonèmes.

#### 2.1.3.5 Les quatre avantages principaux de l'AeroMask

1. pas de déformation du signal acoustique. Le son émis à travers le masque est pratiquement exempt de distorsion acoustique. L'analyse acoustique et perceptive est permise, (*cf.* partie 2.1.3.7);
2. le masque souple n'entrave pas les mouvements de la mâchoire : il permet d'être le plus proche de la production langagière non entravée par un masque ;
3. il est parfaitement étanche et le système d'enregistrement du flux d'air nasal n'entrave pas la propagation acoustique du signal passant par le nez ;
4. aucune stérilisation n'est nécessaire. Les masques sont jetables et peuvent donc être proposés pour chaque locuteur ce qui élimine le temps de stérilisation entre chaque enregistrement. Ce masque souple est fixé par des élastiques resserrés à l'arrière du crâne, il n'a pas besoin d'être tenu ce qui limite les potentielles pertes aérodynamiques liées au mouvement du locuteur.

#### 2.1.3.6 Mon apport

L'architecture du système complet d'acquisition des données aérodynamiques a été repensée dans sa globalité et mon apport a permis :

1. amélioration de l'étanchéité ;
2. possibilité d'enregistrer les débits d'air oral et nasal séparément et possibilité de prendre la pression intra-orale et nasale simultanément ;
3. développement d'un logiciel d'acquisition des données qui permet de visualiser les données en temps réel, disponible ([ici](#)) ;
4. développement d'un logiciel de visualisation des données, disponible ([ici](#)).

### 2.1.3.7 Étanchéité du masque

En 2019, Amélie Elmerich a réalisé son Master 2 sous la direction de Lise Crevier-Buchman et moi-même au LPP, portant sur des patients souffrants de polypes nasales. Elle a enregistré ses locuteurs à l'aide du système EVA<sup>tm</sup> disponible au LPP et à l'HEGP. Pour ses tests de perception, elle a dû doubler les enregistrements aérodynamiques par des enregistrements acoustiques.

Pour poursuivre ses recherches en thèse, il était nécessaire de trouver un appareil permettant de limiter le nombre d'enregistrements sur un même patient (les sessions ne pouvant être trop longues, du fait de la pathologie). Il m'a semblé pertinent de lui proposer d'utiliser l'AeroMask. Ce dernier avait été conçu avec des caractéristiques lui permettant d'être utilisé en milieu hospitalier : masque changeable après chaque locuteur, appareil doté d'une batterie autonome sans besoin de branchement secteur et facilement transportable.

Cette proposition me donnait l'occasion d'évaluer le système sur une cohorte importante de locuteurs et de tester ses limites sur des patients présentant des débits d'air nasal potentiellement très faibles.

Les premiers enregistrements effectués par Amélie Elmerich sur les patients ont révélé la nécessité d'améliorer l'isolation du masque afin de pouvoir capter les faibles débits. J'ai réfléchi à plusieurs systèmes d'isolation pour le masque, pour lesquels Amélie Elmerich a mené des campagnes d'enregistrements pour évaluer leur efficacité. Le système d'isolation qui a été retenu pour son efficacité est illustré ci-dessous.



FIGURE 2.24 – Système d'isolation choisi pour les locuteurs enregistrés pour le travail de recherche d'Amélie Elmerich. Cette figure montre également un pont de nez.

Il s'agit d'un isolant de fenêtre commercialisé par la marque 3M. Il présente l'avantage d'être souple, adhésif et d'assurer une étanchéité parfaite. Avant de l'utiliser en contact avec la peau de nos sujets, j'ai contacté le revendeur pour obtenir des informations. Il a confirmé qu'il s'agissait d'un produit non dangereux conformément à la réglementation REACH n° 1907/2006. À terme, j'envisage de remplacer cet isolant par un dispositif similaire mais imprimé en 3D à partir de résine médicale, qui conservera les mêmes caractéristiques de forme, de souplesse et d'étanchéité.

En complément de l'isolant pour assurer le contact avec le nez, j'ai sollicité Amélie Elmerich pour tester différents ponts de nez, généralement utilisés pour éviter la buée sur les lunettes lors du port de masques quelconques. Les résultats des enregistrements effectués par Amélie Elmerich avec trois configurations différentes de masque ont été intégrés dans sa thèse [Elmerich 2024b]. Ils sont résumés sur la figure 2.25.

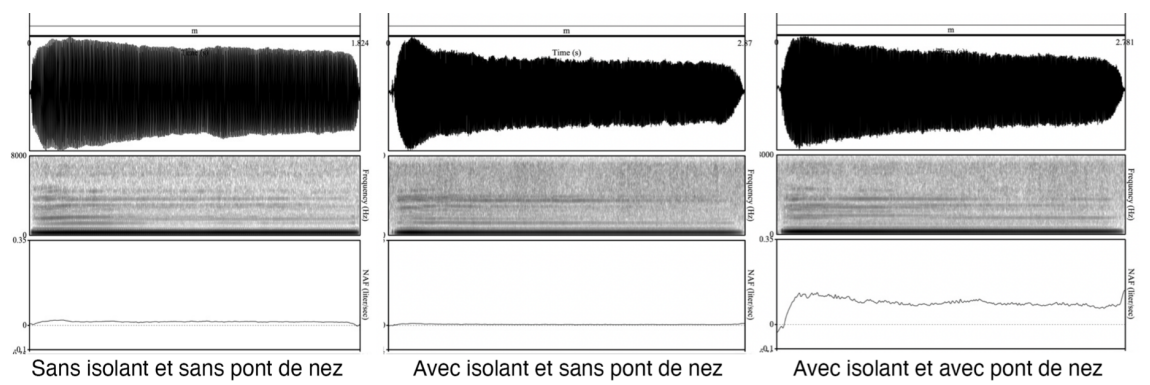


FIGURE 2.25 – Enregistrement de la voyelle /a/ par un sujet équipé de l'AeroMask : signal acoustique en haut et débit d'air total en bas. À gauche : masque sans isolant et sans pont de nez, au milieu : masque avec isolant et sans pont de nez et à droite ; masque avec isolant et pont de nez, d'après [Elmerich 2024b].

La figure ci-dessus met en évidence l'importance de l'isolant et du pont de nez pour la quantité d'air globale produite lors de la production d'une voyelle isolée.

Par la suite, j'ai vérifié que les modifications apportées au masque ne perturbaient pas l'acoustique, ce qui constitue la valeur ajoutée initiale de cet instrument. À cette fin, j'ai créé un script Matlab, disponible ([ici](#)) qui a permis de comparer les coupes spectrales obtenues via différents instruments disponibles au LPP (un microphone, l'AeroMask, l'EVA<sup>tm</sup> et le masque de Rothenberg) et pour différents locuteurs. Amélie Elmerich a poursuivi la validation des données acoustiques en mettant en place des tests de perception. Des enregistrements acoustiques obtenus avec les instruments cités précédemment ont été intégrés dans PsyToolKit. Pour ce test, les auditeurs ont été invités à fournir leurs impressions perceptives sur les différents enregistrements, notamment s'ils jugeaient que le son était naturel et non « étouffé ». Les résultats des analyses acoustiques et des tests perceptifs ont abouti à plusieurs publications dont je suis coauteur : ([Elmerich 2020c] ; [Elmerich 2023c]), disponibles ([ici](#)) et ([ici](#)).

La figure ci-dessus présente le triangle vocalique pour deux locutrices sans pathologie de la voix ni de la parole produisant les voyelles du français à l'isolée. Les enregistrements ont été effectués sous différentes conditions : 1. avec un microphone seul (AKG C520), 2. avec le masque de Rothenberg et un microphone positionné à l'extérieur du masque sur le côté (AKG C520), 3. avec le système EVA<sup>TM</sup> et un microphone (AKG C520) positionné à l'avant du masque avec la grille du pneumotachographe et 4) avec l'AeroMask et le microphone (AKG C520) positionné sur le côté à l'extérieur du masque.

La figure 2.26 indique que les valeurs des formants F1 et F2 pour les voyelles produites avec l'AeroMask se rapprochent des valeurs de F1 et F2 des voyelles enregistrées avec le microphone seul, suggérant que le signal acoustique obtenu avec l'AeroMask est très proche de celui du microphone. Ce n'est pas le cas pour les voyelles enregistrées avec EVA<sup>tm</sup> ni avec le masque de

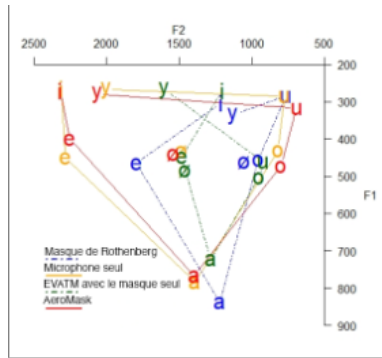


FIGURE 2.26 – Triangle vocalique, de deux locutrices, obtenu à partir d'un enregistrement acoustique équipées de l'AeroMask, d'après [Elmerich 2020c].

Rothenberg pour les lesquels, les valeurs de F1 et F2 se rapprochent du centre du triangle.

Table 1: Confusion matrices for the categorisation of vowels by recording condition. Upper panel for isolated vowels, lower panel for vowels embedded in /p\_/. Rows for reference vowels, columns for listeners' responses. Bottom rows for accuracies with 95% CIs.

	V: ACOUSTIC						V: FIBER						V: EVA						V: ROTH									
	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a
i	76	0	0	0	0	0	0	75	1	0	0	0	0	0	57	9	7	0	3	0	0	60	0	12	0	2	2	0
y	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	70	2	0	3	0	0	12	31	29	0	3	1	0
u	0	1	75	0	0	0	0	0	1	70	0	1	4	0	0	2	74	0	0	0	0	0	0	58	0	0	18	0
e	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	2	2	61	8	3	0	4	0	4	17	11	40	0
ø	0	0	0	1	75	0	0	0	0	0	2	74	0	0	0	0	0	1	73	2	0	0	0	0	1	3	72	0
o	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	1	75	0	0	0	2	0	3	71	0	0	0	3	0	0	73	0
a	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	3	5	5	63	0	0	0	0	5	1	69
	Accuracy: 0.996 (0.99, 1)						Accuracy: 0.981 (0.97, 0.99)						Accuracy: 0.883 (0.85, 0.91)						Accuracy: 0.586 (0.54, 0.63)									
	pVp: ACOUSTIC						pVp: FIBER						pVp: EVA						pVp: ROTH									
	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a	i	y	u	e	ø	o	a
i	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0
y	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	9	65	2	0	0	0	0
u	0	1	75	0	0	0	0	0	1	74	0	0	1	0	0	0	73	0	1	2	0	0	3	69	0	0	4	0
e	7	0	0	69	0	0	0	7	1	0	68	0	0	0	9	2	0	64	1	0	0	12	1	0	35	5	0	22
ø	0	1	1	0	74	0	0	0	2	0	0	74	0	0	0	1	1	0	73	0	0	1	3	16	10	17	28	1
o	0	0	5	0	0	71	0	0	0	5	0	0	71	0	0	0	23	0	1	51	1	0	0	12	0	2	60	2
a	0	0	0	0	1	0	75	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	3	11	5	57	0	0	0	0	3	0	73
	Accuracy: 0.970 (0.95, 0.98)						Accuracy: 0.968 (0.95, 0.98)						Accuracy: 0.885 (0.85, 0.91)						Accuracy: 0.744 (0.70, 0.78)									

FIGURE 2.27 – La matrice de confusion obtenue à partir des tests de perception. V = voyelle, pVp = voyelle dans le contexte /p/, ACOUSTIC = microphone seul, FIBER = AeroMask, EVA = EVATM, ROTH = masque de Rothenberg, (n=76), d'après [Elmerich 2023c].

La matrice de confusion obtenue à partir de tests de perception, construits avec les mêmes enregistrements que pour l'analyse acoustique de la mesure des formants F1 et F2, montre que l'AeroMask se rapproche perceptivement du signal acoustique obtenu avec le microphone seul. La nouvelle isolation a été mise en place en 2024. Je décrirai le nouveau système d'isolation dans la partie sur les nouveaux développements 2.1.3.12.

### 2.1.3.8 Séparation du flux d'air oral et nasal

Le premier modèle de séparation que j'ai créé était fait en caoutchouc très souple. Il avait l'avantage de s'adapter parfaitement à la morphologie du locuteur, mais avait pour inconvénient de ne pas se fixer correctement sur le masque et était donc source de fuite.

La démocratisation de l'impression 3D, avec des prix de plus en plus abordables pour les

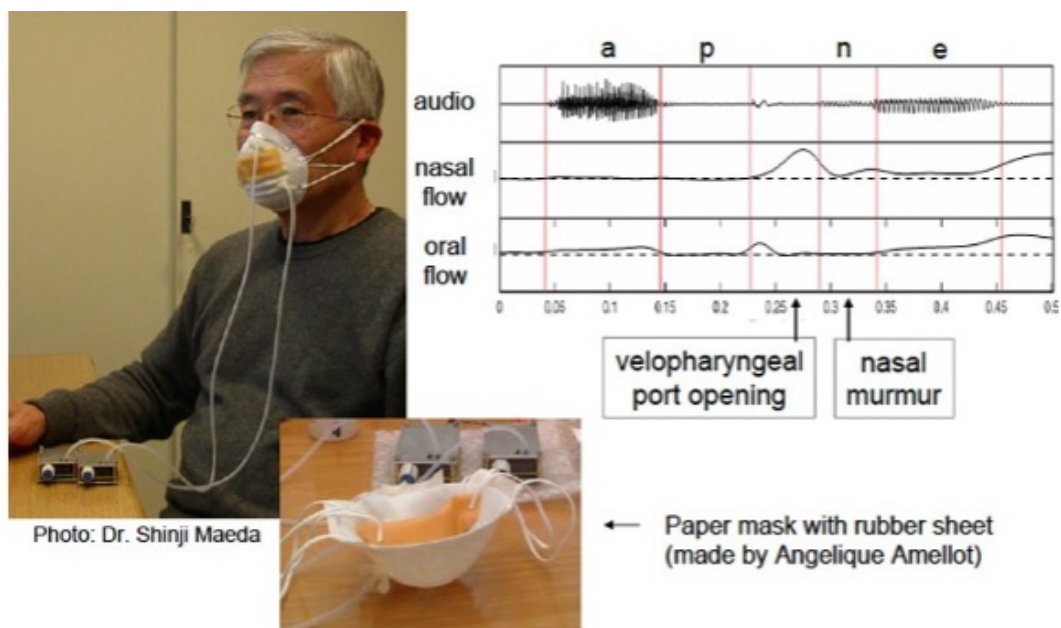


FIGURE 2.28 – Première version de séparation des cavités orale et nasale. À gauche : masque avec la séparation nasale porté par un sujet, à droite : exemple de données pour le mot « apnée », au milieu : intérieur du masque avec le placement de la séparation, rapport [ESAPVI](#), 2019.

matériaux d'impression et l'accessibilité des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), m'a permis de pallier ce problème de fuites.

J'ai modélisé une séparation à partir du logiciel [Fusion 360](#) et j'ai ensuite testé différents matériaux d'impression pour retenir celui qui garantissait les propriétés suivantes :

- une souplesse suffisante pour pouvoir s'adapter à la morphologie du locuteur ;
- en résine médicale pour assurer les précautions d'emploi liées au contact avec la peau du locuteur ;
- se mouler avec l'isolant qui entoure le masque afin de limiter les risques de fuite.

Après plusieurs tentatives et modélisations, j'ai réussi à élaborer cinq séparations qui diffèrent par la largeur et la profondeur, permettant ainsi de choisir la plus adaptée à la morphologie du locuteur.

Les séparations entre le nez et la bouche peuvent être imprimées dans différentes tailles, ce qui permet une meilleure adaptation au visage du locuteur et limite ainsi les risques de fuites. J'ai dessiné plusieurs prototypes et j'ai ensuite confié à Amélie Elmerich le soin de les tester, de choisir le plus approprié et de faire des adaptations pour tenir compte de la morphologie des locuteurs. La figure [2.29](#) montre un exemple de séparation élaborée pour séparer le flux d'air oral et nasal et s'intégrant parfaitement dans le masque en fibre de papier.

J'ai profité des possibilités offertes par l'impression 3D pour également modéliser la plupart des accessoires utilisés avec le masque, permettant ainsi au LPP d'être auto-suffisant et d'avoir les éléments aux dimensions exactes. Ils sont illustrés ci-dessous :

L'ensemble des éléments imprimés au LPP est visible en 3D et téléchargeables ([ici](#)).



FIGURE 2.29 – Exemple de séparation mise dans le masque qui permet de séparer le flux d'air buccal du flux d'air nasal.



FIGURE 2.30 – Accessoire pour maintenir le bandeau autour de la tête ainsi que les élastiques assurant un bon maintien et une bonne étanchéité du masque sur le visage de la personne.

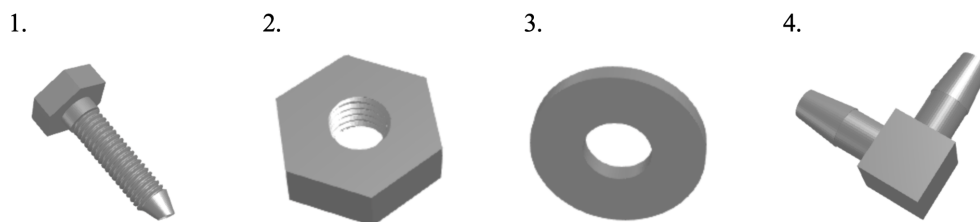


FIGURE 2.31 – Accessoires utilisés pour l'AeroMask que j'ai dessinés pour qu'ils s'adaptent parfaitement aux spécificités du masque. 1. Visse percée sur toute sa longueur pour que le tube de débit soit relié au capteur de débit ; 2, écrou pour maintenir la visse ; 3, écrou par 2 mis de chaque côté du masque pour limiter les fuites ; 4, adaptateur pour mettre un tube de pression dans le masque et un autre qui relie le capteur de pression.

### 2.1.3.9 Logiciel d'acquisition et de visualisation des données

J'ai travaillé avec un stagiaire, Florian Belhassen, sur un logiciel d'acquisition permettant de visualiser les données en temps réel et de pouvoir interagir sur la visualisation en changeant les échelles, disponible ([ici](#)). Pour cela, nous nous sommes appuyés sur un script Matlab fourni sur le site de [DataTranslation](#) et qui fonctionne avec la ToolBox Data Acquisition de Matlab.

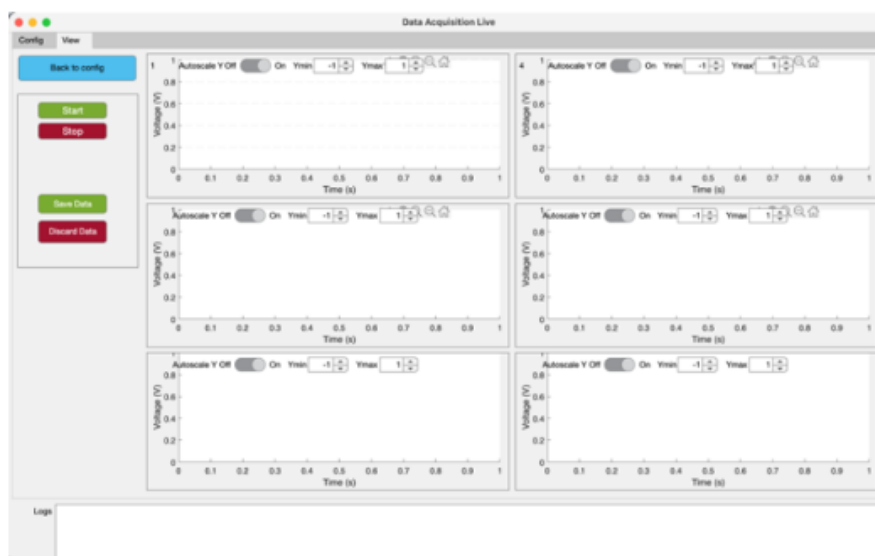


FIGURE 2.32 – Copie d'écran du logiciel DataAcquisition Live.m.

Ce script présente deux avantages par rapport aux autres logiciels d'acquisition utilisés pour l'enregistrement de données aérodynamiques ou fournis avec la carte DataTranslation : 1. il permet de visualiser les données en temps réel et 2. il offre la possibilité de contrôler l'échelle de visualisation, ce qui permet de voir rapidement si le masque et/ou la séparation sont mal positionnés et d'effectuer les ajustements nécessaires. Une vidéo disponible sur mon portfolio ([ici](#)) montre l'enregistrement d'un locuteur.

En parallèle, j'ai développé un script Matlab permettant de visualiser les données. Il est complémentaire du script d'acquisition et permet de calibrer, enregistrer en .wav, zoomer, filtrer et mesurer les données. Il est disponible ([ici](#)). Une version .exe de ce script existe pour qu'il soit utilisé sans l'environnement Matlab. La figure 2.32 montre un exemple de données acquisition avec l'AeroMask via le logiciel d'acquisition, dans l'ordre signal acoustique, pression intra-orale, [DAB](#), [DAN](#) et [EGG](#).

### 2.1.3.10 Utilisateurs

Amélie Elmerich a réalisé tous les enregistrements de sa thèse avec l'AeroMask et retrace dans son document les différentes étapes d'amélioration qui ont été mises en œuvre sur le système.

Depuis janvier 2023, Iraj Hashemi, étudiant de thèse de Didier Demolin, utilise l'AeroMask dans le cadre de son doctorat dans une campagne d'enregistrements de 10 locuteurs au Laboratory of Neurophysiology and Movement Biomechanics ([LNMB](#)) en Belgique. Il souhaite

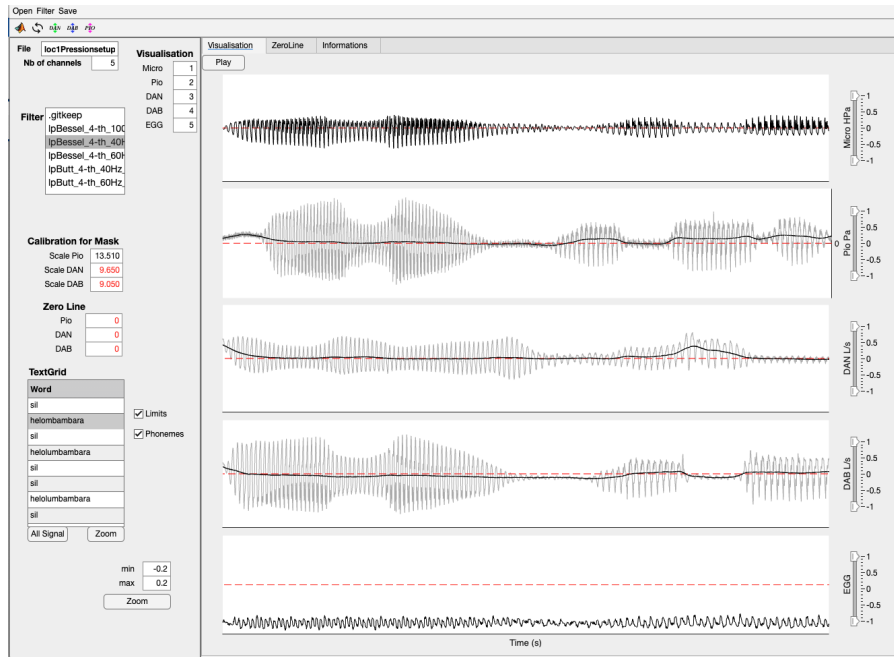


FIGURE 2.33 – Copie d'écran du logiciel AeroVisu.m.

compléter ces acquisitions Électroencéphalographie (EEG) et EMGs avec des données de débit et de pression liées à la respiration.

En mars 2024, Didier Demolin a utilisé le système pour une campagne d'enregistrement des débits oral, nasal, de la pression et de l'EGG en simultané sur quatorze locuteurs en Tanzanie parlant le Mbugu.

Plus récemment, Cédric Gendrot et son étudiante Lila Kim ont utilisé des données enregistrées avec l'AeroMask dans le cadre de la détection de nasalité à partir de réseaux de neurones, ce qui a abouti à deux participations à des colloques et dont je suis coauteur ([Elmerich 2023d]; [Kim 2023]), disponibles (ici) et (ici).

### 2.1.3.11 Direction

J'ai codirigé la thèse d'Amélie Elmerich conjointement avec Lise Crevier-Buchman. Au-delà des tests sur les locuteurs, elle a participé à toutes les étapes indispensables pour développer la nouvelle version de l'AeroMask. Elle a participé à plusieurs colloques pour présenter l'avancée de ce travail et dont je suis coauteur ([Elmerich 2020a]; [Elmerich 2021]), les articles sont disponibles (ici) et (ici).

Florian Belhassen, stagiaire venant de l'Université Paris 13, a travaillé sur le logiciel d'acquisition. Quatre stagiaires de l'Université Paris 13 ont également travaillé sur une version Python du logiciel de visualisation des données pour tenter d'ouvrir le logiciel à d'autres plateformes et d'autres systèmes d'exploitation (Mohamed El Moustapha, Gillian Guenier, Ali Raza Khan et Christian Kozak). Et enfin deux stagiaires Polytechniciens (Ouynes Makda et Matthieu Brion) ont eu en charge d'essayer de réactualiser une nouvelle carte d'acquisition, la carte DataTranslation n'étant plus commercialisée depuis 2020.

En 2023, j'ai recruté Amélie Elmerich, en fin de contrat d'allocation de recherche, sur un poste d'ingénieur à temps complet pour dupliquer l'AeroMask en vue d'équiper les laboratoires

intéressés.

Entre juin et septembre 2024, j'ai dirigé un stagiaire venant de l'école de [Design Condé de Paris](#), David Jacquinot, pour travailler sur le design de la boîte contenant la carte DataTranslation. David Jacquinot a également travaillé sur une amélioration du design des séparations des cavités nasale et buccale notamment pour les rendre plus souples.

### 2.1.3.12 Projets à court et moyen terme

L'AeroMask commence à intéresser des chercheurs travaillant dans d'autres laboratoires de phonétique. Le Langues et Civilisation à Tradition Orale, UMR7107 ([LACITO](#)) se dit intéressé par ce nouveau système, tout comme le Langage, Langues et Culture d'Afrique, UMR8135 ([LLACAN](#)). Un laboratoire de phonétique basé en Afrique du Sud a déjà déposé une demande de crédits pour s'équiper, ils souhaitent l'utiliser pour collecter des données sur les langues rares sur le terrain. Pour satisfaire ces demandes, deux solutions ont été envisagées :

1. l'une d'elle consiste à construire des systèmes complets. Pour essayer de fournir un système viable, secondée par Amélie Elmerich, je suis en train de passer en revue toutes les étapes de l'élaboration de l'AeroMask et de tester les limites pour améliorer l'ensemble. En parallèle, je suis en train de rédiger une demande d'invention à destination du service de Valorisation du CNRS ;
2. en juillet 2024, j'ai mis en place un système de prêt de matériel pour la mission de terrain de Didier Demolin en Tanzanie. Ce système vise à faciliter l'utilisation de l'AeroMask pour les enregistrements. Les personnes souhaitant utiliser l'AeroMask doivent répondre à un questionnaire disponible [ici](#). Nous fixons ensuite un ou plusieurs rendez-vous selon les besoins. Je leur fournis un système complet comprenant le nombre de masques nécessaires. Trois dimensions de masques sont disponibles : petit, moyen, grand. L'expérience a montré que le masque petit convient au plus grand nombre de locuteurs, il est donc fourni pour le nombre attendu de locuteurs. Le système est complété par cinq masques moyens et trois grands masques. Les masques sont prêts à l'emploi et sont fournis avec sept séparations : 3 pour le petit masque, 2 pour le masque moyen et 2 pour le grand masque. Un gabarit est également fourni avec chaque séparation. Le gabarit est une impression en dur de la forme de la séparation, permettant de tester directement sur le locuteur la forme de séparation la mieux adaptée.

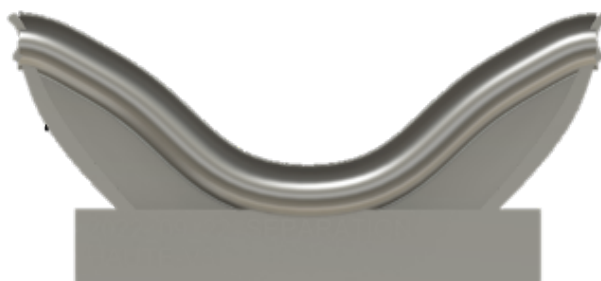


FIGURE 2.34 – Exemple de gabarit propre à une forme de séparation.

Le système complet inclut également la carte d'acquisition avec toutes les connexions nécessaires, deux batteries ainsi que les logiciels d'enregistrement et de visualisation. Il est possible

d'emprunter un ordinateur équipé de Matlab si nécessaire.

- Carte d'acquisition
- Batterie (2)
- Capteurs de pression
  - Débit (2)
  - Pression (1)
- Séparations
- Tubes de pression
- Tubes (2 jeux)
- Chargeur de batterie (optionnel)
- Adaptateur secteur (optionnel)
- Ordinateur (optionnel)
- Lingettes désinfectantes
- Scotch
- Nécessaire pour faire les trous
- Accessoires pour les tubes de pression
- Logiciel d'enregistrement
- Logiciel de visualisation
- Microphone et alimentation micro
- Camera (optionnel)
- Masques non préparés
- Pochettes avec les 3 tailles de séparation
- Masques Préparés
- Câbles RCA (nombre lié au nombre de capteurs + EGG si nécessaire)
- Masques non préparés
- Maintien Tête (+ Bandeau) (2)

FIGURE 2.35 – Pour exemple, liste du matériel fourni pour la mission de Didier Demolin en juillet 2024.

Avant la mission, je calibre l'ensemble des masques fournis et je prépare un fichier Excel pour indexer chaque masque et son utilisation. Ce fichier devra être complété par la personne responsable des enregistrements, car les informations qu'il contient sont reprises dans le script de visualisation des données.

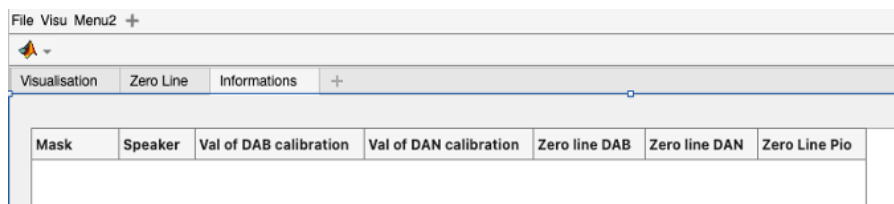
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Mission	Didier	Amp/Plot												
2															
3	Masque	Taille	Marque	Séparation	Galberk	Calibration	Pression	Valeur de calibration	Pression	Débit oral	Valeur de calibration oral	Débit nasal	Valeur de calibration nasal	Locuteur	Remarques
4	P0	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.248443	oui	8.248443	oui	8.248443	oui		
5	P1	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.39	oui	8.39	oui	8.39	oui		
6	P2	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.65	oui	8.65	oui	8.65	oui		
7	P3	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.67	oui	8.67	oui	8.67	oui		
8	P4	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	12.98	oui	12.98	oui	12.98	oui		
9	P6	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	12.83	oui	12.83	oui	12.83	oui		
10	P7	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.71	oui	8.71	oui	8.71	oui		
11	P8	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.95	oui	8.95	oui	8.95	oui		
12	P9	Petit	DeSafte		oui	13.23	oui	8.95	oui	8.95	oui	8.95	oui		

FIGURE 2.36 – Exemple d'un fichier .xlsx préparé en vue d'une mission de terrain.

La figure 2.35 présente les éléments qui seront fournis pour le prêt et la figure suivante montre les données qui sont reprises dans le script de visualisation (cf. figure 2.36) :

J'ai retravaillé le principe de l'isolation du masque pour s'affranchir de l'isolant 3M trouvé dans le commerce. Il est maintenant en résine médicale et imprimé avec une imprimante 3D qui permet d'imprimer en résine afin que toutes les normes médicales soient respectées.

J'ai également dessiné une nouvelle séparation, plus souple permettant de mieux s'adapter aux différentes morphologies des locuteurs. Les phases de test viennent de commencer pour ces deux nouveaux développements.



Mask	Speaker	Val of DAB calibration	Val of DAN calibration	Zero line DAB	Zero line DAN	Zero Line Pio

FIGURE 2.37 – Exemple des données remplies dans le fichier .xlsx qui sont ensuite utilisées dans le script de AeroVisu.m.



FIGURE 2.38 – Nouvelle version d’isolant posée autour du masque pour favoriser l’isolation.

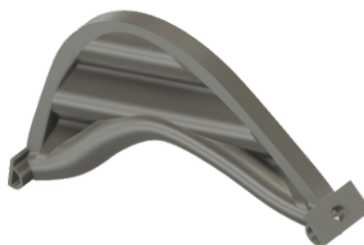


FIGURE 2.39 – Prototypage de la nouvelle séparation plus souple et plus ergonomique dessiné fin 2024.

## 2.2 Mise en place de protocoles expérimentaux au service de la recherche

Dans cette section, que je distingue volontairement du développement d'instruments, je vais décrire plusieurs procédures expérimentales que j'ai mises en place en tant que personnel d'appui à la recherche. Je réponds aux besoins des chercheurs et des étudiants en élaborant des protocoles expérimentaux adaptés. Cela peut impliquer l'adaptation d'instruments, la création de protocoles d'enregistrement, la synchronisation de données, la création de scripts pour l'acquisition et l'analyse des données, *etc.*

### 2.2.1 Adaptation d'instruments : Le Nasomètre

*Présentation de référence : Barbier, Héloïse, Liz Redouloux, Cécile Chapuis-Vandenbogaerde, Nicolas Kadlub, Cécile Fougeron, et Angélique Amelot. « Étude de normalisation et de validation du nasomètre en français sur une population pédiatrique (8-10 ans). Comparaison des résultats avec un dispositif similaire élaboré par le LPP (CNRS / Sorbonne Nouvelle). » In XIème Congrès de l'Association Francophone Des Fentes Faciales. Strasbourg, 2022, [Barbier 2022], disponible (ici).*

J'ai travaillé sur un protocole expérimental pour remplacer le [Nasometer](#) de Kay Pentax qui se compose de deux microphones et d'un logiciel pour mesurer la nasalance.

Dans cette partie pour plus de clarté, le Nasometer de Kay Pentax gardera la même charte graphique alors que le « Nasomètre », système que j'ai implémenté sera indiqué entre guillemets.

#### 2.2.1.1 Mon implication

J'ai développé l'ensemble du système permettant de suppléer le Nasometer de KayPentax. Le système se compose d'une série d'instruments d'acquisition ainsi que d'un logiciel permettant d'obtenir des mesures de nasalance [Horii 1980], je l'ai nommé « Nasomètre ».

#### 2.2.1.2 Collaborations

J'ai travaillé avec Cécile Chapuis, Service de chirurgie maxillo-faciale et plastique de l'Hôpital Necker, Paris et six stagiaires orthophonistes : Liz Redouloux, Théo Bompas, Héloïse Barbier, Manon Dalmet, Caroline Fersing et Daphnée Thevarajah.

#### 2.2.1.3 Description de l'instrument et du protocole expérimental associé

En 2021, le Service de chirurgie maxillo-faciale et plastique de l'Hôpital Necker m'a contacté pour savoir si je pouvais développer un système similaire à leur Nasometer, leur modèle étant vieillissant et plus commercialisé vers la France. Inspiré du Nasometer de PENTAX Médical, le « Nasomètre » que j'ai développé est un système d'acquisition de données acoustiques. Deux microphones placés sur une plaque, celle-ci servant de séparation entre le nez et la bouche du locuteur, sont à égal distance (un sur la face du dessus et l'autre sur la face du dessous) permettent d'enregistrer isolément l'acoustique oral de l'acoustique nasale, voir la figure 2.40.

J'ai adapté deux microphones cardioïdes (AKG 520L) et un système d'acquisition de données pour enregistrer simultanément les données acoustiques. Les deux microphones ont été positionnés sur la plaque du Nasometer à égale distance et au même niveau que les deux microphones d'origine.

Le système instrumental n'est pas très complexe. Le défi consistait à trouver un moyen d'acquérir les données simultanément et de pouvoir les comparer. J'ai donc proposé un petit signal de synchronisation (bip) à lancer au début de chaque enregistrement.

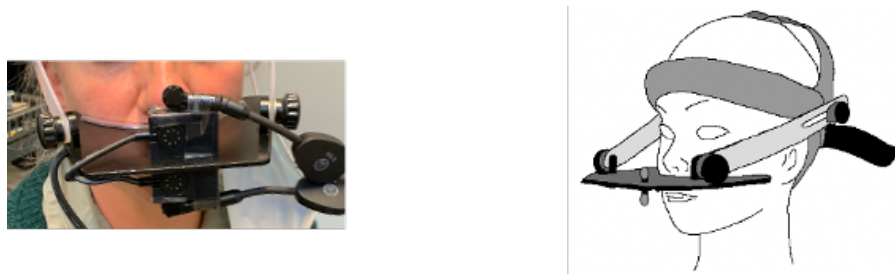


FIGURE 2.40 – « Nasomètre » : Système que j'ai élaboré à gauche à l'aide de deux microphones et en utilisant la plaque fournie par le KayPentax et schéma montrant le principe d'utilisation du système KayPentax à droite.

J'ai développé plusieurs scripts d'analyse pour aligner les données issues du Nasometer avec les données enregistrées par les deux microphones (« Nasomètre »). Pour une synchronisation parfaite, j'ai adapté un script Matlab d'alignement initialement développé par Thibaut Fux pendant son post-doc au LPP. Le script adapté s'appelle TransiCheck, il est disponible ([ici](#)).

Pour l'utiliser, il est nécessaire d'avoir deux fichiers .wav, un provenant du Nasometer et un autre .wav provenant du système que j'ai développé (« Nasomètre »). Au moins l'un des deux fichiers acoustiques doit être annoté en TextGrid, une annotation courante dans le logiciel d'analyse du signal de parole, Praat. Ce fichier TextGrid servira de référence.

Le script va mesurer la distance entre les Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) des deux signaux afin de créer une nouvelle TextGrid qui s'alignera avec le signal de référence et qui permettra que les deux fichiers soient synchronisés.

Une fois les données alignées, l'objectif était de pouvoir les comparer entre les deux outils afin de valider l'adaptation que j'ai réalisée. Pour cela, j'ai proposé aux stagiaires orthophonistes, chargés d'analyser les données, un script de visualisation et un autre de mesure.

Le premier script, un script Matlab intitulé CompNasoMicro, disponible ([ici](#)), permet de comparer les données du Nasometer et du « Nasomètre ». Après l'alignement des données, le script permet de les filtrer si nécessaire, de récupérer la valeur de RMS des différents signaux et de calculer la mesure de Nasalance.

La mesure de Nasalance, définie par Horii en 1980, est un ratio de l'enveloppe du signal oral par rapport à l'enveloppe totale du signal (l'enveloppe du signal oral + l'enveloppe du signal nasal). La mesure est exprimée en %, [[Horii 1980](#)].

Ce script a été complété par un script Praat. La dernière stagiaire orthophoniste qui a travaillé sur le protocole des mesures n'était pas très à l'aise avec l'outil informatique et, malgré la distribution du script CompNasoMicro avec un fichier .exe, elle n'a pas réussi à l'utiliser. J'ai donc développé un script Praat plus accessible permettant de visualiser et quantifier les données.

Le script Praat nommé Visudata, disponible ([ici](#)), nécessite de paramétrer les valeurs de filtrage au début du traitement. Il génère ensuite un fichier .pdf permettant de comparer les données entre elles. La sortie de ce script est assez similaire à de celle du script CompNasoMicro.

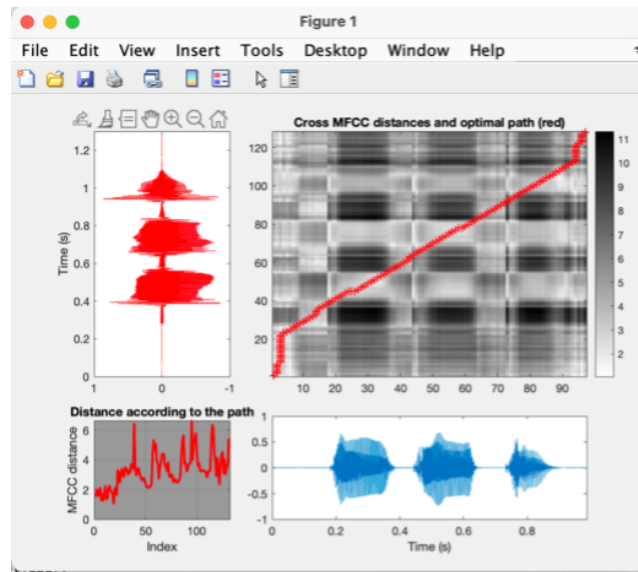


FIGURE 2.41 – Exemple d'alignement obtenu à partir du script TransiCheck. Plus la ligne pointillée en rouge est rectiligne meilleur est l'alignement.

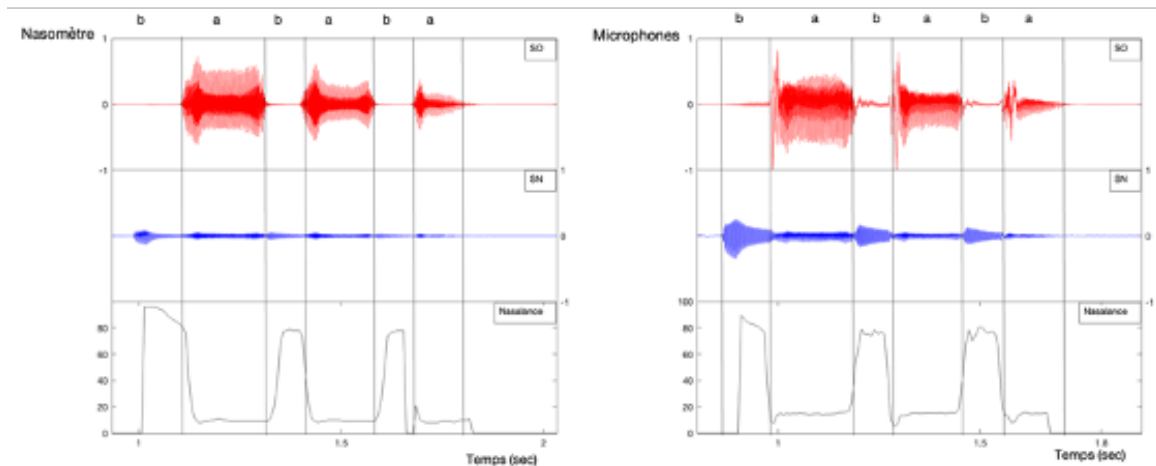


FIGURE 2.42 – Exemple de données du Nasometer comparées aux mesures du "Nasomètre" obtenues avec CompNasoMicro : en rouge le signal acoustique obtenu par le microphone situé au niveau de la bouche, en bleu celui obtenu par le microphone situé au niveau du nez et en noir la courbe de Nasalance.

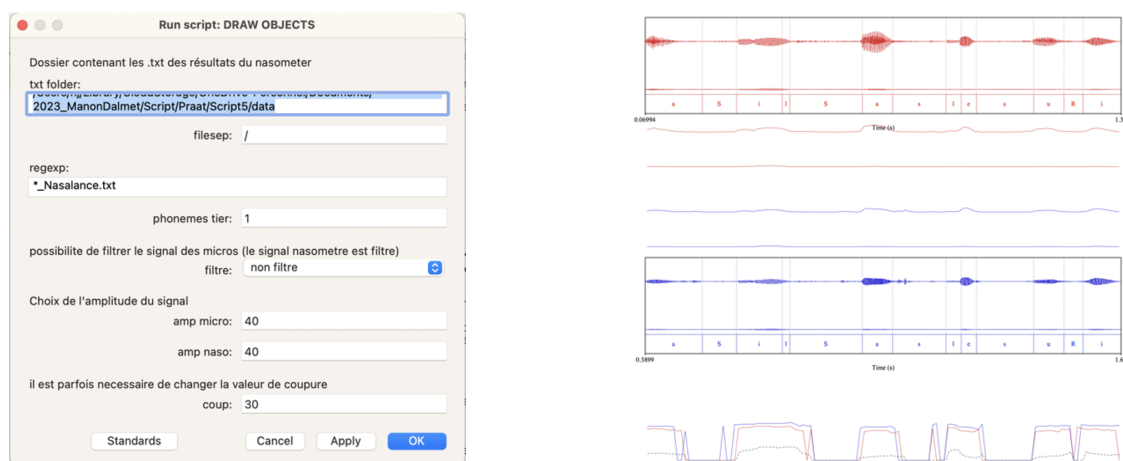


FIGURE 2.43 – Exemple des données obtenues à partir du script Praat Visudata : à gauche : boîte de dialogue qui doit être remplie avec les paramètres voulus, à droite : exemple de signaux obtenus (en rouge données du Nasometer ; 1. acoustique 2.RMS et 3. Nasalance brute, en bleu données du « Nasomètre » ; 1. acoustique 2.RMS et 3. nasalance brute et en noir pointillé valeurs extraites du logiciel KayPentax représentant les valeurs normalisées de nasalance en %).

L'ensemble de ces scripts a été conçu pour les stagiaires orthophonistes afin qu'ils puissent comparer les données issues des deux instruments. L'objectif était de les rendre faciles. Ils ont été fournis avec des modes d'emploi pour une utilisation autonome.

#### 2.2.1.4 Direction

Théo Bompas, stagiaire orthophonique sous ma direction en 2022, a traité les données pour les synchroniser et les rendre compatibles avec les scripts CompNasoMicro et Visudata. Manon Dalmet, stagiaire orthophonique sous ma direction en 2023, était chargée de comparer les données.

#### 2.2.1.5 Utilisateurs

L'instrumentation a déjà été utilisée par quatre stagiaires orthophonistes de Cécile Chapuis qui ont enregistré 40 enfants sains en 2022 et 40 enfants souffrant d'une fente palatine en 2023 afin de tester le « Nasomètre ». Deux des orthophonistes ont soutenu leur mémoire en 2022 et les deux autres en 2023. Barbier et *al.* ont présenté leur travail en 2022 au congrès de l'Association Francophone des Fentes Faciales [Barbier 2022]. L'ensemble des travaux a été validé par deux publications collaboratives entre le service de Necker et le LPP dans *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery* en 2024 [Fersing 2024] et [Barbier 2024] disponible ([ici](#)) et ([ici](#)).

#### 2.2.1.6 Actualité(s)/Projet(s)

Les premiers résultats sont prometteurs et montrent que le « Nasomètre » pourrait remplacer le Nasometer de KayPentax. Ce système est léger, peu coûteux et permet d'enregistrer et

d'analyser la voix des patients. Il est encore nécessaire d'apporter des améliorations tant au niveau du matériel que du logiciel.

A terme, je souhaite améliorer ce « Nasomètre » notamment en le miniaturisant au maximum afin de faciliter les sessions d'enregistrement grâce à un système léger et flexible. Je vais le concevoir à partir d'un logiciel de CAO puis imprimer avec une imprimante 3D. Voici un exemple du modèle de plaque envisagé.

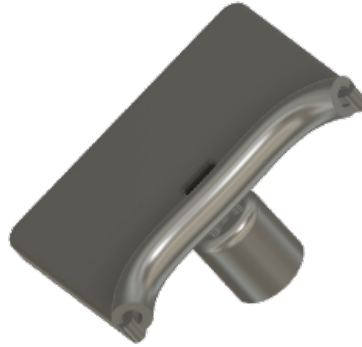


FIGURE 2.44 – Exemple de la plaque qui a été dessinée par mes soins et qui sera imprimée à l'aide d'une imprimante 3D.

Concernant le logiciel, je souhaite imiter le logiciel que j'ai développé pour l'AeroMask (cf. figure 2.32) afin de permettre aux utilisateurs d'obtenir les mesures de nasalance en temps réel pendant les sessions d'enregistrement.

### 2.2.2 Adaptation d'instruments et protocoles de mesure : Les différentes mesures liées à la nasalité (accéléromètre piézoélectrique microphone électret miniature)

*Article de référence : Audibert, Nicolas, et Angélique Amelot. « Comparison of nasalance measurements from accelerometers and microphones and preliminary development of novel features ». In INTERSPEECH 2011-12th Annual Conference of the International Speech Communication Association, 2825-28, 2011, [Audibert 2011], disponible (ici).*

Cette expérimentation a consisté à détourner plusieurs instruments dont la vocation première n'est pas l'analyse de la parole et les adapter pour qu'ils puissent être utilisés pour faire des enregistrements liés à la production de nasalité puis de comparer les résultats entre eux afin de développer des processus expérimentaux d'enregistrement et de mesures.

#### 2.2.2.1 Mon implication

Les instruments que j'ai utilisés et adaptés sont : 1. un capteur piézoélectrique, 2. un microphone électret miniature. Une série de tests de mesures, disponibles pour les techniques acoustiques et vibrosensorielles sur la nasalité, a été menée pour les valider afin de permettre l'évaluation de la nasalité.

L'objectif était de détourner plusieurs instruments pouvant potentiellement permettre de réaliser des mesures liées à la production de nasalité, de comparer les résultats des différents instruments et de développer des routines de mesure pour l'acquisition et l'analyse des données.

J'ai développé des techniques acoustiques et vibrosensorielles et testé des protocoles d'enregistrement et de mesure pour étudier les phénomènes de nasalité.

L'évaluation analytique de la nasalité à partir des signaux acoustiques est techniquement complexe, et son évaluation perceptuelle dépend de nombreux facteurs, notamment la langue maternelle de l'auditeur. Diverses techniques d'instrumentation ont été mises au point pour évaluer la nasalité à partir des signaux acoustiques et de vibrations et je les ai testées de manière systématique pour adopter celle qui me semblait la plus consistante.

### 2.2.2.2 Collaborations

Pour ces différentes expérimentations basées sur les mesures de nasalité, j'ai travaillé en collaboration avec Nicolas Audibert, Solange Rossato et Julie Montagu.

### 2.2.2.3 Description, directions et collaborations en lien avec l'accéléromètre piézoélectrique

En 2012, je me suis inspirée des travaux de Kent Stevens (1975) pour développer un dispositif complet (instrument, calibration, logiciel) à partir d'un accéléromètre piézoélectrique pour acquérir des données de vibration nasale [Stevens 1975]. Les accéléromètres piézoélectriques, principalement utilisés en musique, sont basés sur des techniques vibrosensorielles. Ils donnent une indication de la vibration d'une surface. Utilisés sur l'arête nasale (de préférence avec un double capteur), ils fournissent une indication des vibrations induites dans la cavité nasale lors de la production des phonèmes.

Une fois adapté et rendu facile d'utilisation, ce dispositif a été régulièrement utilisé par les étudiants (master et doctorants) et par plusieurs chercheurs du LPP. A noter que deux doctorants, Altijana Brkan et David Bustamante-Arango ont utilisé le protocole complet que j'ai mis en place pour leurs données de master et de thèse.

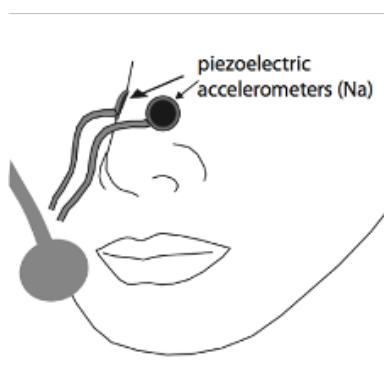


FIGURE 2.45 – Schéma montrant le placement l'accéléromètre piézoélectrique pour capter les vibrations nasales d'après [Vaissière 2010].

Une des étapes importantes a été d'identifier le signal de sortie du capteur piézoélectrique et de trouver un protocole de calibration pour pouvoir comparer les signaux issus de ce capteur à ceux issus du microphone. Il a ensuite fallu fournir aux utilisateurs des scripts leur permettant d'analyser leurs données.



voyelles nasales phonologiques (l'anglais américain, le bosnien et le norvégien). Pour évaluer le degré de nasalité produit, elle a utilisé le protocole instrumental et logiciel que j'ai développé. Cinq locuteurs natifs par langue ont enregistré un corpus de logatomes (CVNC) et un ensemble de mots et de phrases.

Son travail de thèse montre que 1. une différence inter-langues de stratégies existe, confirmant ainsi un fait déjà connu, 2. l'existence d'un contraste phonologique entre voyelles nasales et voyelles orales n'a pas d'influence prévisible sur la propagation de la nasalité, confirmant un fait déjà connu, 3. un modèle d'anticipation de nasalité peut être plus adéquat pour une langue que pour une autre, 4. les auditeurs francophones ne distinguent pas entre plusieurs degrés de nasalisation contextuelle, mais il existe une corrélation entre la quantité de vibrations issue de l'accéléromètre piezoélectrique et la perception du degré de nasalisation pour les auditeurs de l'ourdou. L'intérêt de cette étude est que la comparaison de phénomènes de coarticulation nasale des voyelles dans les cinq langues a été faite avec la même instrumentation, dans les mêmes conditions. Un autre intérêt est de montrer l'intérêt de la méthode choisie.

J'ai également participé en tant que personnel d'appui à la recherche à la mise en place de la méthodologie de la thèse de David Bustamante-Arango et l'ai aidé à mettre en place ses protocoles de mesures [Bustamante Arango 2021]. J'ai été membre de son jury de thèse. La thèse soutenue en 2021, traite de la perception et production des voyelles nasales du français par des hispanophones Espagnols et colombiens. Deux populations d'hispanophones ont participé à l'étude : des sujets n'ayant jamais étudié ou parlé le français (25 Espagnols et 20 Colombiens), et des apprenants du français de trois niveaux (débutant, intermédiaire et avancé : 30 apprenants espagnols et 26 apprenants colombiens). Les résultats des enregistrements avec le capteur piezoélectrique, ont montré que les Colombiens, produisent des voyelles nasales plus longues que celles des locuteurs natifs du français. Les résultats sur la proportion de nasalité des voyelles nasales montrent que la proportion de nasalité des voyelles nasales chez les locuteurs natifs du français est plus importante que chez les apprenants hispanophones. Cependant, les résultats indiquent également que les hispanophones peuvent ajuster leurs gestes articulatoires pour produire des vibrations nasales, d'où une proportion de nasalité spécifique à chaque voyelle nasale, tout comme c'est le cas pour les locuteurs natifs du français : pour les trois groupes de sujets, l'ordre de proportion de nasalité est  $/\tilde{o}/ > / \tilde{a}/ > / \tilde{e}/$ . La proportion de nasalité des voyelles nasales serait inversement proportionnelle à l'ouverture des lèvres : plus l'aperture labiale est importante, moins la proportion de nasalité serait élevée, avec la proportion de nasalité la plus basse pour  $/ \tilde{e}/$ . Les données aérodynamiques de [Amelot 2004a] montrent en effet que  $/ \tilde{e}/$  a une petite résistance au niveau des lèvres et une ouverture du vélum assez importante, ce qui entraîne une proportion de nasalité plus basse. Plus il y a de résistance au niveau des lèvres, plus la proportion de nasalité est élevée :  $/\tilde{o}/$  a la proportion de nasalité la plus élevée. Pour les apprenants hispanophones, les configurations des lèvres sont sans doute différentes de celles des natifs. Les données sur les formants en début de voyelle (partie orale), qui pourraient permettre d'inférer en partie ces configurations, montrent beaucoup de variabilité, tout comme les toutes premières analyses de dynamique temporelle des mouvements d'aperture et d'étirement (écartement) labiaux. Cependant, la proportion de nasalité des trois voyelles nasales s'ordonne de la même façon chez les apprenants et les natifs.

En plus d'Altijana Brkan et David Bustamante-Arango, en 2008, Aline Patricia De Santiago Gonçalves a utilisé mon protocole complet pour faire une analyse de la nasalité contextuelle en Portugais du Brésil et en français durant Master 2 en 2008. Ce même protocole a été utilisé pour les mesures de nasalité dans le cadre du projet *i-Treasures* et plusieurs articles dont je

suis coauteur sont parus : [Al Kork 2014] ; [Chawah 2014] ; [Fux 2014] ; [Jaumard-Hakoun 2013], disponibles ([ici](#)), ([ici](#)), ([ici](#)), ([ici](#)).

#### 2.2.2.4 Description et collaborations en lien avec le microphone électret miniature

En 2006, lors d'un post-doc au Gipsa Lab de Grenoble, j'ai travaillé avec Solange Rossato et me suis inspirée des travaux de Hirano pour développer un microphone miniature pouvant être inséré dans la cavité nasale par le biais de la narine [Hirano 1966]. Ce microphone miniature est illustré ci-dessous.

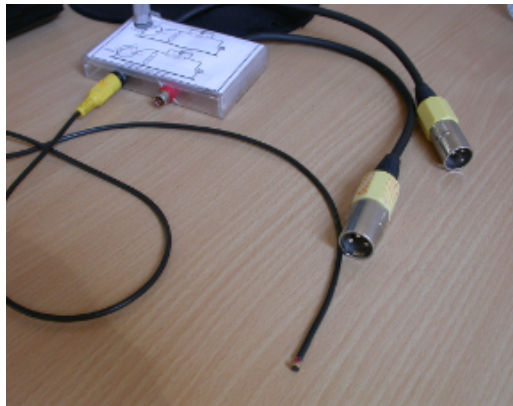


FIGURE 2.48 – Illustration du microphone miniature utilisé pour mesurer l'acoustique à l'intérieur de la cavité nasale.

Une capsule micro-électret de marque Monacor (Référence MCE-4001), sub-miniature et de qualité, est insérée dans une gaine de nasofibroscope. Elle est reliée à un boîtier contenant un atténuateur et à une carte son. Si ce microphone est positionné entre l'embouchure de la narine et le vélum, il permet d'enregistrer l'acoustique passant par le nez. Ce type de capsule est également utilisée dans les mesures de résonance modélisées décrites dans mes projets de recherche (*cf.* la partie 5.4).

Malheureusement, il n'y a pas eu d'étude réalisée avec le microphone miniature que j'ai construit, seulement des enregistrements de faisabilité. Une limitation assez importante persiste dans cet instrument, même si la gaine de fibroscope contenant le microphone ne rentre pas très profondément dans la cavité nasale, elle est néanmoins insérée de quelques centimètres (2-3 cm), ce qui rend cette instrumentation potentiellement invasive et ne pouvant pas être conduite en laboratoire sans la supervision d'un médecin. Je présente cet instrument dans son développement actuel et j'espère qu'il pourra un jour être utilisé pour déterminer s'il apporte des informations supplémentaires pour l'étude de la nasalité.

Un système assez similaire, a été développé par Bernard Gautheron pour la thèse de Julie Montagu. Il permet d'enregistrer les vibrations nasales sortant du nez [Montagu 2007]. Le système de Bernard Gautheron est à l'origine un écouteur intra-auriculaire qui, placé à l'embouchure de la narine, permet de capter les vibrations nasales sortantes.

Julie Montagu et moi-même avons comparé les mesures issues de l'écouteur intra-auriculaire avec les mesures de débit d'air nasal, obtenues avec EVA<sup>tm</sup>. L'étude, disponible ([ici](#)), consistait à comparer les temps de début et de fin du flux d'air nasal et du signal acoustique nasal par rapport à ceux du signal acoustique total (issu du microphone) pendant la production des

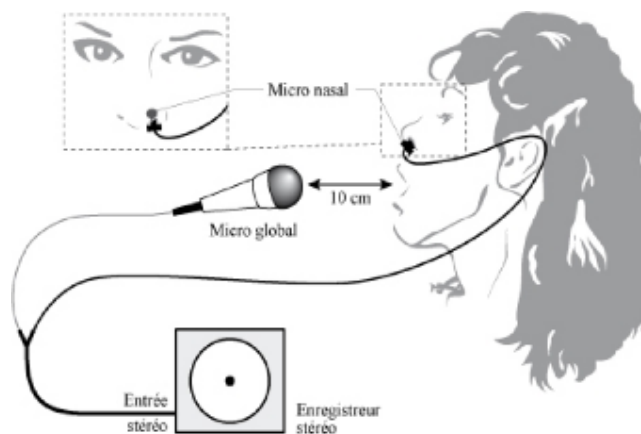


FIGURE 2.49 – Écouteur Intra-auriculaire utilisé pour capter les vibrations nasales, d'après [Montagu 2007].

voyelles nasales du français. Les résultats ont montré que, d'une part, le décalage entre le signal acoustique oral et le flux d'air nasal, et entre le signal acoustique oral et le signal acoustique nasal est relativement faible au début, sauf dans le contexte consonantique [l] où le flux d'air nasal et le signal acoustique nasal anticipent le signal acoustique oral. D'autre part, le flux d'air nasal persiste après la fin acoustique de la voyelle nasale, tandis que le signal acoustique nasal s'arrête avant ou en même temps que le signal acoustique oral respectivement dans les contextes droits [t] et [z]. A la fin de l'article, nous avons conclu que les caractéristiques temporelles du flux d'air nasal et du signal acoustique nasal donnent des informations complémentaires sur la production des voyelles nasales du français [Montagu 2005].

### 2.2.2.5 Mesures de nasalité comparant plusieurs systèmes

Le LPP est équipé des instruments décrits précédemment qui permettent des acquisitions acoustiques et vibrosensorielles sur les phonèmes nasals. C'est une richesse expérimentale. Il nous a semblé opportun avec Nicolas Audibert de tester ces instruments ainsi que les différentes mesures possibles.

L'étude de 2011 a permis de comparer quatre mesures de la nasalité calculées comme des rapports entre l'amplitude des signaux enregistrés avec des accéléromètres et des microphones [Audibert 2011]. Deux nouvelles mesures, basées sur les différences d'amplitude RMS entre le signal nasal et le signal de vibration des plis vocaux ou le signal acoustique oral, ont été introduites. Les mesures ont été comparées sur un total de 584 énoncés produits par quatre locuteurs natifs français. Les résultats montrent que :

1. toutes les mesures distinguent les consonnes nasales des consonnes orales ;
2. les différents dispositifs expérimentaux ne peuvent pas être considérés comme équivalents ;
3. Les mesures basées sur les différences semblent mieux décrire l'évolution temporelle de la nasalité que les mesures basées sur les ratios.

Il n'existe pas, à ma connaissance, de mesures idéales pour la nasalité et notamment en ce qui concerne les voyelles nasales et nasalisées. Les résultats des mesures acoustiques sont parfois aléatoires, extrêmement liés au phonème environnant et au locuteur [Chen 1997] et difficile à reproduire. Les mesures de nasalance sont liées au caractère voisé/non voisé du phonème

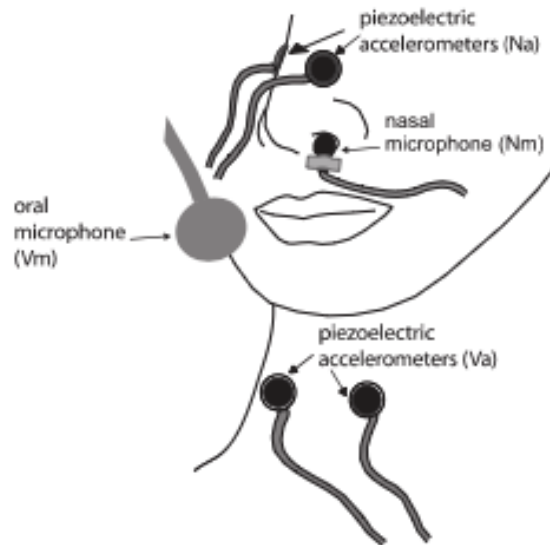


FIGURE 2.50 – Ensemble des instruments utilisés en simultan e pour cette étude, d’après [Audibert 2011].

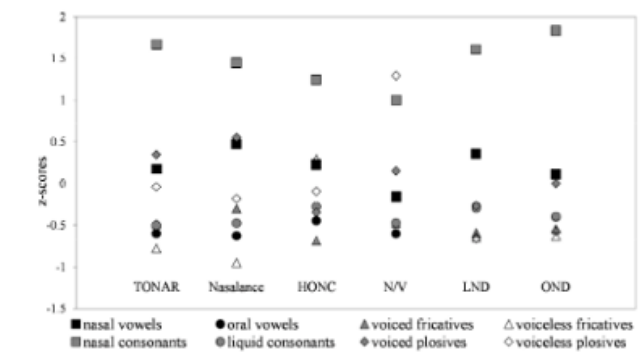


FIGURE 2.51 – Distribution des valeurs moyennes des z-scores des 6 mesures de nasalité calcul es sur les classes phonétiques pour 4 locuteurs, d’après [Audibert 2011].

[Horii 1980]. Les mesures de spectre moyen pensées par Elmerich en 2024 sont potentiellement prometteuses mais parfois difficiles à interpréter [Elmerich 2024b]. Dans la partie Projet de Recherche (cf. Chapitre 5), je décrirai une expérimentation que j’ai mise en place avec deux locuteurs francophones, un homme et une femme. J’ai collecté des données acoustiques et aérodynamiques (flux d’air oral et nasal séparé). Pour ces deux locuteurs, je dispose d’images issues de Scanner (acquises à l’hôpital Foch) permettant d’avoir une idée de la géométrie de leur cavité nasale et de leur sinus. J’espère, à partir de maquettes tridimensionnelles statiques et de mesures acoustiques et aérodynamiques trouver un paramètre de mesure permettant de classer les marqueurs de nasalité.

### 2.2.2.6 Actualité(s)/Projet(s)

Actuellement, ces différents instruments sont essentiellement présentés en démonstration lors des cours de Master 1 et Master 2 que j’anime. Aucun projet de recherche n’est associé à ces instruments, ni de mon côté ni de la part des chercheurs du LPP.

## 2.2.3 Élaboration de scripts informatiques à l’usage des chercheurs et des étudiants

*Je présente dans cette section quelques-uns des principaux scripts d’acquisition et d’analyse que j’ai mis en place en tant que personnel d’appui à la recherche. Certains sont disponibles en téléchargement libre sur mon [Portfolio](#)*

Une de mes tâches en lien avec le développement de protocoles expérimentaux, en tant que personnel d’appui à la recherche, a été de développer des scripts d’analyse de données.

### 2.2.3.1 Détection des mouvements linguaux

Dans le cadre de sa thèse, David Bustamante-Arango a filmé les lèvres des locuteurs qui ont participé à la procédure d’enregistrement de son corpus [Bustamante Arango 2021]. Deux caméras vidéo ont enregistré les mouvements des lèvres à 50 images/sec : une caméra frontale, positionnée à un mètre du participant, pour capturer les mouvements d’arrondissement et d’écartement des lèvres, et une caméra latérale pour les mouvements de protrusion. Le mouvement des lèvres a été suivi à l’aide de quatre capteurs fixés autour des lèvres du participant : deux aux commissures, un sur la lèvre supérieure et un autre sur la lèvre inférieure et un capteur entre les deux sources qui sert de référence pour établir des mesures de distances euclidiennes.

Les données sur l’articulation labiale des locuteurs produisant des voyelles nasales, y compris chez des apprenants, permettent de contribuer à une approche intégrale de la prononciation des voyelles nasales du français. Cela permet de souligner cet autre aspect de l’articulation des voyelles nasales : l’arrondissement et la protrusion des lèvres, en parallèle avec les autres paramètres de mesures effectués dans son travail de recherche de thèse, à savoir la pression acoustique orale et la pression vibratoire nasale.

Le script Matlab illustré sur la figure 2.53 a permis à David Bustamante-Arango d’analyser l’articulation labiale de ces locuteurs. Le script permet d’extraire toutes les images d’une séquence vidéo. Il va ensuite isoler les marqueurs disposés sur le visage du locuteur en les numérotant de 1 à 5. En appliquant différents filtres, il est possible d’augmenter le contraste entre les marqueurs et la peau du locuteur. Une fois le contraste suffisant, le script va détecter les couleurs voulues dans les images sélectionnées et placer une croix au centre de la zone détectée.



FIGURE 2.52 – Exemple de positionnement des pastilles (en gris sur la figure) pour un locuteur colombien, d’après [Bustamante Arango 2021].

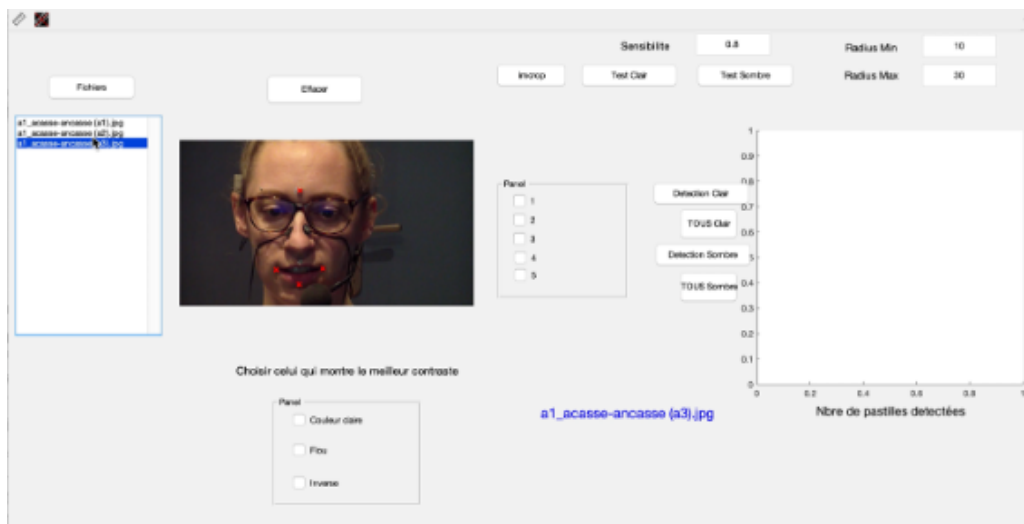


FIGURE 2.53 – Illustration d’un script de détection de pastilles qui a été utilisé dans la thèse de David Bustamante-Arango, d’après [Bustamante Arango 2021].

Puis, les coordonnées en pixels dans les axes x et y seront extraites sur la totalité des images. Suite à cette étape, l'utilisateur devra sélectionner un marqueur de référence, qui servira à extraire automatiquement les mesures de distances euclidiennes entre les différents marqueurs. Les mesures seront ensuite alignées avec le signal acoustique correspondant (*cf.* figure 2.54).

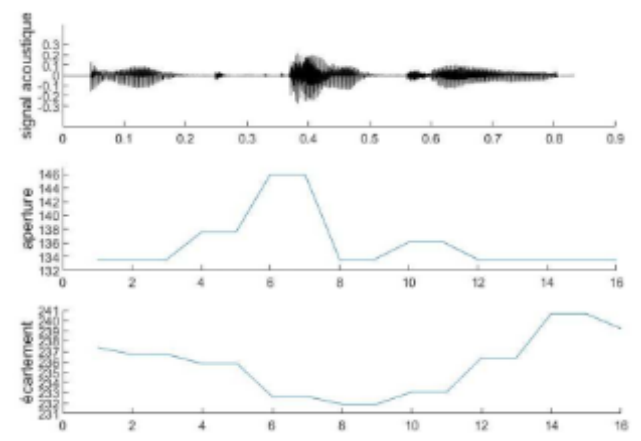


FIGURE 2.54 – Mouvements des lèvres lors de la production de la séquence « Vous dites aintoune six fois » (en gras la partie visible sur le signal acoustique) par une apprenante espagnole de niveau avancé. De haut en bas pour chaque panneau : signal acoustique, aperture labiale, et écartement des lèvres, d’après [Bustamante Arango 2021].

Les scripts ainsi que les modes d’emploi associés sont disponibles ([ici](#)).

### 2.2.3.2 Acoustique nasale

J’ai développé ce script pour l’analyse des données de thèse d’Amélie Elmerich [Elmerich 2024b]. Je me suis inspirée des articles de [Chen 1997] et de [Styler 2017]. Ce script permet de visualiser le signal acoustique oral, le signal acoustique nasal en parallèle avec les débits d’air oral et nasal. La particularité des données acquises avec l’AeroMask est que, selon le filtre appliqué sur les signaux de débit, il est possible de récupérer différentes composantes du signal. Plus la valeur en Hertz (Hz) du filtre (Butterworth ou Bessel) est basse (par exemple 60 Hz), et plus il est possible de récupérer la composante principale du signal (débit). Et inversement, plus la valeur du filtre est haute (par exemple 3000 Hz), plus il est possible de récupérer les informations présentes dans les fréquences comprises entre 0 et 3000 Hz, soit pour la parole au moins les deux premiers formants.

Lorsqu’une zone est sélectionnée sur le signal acoustique oral, le script va proposer la coupe spectrale de cet intervalle de temps pour le signal acoustique oral et superposer la coupe spectrale issue du signal acoustique nasal. Cette coupe spectrale est calculée à partir de trois cycles obtenus après le calcul de la fréquence fondamentale. Le script permet ensuite de visualiser les quatre premiers harmoniques ainsi que la courbe de LPC afin d’extraire automatiquement les valeurs des formants F1, F2, F3, ainsi que la largeur de chacun et la valeur en dB des quatre premiers harmoniques.

Ce script a permis de mettre en évidence que certains patients souffrant de polypose nasale auront des valeurs de H1, H2, H3 et H4 (H = Harmonique) pour le signal acoustique

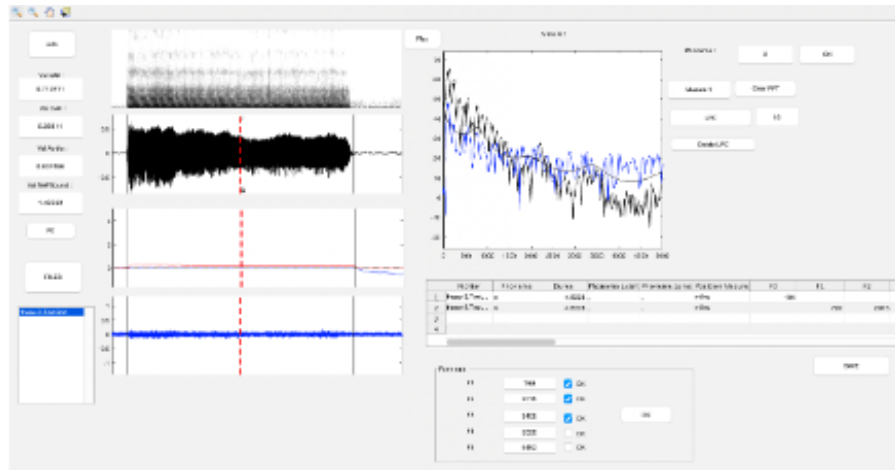


FIGURE 2.55 – Illustration du script permettant d’extraire des coupes spectrales des signaux acoustiques oral et nasal. En noir le signal acoustique oral et en bleu le signal acoustique nasal, d’après [Elmerich 2024b].

nasal significativement supérieures aux valeurs de ces mêmes harmoniques mesurés sur le signal acoustique oral, comme illustré sur la Figure 58. Une étude préliminaire et dont je suis coauteur a été menée en 2023 par Amélie Elmerich avec ce script [Elmerich 2023a], disponible ([ici](#)).

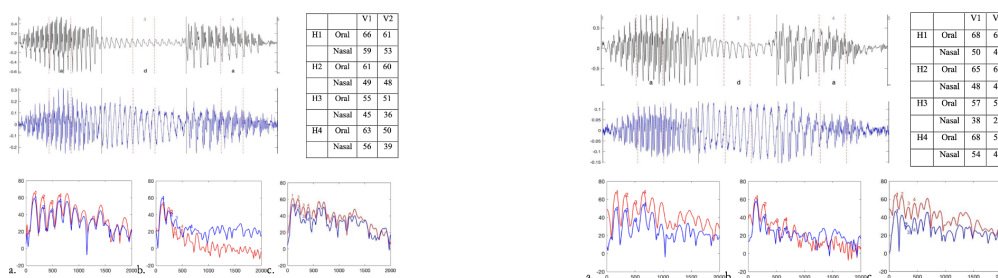


FIGURE 2.56 – Du haut vers le bas : signal acoustique oral, nasal du logatome [ada] ainsi que les coupes spectrales oral (rouge) et nasal (bleu) sur [a] (V1) en a., [d] en b. et [a] (V2) en c., ainsi que sur la droite, un tableau reprenant les valeurs des harmoniques en dB sur le signal oral et nasal, avant chirurgie (droite), après chirurgie (gauche), d’après [Elmerich 2023a].

Ce script, le mode d’emploi associé et un jeu de données sont disponibles ([ici](#)). Une version préliminaire a déjà été fournie pour l’analyse de données simultanées prises avec le PNG1 et la fibroscopie, et a été testée par Patricia Basset, Jacqueline Vaissière en 2021.

### 2.2.3.3 Synchronisation audio et vidéo : script VisuUSCAM

Ce script Matlab permet d’aligner des images issues de plusieurs sources à partir d’un signal acoustique. Dans le cadre de son mémoire de Master 1, Song Ying, que j’ai dirigé, a souhaité étudier l’articulation des voyelles nasales en français par des apprenants chinois (2019). Pour mener à bien son étude, elle a enregistré ses données à l’aide du casque HyperHelmet *i-Treasures*, qui a fourni les données d’ultrasons des mouvements de la langue associées aux données des

mouvements des lèvres via une caméra vidéo à une fréquence de 50 Hz et du signal acoustique à partir d'un microphone. À la fin de son protocole d'enregistrement, elle disposait d'un jeu de données des mouvements de la langue, des mouvements des lèvres à partir d'une caméra permettant d'obtenir 50 images/sec synchronisées avec le signal acoustique.

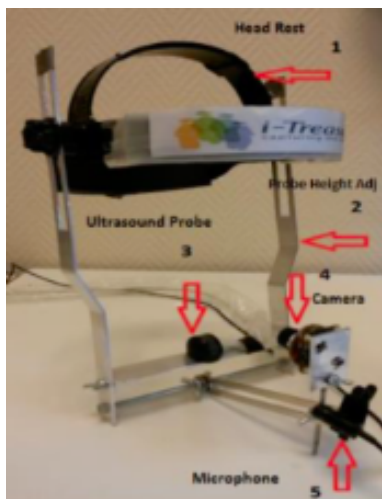


FIGURE 2.57 – Illustration du casque HyperHelmet développé dans le cadre du projet i-Treasures et utilisé par Song Ying dans le cadre de son mémoire de Master 1.

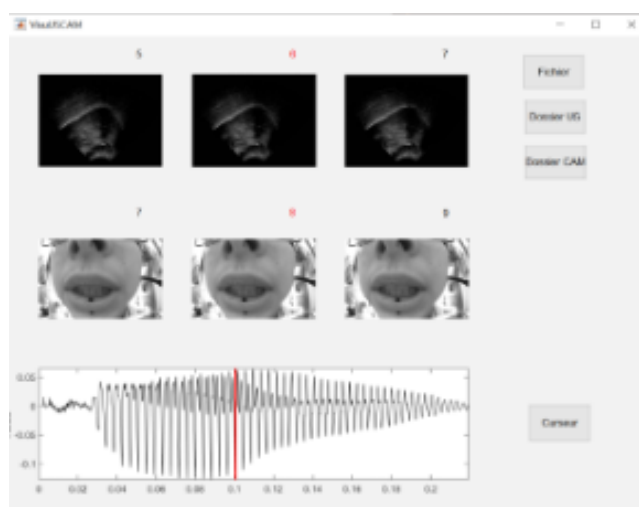


FIGURE 2.58 – Illustration du script VisuUSCAM pour un locuteur chinois apprenant le français et produisant le mot « thym ».

Le script VisuUSCam permet d'aligner les données issues de l'échographe à ultrason et les données vidéo des lèvres à partir du signal acoustique. Il permet ainsi d'indiquer la position des lèvres et de la langue à un instant précis sur le signal acoustique, comme on peut le voir sur la figure 2.58 avec le trait rouge pour lequel sont présentées les images des lèvres et les images de la surface de langue, ainsi que l'image précédente et suivante. L'image à cet instant  $t$  peut être extraite pour effectuer des mesures précises notamment pour suivre la surface de la langue.

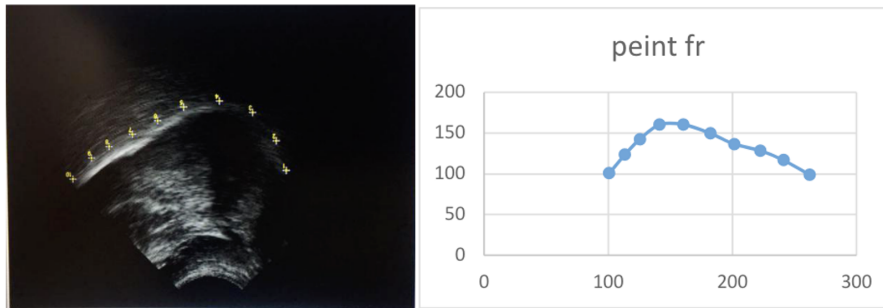


FIGURE 2.59 – Image extraite sur laquelle il est possible de repérer le dos de la langue, la position des points est ensuite retranscrite sur Excel.

Song Ying a ainsi pu montrer que les locutrices chinoises avaient une articulation plus postérieure (position de la langue) des voyelles nasales que les locuteurs francophones. Le script, un jeu de données et un mode d'emploi sont disponibles ([ici](#)).

#### 2.2.3.4 Script Aire aux lèvres

Ce script Matlab que j'ai développé dans le cadre du projet européen [i-Treasures](#) permet de détecter les zones inter-labiales. Ce Script a été développé initialement pour Claire Pillot-Loiseau afin qu'elle puisse exploiter des données de chants corses acquises avec le casque HyperHelmet (*cf.* figure 2.57). Ce script utilise des images extraites d'une vidéo enregistrée via une caméra à 50 images/sec. Pour chaque image, le script va modifier l'image et la transformer en une simple image en noir et blanc. Il est possible de modifier le contraste pour éliminer du bruit et renforcer les zones à détecter. Puis le script ira chercher la zone noire dans une sélection identifiée par l'utilisateur afin d'en extraire le nombre de points noirs (pixels), et ainsi établir une aire relative pour chaque locuteur. Il est également possible de supprimer manuellement des zones en cas d'erreur de détection.

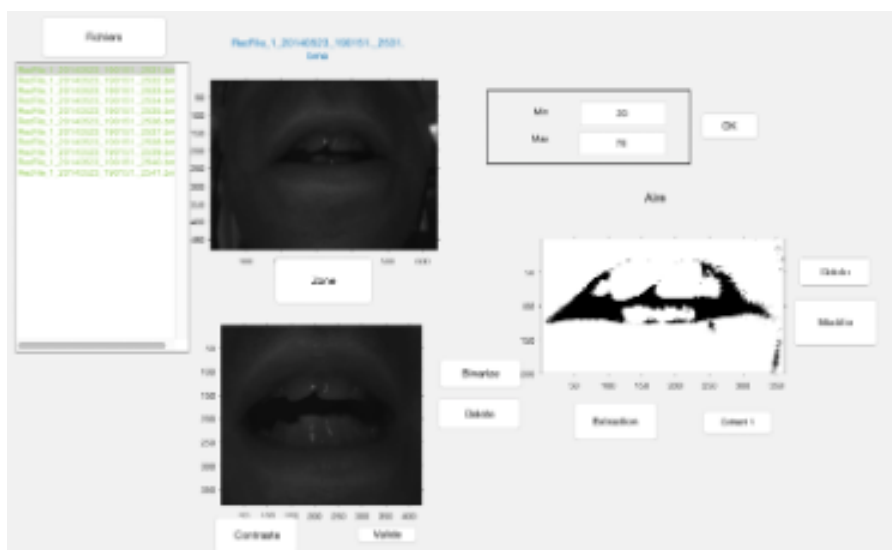


FIGURE 2.60 – Illustration du script Matlab Aire aux Lèvres.

Le script, un jeu de données et un mode d'emploi sont disponibles ([ici](#)). Ce script et le script VisuUSCAM sont réutilisés depuis octobre 2024 par Louise McKeever, qui a rejoint le LPP dans le cadre d'un post-doctorat financé par l'Université Sorbonne Nouvelle (*cf.* Chapitre 4). L'objectif principal de son projet est de collecter et d'analyser des données linguales, laryngées et labiales complètes de chanteurs et de personnes souffrant de pathologies vocales. Ce protocole soutiendra le développement d'un modèle prédictif qui englobe trois états : la réalisation maximale dans le chant (état 1), la réalisation minimale dans la parole altérée (état 3), et un modèle standardisé de la voix (état 2). Plus particulièrement Louise McKeever est en charge d'analyser une base de données existante contenant des enregistrements d'EGG, de données sur les lèvres et d'ultrasons de Cantu in Pagaglia, acquise à partir du casque HyperHelmet de i-Treasures, afin de discerner des modèles articulatoires détaillés dans le chant professionnel, en juxtaposant la sur-articulation et la sous-articulation dans le chant et dans la parole pathologique. Le script Aire aux lèvres est essentiel pour son projet de recherche, car il permettra d'explorer des données de cette base qui n'avaient pas pu être exploitées jusqu'à présent.

### 2.2.3.5 Script Alignement et Découpage

Beaucoup de chercheurs du laboratoire enregistrent des données avec des instruments de la plateforme physiologique (*cf.* Chapitre 1). J'ai développé un script Matlab nommé VisuCutPrint qui permet de découper différents formats de fichiers en fonction d'une TextGrid créée à partir de Praat. Il permet ensuite de synchroniser les différents fichiers découpés et de générer une image au format .eps et .fig du nouveau fichier, permettant de vérifier visuellement le découpage.

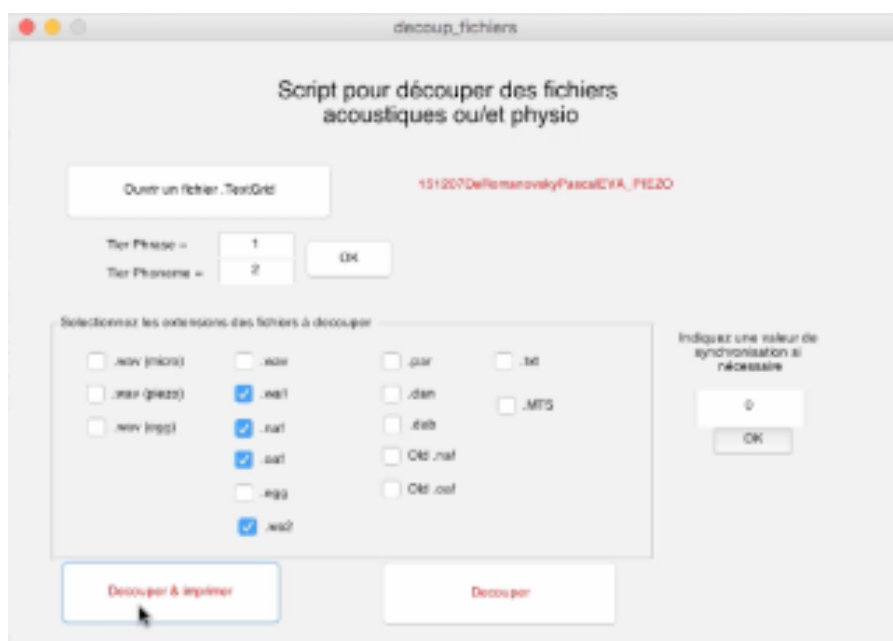


FIGURE 2.61 – Illustration du script Matlab de découpage nommé VisuCutPrint.

Je fournis régulièrement ce script aux étudiants qui souhaitent visualiser leurs données avant de lancer des analyses. Il est disponible avec un mode d'emploi et un jeu de données ([ici](#)). J'ai récemment développé une version Praat disponible ([ici](#)) pour les personnes moins aguerries aux

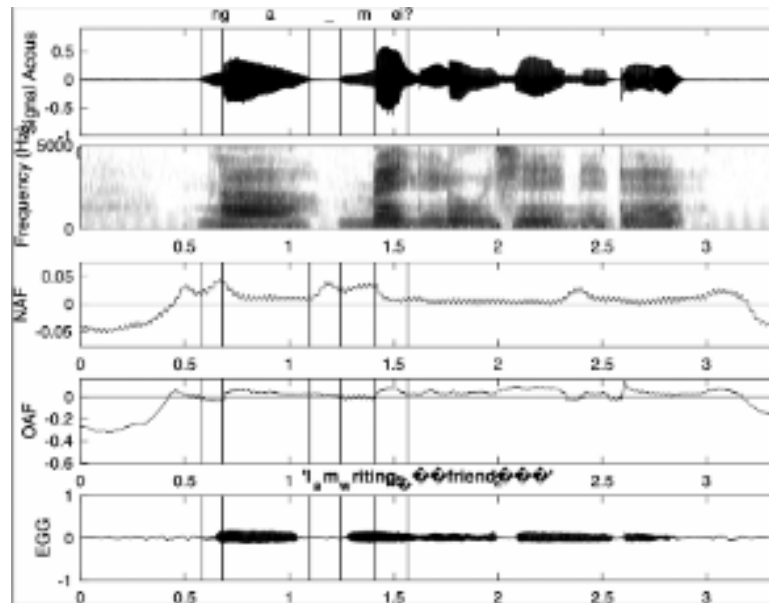


FIGURE 2.62 – Exemple de figure obtenue en sortie du script VisuCutPrint et sauvée en .eps.

logiciels de traitement du signal. Les deux scripts sont faciles à modifier pour s'adapter aux différentes données.

J'ai décrit dans ce chapitre certains des protocoles expérimentaux et scripts informatiques que j'ai mis en place en fonction des besoins des chercheurs du LPP et des chercheurs d'autres laboratoires comme Katia Chirkova ou Mark Van de Velde et Dmitry Idiatov. La liste n'est pas exhaustive, il y en a eu d'autres plus spécifiques : ils ont souvent été développés dans un but précis et je n'ai pas eu l'occasion de les généraliser pour s'adapter à d'autres types de données. L'un de mes projets inhérents à mon poste d'Ingénieur de Recherche serait de démocratiser l'accès à certains de ces scripts en les développant en Python pour s'affranchir de Matlab, qui n'est pas le langage de programmation le plus courant, et ensuite de les diffuser en Open Source.

## 2.3 Valorisation du patrimoine scientifique

*Article de référence : Amelot, Angélique, Didier Demolin and Amélie Elmerich. 2024. Instruments used in experimental phonetics at the beginning of the 20th century at the Institute of Phonetics in Paris. In, 167-176. <https://doi.org/10.21437/HSCR.2024-12>, [Amelot 2024], disponible (ici)*

Cette partie décrit une activité assez récente qui s'est ajoutée à ma fiche de poste, qui est la mise en conservation d'instruments scientifiques anciens utilisés en phonétique au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

En 2022, lors d'un recensement du matériel en vue du déménagement de l'ILPGA, j'ai découvert de mystérieux instruments dans le grenier. Ce fut le point de départ d'une vaste enquête bibliographique et de rencontres passionnantes pour identifier l'origine et comprendre le fonctionnement de ces instruments. Plusieurs d'entre eux ont échappé aux deux campagnes de dons à la Bibliothèque Nationale de France (BNF) (Collection Charles Cros) en 1975 et 2000. J'ai entrepris de valoriser ce patrimoine scientifique. Cent ans après la mort de Rousselot, ces instruments me semblaient bien mystérieux, et j'ai cherché à connaître : 1. leur origine, 2.

leur utilisation et 3. leur mode de fonctionnement.

### 2.3.1 Mon implication

Le patrimoine scientifique est mis à l'honneur par les différents organismes de recherche français. En 2013, une [Fondation des Sciences du Patrimoine](#) a été créée, où plusieurs laboratoires mettent en place une politique de valorisation de leurs collections scientifiques. Il m'a semblé important de faire le point sur les instruments retrouvés, qui représentent le point de départ de l'instrumentation utilisée en phonétique expérimentale, comme Rousselot la nommait (*cf.* Introduction). J'ai passé beaucoup de temps à nettoyer, restaurer et identifier les instruments retrouvés. À ce jour, seuls deux instruments sur les vingt deux demeurent encore un mystère.

### 2.3.2 Restauration du matériel

La première étape a consisté à nettoyer tous les instruments découverts. Ayant probablement séjourné dans le grenier pendant plus de 50 ans, ils étaient couverts de poussière et certains étaient cassés. J'ai soigneusement ressoudé les pièces cassées. Une fois nettoyés, la plupart d'entre eux ont révélé le nom de leur fabricant, ce qui m'a permis de les identifier relativement facilement à l'aide des catalogues des fabricants. Les deux principaux fabricants de l'époque étaient Verdin et Boulitte. Dans les cas où les descriptions étaient trop succinctes, j'ai consulté la thèse de Rousselot pour comprendre la fonction et l'usage de chacun [[Rousselot 1891](#)]. Pour les instruments dont des pièces étaient manquantes, j'ai utilisé le logiciel Fusion 360 (Autodesk®) pour concevoir et imprimer en 3D les pièces de remplacement.

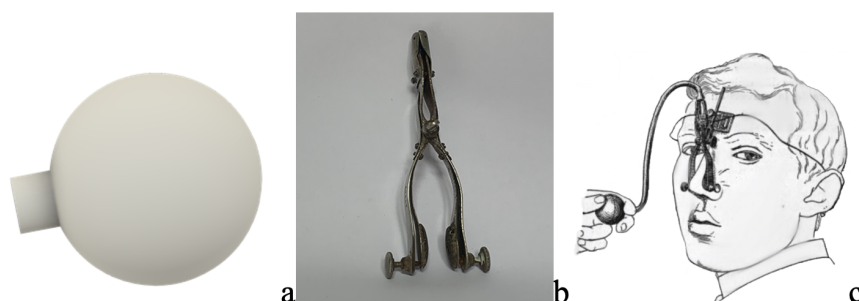


FIGURE 2.63 – Pince Nasale de Zund-Burguet (1903), a) les parties manquantes comme la boule et le tuyau ont été dessinées et imprimées en 3D, b) la pince retrouvée après nettoyage, c) la pièce d'origine.

### 2.3.3 Inventaire du matériel

J'ai mis en place un site, pour l'instant hébergé sur mon portfolio, avec une version en français ([ici](#)) et une version en anglais ([ici](#)). Ce site sera par la suite hébergé sur le site du LPP, une fois l'ensemble des instruments identifiés, décrits et photographiés. Un article a été publié en 2024 pour valoriser ce travail. Pour les fiches liées aux instruments, je me suis inspirée de sites comme Gallica, la Collection Charles Cros, le site des ressources numériques en histoire

de l'éducation de l'[UMR5190](#) ou encore le site mis en place par le Conservatoire National des Arts et Métiers ([CNAM](#)) *via* la mission [PATSTEC](#). Les fiches sont toutes créées sur le même modèle et fournissent les détails suivants :

- Nom ;
- Inventeur ;
- Le constructeur ;
- Date d'invention ou de construction le cas échéant ;
- La référence du catalogue où on retrouve l'instrument et son prix de l'époque ;
- Une description de l'instrument et des exemples de données acquises à l'époque avec ce système.

Ci-dessous, un exemple de fiche faite pour l'Oreille Inscriptive, instrument permettant d'acquérir les vibrations passant par la bouche, inventée par Rousselot et dont la première version fut fabriquée par Verdin.

La collection compte vingt deux instruments et plusieurs petits accessoires, tous présentés ligne avec leur description. Un [site](#), basé sur une gestion de données de type MySQL et élaboré par Roland Trouville, m'a permis d'ajouter ces instruments à l'inventaire du matériel du [LPP](#).

### 2.3.4 Valorisation

Un grand nombre de défis a dû être relevé pour donner au [LPP](#) la possibilité de sauvegarder son patrimoine, et certains objectifs de cette mission sont toujours en cours :

- repérer, inventorier, documenter et photographier les objets dans les laboratoires de la recherche publique et privée afin de réaliser des « fiches objet » sauvegardées dans une base de données multimédia ;
- concevoir et réaliser, dans un esprit de valorisation, des vidéos, des parcours de chercheurs, et des collections d'objets ;
- transférer les inventaires réalisés vers le site web associé ;
- conserver les objets dans des endroits dédiés et sécurisés ;
- valoriser ce patrimoine par des événements marquant les étapes de réalisation sous diverses formes au niveau des régions et au niveau national ;
- sensibiliser les organismes d'enseignement supérieur et de recherche, les structures culturelles, ainsi que les entreprises, à la sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain ;
- susciter l'organisation dans les régions d'un réseau local autour d'un chef de projet, d'un comité de pilotage et d'un comité scientifique ;
- accompagner la mise en œuvre du programme dans les régions par suivi et coordination nationale, tout en généralisant la méthodologie sous forme de conseils et d'expertises ;
- Susciter autour de ce « patrimoine » des actions de recherche pluridisciplinaires.

Il ne s'agit pas seulement de terminer cet inventaire, il s'agit aussi de le mettre en valeur. L'étape suivante consiste à faire connaître et valoriser ce patrimoine.

En 2023, lors de la journée porte ouverte des [rencontres de la recherche](#) de la [MDR](#), Didier Demolin et moi-même avons animé un stand montrant le fonctionnement du Kymographe. La

**Nom :** Oreille Inscriptrice

**Inventeur :** Rousselot

**Constructeur de ce modèle :** Boulitte

**Date :** On la retrouve dans le catalogue de 1924. Cependant, cet instrument a été fabriqué spécialement pour le laboratoire de phonétique expérimentale du Collège de France. Rousselot (1897 : 136) indique l'avoir construite en 1893 suite aux problèmes qu'il rencontrait avec le tambour à levier comme inscripteur de la parole : trop grande amplitude des mouvements, membrane parfois trop résistante et problèmes liés aux variations atmosphériques.

**Référence :**

Rousselot, P. J. (1897). *Principes de phonétique expérimentale* (H. Didier (ed.)).

Boulitte, G. (1924). Catalogue G : phonétique. In *Catalogue d'instruments fabriqués anciennement par la maison Charles Verdin*. Boulitte, G.

**Référence première :** Bien que les membranes aient forcément été utilisées avant, nous n'en retrouvons pas dans les catalogues de Charles Verdin de 1880 ni de 1895.

**Description :**

L'oreille inscriptrice permet l'inscription directe des vibrations de la parole au moyen d'une membrane de caoutchouc. Elle est construite sur le modèle de l'oreille dans le but de supprimer les défauts des tambours à levier.

Rousselot l'abandonnera assez vite pour revenir aux tambours à levier qui finalement se révéleront plus fiables. A notre connaissance, seul Rousselot a utilisé cet instrument.

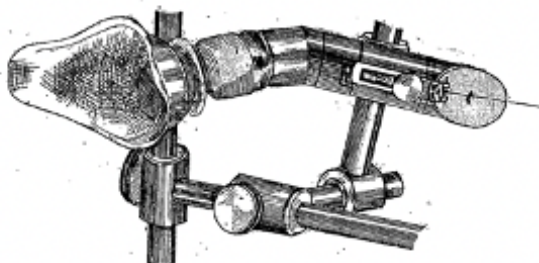


Fig. 1. — Inscripteur à membrane.

Illustration de l'oreille inscriptrice, Fig.1 Page 28 de la Revue Parole de 1899

**Dimension : (de l'oreille)**

Longueur : 9 cm

Largeur : 6.8 cm

**Photo :**



Illustration de l'oreille inscriptrice construite par Rousselot, 1 : oreille inscriptrice, 2 : embouchure pour la bouche, 3 : éléments qui s'adaptent dans l'oreille pour réduire le pavillon de l'oreille

**PDF :**

**N°5000. Oreille inscriptrice de Rousselot.**

Page 1 du catalogue Etablissement G. Boulitte 1924

Cet appareil se compose de 3 pavillons mobiles (1, 2 et 3 sur la figure) qui sont emboîtés et insérés dans le tube (2).

E : embouchure dans laquelle le locuteur met sa bouche.

D : biseau en plastique pour relier l'embouchure au pavillon (1).

Un pavillon fixe mobile (A) s'emboîte dans le tube (E) à son extrémité on trouve une membrane avec un petit disque collé (L).

Les molettes (G) et (H) permettent de régler la position et la tension.

L'oreille inscriptrice a été imaginée par Rousselot pour pallier les problèmes des tambours à levier



VOIR TOUT AJOUTER UN ITEM GÉRER LES CONSTRUCTEURS DECONNEXION								
Requête: <input type="text"/> Envoyer								
Filtre: <input type="text"/>								
N° Inventaire	Modèle	Propriétaire	Date de Fabrication	Dons BNF ?	Localisation	Constructeur	Descriptions	Photos
5020	Capsule Exploratrice	CNRS	22/06/2023	NON	Bureau 213	Boullite	La capsule exploratrice est utilisée soit pour les mouvements des lèvres soit pour les mouvements de la langue.	
5020	Capsule Exploratrice	CNRS	01/01/1924	NON	Bureau 213	Boullite	La capsule exploratrice est utilisée soit pour les mouvements des lèvres soit pour les mouvements de la langue.	
5075	Capsule exploratrice des vibrations du larynx	CNRS	01/01/1923	NON	Bureau 213	Boullite	Cette capsule est utilisée avec différents instruments. On la retrouve comme capsule exploratrice pour le larynx et aussi dans le laryngographe où elle aide à maintenir l'instrument. Sa forme lui permet d'épouser celle du larynx. elle est recouverte d'une membrane de caoutchouc.	
5065	Laryngographe à double cuvette	CNRS	01/01/1924	NON	Bureau 213	Boullite	Cet appareil transmet au tambour récepteur simultanément les mouvements verticaux et les vibrations du larynx, il est maintenu sur la pomme d'Adam au moyen d'une attache spéciale.	

FIGURE 2.65 – Copie d’écran du site d’inventaire du matériel du LPP qui cible sur les instruments anciens.

restauration du Kymographe a été présentée dans un article en 2023, [Amelot 2023b], disponible (ici).

Cette année 2023 a également été l’occasion d’éprouver un jeu que j’ai inventé autour de ce patrimoine scientifique. Je l’ai appelé Phonetic Pursuit : Expériences phonétiques avec l’Abbé Rousselot, « Partez sur les traces de l’abbé Rousselot et découvrez les instruments qu’il utilisait pour étudier la parole ». J’ai conçu ce jeu de plateau pour présenter les premiers instruments utilisés en phonétique expérimentale et pour présenter les instruments plus récents utilisés dans les laboratoires de phonétique actuels. A travers ce jeu, les participants peuvent manipuler les appareils et essayer de comprendre pourquoi et comment ils ont été utilisés. Le jeu est basé sur le jeu classique du Trivial Pursuit. Les gens ont en leur possession des dés et des pions qu’ils déplacent sur le plateau et doivent répondre à des questions ou faire des défis.

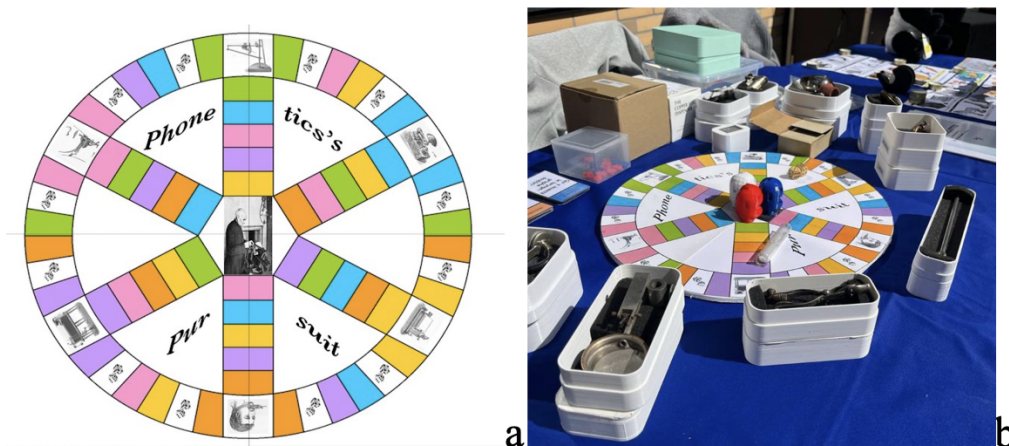


FIGURE 2.66 – a) Plateau de jeu, b) jeu complet mis en place et utilisé à la journée porte ouverte de la MDR de la Sorbonne Nouvelle en 2023.

Les cartes sont divisées en quatre catégories :

- Inventeur : qui est l’inventeur d’un instrument indiqué ;

- Atelier : exercices pratiques de remontage d’instruments ;
- Aujourd’hui : quel instrument a remplacé le premier ;
- Expérimentation : dire à quoi servait l’instrument.

Un vacataire, Mickaël Gayet, recruté sur un projet de valorisation du Labex-EFL m’a secondé pour dessiner les personnages en 3D. Pour gagner la partie, il faut « redonner » la parole à son personnage. A chaque bonne réponse, le joueur a la possibilité de récupérer les oreilles, la langue ou le nez. Il y a trois personnages de couleurs différentes : bleu, vert et rouge. Les joueurs peuvent jouer en équipe.

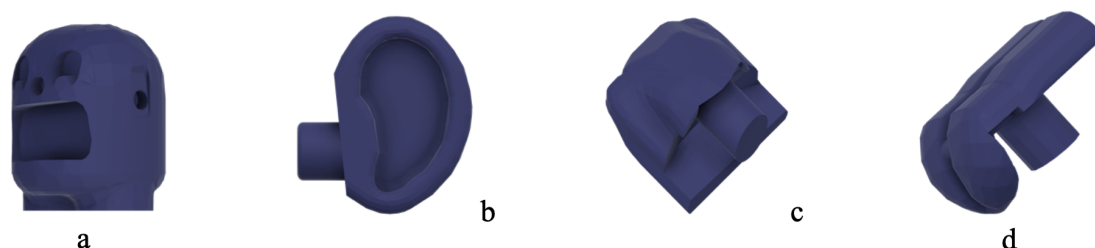


FIGURE 2.67 – Le pion bleu qui compose le jeu, ainsi que les différents accessoires à gagner pour reconstruire le personnage, modélisés en 3D à partir de Fusion 360 et imprimés en 3D : a : personnage, b : oreille, c : nez et d : langue.

En 2024, la seconde journée porte ouverte des [rencontres de la recherche](#) à la [MDR](#) a été l’occasion de faire découvrir l’histoire de la phonétique expérimentale aux écoles doctorales présentes, avec une démonstration du fonctionnement du Kymographe. Faire le parallèle avec Marey a permis de montrer que les écoles doctorales de la [MDR](#) ont des centres d’intérêts communs historiquement. La démonstration s’est poursuivie avec des instruments plus récents développés au [LPP](#).

En octobre 2024, j’ai organisé avec Claire Pillot-Loiseau et Christelle Dodane, un colloque international pour les 100 ans de la mort de Rousselot. Le but de ce [colloque](#) était de montrer toute l’importance des travaux de l’Abbé Rousselot et de ses prédécesseurs évoqués au cours de l’événement, au même titre que ses contemporains français (Marey, Rosapelly, Havet, Brunot, Passy, Roudet, Marichelle, Jones, etc.) et étrangers (Baudoin de Courtenay, Wundt), ainsi que ses héritiers et étudiants (Borel-Maisonny, Grammont, Jousse, Rosset). Ces journées ont été l’occasion de découvrir le patrimoine scientifique des autres laboratoires de phonétique français.

En cherchant à retracer l’origine de ces instruments, je suis entrée en contact avec Anne Picaud, responsable de la valorisation au sein de l’[INJS](#) et Sylvain Lachendrowicz, responsable de la collection Charles Cros à la [BNF](#). Dans un souci de valoriser une majorité des instruments utilisés en phonétique expérimentale à la fin du XIXème. J’aimerais travailler conjointement avec Anne Picaud pour valoriser l’ensemble des instruments restants des deux instituts ([LPP](#) et [INJS](#)). A terme, Anne Picaud souhaite exposer certaines instrumentations dans ses locaux, je l’aiderai dans la création de fiches signalétiques. Lorsque l’on parcourt les instruments listés dans la collection Charles Cros, on se rend compte du travail colossal effectué, l’inventaire étant précis et enrichi de photos. J’aimerais aider à valoriser ce travail pour les instruments liés à la phonétique expérimentale, probablement les plus anciens encore visibles. Rachid Ridouane et moi-même avons eu un premier rendez-vous avec Fanny Lefaire et Sylvain Lachendrowicz

pour voir comment démarrer un travail ensemble. Pour les instruments qui ont vraisemblablement appartenu à Rousselot et qui n'apparaissent pas dans les dons faits à la BNF, une richesse patrimoniale unique, Rachid Ridouane et moi-même avons pris des contacts avec le service valorisation du CNRS et le CNAM, afin que nos instruments puissent intégrer la mission PATSTEC.

Enfin en 2024, le CNRS a lancé le focus Langage (*cf.* Chapitre 5). Ce focus a été l'occasion de créer un groupe de travail au sein de la section 34 (InSHS) dans le but d'organiser une exposition virtuelle « Outils à la découverte linguistique ». Le groupe de travail, dont je fais partie, vise à coupler deux aspects : 1. les outils de traitement des langues et du paysage sonore, et 2. l'histoire de ces outils. L'exposition combinera la présentation des outils dans une perspective historique, avec un parcours sonore correspondant aux diverses attestations du français parlé et des langues de France issues des premiers efforts pour maîtriser le son, incluant les langues d'Outre-Mer, ainsi que les premières tentatives des linguistes et des anthropologues pour enregistrer la richesse linguistique du monde. Pourront être inclus dans ce paysage sonore le chant ou d'autres formes d'expression impliquant le langage, obtenus dans le contexte d'enquêtes ethnolinguistiques. Les fonds sonores de la BNF constitueraient la base principale de cette partie de l'exposition, qui pourrait être complétée avec les apports des laboratoires du CNRS (par le biais des laboratoires qui possèdent des fonds instrumentaux anciens, et de l'Ingénieur de Recherche travaillant pour Huma-Num pour les attestations linguistiques) et d'autres organismes de recherche. L'exposition pourrait être le lieu pour une ou plusieurs expérimentations et des enquêtes à grande échelle, profitant de l'affluence des visiteurs, qui seraient donc exposés directement aux nouvelles technologies d'enregistrement de signaux, et participeraient à éclaircir une question de recherche préalablement formulée. Ce projet est encore en cours de développement, les contacts avec les laboratoires ayant été pris pour estimer le patrimoine scientifique lié à la linguistique au niveau national. L'exposition virtuelle devrait débiter pour le milieu de l'année 2025.

Par ailleurs, Didier Demolin et moi-même pensons écrire un ouvrage recensant le matériel du laboratoire sur le modèle de l'ouvrage « A bras le Corps ». Nous avons déjà pris contact avec les presses de l'université Sorbonne Nouvelle.



## Chapitre 3 : Activités de Recherche

*Dans ce chapitre, je décris l'ensemble de mes activités de recherche depuis la fin de mon doctorat. Les études "multi-paramétriques" sur le français, que j'ai menées, montrent que l'abaissement du voile du palais est nécessaire, mais que d'autres conditions, comme l'ouverture suffisante du port vélo-pharyngé et la pression intra-orale, sont indispensables pour produire des phonèmes nasals. Les résultats aérodynamiques confirment une répartition variable du flux d'air nasal selon les phonèmes, avec un débit nasal plus élevé pour certaines voyelles nasales. Mes recherches sur d'autres langues, comme le vietnamien et le portugais brésilien, confirment l'importance de l'aérodynamique pour comprendre la production des voyelles nasales. La nasalité est généralement définie par l'abaissement du voile du palais (vélum), mais l'ouverture du port vélo-pharyngé est également cruciale pour permettre le passage de l'air par le nez. Mes recherches à partir de données fibroscopiques et nasographiques ont montré que l'abaissement seul du vélum ne suffit pas, et qu'il doit atteindre une position minimale pour ouvrir le port vélo-pharyngé. Les données fibroscopiques montrent une bonne coordination entre les mouvements du vélum et des parois pharyngées latérales. Les résultats révèlent plusieurs types d'abaissements du vélum, influencés par le contexte phonétique et le style de parole. Mes recherches sur trois pathologies affectant la production de la nasalité : la Dystrophie musculaire oculopharyngée (DMOP), la Polypose Nasosinusienne (PNS) et l'Insuffisance vélo-pharyngée (IVP) ont montré que : 1. la DMOP provoque des difficultés de contrôle du voile du palais, entraînant une hypernasalité et des fuites nasales. Malgré cela, l'intelligibilité peut être maintenue grâce à des mécanismes compensatoires, 2. la PNS est une maladie chronique caractérisée par le développement de polypes obstruant la cavité nasale. Des enregistrements avant et après chirurgie montrent une amélioration du flux d'air nasal et une meilleure coordination des consonnes nasales postopératoire et 3. l'IVP, souvent causée par des anomalies anatomiques comme les fentes palatines, empêche la fermeture complète du sphincter vélo-pharyngé, entraînant une hypernasalité. Une étude menée sur des enfants a permis d'établir un protocole de diagnostic français basé sur des mesures de nasalance. Plusieurs études en phonétique expérimentale, que j'ai mené en collaboration, ont démontré l'apport positif des instruments non invasifs sur l'apprentissage du Français Langue Étrangère (FLE), notamment pour améliorer la prononciation des apprenants. Des dispositifs comme l'accéléromètre piézoélectrique ont prouvé leur efficacité pour évaluer les voyelles nasales. Les études que j'ai menées sur le larynx ont mobilisé des instruments tels que l'endoscope, le nasofibroscope, l'EGG et l'ePGG, avec pour objectif principal de mieux comprendre les mécanismes glottiques. J'ai collaboré avec plusieurs chercheurs pour étudier l'inventaire phonologique de langues rares : ersu, xumi, baïma, lizu, ikema, nasa yuwe et mbugu. Nos analyses portent sur la pré-nasalisation contrastive, les consonnes nasales sourdes, les mesures acoustiques. Ces recherches illustrent une approche multidimensionnelle pour comprendre des phénomènes rares et peu documentés.*

Mes recherches collaboratives sur le chant ont été initiées dans le cadre du projet européen *i-Treasures* (2013-2017), qui vise à préserver le patrimoine culturel immatériel (PCI) en développant une plateforme technologique pour l'analyse, la modélisation et la transmission de savoir-faire rares. J'ai contribué à l'élaboration d'une plateforme d'acquisition de données multisensorielle capable d'enregistrer de manière synchronisée les mouvements de la langue, des lèvres, les signaux acoustiques et respiratoires grâce à des capteurs ultrasoniques, vidéo, EGG et l'accéléromètre piézoélectrique. Cette plateforme a permis de mener des études sur le chant polyphonique corse « *Cantu in Paghjella* » et le *Human BeatBox* (HBB), en analysant les caractéristiques acoustiques, articulatoires et aérodynamiques spécifiques à ces techniques vocales. Enfin mes collaborations avec le monde médical à initier un projet qui vise à reconstituer les paramètres acoustiques à partir d'un d'Henri IV à partir de sa tête momifiée. Après avoir obtenu des images issues d'une laryngoscopie et d'un scanner, le travail a débuté par la reconstruction 3D du larynx, l'étude s'est étendue aux sinus paranasaux, révélant une aplasie sinusienne et une pneumatiation anormale des mastoïdes. La reconstruction du conduit vocal a nécessité des ajustements anatomiques, incluant le positionnement de la mâchoire et la modélisation de la langue et du voile du palais à partir de données issues d'une base de locuteurs modernes. Un conduit vocal plausible est en cours de reconstruction et d'élaboration d'une copie 3D de la géométrie du conduit vocal d'Henri IV. Ce projet vise à établir une méthodologie innovante applicable non seulement à l'archéologie, mais aussi à la clinique, en reconstituant des conduits vocaux altérés par des conditions particulières, comme la momification ou des pathologies.

### 3.1 Activités de recherche liées à la production de la nasalité

Vu la complexité du langage, il apparaît nécessaire d'aborder chaque phénomène de parole de plusieurs points de vue et de les mettre en confrontation. Par exemple, il faut tenir compte de la facilité à prononcer les sons en séquence, tout en considérant la dynamique différente des articulateurs. De plus, la non-linéarité entre les mouvements articulatoires et leurs effets acoustiques doit être prise en compte, ainsi que les contraintes aérodynamiques de mise en vibration des plis vocaux ou de la création du bruit dans le conduit vocal. Il faut également considérer le traitement du signal au niveau de l'oreille périphérique, ainsi que les problèmes de masquage temporel et fréquentiel. La production de la nasalité n'échappe pas à cette complexité, bien au contraire [Vaissière 2009].

La nasalité a été décrite comme un trait distinctif, en référence à la particularité articulatoire liée à l'abaissement du voile du palais : [+nasal] = voile du palais abaissé, [-nasal] = voile du palais relevé, depuis Trubetzkoy (1939), [Trubetzkoy 1939]. Bien que simple et évidente, cette description phonologique ne permet pas de rendre compte de manière exhaustive de tous les phénomènes de nasalité rencontrés, notamment en parole continue.

Du point de vue phonétique, il est préférable d'envisager la description de la nasalité sous différents angles : physiologique, articulatoire, aérodynamique, acoustique et perceptif, puis de les confronter entre eux. Pour les études aérodynamiques, fibroscopiques et PNG2 sur le français, le corpus utilisé était similaire. Il était composé de trois parties :

1. logatomes : Des séquences du type "Dites C1V1C1VtC1V1 trois fois C1V1C1VtC1V1, C1V1C1VtC1V1, C1V1C1VtC1V1" où V1 : [a, i, u, y], Vt : [ɔ̃ ã ě] et où les consonnes s'opposent par le mode d'articulation, le lieu d'articulation et le voisement C1 : [p, t, k, b, d, g, s, z, l], (exemple : "dites babāba trois fois");
2. phrases contrastées : Des phrases qui s'opposent deux à deux par une différence prosodique de type emphase ou découpage morphologique (Par exemple, "cet homme est énorme

et m'embête cet homme est énormément bête"). Certaines phrases ont également été imitées du corpus AUPELF-UREF, auquel j'ai participé et qui est disponible sur [Cocoon](#) [Vaissiere 1998];

3. parole spontanée : De courtes séquences de parole spontanée.

Deux femmes et deux hommes ont été enregistrés.

### 3.1.1 Nasalité et « multiparamétrique »

Article de référence : Clements, George, Jacqueline Vaissière, Angélique Amelot, Julie Montagu, Annie Riolland, Rachid Ridouane, et Harry van der Hulst. « The feature [nasal] ». *Features in phonology and phonetics : unpublished work from George N. Clements and his colleagues, 2015, 195-215, [Clements 2015], disponible (ici).*

Étudier la nasalité d'un point de vue "multiparamétrique" a permis de montrer qu'il existe un rapport non linéaire entre les événements lors de la production d'un phonème nasal. L'abaissement du voile du palais est une condition nécessaire mais non suffisante à la production d'un phonème nasal. Il faut que le port vélo-pharyngé soit suffisamment ouvert et que la pression à l'intérieur de la cavité buccale soit suffisante pour que l'air puisse passer par la cavité nasale et ainsi permettre une modification acoustique suffisante pour être perçue par l'auditeur.

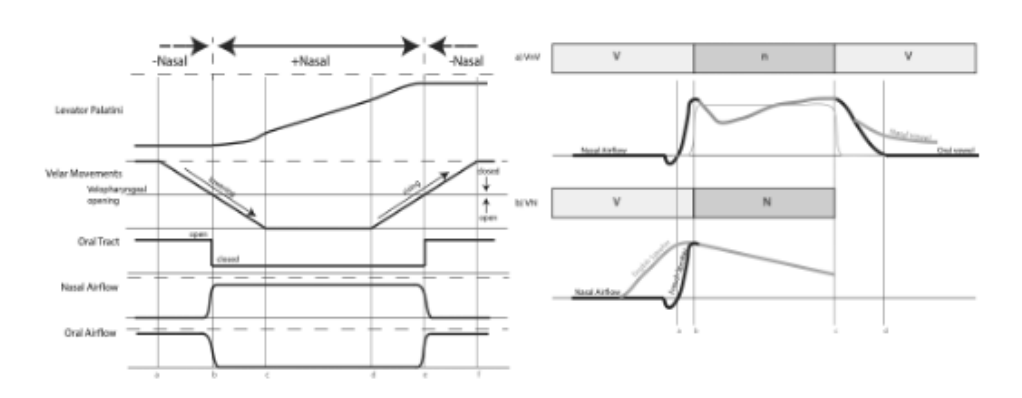


FIGURE 3.1 – Schéma montrant le cas idéal de synchronisation entre les événements lors de la production d'un phonème nasal, d'après [Clements 2015].

J'ai eu l'opportunité de publier avec Jacqueline Vaissière, Nick Clements et Julie Montagu pour décrire le trait [nasal], [Clements 2015]. Le chapitre d'ouvrage est disponible (ici). Dans ce chapitre, nous avons décrit la nasalité du point de vue phonologique, puis du point de vue phonétique. Dans la première partie, nous abordons la répartition des phonèmes nasals dans les langues du monde et leur description dans les systèmes phonologiques. Je ne m'attarderai pas sur cette partie, dont je ne suis pas spécialiste. Je reprendrai juste le tableau que nous avons fait pour résumer la répartition des sons nasals dans les langues du monde, que je trouve intéressant et qui montre bien la disproportion de la répartition de ce trait selon que la nasalité porte sur une voyelle ou une consonne.

La seconde partie, qui traite de la phonétique, nous a amenés à décrire la nasalité sous différents angles : articulaire, acoustique et perceptif. Je reprendrai cette nomenclature, en y ajoutant d'autres distinctions comme l'aérodynamique ou encore la nasalité du point de vue de la pathologie. Avant toute chose, il est nécessaire de définir les termes liés à la nasalité,

Type	Distinctive consonantal nasality	Distinctive vocalic nasality	Summary in words – nasality distinctive on:	Number of languages in the expanded UPSID database (Maddieson 1991)
A	+	+	vowels and consonants	97
B	+	–	consonants only	345
C		+	vowels only	5
D		–	neither vowels nor consonants	4

TABLE 3.1 – Une typologie sommaire de la place des sons nasals dans les systèmes phonémiques, avec des indications de fréquence dans un large échantillon de langues du monde, d’après [Clements 2015].

qui sont souvent source de confusion, notamment en anglais. La première distinction à mettre en avant est la différence entre nasal et nasalisé. Il existe des phonèmes nasals comme [m], phonème le plus courant dans les langues du monde, et des phonèmes nasalisés par contexte. C’est notamment le cas en français, qui comporte dans son inventaire des voyelles nasales [ɔ̃ ã ě œ̃] et des voyelles orales qui peuvent se nasaliser en contexte nasal, par exemple dans le mot "maman" où le premier "a" est nasalisé du fait de l’entourage consonantique. Dans cette partie, nous aborderons exclusivement le cas des phonèmes nasals. Nous aborderons la nasalité selon différents processus liés à la production vocale.

### 3.1.1.1 Aérodynamique de la nasalité

Du point de vue aérodynamique, la nasalité peut être définie comme le moment où le voile du palais est suffisamment abaissé pour permettre à l’air contenu dans le pharynx de passer par le port vélo-pharyngé et de s’échapper par le nez. Il est impératif que la pression intra-orale soit suffisante pour pousser cet air dans le conduit nasal. Mes travaux de recherche sur les données aérodynamiques des phonèmes nasals, et plus particulièrement des voyelles nasales du français, se sont largement inspirés des travaux d’André-Pierre Benguerel [Benguerel 1974] et d’Abigail Cohn [Cohn 1990].

Mes travaux confirment qu’il existe une bonne répartition du flux d’air entre les cavités orale et nasale. Le flux d’air provenant des poumons subit une résistance à la glotte puis se propagera principalement dans la cavité buccale. Si un obstacle à cette propagation surgit, comme par exemple la fermeture de la bouche, l’air contenu dans la cavité pharyngée pourra se propager par le conduit nasal si le port vélo-pharyngé est suffisamment ouvert (cas des consonnes nasales) ou restera bloqué dans la cavité orale jusqu’au relâchement (cas des occlusives orales).

Il est possible de donner des règles de propagation du flux d’air selon le phonème (*cf.* figure 3.3). Cependant, la répartition du flux entre les cavités est liée à la taille de l’ouverture, la vitesse de propagation et l’impédance dans les conduits.

La production des voyelles nasales en est l’exemple le plus probant : pour produire une voyelle nasale, il faut que l’air s’échappe à la fois par le nez et la bouche. Pour cette réalisation, il faut que le port vélo-pharyngé soit suffisamment ouvert pour que l’air puisse passer. Warren et DuBois, 1964 indiquent que cette ouverture est aux alentours de 0.4 cm<sup>2</sup> [Warren 1964], mais il faut également que l’impédance dans la cavité orale soit suffisante pour pousser l’air dans la cavité nasale. Ce jeu de pressions s’obtient généralement grâce à un rétrécissement dans le

conduit vocal, mais dans le cas des voyelles nasales, celui-ci ne doit pas être trop important pour que l'air continue de s'échapper par le conduit buccal.

La figure 3.2 est un bon exemple pour la production des voyelles nasales où l'on voit que l'air nasal apparaît parallèlement au décroissement de l'air buccal et à l'affaiblissement du signal acoustique.

Une étude publiée en 2006 avec Alexis Michaud a montré la relation qui existe entre le débit d'air oral et le débit d'air nasal [Amelot 2006c]. L'article est disponible (ici). L'étude portait sur 168 logatomes construits sur le modèle C1V1VtC1V1, où C1 = /t/, /d/, /l/, /n/, /s/ ou /z/, V1 = /a/, /i/, /u/ ou /y/ et Vt = /õ/, /ẽ/, /ã/, /a/, /i/, /u/ ou /y/, permettant de caractériser l'effet de ces contextes consonantiques et vocaliques sur le débit d'air.

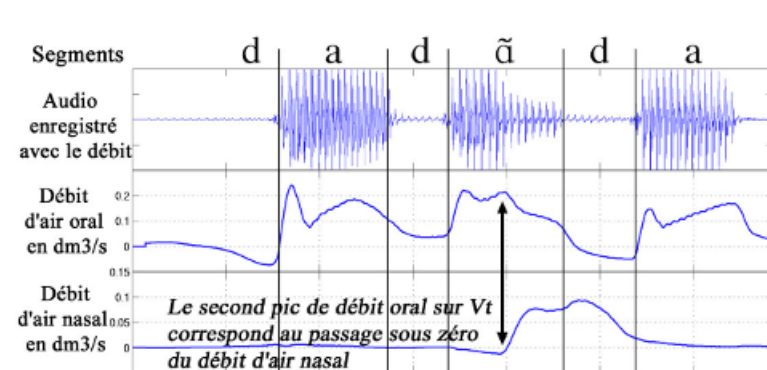


FIGURE 3.2 – Exemple de données obtenues pour le locuteur masculin, d'après [Amelot 2006c].

Les quantités de flux d'air sont très différentes en fonction des locuteurs. Le locuteur masculin présente un débit d'air total bien plus important que la locutrice. Il n'est pas rare de trouver une plus grande quantité de flux d'air chez les hommes que chez les femmes, et notamment le flux d'air nasal peut aller du simple au double. Cette étude a permis de distinguer plusieurs schémas de production de flux d'air en fonction des différents phonèmes.

Concernant les voyelles nasales, cet article a montré que la voyelle /õ/ a le débit nasal le plus élevé, à l'opposé de /ẽ/ qui présente les valeurs les plus basses. Lors de la réalisation d'une occlusive, lorsqu'un pic de débit d'air oral est présent, le débit nasal apparaît après celui-ci. La pression nécessaire à la production du burst n'est pas compatible avec une ouverture du port vélo-pharyngé. À l'inverse, lorsqu'un débit nasal positif est présent dès le début de la voyelle nasale, il n'est pas observé de pic de débit d'air oral ; ce cas correspond à une réalisation co-articulée, affaiblie, de l'occlusive précédant la voyelle nasale.

Lors de la transition entre une voyelle nasale et une occlusive, le débit d'air oral baisse (signe d'occlusion orale). L'apparition du débit nasal s'accompagne d'une diminution du débit oral ; cela est particulièrement net pendant /n/, ce qui suggère que la pression sous-glottique est relativement constante au cours du logatome. En contexte consonantique fricatif (/s/, /z/), débit oral et débit nasal sont inversement corrélés ; en contexte /l/, une telle relation ne ressort pas nettement, vraisemblablement du fait que l'articulation de la consonne latérale /l/ (et, partant, l'impédance du conduit vocal et le débit oral) est fortement influencée par le degré d'arrondissement des voyelles adjacentes [Amelot 2006c]. Cet article est l'un des premiers à montrer l'importance de la fréquente chute de débit d'air nasal en dessous de zéro à l'onset du phonème nasal. Ce phénomène est vraisemblablement lié à l'abaissement du voile du palais. Il

est possible de résumer les contours idéalisés des courbes de débit d'air nasal et de débit d'air oral pour les locuteurs francophones comme indiqué sur la figure 3.3.

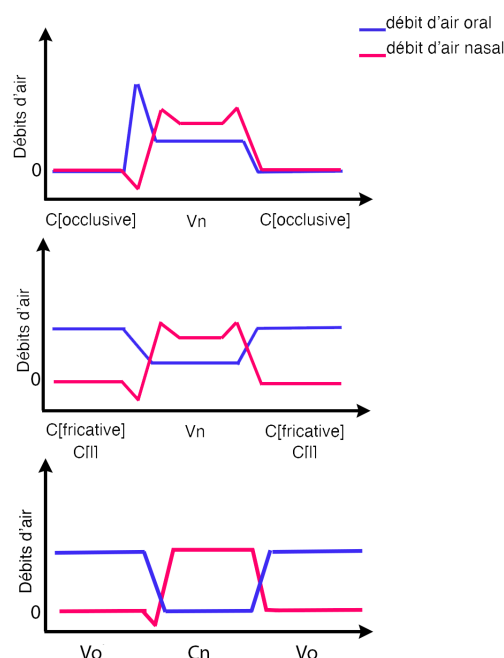


FIGURE 3.3 – Tracés idéalisés des courbes de débit d'air nasal (en rouge) et de débit d'air oral (en bleu), en fonction des cas les plus fréquemment trouvés.

L'analyse des données aérodynamiques tout au long de mon travail de recherche sur le français a montré que le flux d'air nasal est plutôt persistant en parole lue et que le style de parole influence la répartition des flux oral et nasal (*cf.* partie 3.1.1.2).

Concernant les langues autres que le français, l'étude menée en 2006 avec Alexis Michaud, Tuân Vu-Ngoc et moi-même a porté sur trois questions relatives à la phonétique du vietnamien de Hanoï, [Michaud 2006]. L'article est disponible ([ici](#)).

Les mesures du flux d'air nasal prises sur 391 syllabes lues par un locuteur (et les données complémentaires de deux autres locuteurs) montrent que le flux d'air nasal ne permet pas de faire la distinction entre les nasales finales portant le ton B2 et les consonnes occlusives finales. En revanche, le relâchement nasal non voisé est plus fréquent après les consonnes occlusives /p/, /t/, /k/ qu'après les consonnes voisées portant le ton B2 et se terminant par des nasales. L'enregistrement simultané du débit d'air oral et nasal fait ressortir une nette différence entre ces deux ensembles de consonnes, confirmant que la qualité de la voix joue un rôle clé dans le maintien de la distinction entre ces consonnes, qui sont similaires du point de vue de l'articulation orale [Michaud 2006].

Quant à l'étude menée en 2012 par Izabel Christine Seara et moi-même sur le portugais brésilien, elle montre que le pourcentage de flux d'air nasal est toujours plus important à la fin de la voyelle nasale, caractérisant le murmure nasal [Seara 2012]. Cet article apporte une discussion sur l'aérodynamique de la nasalité des voyelles du portugais brésilien parlé à Florianópolis (capitale de l'État de Santa Catarina). Les données se réfèrent aux productions de deux sujets, nés à Florianópolis. Les paramètres d'analyse sont les types de courbes de flux

d'air nasal et le pourcentage de nasalité, mesurés de manière aérodynamique. Les résultats ont montré que les voyelles nasales présentent 1. cinq types de courbes de flux d'air nasal et 2. un pourcentage moyen de nasalité d'environ 17,12% pour la voyelle /ĩ/ en contexte tonique, et 4,87% pour la voyelle /ẽ/, également en contexte tonique. Les différentes phases qui constituent les voyelles nasales, observées dans d'autres études, ont été confirmées pour les courbes de flux d'air nasal. Les voyelles composées seulement de la phase orale plus le murmure nasal sont les plus fréquentes. Le pourcentage de nasalité est toujours plus important à la fin de la voyelle nasale (murmure nasal), mais le pourcentage au début, au milieu et à la fin du son vocalique nasal est plus important du milieu à la fin en portugais brésilien, alors que c'est du début au milieu dans le français [Seara 2012].

### 3.1.1.2 Aérodynamique de la nasalité et style de parole

Une étude que j'ai menée avec Patricia Basset en 2006, qui fait suite à une étude de Basset et al. en 2001, montre l'importance des données de parole spontanée pour les mesures de débit d'air [Amelot 2006b]; [Basset 2001]). Les articles sont disponibles ([ici](#)) et ([ici](#))

Dans ces deux études, nous comparons le degré des phénomènes anticipatoires lors de la production de discours spontané en français, et nous confrontons ces données avec le même corpus mais lu (après avoir été transcrit), pour le même locuteur. Le débit d'air nasal a été interprété comme une indication indirecte du comportement du voile du palais, je peux maintenant au vue de la globalité de mes recherche dire que cette interprétation était erronée. Les enregistrements ont été effectués avec trois locuteurs francophones. Les résultats montrent que l'apparition du débit d'air nasal a lieu avant le phonème nasal et montrent également une forte propension du flux nasal après le nasal. Cependant, aucune différence n'a pu être établie entre les styles de parole (discours spontané vs. discours lu) en ce qui concerne l'anticipation et le transfert du débit d'air nasal. La figure 3.4 montre un exemple de répartition du flux d'air nasal et oral pour la locutrice deux durant un énoncé de parole spontanée. On constate une forte propagation du flux d'air nasal sur les phonèmes oraux.

L'étude de 2006 confirme les résultats de l'étude de 2001 : moins la parole est contrôlée, et plus le débit d'air nasal se propage avant et après le phonème nasal. En parole spontanée comme en parole lue, les occlusives sourdes sont les plus imperméables à la propagation de la nasalité. Le flux d'air nasal se propage durant la phase de fermeture buccale et disparaît avant l'explosion de la consonne; acoustiquement, une "queue nasale" caractérisée par des formants de faible amplitude apparaît durant la phase d'occlusion de la consonne. Cependant, en parole spontanée, les choses sont différentes : il n'est pas rare de voir la barre d'explosion de l'occlusive disparaître. On peut se demander si ce phénomène n'est pas lié à la perception que nous avons du mot "maintenant", régulièrement perçu comme [mẽnã] dans la parole de tous les jours. Par ailleurs, les données suggèrent que le flux d'air nasal est corrélé au signal EGG [Amelot 2006b]. En effet sur les tracés, le flux d'air nasal disparaît en même temps que les vibrations visibles sur le signal EGG.

### 3.1.1.3 La nasalité du point de vue articulatoire

Du point de vue articulatoire, on définit généralement la nasalité par l'abaissement du voile du palais. Le voile du palais, ou vélum, abaissé permet de produire les sons nasals. Cependant, on oublie régulièrement de parler de l'ouverture du port vélo-pharyngé. Ces deux mouvements sont en réalité complémentaires. Les études que j'ai menées et que je vais décrire maintenant

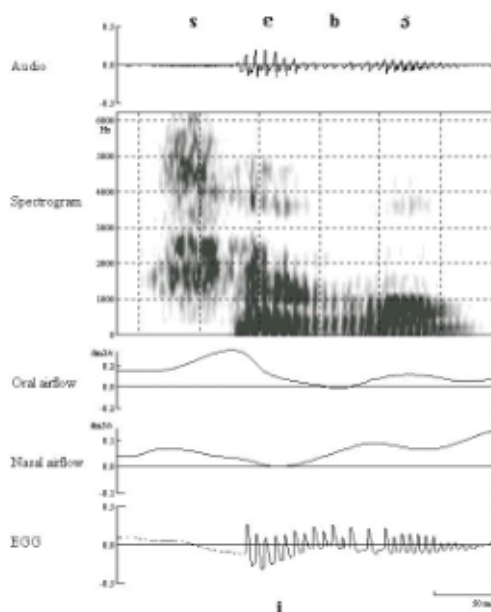


FIGURE 3.4 – Exemple de production d’anticipation du flux d’air nasal pour la locutrice 2 produisant la phrase « c’est bon » en parole spontanée, d’après [Amelot 2006b].

ont montré que le simple abaissement du voile du palais n’est pas suffisant pour le passage de l’air par le nez. Il est nécessaire que le voile du palais soit suffisamment abaissé pour que le port vélo-pharyngé soit ouvert. J’ai pu mettre en évidence cela à partir de données issues d’un fibroscope, d’un articulographe électromagnétique et du PNG2 (voir Chapitre 2).

#### 3.1.1.4 La nasalité du point de vue articulatoire : données fibroscopiques

Les données issues d’un nasofibroscope permettent d’avoir une bonne visualisation des mouvements vélaire liés à l’abaissement et à la remontée du vélum, ainsi que de la paroi pharyngée postérieure et, pour certains locuteurs, des parois pharyngées latérales. Le fibroscope est inséré par une narine et suit le plancher palatal pour se loger au-dessus de l’ouverture vélaire, comme indiqué sur la figure 3.5 .



FIGURE 3.5 – Positionnement du fibroscope pour la visualisation des mouvements du vélum, d’après [Amelot 2003].

Une étude fibroscopique que j’ai menée en 2003 avec Lise Crevier-Buchman et Shinji Maeda

a montré qu'il existe une bonne coordination spatio-temporelle entre les mouvements des parois latérales du pharynx et les mouvements du vélum. Pour les deux locuteurs inclus dans cette étude, il y a une corrélation étroite entre les mouvements du vélum et les mouvements des parois pharyngées latérales [Amelot 2003]. L'article est disponible ([ici](#)).

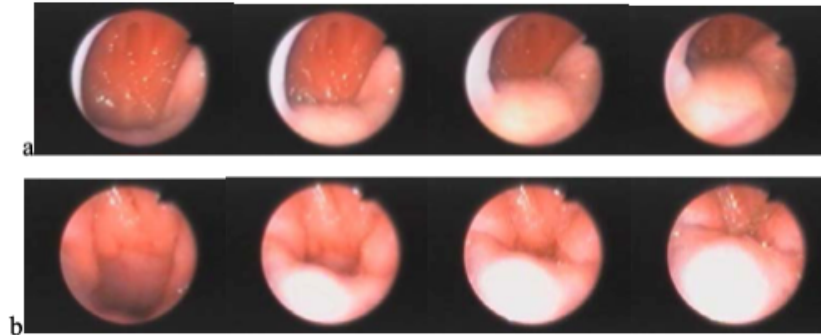


FIGURE 3.6 – Prononciation de la même séquence /ma/ par deux locuteurs francophones, a : pas de mouvements visibles des parois vélo-pharyngées, b : mouvements vélaire verticaux et horizontaux visibles, d'après [Amelot 2003].

Les principaux résultats que nous avons trouvés sur les phonèmes nasals à partir de prises de données fibroscopiques [Amelot 2002a] ; [Amelot 2002b] ; [Amelot 2004a] ; [Amelot 2007a] ; [Amelot 2008], peuvent être résumés ainsi :

- il existe plusieurs types d'abaissements possibles pour le voile du palais en début de phrase, que le phonème soit oral ou nasal : un abaissement très important, probablement en lien avec une respiration, ou un abaissement minimal en anticipation de la séquence vocale, avec entre les deux différentes positions intermédiaires ;
- la mesure totale du mouvement vélaire est plus importante que la durée acoustique de la voyelle nasale. Il n'y a pas de différence significative de durée totale du mouvement vélaire selon son environnement consonantique ;
- plus la parole est relâchée, plus le mouvement vélaire est important. Le mouvement articulaire du voile du palais sera plus important pour la voyelle nasale en fin de mot ;
- dans une grande majorité des cas, le vélum commence à s'abaisser avant le début acoustique du phonème nasal. Plus la parole est relâchée, plus l'anticipation est importante ;
- la mesure de la persévérance du mouvement vélaire est moins importante que la mesure de l'anticipation articulaire. Elle est aussi inférieure à la mesure de la persévérance du débit d'air nasal. La mesure de la persévérance du mouvement vélaire sera plus importante pour les phrases que pour les logatomes, mais plus courte en parole spontanée par rapport aux phrases lues ;
- la mesure du décalage entre l'abaissement vélaire maximum et le début du phonème n'est pas la même pour les voyelles à l'isolée que pour les voyelles en séquence. L'abaissement maximum du vélum a lieu avant la voyelle nasale quand elle est prononcée à l'isolée, sinon il a lieu à peu près à la moitié du phonème nasal ou dans sa première moitié ;
- la durée du mouvement d'abaissement du vélum est sensiblement la même que la durée de son mouvement pour aboutir à une remontée maximum, quel que soit la voyelle nasale, son environnement consonantique et le style de parole ;

- le vélum sera maximalelement abaissé pour la voyelle / $\tilde{\epsilon}$ /, moins pour la voyelle / $\tilde{\nu}$ /. De plus, le vélum sera plus abaissé quand le phonème nasal est en position finale de mot. Il y a un phénomène de compensation en parole spontanée : un vélum moins abaissé s'accompagne d'un mouvement articuloire plus long.

Les différentes études que j'ai menées sur la nasalité en français à partir de la fibroscopie ont également permis de montrer que les mouvements du voile du palais n'étaient pas synchrones avec le flux d'air nasal sortant, [Amelot 2004b]; [Amelot 2008]. L'article de 2004 est disponible (ici).

Concernant les mouvements articuloires, contrairement aux données aérodynamiques, le mouvement d'anticipation est plus important que le mouvement de persévération. De plus, l'ouverture vélaire est contrainte par la position de la langue. Le schéma 3.7 résume bien le rapport non linéaire qui existe entre les mouvements vélaire et les données aérodynamiques durant la production de la consonne nasale.

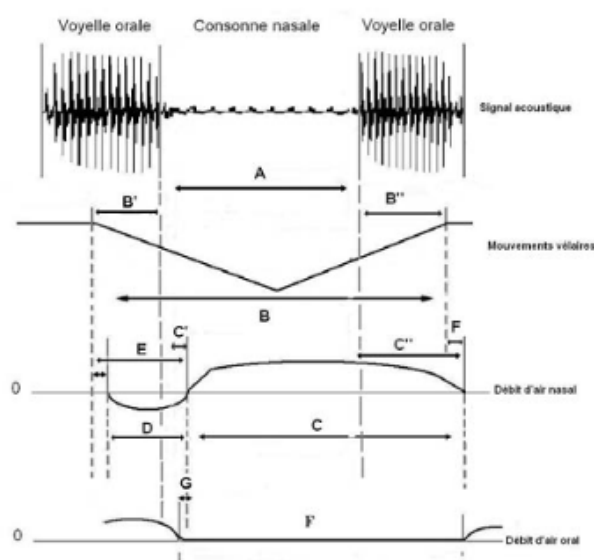


FIGURE 3.7 – Schéma qui résume les mouvements d'abaissement du voile du palais et l'apparition du flux d'air nasal durant la production de la consonne nasale, d'après [Amelot 2004b].

En résumé, les résultats montrent une différence de durée selon les données acoustiques, aérodynamiques ou articuloires. La durée du cycle d'abaissement (durée articuloire) est la plus longue ; la durée du débit d'air nasal (durée aérodynamique) est plus longue que la durée des segments correspondants aux consonnes nasales.

Ces résultats sont en accord avec la littérature ([Bell-Berti 1980]; [Fant 1973]; [Straka 1965]) qui avait déjà observé une durée articuloire d'un segment plus longue que sa période acoustique, ainsi qu'une période d'anticipation pour chaque articuloire, nécessaire et dépendante de l'identité du phonème.

J'ai participé à plusieurs études fibroscopiques sur le portugais brésilien, avec Liane Lovatto en 2007 et 2008, et avec Rita Demasi en 2016 et 2019 ([Demasi 2016]; [Demasi 2019]; [Lovatto 2007]; [Lovatto 2008]). Liane Lovatto a enregistré une locutrice parlant brésilien produisant les logatomes /CoVnCoVo/, /CoVoCoVn/ et /VnCoVo/, avec Vn = / $\tilde{i}$   $\tilde{u}$   $\tilde{\epsilon}$ /, Co = /p, b,

f/ et Vo = /a, i, u/. Les logatomes sont placés dans la phrase cadre : "Diz ... pra ele" et répétés deux fois. Les résultats trouvés par Liane Lovatto sur les voyelles nasales du portugais brésilien peuvent être résumés avec la figure 3.8.

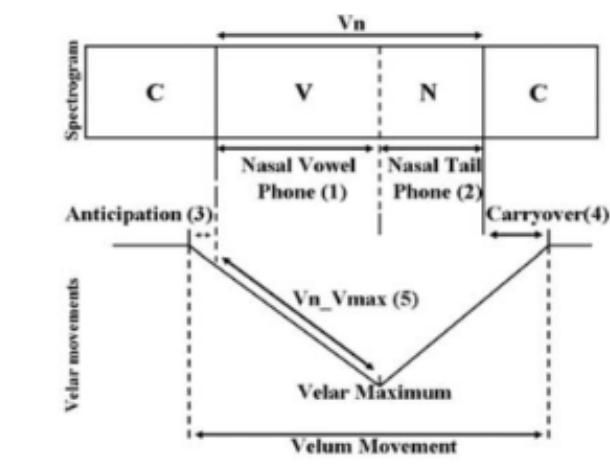


FIGURE 3.8 – Schéma résumant le mouvement du voile du palais durant la production d'une séquence CVNC (monophthongue) en portugais brésilien, d'après [Lovatto 2008].

Les résultats confirment que l'anticipation du mouvement vélaire avant la voyelle nasale est systématique, bien qu'elle soit fortement influencée par la position de la voyelle. Il existe de fortes similitudes avec les données observées pour le français, qui ont été segmentées en utilisant les mêmes critères. Néanmoins, en portugais brésilien, le moment de l'abaissement maximal du voile du palais est plus variable qu'en français : il se produit soit durant la voyelle, soit avant la queue nasale de la voyelle. Cependant, il est à noter que la queue nasale est systématique en portugais brésilien, ce qui n'est pas le cas en français. Elle apparaît selon le contexte suivant et, elle est favorisée quand la voyelle nasale est suivie par une consonne sourde. La nasalité se produit soit avant la queue nasale, soit pendant. Il serait intéressant d'examiner d'autres données dans différents dialectes et de les comparer avec des données similaires dans des langues comme l'anglais, où le statut de la nasalité diffère. Demasi et al. (2019) vont un peu plus loin dans l'interprétation de ces résultats sur le portugais brésilien et montrent que la diphtongaison nasale est le résultat de la variation temporelle du mécanisme d'ouverture et de fermeture du voile du palais, associé au mouvement de la langue, [Demasi 2019]. Une locutrice a participé à l'acquisition des données constituées de diphtongues nasales et de voyelles orales (*cf.* tableau 3.2) enchâssées dans la phrase cadre "Digo .. todo dia".

La coordination entre les gestes oraux et nasals affecte la réalisation des voyelles nasales, mais aussi des diphtongues nasales. Même si la voyelle nasale est généralement considérée comme une monophthongue, les deux types de segments (voyelle et diphtongue) ont un appendice nasal comme résultat de l'élévation de la langue et de l'abaissement du voile du palais. La figure 3.9 tient compte de la particularité des diphtongues dans cette langue.

Ce schéma 3.9 est particulièrement intéressant car il montre que la queue nasale est liée à un mouvement de fermeture et que le mouvement d'abaissement/relèvement du voile du palais semble être assez fixe, indépendamment du contexte articulatoire. Ce fait serait lié à une contrainte musculaire, rejoignant le modèle de coarticulation envisagé par Sefton et Beddor en 2005 ("temporally aligned"). Ce modèle postule que l'étendue temporelle et spatiale du

Diphthongs			
Front			
Oral		Nasal	
[dej]	<i>gave</i>	[têj]	<i>have</i>
[sej]	<i>known</i>	[sêj]	<i>without</i>
[nej]	<i>Ney</i>	[nêj]	<i>neither</i>
[hej]	<i>king</i>	[hêj]	<i>REM</i>
[lej]	<i>law</i>	[bêj]	<i>good</i>
Back			
Oral		Nasal	
[paw]	<i>wood</i>	[pãw]	<i>bread</i>
[maw]	<i>bad</i>	[mãw]	<i>hand</i>
[taw]	<i>these</i>	[tãw]	<i>so</i>
[saw]	<i>salt</i>	[sãw]	<i>sane</i>
[kaw]	<i>lime</i>	[kãw]	<i>dog</i>

TABLE 3.2 – Logatomes constituant le corpus pour l’étude de la nasalité des diphtongues en portugais brésilien, d’après [Demasi 2019].

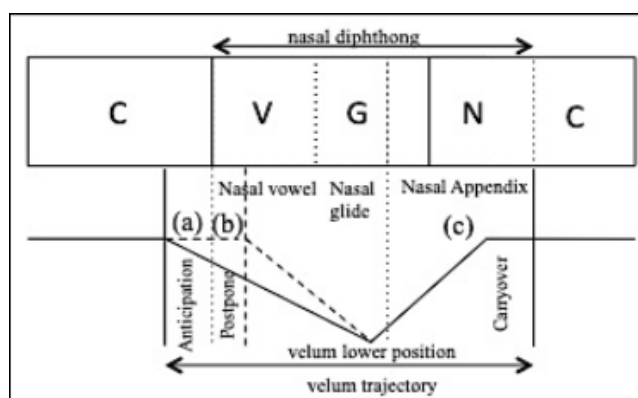


FIGURE 3.9 – Schéma résumant le mouvement du voile du palais durant la production d’une séquence CVGNC (diphtongue) en portugais brésilien, d’après [Demasi 2019].

geste nasal est relativement constante à travers différents contextes, bien que l’alignement temporel du geste nasal et oral puisse varier de façon prévisible selon les contextes : plus la consonne nasale est courte, plus la durée de la coarticulation nasale durant la voyelle orale est longue [Sefton 2005].

Une de mes hypothèses que j’aimerais démontrer dans mes travaux futurs est que, une fois que le voile du palais a commencé à s’abaisser par anticipation d’un phonème nasal, sa masse et ses contraintes musculaires le rendent peu flexible par rapport à d’autres articulateurs. De ce fait, son parcours temporel sera contraint. Les adaptations articulatoires liées à la coarticulation auront alors lieu soit avec d’autres articulateurs comme la langue, soit elles seront temporellement décalées, soit elles impliqueront une forte assimilation.

### 3.1.1.5 La nasalité du point de vue articulatoire : données issues de l’EMA

En 2006, j’ai eu l’opportunité de me former à la prise de mesures EMA au Gipsa-lab, en étant recrutée comme post-doctorante par Solange Rossato. Cette campagne de mesures a permis de récolter la position de la langue et du voile du palais sur trois locutrices francophones produisant l’ensemble des phonèmes du français standard dans des logatomes de type CVC et VCV. Les bobines étaient fixées comme indiqué sur la figure 3.10.

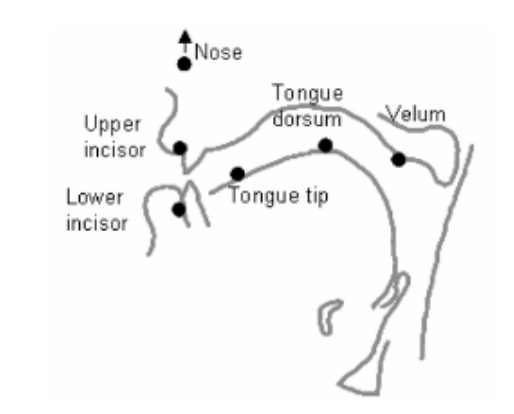


FIGURE 3.10 – Position des six bobines fixées sur les locuteurs durant l’acquisition des données EMA, d’après [Amelot 2007b].

Trois articles ont été publiés suite à cette campagne mesures [Amelot 2007b] ; [Delvaux 2007] ; [Rossato 2007]), disponibles ([ici](#)), ([ici](#)) et ([ici](#)). Les résultats de ces études confirment que :

1. les trois voyelles nasales sont produites avec une hauteur de voile du palais plus basse que les consonnes nasales (/m/ et /n/) (*cf.* figure 3.11) ;
2. les cibles de hauteur de voile du palais pour les segments nasaux et oraux peuvent se chevaucher, en particulier pour les séquences de consonnes nasales et de voyelles orales contextuellement nasalisées, ou pour les consonnes /l/ et /k/ ;
3. la nasalisation contextuelle en français est plutôt un report de l’abaissement du voile du palais qu’une anticipation de ce mouvement.

Nos données confirment également qu’il existe une hauteur intrinsèque du voile du palais selon la voyelle, la voyelle [a] étant la voyelle produite avec le voile du palais le plus bas pour les trois locutrices (*cf.* figure 3.12). Marguerite Durand en 1953 indiquait déjà à partir de données

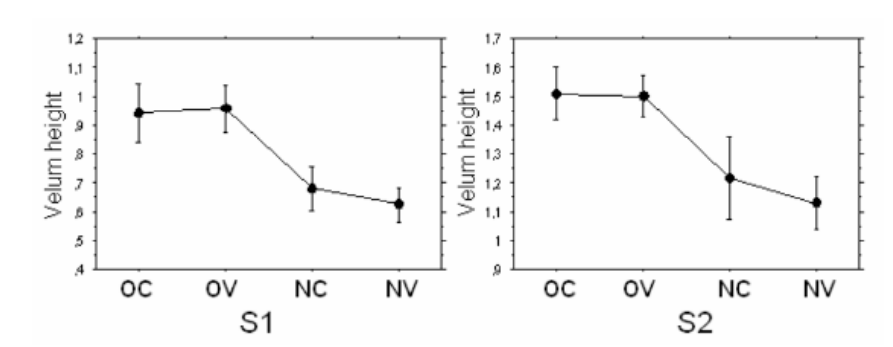


FIGURE 3.11 – Valeur moyenne et écart-type pour les consonnes orales, les voyelles orales, les consonnes nasales et les voyelles nasales pour les deux locuteurs, d’après [Amelot 2007b].

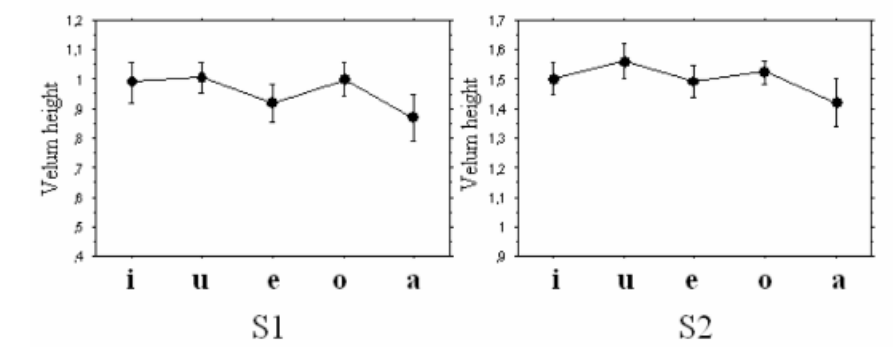


FIGURE 3.12 – Exemple de la hauteur du voile du palais pour cinq voyelles orales du français (/i/, /u/, /e/, /o/ et /a/) produites par deux locuteurs, d’après [Amelot 2007b].

radiographiques et de mesures acoustiques que le phonème [a] pouvait être produit avec un abaissement du voile du palais sans pour autant être perçu comme nasal [Durand 1953].

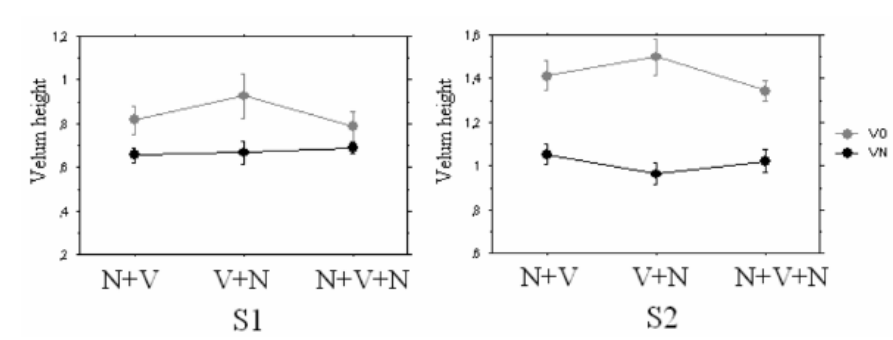


FIGURE 3.13 – Hauteur du voile du palais en fonction des voyelles orales ou nasales, suivies et ou précédées par la consonne nasale /n/ pour deux locuteurs, d’après [Amelot 2007b].

La position du voile du palais est plus élevée pour les voyelles orales suivies de la consonne nasale /VCn/ que pour les voyelles orales précédées de la consonne nasale /CnV/, indiquant qu’il y a plus de persévération que d’anticipation (*cf.* figure 3.13). Nos données tendent donc à montrer que la nasalisation de la voyelle due au contexte nasal n’atteint jamais la cible des voyelles nasales, ce qui tend à confirmer qu’il existe une différence articulatoire entre voyelles nasales et voyelles nasalisées.

Ce dernier résultat concernant la propagation du mouvement vélaire m’a posé question, car il va à l’encontre des résultats trouvés à partir des données fibroscopiques. En effet, pourquoi les mouvements du voile du palais observés par fibroscopie montrent-ils une forte anticipation, alors que les enregistrements EMA montrent peu ou pas d’anticipation ? Une des hypothèses tient au fait de la position d’observation. Pour les données EMA, le capteur est en dessous du voile du palais, et assez proche de la jonction entre le palais dur et le palais mou. La bobine de l’EMA placée sur le voile du palais est parfois assez difficile à supporter et peut causer un réflexe nauséux quand elle est placée loin du palais dur. Durant la fibroscopie, le voile du palais est observé par le haut, il est probablement plus aisé de capter le début du mouvement. Inversement, les résultats des données EMA sont assez proches des résultats des enregistrements aérodynamiques. Les données prises avec l’EMA ne concernent que le français, je n’ai pas eu l’occasion d’enregistrer des locuteurs d’une autre langue.

### 3.1.1.6 La nasalité du point de vue articulatoire : données issues du PNG

Les données acquises avec le PNG1 et le PNG2 (*cf.* Chapitre 2) ne sont pas aisées à obtenir, elles doivent absolument être obtenues sous la supervision d’un médecin ORL, du fait de leur caractère invasif. J’ai eu l’opportunité de tester l’appareil et de prendre beaucoup de données avec le PNG2 pour 4 locuteurs. Ces données ont commencé à être traitées, mais malheureusement, je n’ai pas eu l’opportunité de publier les résultats. Néanmoins, nos données ont montré que le mouvement du voile du palais commence avec un abaissement, suivi de l’ouverture du port vélo-pharyngé. Le voile du palais doit être suffisamment abaissé avant que le port vélo-pharyngé ne s’ouvre, alors que la fermeture du port vélo-pharyngé est quasi synchronisée avec la remontée maximale du voile du palais. Les données montrent que l’ouverture et la fermeture du port vélo-pharyngé sont deux mécanismes non symétriques du point de vue physiologique. Une

des explications serait que, durant la phase de descente, le voile du palais reste plus longtemps plaqué à la paroi pharyngée postérieure avant l'ouverture du port.

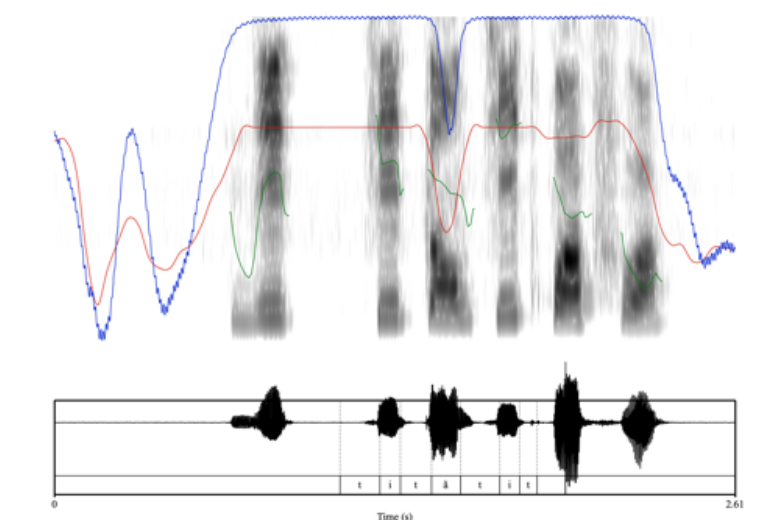


FIGURE 3.14 – Exemple de données obtenues avec le PNG2 sur un locuteur francophone. La courbe bleue est issue du PNG, la courbe rouge est issue des données fibroscopies, la courbe verte est la F0.

La figure 3.14 illustre assez bien la différence entre l'abaissement du voile du palais et l'ouverture du port vélo-pharyngé. Les tracés sont concomitants, mais les mouvements d'abaissement arrivent avant les mouvements d'ouverture et sont plus longs. Si aucune publication n'a encore vu le jour pour les données sur le français, le PNG2 a été utilisé sur le portugais brésilien. Rita Demasi, Didier Demolin, Lise Crevier-Buchman et moi-même ont montré en 2016 et 2019 l'intérêt de cet instrument [Demasi 2019] ; [Demasi 2016]. Les résultats trouvés sont assez similaires à ceux présentés sur la figure 3.14, à savoir que l'ouverture du port vélo-pharyngé arrive après l'abaissement du voile du palais.

Suite à toutes les études portant sur les mouvements articulatoires liés au vélum, il est possible de résumer la production articulatoire de la nasalité avec le schéma 3.15 :

### 3.1.1.7 La nasalité du point de vue acoustique

Cette partie se base exclusivement sur mes travaux de thèse [Amelot 2004a]. La nasalité a toujours été difficile à aborder du point de vue acoustique, et encore plus en ce qui concerne l'analyse acoustique. Dans mes travaux de thèse, je me suis contentée de faire une analyse qualitative du signal acoustique et du spectrogramme. Les données aérodynamiques acquises durant mes travaux de recherche avec EVA<sup>tm</sup> ne se prêtaient pas à une analyse acoustique fine, du fait du masque en silicone qui agit comme un filtre passe-bas et crée une forte résonance autour de 1400 Hz et un phénomène d'anti-résonance autour de 3500 Hz [Ghio 2002], ceci ajouté aux embouts qui obstruent les narines durant la phonation. L'évaluation acoustique liée à mes travaux de thèse a été effectuée en deux temps : 1. dans un premier temps, j'ai regardé s'il existait une corrélation entre les mouvements vélares (fibroscopique) et le signal acoustique, et 2. dans un second temps, j'ai cherché la corrélation entre le débit d'air nasal et

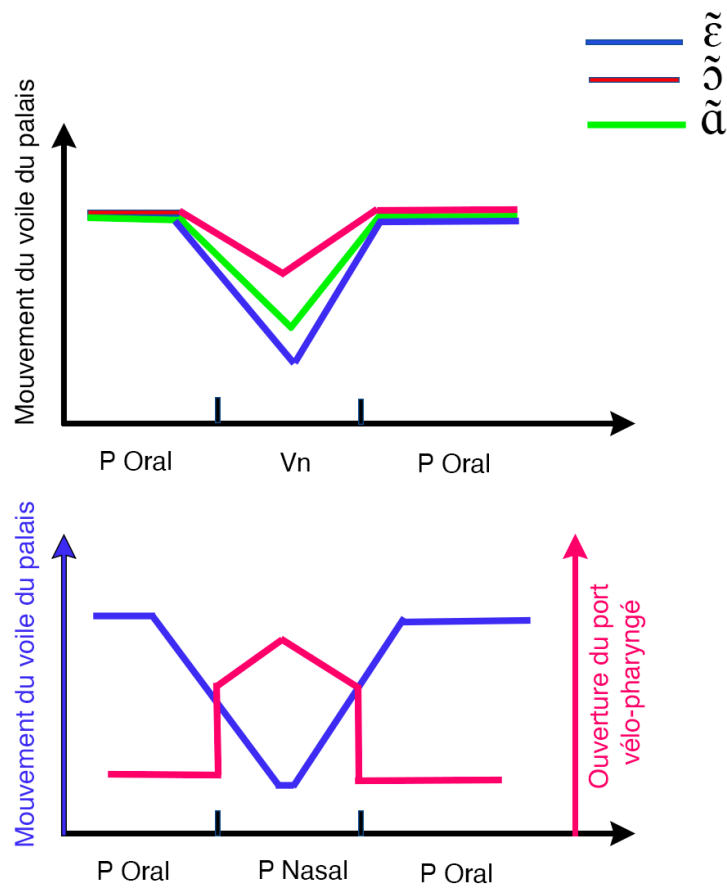


FIGURE 3.15 – Schéma idéalisé résumant mes recherches sur les mouvements du voile du palais et l'ouverture du port vélo-pharyngé.

le signal acoustique. Ils peuvent se résumer ainsi : l'enveloppe spectrale du signal acoustique de la voyelle nasale et, en présence d'un changement d'amplitude, j'ai regardé si ce changement était lié à un état particulier du mouvement vélaire. Mon hypothèse était que les changements induits par le mouvement du voile du palais pouvaient transparaître sur le signal acoustique. Je me suis focalisée sur trois positions : 1. le voile du palais commence à s'abaisser, 2. le voile du palais est complètement remonté, et 3. le voile du palais est maximale abaisse. Les données montrent qu'il n'y a pas de correspondance entre le début du mouvement d'abaissement et le signal acoustique. Il n'y a pas non plus de corrélation entre la fin du mouvement de fermeture vélaire et le signal acoustique. Par contre, dans 42% des cas, j'ai trouvé une corrélation entre l'abaissement maximum et le signal acoustique.

Plus récemment, à partir de données acquises avec PNG2, j'ai repris les analyses acoustiques. Ces travaux n'ont pas encore été publiés mais ils confirment ce que j'avais observé durant ma thèse à savoir une corrélation entre le mouvement du voile du palais et la trajectoire de F2, comme on peut le voir sur la figure 3.16. Il est également possible de constater que, durant l'abaissement maximum correspondant à l'ouverture maximum, il y a une forte augmentation de H3. Il sera nécessaire de poursuivre ces investigations pour confirmer ou non l'importance du troisième harmonique pour l'acoustique des voyelles nasales.

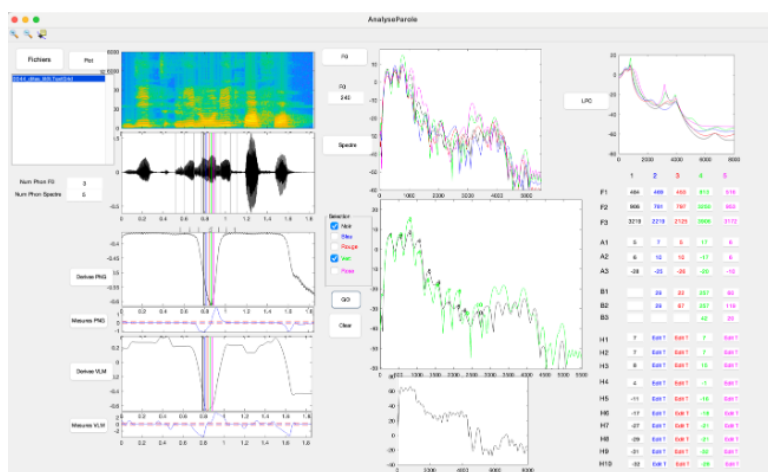


FIGURE 3.16 – Logatome prononcé par une locutrice de haut en bas et de la gauche vers la droite : spectrogramme, signal acoustique, ouverture du port vélo-pharyngé, mouvement du voile du palais, dérivée des mouvements, coupe spectrale prise au milieu de la voyelle nasale et les différentes couleurs illustrent un décalage dans le temps pour la mesure spectrale, LPC

Ainsi ces différentes études "multiparamétriques" m'ont permis d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes de production de la nasalité et de montrer la non-linéarité des phénomènes, même si il reste encore des mécanismes à d'étudier, il me semble possible d'affirmer que pour les consonnes nasales, il est nécessaire d'avoir une section des évènements suivants :

1. l'arrêt de l'activité musculaire du levator palatini et l'amplification de l'activité musculaire du palatoglosse ;
2. celui-ci implique un abaissement du voile du palais ;
3. celui-ci implique une ouverture du port vélo-pharyngé ;

4. celui-ci implique une possibilité de l'air à passer par le nez ;
5. la fermeture de la bouche pour la production de la consonne implique une fermeture du conduit buccal et une augmentation de la pression intra-oral ;
6. celle-ci implique que l'air passe exclusivement par le nez ;
7. la structure de la cavité nasale implique un amortissement de la pression acoustique avec une composante principale du signal dans les basses fréquences.

Résultante = perception d'un son plus grave et non oral

Et pour les voyelles nasales :

1. l'arrêt de l'activité musculaire du levator palatini et l'amplification de l'activité musculaire du palatoglosse ;
2. celui-ci implique un abaissement du voile du palais ;
3. celui-ci implique une ouverture du port vélo-pharyngé ;
4. l'abaissement du voile du palais permet de modifier la forme de la cavité orale, implique une modification acoustique ;
5. l'ouverture du port vélo-pharyngé implique une possibilité de l'air à passer par le nez ;
6. trouver une configuration articuloire qui permette d'augmenter la pression intra-orale pour que de l'air puisse passer par le nez tout en permettant à l'air de passer aussi par la bouche ;
7. ce qui implique une modification d'affiliation des cavités, la cavité nasale participe à la production du phonème et devient une composante importante du signal ;
8. la structure de la cavité nasale implique un amortissement de la pression acoustique avec une composante principale du signal dans les basses fréquences.

Résultante = perception d'un son plus grave et non oral associé à une configuration du conduit orale contrainte par l'abaissement du voile du palais

### 3.1.2 Nasalité et pathologie

*Article de référence : Amelot, Angélique. « Étude aérodynamique et évaluation perceptive sur des patients souffrant de dystrophie musculaire ». Mémoire pour valider un Diplôme InterUniversitaire. Directeur de mémoire : Robert, Danielle. Toulouse, 2006, [Amelot 2006a]. Mon mémoire est disponible ([ici](#))*

J'ai travaillé sur trois pathologies liées au phénomène de nasalité : la dystrophie musculaire, la **PNS** et l'**IVP**. Ces trois pathologies ont en commun d'affecter la production de la nasalité. La dystrophie musculaire et l'**IVP** se caractérisent par un problème au niveau du sphincter vélo-pharyngé, qui se traduit soit par une impossibilité de commander les mouvements du voile du palais (dystrophie), soit par une non-perméabilité entre la cavité orale et la cavité nasale due à ce que l'on appelle communément une fente palatine **IVP**. Dans le cas de la **PNS**, le voile du palais n'est à priori pas touché, donc la jonction entre cavité orale et nasale peut avoir lieu. Néanmoins, l'encombrement de la cavité nasale par les polypes agit sur la qualité de la production vocale des patients. Pour ces trois pathologies, non seulement on retrouve une difficulté de production, mais la qualité de vie est également atteinte.

### 3.1.2.1 La dystrophie musculaire

En 2006, j'ai obtenu un diplôme inter-universitaire en phoniatry. Mon objectif était de me familiariser avec les pathologies de la voix et de mieux comprendre l'anatomie du conduit vocal dans son ensemble. Je me suis intéressée, pour mon mémoire, à la **DMOP** et à la maladie de Steinert. Cette partie de recherche a également été présentée dans un séminaire de recherche au Gipsa-Lab [Amelot 2007c].

Les troubles de la voix (dysphonie) et de la parole (dysarthrie) doivent être connus et reconnus dès que possible, car ils sont durables et parfois difficiles à identifier précisément. Concernant les troubles de la nasalité, ils ne sont pas toujours décelés lorsque plusieurs déficits de la parole et/ou de la voix coexistent. L'insuffisance vélo-pharyngée peut également être associée à des dysfonctionnements neuromusculaires. Randall et al. classent les insuffisances vélo-pharyngées en 4 groupes : 1. celles dues à des dysfonctionnements neuro-moteurs (tumeurs, problèmes vasculaires, paralysie cérébrale); 2. celles de type "nuclear" (polio bulbaire, amyotrophie, sclérose latérale); 3. celles liées à des problèmes de la périphérie nerveuse (polynévrite); et 4. celles liées à la détérioration des organes (myasthénie, polymyosite, dystrophie musculaire) [Randall 1960]. Salomonson et al. indiquent que l'insuffisance vélo-pharyngée pourrait être un des premiers signes cliniques de cette maladie [Salomonson 1988]. Ce dysfonctionnement au niveau du port vélo-pharyngé se traduit par une quasi impossibilité à bouger le voile du palais. Comme la position de repos du voile du palais est la position basse, si celui-ci est immobile et en position de relâchement, cela entraîne probablement une hypernasalité avec des fuites nasales. Kummer et al. indiquent que l'hypernasalité est une quantité excessive de résonance nasale, accompagnée de sons normalement non nasals qui sont produits avec une fuite d'air passant par le nez durant la pression nécessaire à la production de la consonne [Kummer 1992].

La dystrophie musculaire consiste en une détérioration progressive des muscles du corps, ou myopathie. Il s'agit d'une maladie génétique qui se caractérise par une faiblesse et une dégénérescence progressive des muscles volontaires qui contrôlent les mouvements du corps. Il existe plusieurs formes de dystrophie musculaire, qui varient selon les muscles atteints, l'âge où apparaissent les premiers symptômes et leur gravité, la rapidité de l'évolution de la maladie, et le mode de transmission héréditaire. Les principaux types de dystrophie musculaire sont la dystrophie musculaire de Duchenne, la dystrophie musculaire de Becker, la dystrophie musculaire myotonique ou maladie de Steinert, la dystrophie musculaire congénitale, la dystrophie musculaire des ceintures et la dystrophie musculaire facio-scapulo-humérale. La **DMOP** est une forme de myopathie lente et progressive à début tardif. Elle est caractérisée par un ptôsis, une dysphagie et parfois par d'autres atteintes au niveau du crâne et des muscles des membres supérieurs. Même si les premiers cas, pour la plupart, ont été rapportés dans la population québécoise, la **DMOP** a ensuite été observée partout dans le monde. Du point de vue clinique, la maladie se déclare entre 30 et 60 ans avec un ptôsis progressif souvent asymétrique, provoquant une contraction compensatoire du muscle du front et donnant ainsi une attitude caractéristique avec rétroflexion du cou.

La maladie de Steinert est une maladie génétique de transmission autosomique dominante avec anticipation, c'est-à-dire qu'elle tend à s'aggraver et à apparaître plus précocement avec les générations [Jaeger 1993]. Elle associe une dystrophie musculaire à une myotonie. La myotonie implique une difficulté à relaxer un muscle ou un groupe de muscles une fois qu'ils ont été contractés. Cette myotonie s'aggrave avec le froid et la fatigue, mais diminue avec la répétition des mouvements. Elle implique un retard du relâchement musculaire et des anomalies d'autres organes : œil, système nerveux, appareil cardio-respiratoire, appareil digestif, glandes

endocrines. C'est la plus fréquente des maladies neuromusculaires de l'adulte, avec une prévalence d'environ 5 cas pour 100 000 habitants. Il existe deux grandes entités cliniques distinctes, dont les différents phénotypes correspondent pourtant à une même anomalie génétique.

Pour étudier ces deux populations, j'ai utilisé des enregistrements faits avec l'appareil EVA<sup>tm</sup>, à l'hôpital Tenon sous la direction de Bernard Roubeau. Le corpus consistait à faire lire la phrase : « c'est une affaire intéressante qu'en pensez-vous? ».

Les mesures quantitatives de flux d'air oral et nasal montrent que, pour la majorité des locuteurs pathologiques, la quantité d'air nasal est plus importante durant la production de la phrase que pour les locuteurs sains (*cf.* tableau 3.3).

	Max_DAN (cm <sup>3</sup> /sec)	Min_DAN (cm <sup>3</sup> /sec)	Max_DAB (cm <sup>3</sup> /sec)	Min_DAB (cm <sup>3</sup> /sec)	Moy_DAN (cm <sup>3</sup> /sec)	Moy_DAB (cm <sup>3</sup> /sec)	Ratio (%)
loc1_patho	0,3336	0,0382	0,9958	-0,1129	0,1142	0,2991	22
loc2_patho	0,0873	-0,0167	0,8851	0,0192	0,0213	0,2488	6
loc3_patho	0,2585	-0,0448	0,4193	-0,0815	0,0483	0,099	29
loc4_patho	0,1277	0,0146	0,4407	-0,0822	0,0628	0,1580	22
loc5_patho	0,4158	0,0693	0,5324	-0,0914	0,1785	0,2092	42
loc1_sain	0,1685	-0,0233	0,3538	-0,1247	0,0285	0,0992	17
loc2_sain	0,2308	-0,0144	0,7687	-0,1368	0,0330	0,2270	9
loc3_sain	0,1504	-0,0311	0,5933	-0,1335	0,0070	0,1970	1

TABLE 3.3 – Mesures de DAN et DAB pour l'ensemble des locuteurs, d'après [Amelot 2006a].

Les résultats ont montré que seul un locuteur pathologique (loc3patho) pouvait produire la phrase sans fuite nasale importante. Pour les quatre autres locuteurs pathologiques, la totalité de la phrase est produite avec du flux d'air nasal, même durant la production des occlusives orales sourdes. J'ai montré dans plusieurs articles que les occlusives orales sourdes ne pouvaient être produites avec du flux d'air nasal, sous peine de perdre leur caractère sourd et oral. Visuellement, les tracés aérodynamiques trouvés pour les locuteurs pathologiques sont assez similaires à ce que nous avons trouvé en 2001 avec Basset et al. sur la parole non lue. Il est intéressant de constater que la phrase était intelligible, même pour loc5patho avec une forte fuite d'air nasal (*cf.* tableau 3.17). Cela suggère que la loi aérodynamique basée sur le principe de la pression intra-buccale maximum pour les consonnes non voisées n'est peut-être pas le seul mécanisme important dans ce cas, car s'il existe un dysfonctionnement empêchant sa mise en place, il y a vraisemblablement un mécanisme de compensation qui permet de maintenir l'explosion. Les tests de perception qui ont été faits pour cette étude révèlent qu'il est assez difficile de juger d'un dysfonctionnement nasal, notamment si un autre trouble de la voix est présent.

### 3.1.2.2 Polypose naso-sinusienne (PNS)

Pour l'étude de cette pathologie, j'ai travaillé en collaboration avec Amélie Elmerich. L'article montrant les résultats des données aérodynamiques est disponible ([ici](#)), [Elmerich 2020b]. La PNS est une maladie chronique de la muqueuse sinusienne, caractérisée par une inflammation bilatérale des cavités naso-sinusiennes aboutissant au développement de polypes. Cependant, la PNS peut parfois être asymétrique, voire unilatérale, ce qui doit conduire à rechercher un diagnostic différentiel tel qu'une infection ou une tumeur. On compare souvent ces polypes à une grappe de raisins en raison de leur forme similaire et de leur couleur blanche jaunâtre. La taille des polypes peut varier de quelques millimètres à plusieurs centimètres de diamètre. Dans la population générale, sa prévalence est de 2 à 3%, avec une nette augmentation à partir de 50 ans [Klossek 2005]. Quatre patients atteints de PNS ont été retenus pour le travail de thèse d'Amélie Elmerich, mais la campagne d'enregistrement a permis d'avoir des données pour

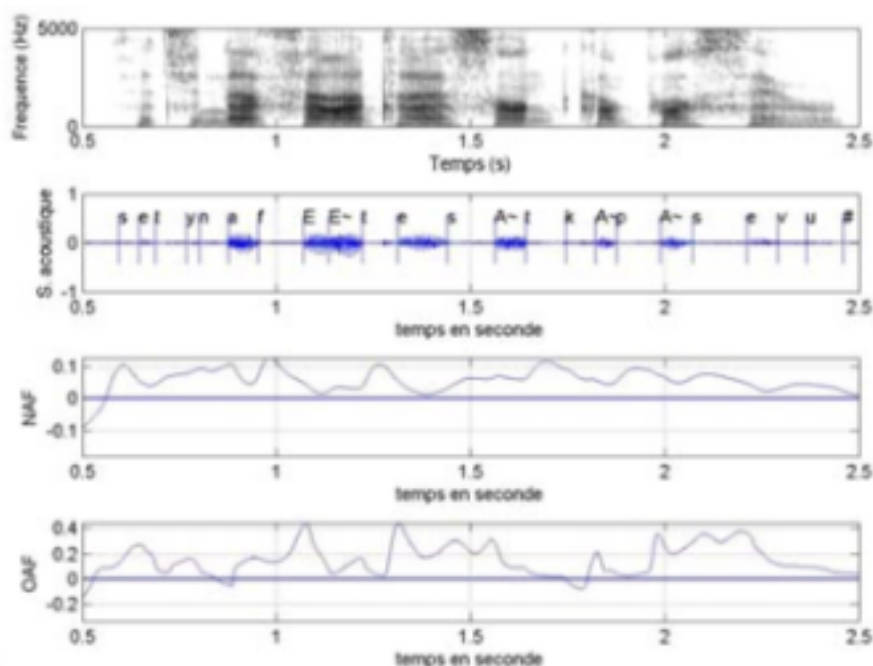


FIGURE 3.17 – Données d’un locuteur souffrant de dystrophie musculaire avec une fuite nasale importante (loc5patho), d’après [Amelot 2006a]

huit locuteurs. Le corpus est composé de logatomes types et de phrases provenant du corpus AUPELF-UREF [Vaissiere 1998]. Les phrases allient consonnes nasales et voyelles orales ([a] et [i]), par exemple : "Nana a nagé naguère à nadi", "Nini ne nie les nids ni les anis" ainsi que des logatomes de type VCV. V est composé des voyelles orales du français, insérées dans une phrase porteuse "il a dit V : comme dans pV. PVp, pVp pVp, tu n’as pas dit pVpVp mais pVpVpVp". Une partie des données a été enregistrée avec le système  $EVA^{TM}$  et une autre partie avec l’AeroMask (cf. Chapitre 2).

Nos résultats obtenus à partir d’ $EVA^{TM}$  indiquent que la chirurgie a un impact sur le niveau aérodynamique de la parole des personnes atteintes de PNS. Elle a permis pour deux patients, d’augmenter le flux d’air nasal, de réduire le phénomène de compensation orale mais aussi de faciliter la coordination des consonnes nasales, comme on peut le voir sur la figure 3.18.

Les enregistrements avec l’AeroMask nous ont permis d’envisager des mesures acoustiques, les premières mesures exploitées ont été publiées en 2023 mais il ne s’agit que de mesures préliminaires, comme indiqué dans le Chapitre 5, je souhaite approfondir ces mesures et je décrirai mes projets de recherche dans ce sens [Elmerich 2023b].

Il s’agit bien évidemment de résultats préliminaires qui nécessitent d’être approfondis, la figure 3.19 indique que le spectre nasal diminue après chirurgie et s’aligne sur le spectre oral tout en étant légèrement inférieur en termes de dB. C’est l’inverse avant chirurgie, ce qui pourrait expliquer que les patients atteints de PNS sont souvent catalogués comme « parlant du nez ».

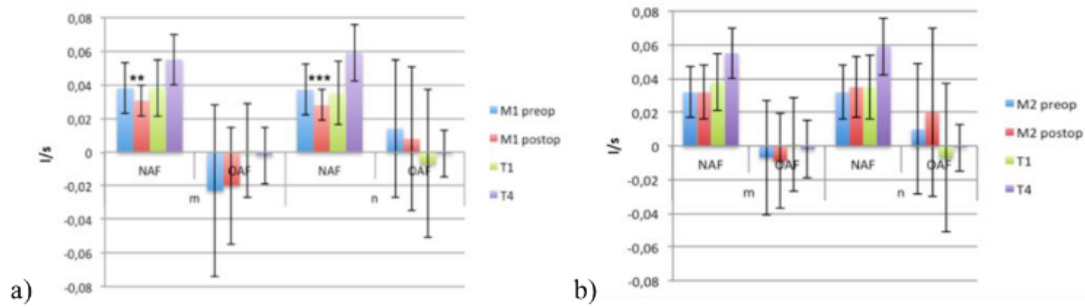


FIGURE 3.18 – a) Graphique des moyennes en l/s de DAN et DAB sur [m] et [n] en préopératoire (bleu), postopératoire (rouge) pour le patient M1 et pour les témoins T1 et T4 (vert et violet), b) Graphique des moyennes en l/s de DAN et DAB sur [m] et [n] en préopératoire (bleu), postopératoire (rouge) pour le patient M2 et pour les témoins T1 et T4 (vert et violet), d'après [Elmerich 2020b]

### 3.1.2.3 Insuffisance vélo-pharyngée (IVP)

J'ai toujours cherché à mettre en application mes recherches et à les confronter à la pathologie. Pour cela, je me suis rapprochée des praticiens. J'ai régulièrement dirigé des Masters d'orthophonie et travaillé avec le Service de chirurgie maxillo-faciale et chirurgie plastique de l'Hôpital Necker. L'IVP se caractérise par un défaut de fermeture du sphincter vélo-pharyngé. Bien que principalement associée à des causes anatomiques telles que les fentes palatines, l'IVP peut avoir d'autres causes : iatrogènes ou neurologiques. Dans l'étude que nous avons publiée en 2024, nous avons montré que les mesures de nasalance peuvent apporter des informations essentielles sur la nature de la pathologie, et qu'il est nécessaire de fixer des seuils selon la langue parlée par le patient [Fersing 2024]. Les valeurs seuils de nasalité définies dans cette étude peuvent être utilisées pour le diagnostic objectif de l'IVP et le suivi ultérieur des enfants français âgés de 8 à 10 ans, nés avec une fente labiale et palatine. Cette étude porte sur 42 patients (23 garçons, 19 filles), âgés de 8 à 10 ans (âge moyen de 9 ans et 5 mois). Tous les patients étaient de langue maternelle française (dont 8 bilingues : espagnol, arabe, chinois), avec une fente labiale et palatine totale (11 bilatérales et 31 unilatérales). Sept patients avaient déjà subi une pharyngoplastie, et 16 avaient suivi une rééducation orthophonique pour corriger une IVP. Les données ont été comparées à celles de cinquante enfants sains âgés également de 8 à 10 ans. Le corpus est basé sur des logatomes de type [fafafa] contenant la totalité des phonèmes du français, et sept phrases phonétiquement équilibrées construites pour cibler certaines consonnes (/p, t/, /b, d/, /k, g/, /s, ʃ/ et /z, ʒ/), ainsi qu'une phrase contenant une forte proportion de consonnes et de voyelles nasales. Les résultats des analyses sont indiqués dans le tableau 3.4.

Ce travail a permis de proposer le premier protocole français pour le diagnostic objectif de l'IVP. Le protocole comprend des valeurs seuils avec la plus grande capacité de prédiction (8 syllabes, 6 phrases et gamme nasale) et un panel de caractéristiques phonétiques françaises. Ce protocole de diagnostic peut donc être facilement incorporé dans la pratique clinique standard du département.

Ce travail sur l'IVP est lié au système que j'ai développé pour l'hôpital Necker, que je décris dans la Chapitre 2 ; « le Nasomètre ». Je souhaite y ajouter des analyses visant à comprendre

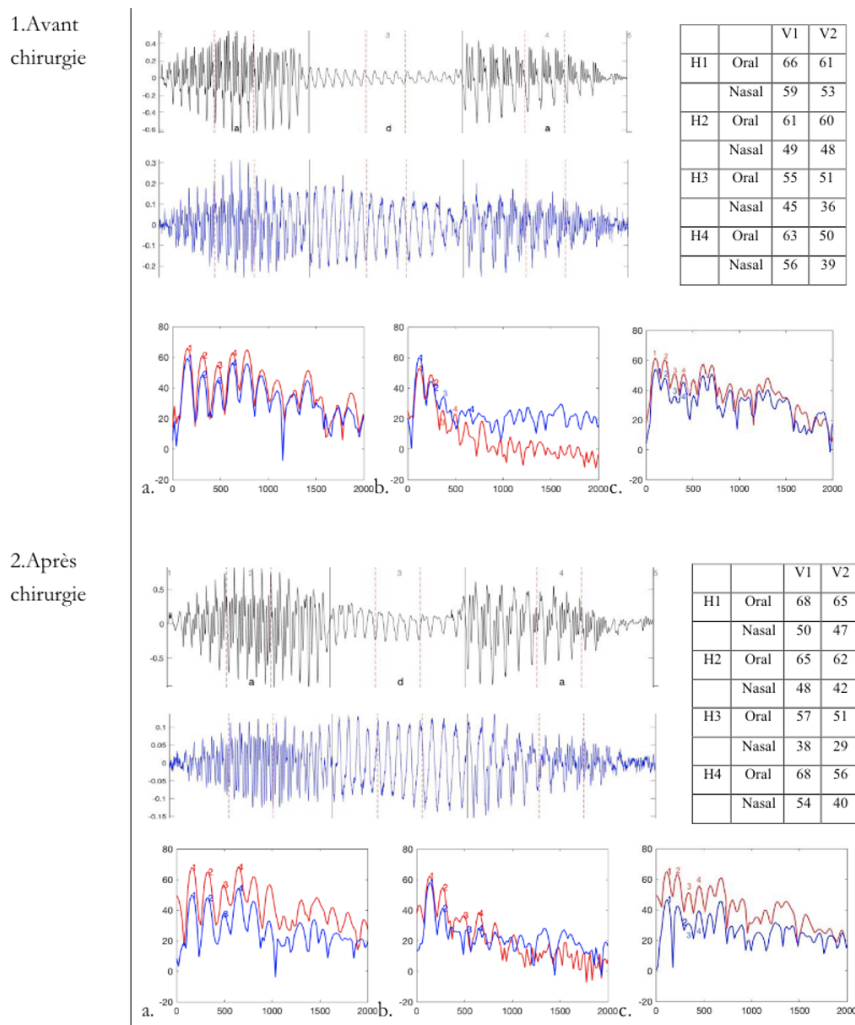


FIGURE 3.19 – a) Du haut vers le bas : signal acoustique oral, nasal du logatome [ada] ainsi que les coupes spectrales oral (rouge) et nasal (bleu) sur [a] (V1) en a., [d] en b. et [a] (V2) en c., ainsi que sur la droite, un tableau reprenant les valeurs des harmoniques en dB sur le signal oral et nasal, avant chirurgie (1), après chirurgie (2), d’après [Elmerich 2020b]

Nasalance (%)	Control group		Cleft group	
	mean (SD)	median [Min-Max]	mean (SD)	median [Min-Max]
Syllable OCOV (Oral consonant Oral vowel)	13,87 (9,09)	11,76 [4-70]	21,22 (17,07)	19,58 [3-84]
Oral sentences	16,69 (5,99)	16,26 [6-44]	25,34 (14,18)	24,98 [4-64]
All Oral stimuli	14,90 (8,41)	13,68 [4-70]	22,70 (15,23)	21,90 [3-84]
All nasal stimuli	55,12 (11,61)	55,76 [21-87]	52,10 (14,37)	51,75 [17-94]
Nasalance range	44,28 (7,31)	43,00 [27-59]	31,00 (14,30)	33,00 [4-69]

TABLE 3.4 – Moyenne, écart-type, médiane, minimum, maximum des scores de nasalance pour chaque type de stimulus du corpus, d’après [Fersing 2024].

les phénomènes de compensation mis en place par les enfants souffrant de cette pathologie.

Pour ces pathologies, mon but est de partir de la compréhension des mécanismes articulatoires physiologiques, pour comprendre les déviations présentes dans la parole pathologique et explorer les mécanismes de compensation possibles, spontanés ou orientés.

## 3.2 Données expérimentales et français langue étrangère (FLE)

*Article de référence : Pillot-Loiseau, Claire, Angélique Amelot and Florentina Fredet. 2010. Apports de la phonétique expérimentale à la didactique de la prononciation du français langue étrangère : Étape 1 : réflexion autour de l'établissement d'un corpus. Les Cahiers de l'APLIUT (Vol. XXIX N° 2). 75-88. <https://doi.org/10.4000/apliut.723>, [Pillot-Loiseau 2010a]*

Plusieurs expérimentations ont permis de montrer que les instruments utilisés en phonétique expérimentale ont un apport positif sur la réalisation des phonèmes par des locuteurs apprenant le français et qu'ils peuvent permettre d'aider à améliorer sa production.

En 2010, Claire Pillot-Loiseau, Florentina Fredet et moi-même, nous nous sommes interrogées sur l'apport de la phonétique expérimentale pour l'apprentissage du français [Pillot-Loiseau 2010a] ; [Pillot-Loiseau 2010b]. Les articles sont disponibles ([ici](#)) et ([ici](#)).

De nos jours, l'oral occupe une place importante et l'apprenant étranger doit maîtriser les habitudes articulatoires et prosodiques de la langue cible s'il souhaite favoriser les échanges en situation naturelle de communication avec les natifs. Ainsi, pour l'évaluation et la didactique de la prononciation des apprenants testés, j'ai proposé d'utiliser des instruments non invasifs utilisés en phonétique expérimentale. Au-delà du fait que ces instruments sont non invasifs, j'ai fourni des protocoles et des scripts qui permettent d'évaluer rapidement les données acquises. Concernant ces études, nous avons enregistré dix sujets. Ils avaient un niveau très satisfaisant de compréhension orale et écrite du français, et passaient un Diplôme Universitaire de Phonétique Appliquée à la langue Française (DUPALF) dans le but d'améliorer leur prononciation. Des enregistrements microphoniques (niveau buccal), piézoélectriques (niveau nasal), et EGG ont été effectués en simultané pour chaque locuteur. Le corpus a été conçu pour évaluer finement la plupart des aspects segmentaux et suprasegmentaux de la prononciation de locuteurs français et étrangers. Il a été réalisé en deux temps. Un premier corpus, adapté du corpus AUPELF-UREF [Vaissiere 1998], dans lequel nous avons puisé les consonnes du français en divers contextes vocaliques, comme par exemple "c'est apa qui l'a dit", ainsi que des voyelles en divers contextes, comme par exemple "Il a dit 'i' de pipi, de titi, de kiki, de bibi, de didi, de gigi, de fifi, de sisi, de chichi, de vivi, de zizi, de jiji, de lili, de mimi, de nini, de riri". Nous avons également enregistré deux extraits du texte du Petit Prince. Un second corpus comportant quatre tâches (1. Répétition, 2. Lecture, 3. Parole spontanée, 4. Mémorisation) a également été enregistré, conformément aux techniques habituellement employées en situation d'enseignement.

Les enregistrements ont duré en moyenne une heure, installation et calibration des appareils comprises. Ils ont abouti à 15/20 minutes de parole selon le niveau de l'apprenant et le débit de parole produit. Après l'installation du dispositif, quelques productions destinées à calibrer les différents appareils étaient demandées. Cette réflexion autour d'un corpus réalisable par des apprenants étrangers n'a été finalement qu'un préalable à la constitution d'une importante base de données de productions d'apprenants de FLE. Les données ont été fournies aux étudiants de Master afin qu'ils puissent faire des analyses acoustiques.

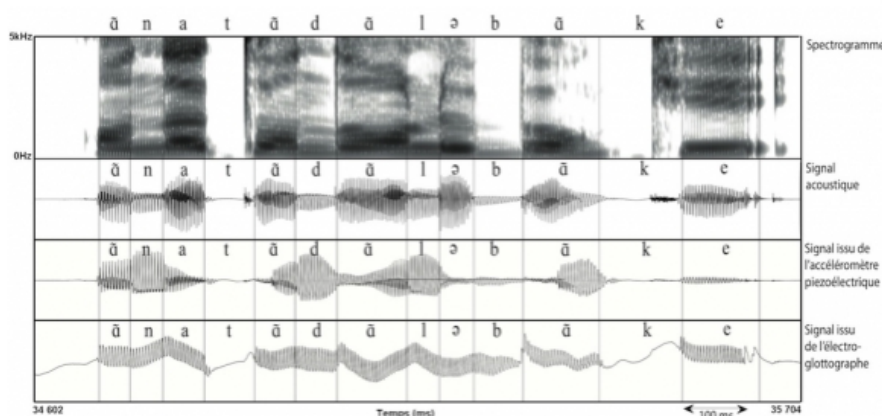


FIGURE 3.20 – Exemples de tracés obtenus pour le syntagme « en attendant le banquet » prononcé par un sujet témoin masculin. De haut en bas : spectrogramme ; signal acoustique ; signal issu de l'accéléromètre piezoélectrique ; signal issu de l'EGG, d'après [Pillot-Loiseau 2010a]

Dans la continuité de ce travail, j'ai travaillé en collaboration avec Altijana Brkan sur les données enregistrées avec un accéléromètre piezoélectrique qui a abouti à deux publications en 2012 [Brkan 2011] ; [Brkan 2012]. L'article publié aux JEP est disponible (ici). Pour cet article, nous avons enrichi la base de données précédente de cinq locutrices bosniaques et cinq locutrices francophones natives, les dernières ont servi de référence. Les résultats les plus significatifs sont les suivants : 1. une durée plus importante des voyelles françaises produites par les bosniaques par rapport aux francophones, comme on peut le voir sur le graphique 3.21.

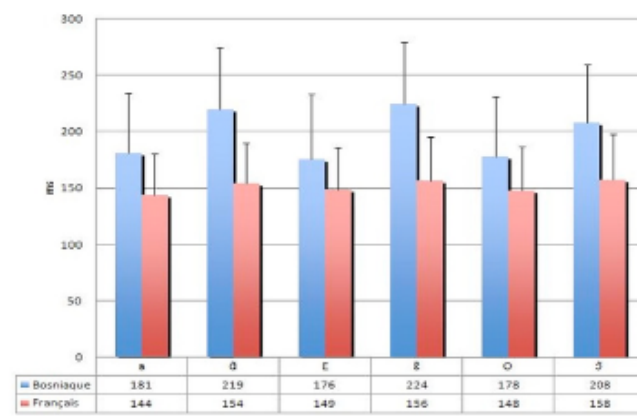


FIGURE 3.21 – Durée des voyelles (msec) : comparaison locuteurs bosniaques/français, d'après [Brkan 2011]

2. Le pourcentage de nasalité est significativement plus élevé pour chaque voyelle nasale par rapport à sa « contrepartie » orale pour les deux populations, comme on peut le voir sur le graphique 3.22.

La propagation du pourcentage de nasalité est similaire pour les deux groupes, avec plus de persévération que d'anticipation de nasalité. Ces résultats concordent avec ceux obtenus durant

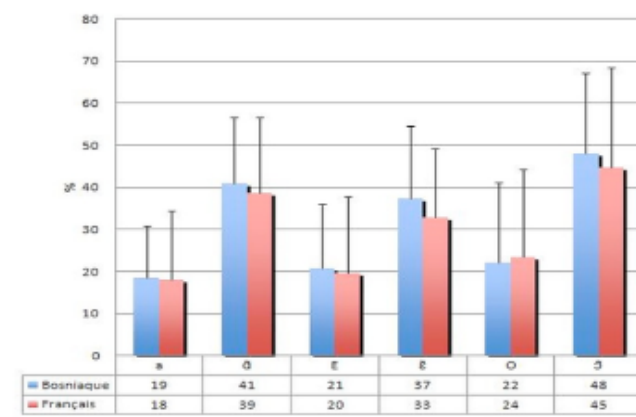


FIGURE 3.22 – Pourcentage de nasalité à partir de la moyenne en % du RMS durant la voyelle : comparaison entre les locutrices bosniaques et les locutrices françaises, d’après [Brkan 2011]

ma thèse pour le débit d’air nasal.

En 2014, une étude publiée avec David Alejandro Bustamante a permis d’enrichir la base de données des apprenants du français avec les enregistrements de deux apprenantes espagnoles, deux apprenantes colombiennes et de deux nouvelles francophones qui ont également servi de base de comparaison [Bustamante 2014]. L’article est disponible ([ici](#)).

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la production des voyelles nasales du français par les apprenantes, en fonction de la position de la voyelle dans la syllabe : initiale absolue, initiale inter-consonantique dans une séquence CVCV, et position finale de mot.

L’hypothèse principale de cette étude était que les apprenants hispanophones produisent les voyelles nasales françaises ([ã ã ě]) les plus proches de la réalisation des francophones natifs, lorsqu’elles se situent en position finale de mot. Cette hypothèse est liée au fait qu’une assimilation de la nasalisation dans certains dialectes d’Espagne et d’Amérique hispanique indique que les consonnes nasales en position finale de mot tendent parfois à disparaître, tout en nasalisant la voyelle précédente [Zamora 1967].

Nos résultats montrent qu’il existe une différence de durée entre les voyelles orales et nasales, et que cette différence se maintient quel que soit la langue d’origine et la position dans la syllabe. Les résultats sur le ratio du RMS nasal par rapport au RMS oral sont intéressants et permettent d’estimer un taux de nasalité pour les différents phonèmes, comme le montre les graphiques 3.23.

Les données montrent une tendance chez les locutrices hispanophones, particulièrement chez une locutrice colombienne, à réaliser des voyelles orales et nasales plus longues que les locutrices françaises. Ce résultat avait déjà été trouvé chez [Brkan 2011]. Le ratio du RMS nasal sur RMS oral a permis de montrer le taux de nasalité des voyelles orales et nasales, où celui des voyelles nasales est plus important. Malgré le fait que cette étude ne rende pas compte de l’articulation orale des voyelles nasales, ni de la position des lèvres ou de la langue, il est possible d’affirmer que la réalisation de la nasalité vocalique chez les apprenants est liée à leur niveau de maîtrise de la langue française. Suite à ces trois études, l’accéléromètre piézoélectrique a montré que ce dispositif non invasif et transportable peut apporter des informations intéressantes sur l’évaluation de la production des voyelles nasales du français en didactique du FLE. Au-delà

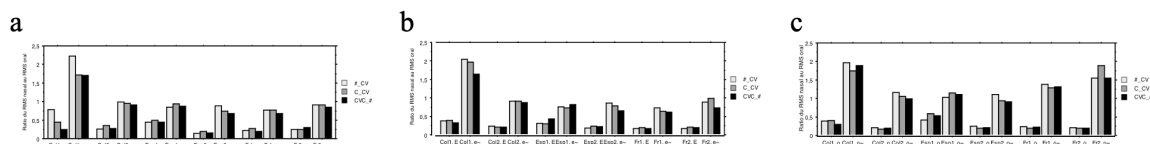


FIGURE 3.23 – a) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [a] et de [ã] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus); b) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [ɛ] et de [ẽ] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus); c) Ratio du RMS nasal au RMS oral de [o] et de [õ] des locutrices colombiennes, espagnoles et françaises dans trois positions syllabiques (mots et logatomes tous confondus), d’après [Bustamante 2014].

de l’instrument, étudier les aspects temporels de la nasalisation et le degré de nasalité chez des locuteurs de FLE devrait permettre de mieux comprendre les phases d’appropriation d’une langue, en lien avec la réalisation articulatoire, notamment pour les phonèmes qui ne sont pas présents dans leur langue d’origine. Je montrerai dans la partie suivante 3.3 l’apport de l’EGG pour l’apprentissage du français.

### 3.3 Activités de recherche liées aux mécanismes laryngés

Article de référence : Elie, Benjamin, Angélique Amelot, Yves Laprie and Shinji Maeda. 2019. Glottal Opening Measurements in VCV and VCCV Sequences. In ICA 2019 - 23rd International Congress on Acoustics, [Elie 2019], disponible (ici), [Clements 2015].

Les études que j’ai menées sur le larynx ont porté sur l’utilisation des instruments suivants : endoscope, nasofibroscope, EGG et ePGG. Une première étape de mes recherches a consisté à comparer les résultats obtenus avec ces instruments et à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents au fonctionnement de la glotte. J’ai mené une étude sur le synchronisme entre l’ouverture glottique visible sur le signal acoustique microphonique, l’ouverture glottique et le début des vibrations des plis vocaux.

Au-delà de la distinction classique voisée vs non-voisée des phonèmes, la glotte joue un rôle crucial dans l’activation de la voix. À partir du système Microbeam, Vaissière (1986) a décrit le « geste de préparation à la parole » (speech-ready gesture) lors de la mise en tension des différents articulateurs en vue de la production vocale après une pause. Ce geste s’avère hautement variable, même pour un seul locuteur lors d’une même séance d’enregistrement, en particulier pour les mouvements du voile du palais, de la langue et des lèvres [Vaissière 1986]. Si le « geste de préparation à la parole » peut être assez variable pour des articulateurs comme le voile du palais ou les lèvres, il est relativement régulier pour les plis vocaux, nécessitant une fermeture quasi complète pour obtenir une pression intra-orale suffisante à l’émission des sons (observation personnelle à partir des campagnes d’enregistrement avec l’ePGG).

La glotte est également fondamentale dans la production de sons épilaryngés et devrait être mieux prise en compte dans les modèles de synthèse vocale [Esling 2019]. Bien qu’il existe des modèles articulatoires supraglottiques, généralement construits à partir d’imagerie du tractus vocal, les gestes glottiques sont souvent modélisés à l’aide de primitives géométriques simples qui ne reflètent pas nécessairement la réalité.

Dans les années 70, on a assisté à un engouement pour l’étude des mouvements glottiques,

avec des enregistrements systématiques des vibrations des plis vocaux. Ces mouvements ont été ensuite largement modélisés mais peu étudiés *in vivo*, hormis en phonétique clinique dans le cadre des dysphonies.

J'ai personnellement mené de nombreuses expériences sur le larynx en utilisant l'**EGG**. Cet appareil non invasif est rapidement oublié par le sujet pendant l'expérimentation. Cependant, étant davantage intéressée par la nasalité que par le voisement, je n'ai pas analysé l'intégralité de ces données.

Néanmoins, les études que j'ai menées en collaboration avec des membres du laboratoire démontrent l'intérêt d'étudier les mouvements d'abduction et d'adduction de la glotte et de vibration, pour des phonèmes spécifiques, la production langagière en général et la qualité de voix, tant pour la parole saine que pathologique.

J'ai conduit une étude qui a exploré le rapport entre les mouvements de vibrations des plis vocaux acquis à partir de l'**EGG** et les mouvements d'ouverture glottique obtenus à partir de l'**ePGG**, avec les données liées issues de l'endoscope comme référence.

### 3.3.1 ePGG vs. EGG

et la vidéo endoscopique Selon la théorie acoustique, le conduit vocal est excité au moment précis de la fermeture par une impulsion négative. La flèche 1 sur le signal audio survient environ 0,5 ms après le début de la fermeture de la glotte. Ce délai de 0,5 ms correspond au temps de propagation du son de la glotte au microphone (environ 20 cm), renforçant ainsi la notion du début de la fermeture de la glotte et du quotient de la glotte fermée.

Deux locuteurs francophones sans pathologie vocale, une femme (locuteur 1) et un homme (locuteur 2), ont enregistré un corpus constitué de [VCV], [CVCV] et de [CVC], où C = [s, z, p, b] et V = [a, i, u], intégré dans une phrase cadre. Les signaux simultanés de l'**ePGG** et de l'**EGG**, ainsi que des images vidéo-endoscopiques à haute vitesse (4000 images/seconde), ont été acquis dans un milieu hospitalier sous la direction de Lise Crevier-Buchman. L'alignement temporel de la séquence des images vidéo et des signaux ePGG et EGG a été réalisé à partir des enregistrements microphoniques : un microphone connecté au système de vidéo-scopie et un microphone serre-tête AKG (520L) dédié à l'**ePGG** et l'**EGG**, enregistrés de manière synchrone.

Afin d'étudier l'ouverture et la fermeture des plis vocaux avec précision, la vitesse d'enregistrement a été fixée à 4000 images par seconde. Pour obtenir une lumière suffisante, nous avons dû enregistrer avec un endoscope rigide. L'endoscope permet d'identifier, image par image, les moments exacts d'ouverture et de fermeture de la glotte (*cf.* figure 3.24). Le corpus est limité à la voyelle /i/, voyelle antérieure qui peut être prononcée sans que l'endoscope rigide n'entrave les mouvements de la langue.

Le point noir indiqué par la flèche n°2 sur la figure 3.24 correspond à une forte discontinuité de l'aperture glottique (repérée par endoscopie) : les plis vocaux sont soudainement bloqués dans une position fermée. Cela se reproduit à chaque cycle de la glotte. La fermeture est maintenue pendant un moment avant une ouverture relativement rapide de la glotte. Le moment exact de fermeture repéré à partir des données endoscopiques ne correspond donc pas à un moment repérable sur les données ePGG et EGG. Sur la figure 3.24, les flèches 3 et 4 ne correspondent pas exactement à la flèche 1. Nous avons émis l'hypothèse que les tissus à l'intérieur de chaque pli vocal, lors de la fermeture, se déforment continuellement, ce qui est invisible sur l'imagerie endoscopique mais "visible" pour l'**ePGG** et pour l'**EGG**. Cette déformation des tissus provoque des variations dans la transmission de la lumière à travers la glotte fermée (sensible à l'**ePGG**)

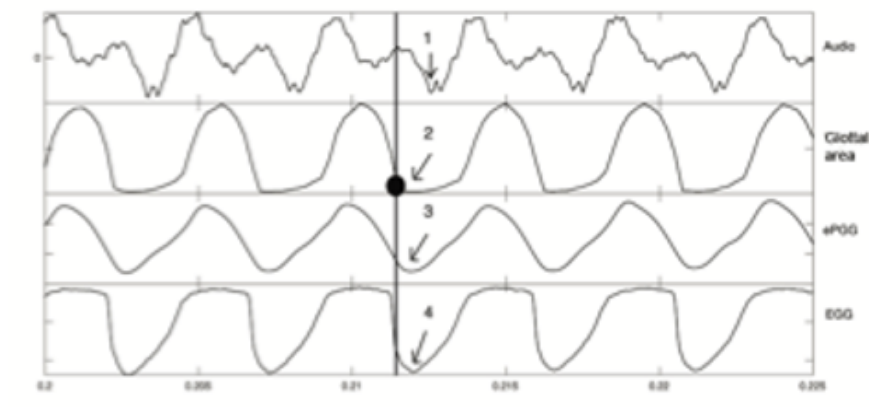


FIGURE 3.24 – Extrait des données pour la voyelle de [i] pour le locuteur 2, de haut en bas : signal acoustique, GA (Glottal area, ou Aperture Glottique), ePGG et EGG pour lequel la courbe est inversée, d’après [Amelot 2018].

et celle à la surface de contact des plis vocaux (sensible à l’EGG). Cependant, il est intéressant de noter que les signaux GA (Glottal area, ou Aperture Glottique), ePGG et EGG de la figure 3.24 (flèches 2, 3 et 4) sont assez proches temporellement, montrant qu’il existe un rapport assez fin entre la vibration et l’ouverture glottique.

Une seconde étude a été menée, remplaçant l’endoscope par un fibroscope souple. Son objectif est d’étudier de manière globale l’ouverture et la fermeture de la glotte lors de la production d’un phonème. La vitesse d’enregistrement vidéo a été réduite à 25 images/s, nécessitant ainsi moins de lumière. Le corpus, constitué d’une séquence de VCV et VCCV prononcées dans une phrase cadre par les deux mêmes locuteurs, a été conçu pour mettre en évidence les différences d’ouverture de la glotte entre les fricatives et les occlusives. Différents modèles d’ouverture de la glotte ont été mis en évidence en fonction de la classe des consonnes. Notamment, nous avons observé que la glotte est maximale ouverte pour la consonne /ʃ/, suivie de /s/ et /f/ pour les deux locuteurs. Une légère ouverture glottique est visible pour les occlusives sourdes, mais disparaît pour les occlusives sonores. Ces dernières présentent un tracé similaire aux voyelles pour l’ePGG, [Amelot 2018].

### 3.3.2 Campagnes d’enregistrement avec l’ePGG et premiers résultats

J’ai participé à de nombreuses campagnes d’enregistrement avec l’ePGG. Ces campagnes étaient nécessaires pour valider cet instrument unique, estimer son potentiel pour la compréhension des mécanismes laryngés, tester ses limites, améliorer sa calibration, son système de maintien et la reproductibilité des données. Toutes les personnes souhaitant utiliser cet instrument ont fait appel à moi pour leurs enregistrements. Par ailleurs, dans le cadre de l’ANR ArtSpeech, nous avons mené une campagne d’enregistrement avec l’ePGG sur 10 locuteurs (4 femmes et 6 hommes). Le corpus était composé de séquences VCV et VCCV, ainsi que de phrases phonétiquement équilibrées. Cette campagne d’enregistrement a abouti en 2019 à un article dont je suis coauteur [Elie 2019]. Cette étude présente les premiers résultats liés au développement d’une base de données de gestes glottiques obtenue avec l’ePGG. Cet article

a permis de présenter les premières mesures expérimentales de la dynamique d’ouverture de la glotte dans des séquences VCV et VCCV prononcées par des sujets sains [Elie 2019]. Nous avons confirmé dans cet article l’existence de différents modèles d’ouverture de la glotte en fonction de la classe des consonnes. Le corpus est un extrait de ce qui a été enregistré durant la constitution de la base de données ePGG. Les phonèmes ont été sélectionnés pour mettre en évidence les différences d’ouverture de la glotte entre les fricatives et les occlusives. Les premières analyses ont porté sur trois des locutrices et un homme. Les résultats confirment les observations faites pour les deux locuteurs dans l’étude précédente *cf.* [Amelot 2018], à savoir que l’ouverture de la glotte est considérablement plus petite pour les occlusives sourdes que pour les fricatives sourdes.

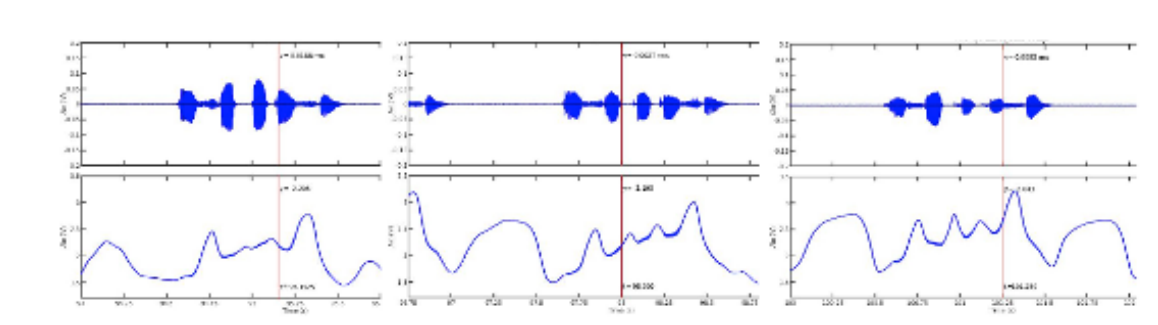


FIGURE 3.25 – Signal de l’ePGG (en bas) et acoustique (haut) pour les /asa papa sa/, /asa kaka sa/ et /asa titi sa/ produites par le locuteur 4, d’après [Elie 2019].

Les résultats ont également montré que la consonne fricative /ʃ/ est la consonne produite avec la plus grande ouverture glottique comme le montre sur la figure 3.26.

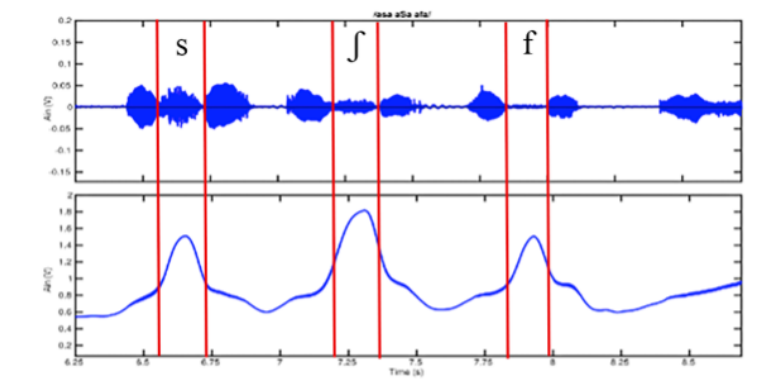


FIGURE 3.26 – Signal de l’ePGG (en bas) et acoustique (haut) pour la séquence /asa a/ʃ/a afa/, d’après [Elie 2019].

Les résultats montrent également que le pic d’ouverture est atteint approximativement un peu après le milieu du phonème. Pour les logatomes /papa kaka titi/ nous avons remarqué que l’ouverture est plus grande pour /kaka/ que pour /papa/, et qu’elle est plus grande pour /titi/ que pour /kaka/, et cela pour l’ensemble des locuteurs qui ont participé à cette étude. Cette augmentation de l’ouverture glottique coïncide avec l’existence d’un bruit de friction de plus

en plus intense après le relâchement. Globalement, nous observons la même tendance pour /u/ et /i/ par rapport à /a/.

En lien avec ce que j'ai indiqué sur le « speech-ready gesture » (*cf.* partie 3.3), les locuteurs commencent par une inspiration qui se traduit par une longue ouverture de la glotte, elle se referme ensuite complètement juste avant de commencer à produire un son (environ 100 ms) afin d'atteindre une pression sous-glottique suffisante. La fermeture est également presque complète lorsque la phrase commence par une fricative non voisée mais le geste de fermeture ne se termine pas complètement avant qu'un nouveau geste d'ouverture glottique correspondant à la fricative ne commence. A la suite de ces études et aux différentes campagnes d'enregistrement que j'ai menées, je propose les modèles d'ouverture glottique suivants :

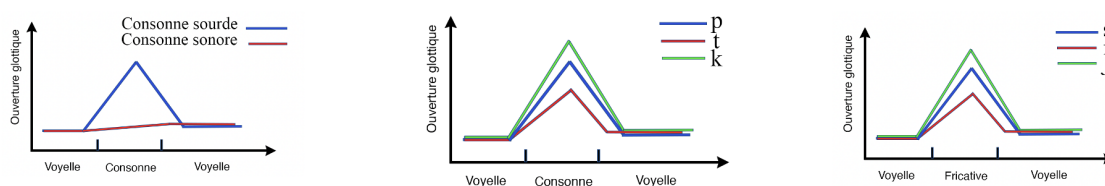


FIGURE 3.27 – Schémas idéalisés d'ouverture glottique selon la consonne, d'après les différentes études faites avec l'ePGG.

### 3.3.3 EGG et FLE

En 2013, nous avons avec Simon Landron étudié la présence de voisement pour les consonnes occlusives /d/ et /b/ produites par des taiwanaises apprenant le français [Landron 2013]. L'article est disponible ([ici](#)).

Il existe un grand nombre d'indices permettant de distinguer un phonème sourd d'un phonème sonore. En français, cet indice est principalement la barre de voisement avant le relâchement de la consonne, permettant de distinguer par exemple /p/ de /b/. Dans d'autres langues, comme le chinois mandarin qui nous a intéressé dans cette étude, l'indice de voisement principal est lié à l'aspiration pour les sourdes /p, t, k/ et à l'absence d'aspiration pour les sonores /b, d, g/. La question de recherche était de savoir si les apprenants taiwanais réalisent la distinction de ces phonèmes comme attendu en français, ou s'ils maintiennent la production typique de leur langue. Six locutrices ont participé à cette étude : trois locutrices ayant le mandarin comme langue maternelle et apprenant le français, et trois locutrices francophones natives. Le corpus est inspiré du corpus AUPELF-UREF [Vaissiere 1998].

Cette étude n'a pas permis de dégager de tendance générale quant à la prononciation du voisement pour les occlusives du français par les apprenantes taiwanaises. Cependant, il est intéressant d'indiquer que pour les locutrices françaises, il y a une tendance nette à voiser sur toute la durée des occlusives voisées.

Pour ce qui est des apprenantes taiwanaises, on observe trois stratégies différentes : une première locutrice qui réalise autant de voisement que les locutrices natives, et deux locutrices qui voisent différemment selon les occlusives, comme le montre la figure ci-dessous.

Il aurait été intéressant de poursuivre cette étude sur un plus grand nombre de locuteurs et sur différents niveaux d'apprentissage du français. Cela aurait permis de savoir si c'est une

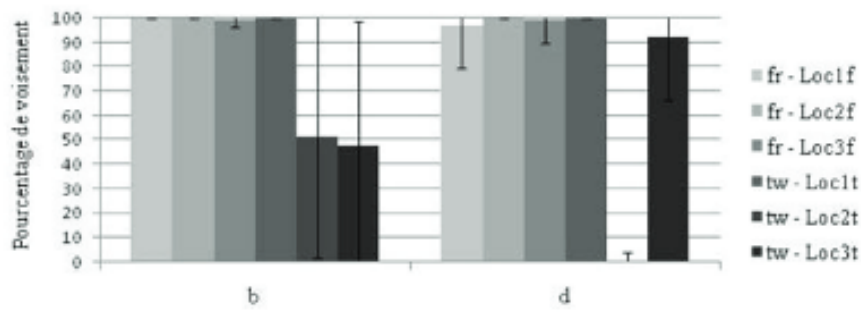


FIGURE 3.28 – Pourcentage de voisement de /b/ et /d/ (moyenne et écart-type) pour trois locutrices françaises (fr) et trois locutrices taiwanaises (tw), d’après [Landron 2013].

stratégie de production qui évolue au fur et à mesure de la pratique de la nouvelle langue, ou si la distinction entre les deux phonèmes est établie avec la distinction d’aspiration et non de voisement, et reste donc suffisante.

De plus, il aurait été pertinent de compléter ces résultats avec des tests de perception, afin d’avoir une vision plus complète des stratégies mises en place par les apprenantes taiwanaises pour maîtriser la distinction entre les occlusives sourdes et sonores du français.

### 3.3.4 Larynx et qualité de voix

En 2015, j’ai travaillé en collaboration avec Scott Moisik, John Esling, Lise Crevier-Buchman et Philippe Halimi sur la constriction épilaryngée dans la voix craquée [Moisik 2015]. L’article est disponible ([ici](#)). Le corpus consistait en la production de la syllabe [iʔ], prononcée à différents rythmes d’élocution. L’ensemble des données a été acquis à l’hôpital sous la direction de Lise Crevier-Buchman et Philippe Halimi.

La position du larynx a été examinée en coupes axiales et sagittales à l’aide de l’IRM. La vidéo laryngoscopique à grande vitesse a été utilisée pour étudier la posture et la dynamique vibratoire.

L’ensemble de ces données confirme que la constriction épilaryngée joue un rôle clé dans la suppression de la vibration des plis vocaux, plus directement par un mécanisme de compactage vertical, par lequel les plis vocaux et les plis ventriculaires entrent en contact, oblitérant le ventricule. L’effet de ce mécanisme est suggéré pour augmenter l’impédance mécanique à la transmission de l’onde muqueuse, ce qui entraîne la perturbation de la vibration observée dans la voix craquée ou facilite l’arrêt vibratoire dans l’arrêt glottal. Un locuteur entraîné à produire la plupart des phonèmes de l’IPA (John Esling avec qui je travaille régulièrement et qui se porte régulièrement volontaire pour beaucoup de mes tests d’instrumentations, notamment l’ePGG) était le sujet de cette étude. Les séquences IRM ont été obtenues pour évaluer les relations géométriques entre les structures laryngées au cours d’états laryngés restreints. Les états examinés étaient la voix modale (pour le contrôle), la voix craquée, l’arrêt glottal et l’arrêt aryépiglottal-épiglottal, tous soutenus pendant 8 secondes (la durée du balayage) avec la langue positionnée pour [i]. L’imagerie a consisté en une imagerie par résonance magnétique axiale et sagittale 2D multicoupe acquise de manière indépendante.

Une seconde session d’enregistrement a été effectuée avec la vidéo laryngoscopique à haute vitesse sur le même locuteur, afin d’évaluer la dynamique des plis vocaux en relation avec la

posture du larynx pendant les états de constriction du larynx.

Les données recueillies nous ont permis de tirer les conclusions suivantes 1. le contact entre les plis vocaux et ventriculaires peut se produire pendant la voix craquée (ce qui confirme des observations antérieures), 2. si l'action épilaryngée diminue à des vitesses de parole plus élevées, la diminution est faible et 3. les données kymographiques suggèrent que la simple adduction médiane ne suffit pas à expliquer la perturbation de la vibration lors de la transition vers l'arrêt vibratoire pour l'arrêt glottique complet. La figure ci-dessous est une bonne illustration de la différence entre la voix modale et craquée (*cf.* figure 3.29).

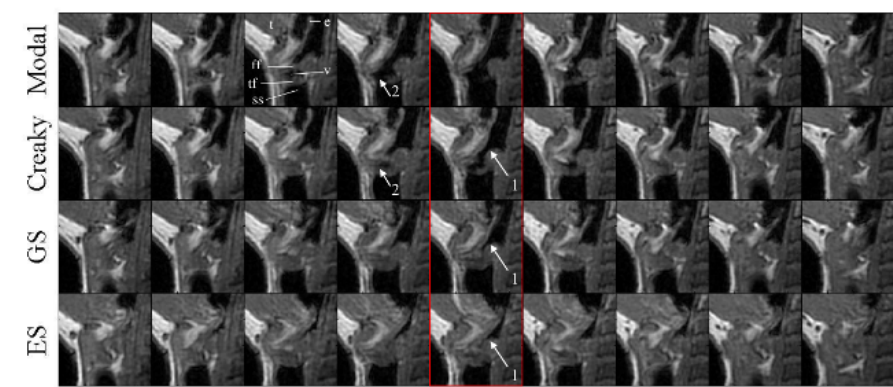


FIGURE 3.29 – Coupes IRM sagittales : voix modale, voix craquée, [ʔ] (GS), et [ɛ] (ES); [i]-contexte. e = épiglote; ff = pli ventriculaire; ss = espace sous-glottique; t = langue; tf = pli vocal (vrai); v = ventricule. Gauche = avant. Encadré rouge = illustration de la position glottique dans les quatre modalités, d'après [Moisik 2015].

## 3.4 Langues rares

Article de référence : Chirkova, Katia, Patricia Basset and Angélique Amelot. 2019. Voiceless nasal sounds in three Tibeto-Burman languages. *Journal of the International Phonetic Association.* , disponible (*ici*), [Chirkova 2019].

J'ai eu l'opportunité d'être contactée par des chercheurs intéressés par la plateforme instrumentale du LPP m'introduisant ainsi dans l'étude des langues rares. Mon rôle est de leur proposer l'instrument le mieux adapté à la question de recherche et de leur fournir l'expertise de l'instrumentation. Je fournis mon aide pour les prises de mesures ainsi que des scripts pour analyser les données acquises, et j'apporte mes connaissances dans l'exploitation des résultats des productions phonétiques. La carte ci-dessous indique la localisation des langues pour lesquelles il m'a été demandé mon expertise phonétique.

La liste comprend des langues tibéto-birman, une langue parlée en Colombie, des langues parlées en Tanzanie et une langue parlée sur l'île d'Ikema au Japon.

### 3.4.1 Langues Tibéto-Birman

En 2015, j'ai été contactée par Katia Chirkova. Cette dernière souhaitait faire une description phonétique (acoustique, aérodynamique et articulatoire) des sons des langues tibéto-birmanes.

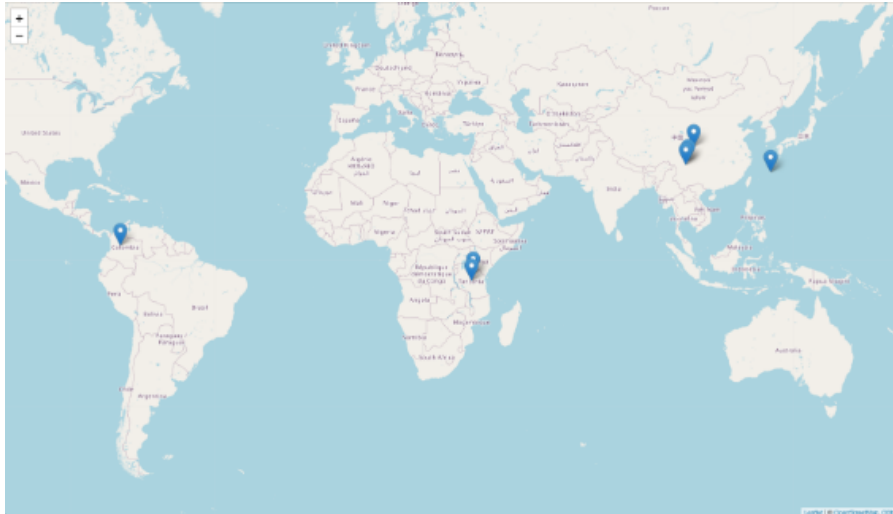


FIGURE 3.30 – Localisation des langues rares sur lesquelles j’ai eu l’opportunité de travailler, carte obtenue à partir de OpenStreetMap, ODbL.

### 3.4.1.1 ersu

Nous avons réfléchi ensemble à la constitution d’un corpus et à plusieurs analyses possibles. Pour la description de l’ersu, nous avons mené une étude palatographique et aérodynamique sur certains mots extrait du corpus complet [Chirkova 2015]. L’esquisse phonétique de cette langue a fait l’objet d’un article disponible ([ici](#)). La langue ersu est parlée par environ 16800 personnes qui résident dans cinq comtés de la province du Sichuan, en République Populaire de Chine. La répartition des phonèmes de la langue est la suivante :

	Bilabial	Labio-dental	Dental	Alveolar	Alveolo-palatal	Retroflex	Vélar
Plosive	p p <sup>h</sup> b		t t <sup>h</sup> d				k k <sup>h</sup> g
Affricate			tʃ tʃ <sup>h</sup> dʒ	tʃ tʃ <sup>h</sup> dʒ	tʃ tʃ <sup>h</sup> dʒ	ʈ ʈ <sup>h</sup> ɖ	
Nasal	m		n				ŋ
Trill						ʀ	
Fricative		f v	s z	ʃ ʒ	ç ʒ		x
Approximant	w				j		
Lateral				l			
Lateral fricative				ɬ			

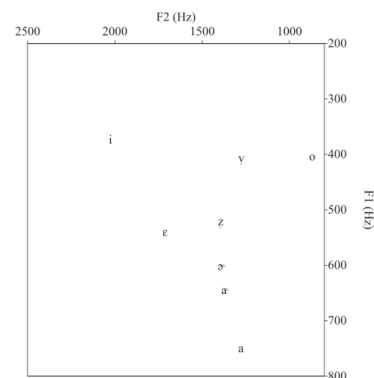


FIGURE 3.31 – Répartition des consonnes et des voyelles de l’ersu, d’après [Chirkova 2015].

Concernant les consonnes, la palatographie statique nous a permis de voir la différence de contact de la langue entre les sons /z̥/, /z̄/ et /z/. comme le montre la figure ci-dessous.

Nous avons ensuite enregistré des paires minimales avec le système  $EVA^{TM}$ , d’un locuteur produisant des clusters pré-nasalisés : /Nb/, /Nph/ et /ŋḍ/. La pré-nasalisation en ersu est contrastive et se produit non seulement devant les occlusives et les affriquées voisées, mais aussi devant les aspirés sourdes. Les occlusives et affriquées pré-nasalisées se trouvent avec tous



FIGURE 3.32 – Palatographie statique pour voir les points de contact des consonnes dans les mots /zɛ/ "sauvage", /zɔ/ "gronder" et /zɔ/ "adoucir", d'après [Chirkova 2015].

les lieux d'articulation. Le lieu d'articulation est toujours homorganique avec l'autre consonne constituant le cluster.

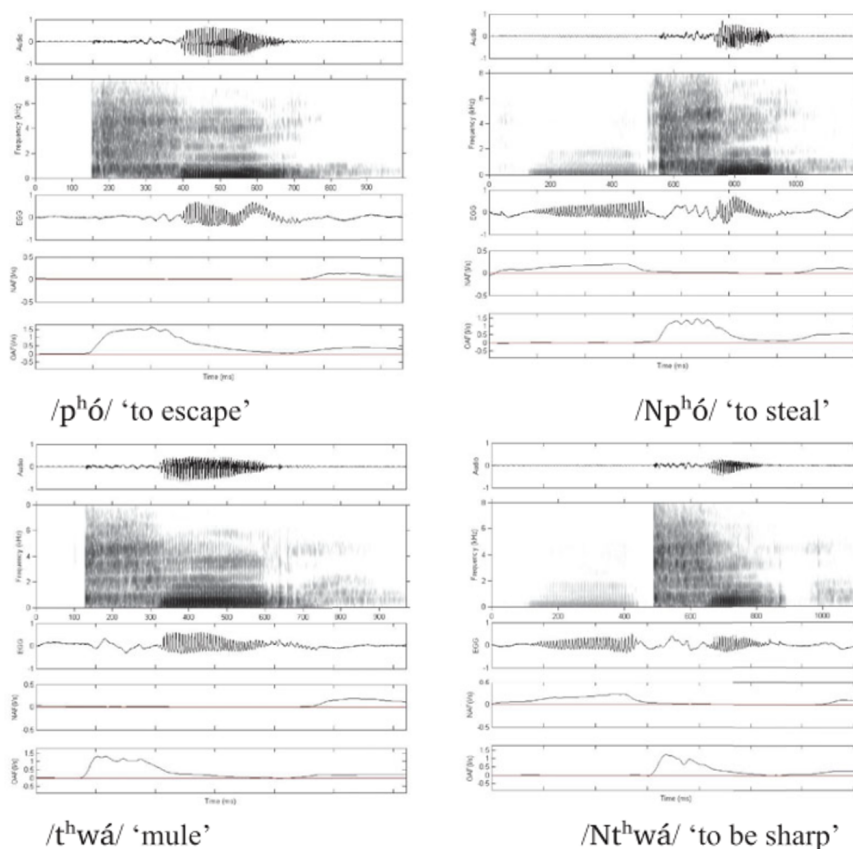


FIGURE 3.33 – Signal acoustique, spectrogrammes, EGG, DAN et DAB pour les paires minimales /pʰɔ/ 's'échapper' vs. /Npʰɔ/ 'voler'; /tʰwá/ 'mule' vs. /Ntʰwá/ 'être tranchant', d'après [Chirkova 2015].

La figure 3.33 montre un arrêt du DAN à la fin de la consonne nasale, c'est particulièrement intéressant de noter que ce genre de production aérodynamique ne se retrouve pas en français où généralement, il y a une forte propagation du DAN après le phonème nasal. Une des hypothèses

est liée à la durée de la portion pré-nasalisée qui est particulièrement longue pour l'ensemble des mots enregistrés en ersu. L'ANR [PhoTon](#) devrait nous permettre prochainement de tester cette hypothèse sur plusieurs paires minimales et plusieurs locuteurs de l'ersu.

### 3.4.1.2 xumi

Dans la continuité de l'étude sur l'ersu, nous nous sommes également intéressées aux consonnes sourdes nasales de la langue xumi [[Chirkova 2019](#)]. L'article est disponible ([ici](#)). J'ai découvert l'existence des consonnes nasales sourdes en étudiant cette langue. Ces consonnes se retrouvent dans environ 5% des langues du monde, selon la base de données UCLA Phonological Segment Inventory Database (UPSID), [[Maddieson 1984](#)]. La description du xumi, présentée dans l'article de 2019, se concentre sur deux types de sons nasals sourds : 1. les nasales aspirées non voisées [ $m̥$ ] et [ $n̥$ ]; et 2. la fricative nasale glottalisée non voisée [ $h̃$ ]. Nous fournissons une description synchronique de ces deux types de sons et explorons leurs similitudes ainsi que leurs différences. Les consonnes nasales sourdes du xumi sont décrites en comparaison avec les consonnes nasales sourdes / $m̥$ / et / $n̥$ / du birman et du tibétain kham. Les nasales sourdes du birman ont été très bien décrites et servent donc de point de référence pour la comparaison ; en revanche, les nasales sourdes du tibétain kham, qui est en contact étroit avec le xumi, représentent un trait régional caractéristique. La description repose sur des mesures acoustiques et aérodynamiques, incluant la durée totale des phonèmes cibles, la durée du voisement pendant les phonèmes cibles ainsi que les débits nasal et oral. Cette étude a porté sur un locuteur du xumi et trois locutrices du birman et trois locuteurs de la langue tibétaine kham.

Cette étude 1. a contribué à une meilleure compréhension des consonnes nasales sourde ; 2. fournit une toute première description acoustique et aérodynamique de la fricative glottalisée nasale non voisée, telle qu'elle est attestée dans un certain nombre de langues tibéto-burmanes du sud-ouest de la Chine ; et 3. suggère une base d'étude phonétique possible pour la variation dialectale et diachronique observée entre les nasales sourdes et [ $h̃$ ] dans certaines langues tibéto-burmanes. Les mots enregistrés sont des paires minimales incluant des consonnes nasales sourdes *vs.* des consonnes nasales sonores. Les locuteurs ont été enregistrés avec le système *EVA<sup>TM</sup>* pour le [DAN](#), [DAB](#) et [EGG](#) dans la salle sourde du [LPP](#) et une seconde fois avec un microphone et l'[EGG](#). Les résultats aérodynamiques montrent une nette différence entre les consonnes nasales sourdes et les consonnes nasales sonores. La figure ci-dessous en est un bon exemple.

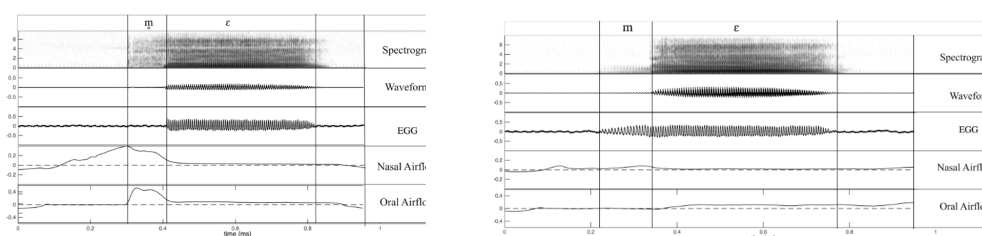


FIGURE 3.34 – Signal acoustique, [EGG](#), [DAN](#) et [DAB](#) pour les mots / $m̥$ ɛ/ (« medecine » et / $m$ ɛ/ (« bamboo ») produit par le locuteur de xumi, d'après [[Chirkova 2019](#)].

Il est incontestable à partir de données [EGG](#) de la figure 3.34 de considérer la consonne / $m̥$ / comme dévoisée. Néanmoins elle n'a pas les caractéristiques attendues en ce qui concerne

le **DAB**, où nous nous attendrions à ne pas avoir une telle quantité d'air passant par la bouche comme on peut le voir pour le /m/ de /mɛ/ qui selon la description articulatoire attendue devrait être produit avec une occlusion labiale totale. Ces données sont extrêmement intéressantes. Contrairement à l'ersu (*cf.* 3.33), le **DAN** montre une légère propagation après la consonne. Visuellement et du point de vue aérodynamique, le phonème /m̃/ semble plus proche du phonème /h̃/ comme on peut le voir sur la figure ci-dessous.

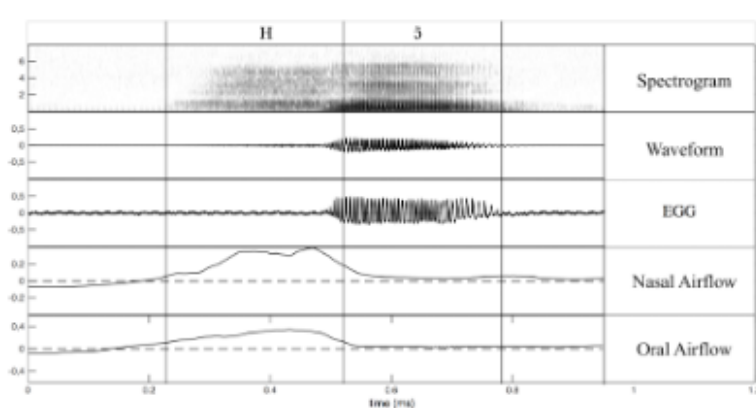


FIGURE 3.35 – Signal acoustique, **EGG**, **DAN** et **DAB** pour le mot /fiõ/ (« légume ») produit par le locuteur de xumi, d'après [Chirkova 2019].

Il est également intéressant de constater que, bien que notées de la même manière, les consonnes nasales sourdes présentent des réalisations complètement différentes selon la langue. Cela suggère que ces consonnes, particulièrement difficiles à produire, posent des défis spécifiques si l'on tient compte de la théorie aérodynamique décrite par Ohala en 1974 [Ohala 1974]. Comme je l'ai également montré dans le Chapitre 2, il est nécessaire qu'une pression suffisante soit maintenue pour que l'air puisse passer par le nez. De plus, l'ouverture du voile du palais favorise le voisement, car elle permet une différence de pression significative entre la partie subglottique et supraglottique. Tous ces mécanismes s'opposent à la production d'une consonne nasale sourde. Enfin, si l'on observe les deux figures ci-dessous, on constate que les stratégies employées diffèrent selon les trois langues étudiées, *cf.* figure 3.37.

Les enregistrements n'avaient pas été faits pour étudier ces phonèmes au départ, il manque donc de consistance pour généraliser sur les descriptions que nous avons faites dans cet article mais les données sont réellement extraordinaires et montrent des phénomènes méconnus sur la production de la nasalité. Katia Chirkova et moi-même ayant obtenu l'ANR **PhoTon**, nous espérons pouvoir étudier plus systématiquement ces phénomènes afin de mieux les appréhender. Je terminerai avec la figure ci-dessous qui va à l'encontre même de tout ce que je pensais sur la production de la nasalité et de la théorie de l'aérodynamique.

Une barre d'explosion est clairement visible sur le signal acoustique, ce qui implique qu'il y a une phase de fermeture durant la consonne, suivie d'un relâchement. Comment peut-on expliquer ce phénomène alors que l'air s'écoule en continu par le nez ?

### 3.4.1.3 baima

Sur le modèle de l'ersu, Katia Chirkova, des collègues et moi-même avons publié une esquisse phonétique du baima [Chirkova 2022]. L'article est disponible ([ici](#)). La langue baima est une

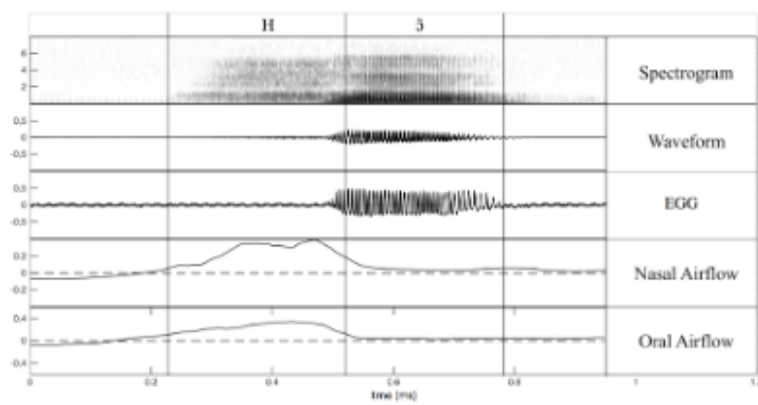


FIGURE 3.36 – Signal acoustique, EGG, DAN et DAB pour le mot /ma/ (« à partir ») produit par un locuteur birman à gauche et signal acoustique, DAN et DAB pour le mot /me// (« grain de beauté ») produit par un locuteur tibétain à droite, et un locuteur du khan à gauche, d’après [Chirkova 2019].

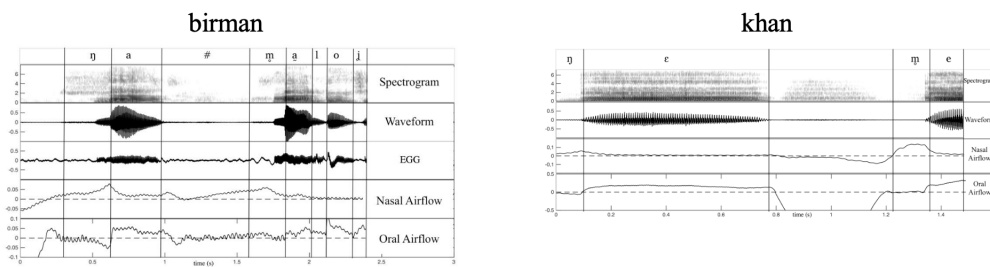


FIGURE 3.37 – Signal acoustique, DAN et DAB pour le mot /na/ (« nez ») produit par un locuteur tibétain, d’après [Chirkova 2019].

langue tibéto-birmane peu étudiée, parlée dans le sud-ouest de la République populaire de Chine, par environ 10000 personnes, qui résident traditionnellement dans trois comtés de la province du Sichuan, Jiuzhaigou et dans un comté de la province du Gansu.

Le baima est une langue particulièrement riche et complexe du point de vue phonologique avec un nombre important de phonèmes. L'inventaire de baima comporte 57 consonnes, listées dans le tableau ci-dessous.

	Bilabial	Alveolar	Postalveolar	Palatal or Alveolo-Palatal	Retroflex	Velar
<b>Plosive</b>	p p <sup>h</sup> b ᵐᵇ ᵐᵇᶜ	t t <sup>h</sup> d ᵐᵈ				k k <sup>h</sup> g ᵑᵑ ᵑᵑᶜ
<b>Affricate</b>		ts ts <sup>h</sup> dz ᵐᵈz ᵐᵈzᶜ	tʃ tʃ <sup>h</sup> dʒ ᵐᵈʒᶜ	tɕ tɕ <sup>h</sup> dʑ ᵐᵈʑᶜ	ʈ ʈ <sup>h</sup> ɖ ᵐᵈɖᶜ	
<b>Nasal</b>	m mᶜ	n nᶜ		ɲ ɲᶜ		ŋ ŋᶜ
<b>Trill</b>		r				
<b>Fricative</b>		s s <sup>h</sup> z	ʃ ʃ <sup>h</sup> ʒ	ɕ ɕ <sup>h</sup> ʑ		x ɣ
<b>Approximant</b>	w			j jᶜ		
<b>Lateral approximant</b>		l lᶜ				

FIGURE 3.38 – Répartition des consonnes du baima, d'après [Chirkova 2022].

Le baima comporte 11 voyelles.

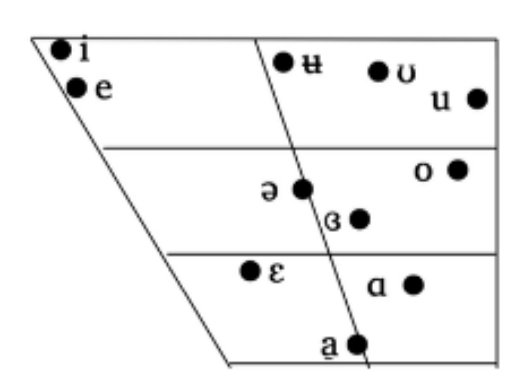


FIGURE 3.39 – Triangle vocalique des voyelles du baima, d'après [Chirkova 2022].

Il existe trois tons contrastifs en baima (high falling, mid et low) et différents types de production vocalique (tense, modal et lax) plus un contraste entre épiglottalisé et non épiglottalisé.

Le tableau ci-dessous illustre les différents types de phonation possibles en Baima.

Syllable onset \ Tone	High falling		Mid	Low
	epiglottalized	non-epiglottalized		
TV		tense	modal	
T <sup>h</sup> V				
DV				
<sup>N</sup> DV	tense or	tense	modal	lax
SV	harsh			

TABLE 3.5 – Type de phonation selon les débuts de syllabe et les tons. T = obstruente non aspirée dévoisée, Th = obstruente non voisée aspirée, D = obstruente voisée (non nasalisée), ND = occlusive pré-nasalise ou affriquée, S = sonorante, V = voyelle, d’après [Chirkova 2022].

Pour étudier cette langue et comprendre comment ses phonèmes sont produits, nous avons effectué plusieurs mesures acoustiques en complément de l’étude qualitative basée sur les spectrogrammes : durée, formants, centre de gravité, Harmonic to Noise Ratio (HNR), Harmonique1-Harmonique2, et fréquence du fondamentale. Cet article descriptif illustre l’intérêt de ces mesures pour caractériser les différences entre des phonèmes peu courants

#### 3.4.1.4 lizu

Pour cette étude publiée en 2023, nous nous sommes intéressées aux corrélats acoustiques de la proéminence en lizu (tibéto-birman) [Chirkova 2023]. Il a été avancé que le lizu possède un système prosodique hybride, combinant le ton lexical sur les mots monosyllabiques et des schémas de proéminence présentant des caractéristiques tonales et de type accentuel sur les mots polysyllabiques, bien qu’aucune preuve empirique n’ait été apportée jusqu’à présent. Notre étude propose une investigation acoustique des schémas de hauteur sur les mots disyllabiques dans la variété Kala du Lizu (high low, high high et low high). En utilisant les paramètres de durée, d’intensité et de fréquence du fondamental, elle vise à identifier différentes formes de proéminence et à explorer leur interaction avec le ton lexical. Les mesures ont été obtenues à partir de données acoustiques recueillies auprès de huit locuteurs de lizu (4 hommes et 4 femmes). Les résultats des analyses statistiques suggèrent que la première syllabe en lizu constitue la position de proéminence dans les trois modèles de tonalité. Nos résultats concordent avec l’interprétation selon laquelle le modèle de hauteur high low se rapproche davantage de l’accent (avec l’intensité comme corrélat acoustique de l’accent), tandis que les modèles de hauteur high high et low high s’apparentent davantage au ton (avec l’accent marqué par la réalisation complète du ton lexical). Cette étude contribue à une meilleure compréhension de l’organisation prosodique du lizu et propose également une méthodologie applicable à l’exploration future d’autres variétés de lizu. Toutes ces études nous ont permis de mutualiser nos efforts et d’envisager la possibilité de renforcer notre collaboration.

### 3.4.2 ikema

Shigeko Shinohara, chercheuse au LPP, m’a demandé si j’étais intéressée pour travailler avec elle sur une langue en danger parlé au Japon. Elle avait acquis des données avec PCquirerX, et avait à sa disposition des données de EGG, DAB et DAN non exploitées. Les analyses, que nous avons menées, ont données lieu à deux articles de conférence [Shinohara 2022] ; [Shinohara 2023], disponibles (ici et ici). La langue ryukyuan de Miyako, l’ikema est parlée sur les îles Miyako du Japon, dans la mer de Chine orientale. Elle appartient à la famille des langues japonaises, au même titre que le japonais. Toutes les langues ryukyuan sont reconnues comme étant en danger par l’UNESCO. Le dialecte Ikema du ryukyuan de Miyako est parlé dans trois régions des îles Miyako : l’île d’Ikema, la région de Sarahama sur l’île d’Irabu et l’île de Nishishu. Elle comporte quatre voyelles et 38 consonnes avec une grande quantité de consonnes géminées, comme indiqué sur les deux figures ci-dessous :

	Front		Back
<b>Close</b>	i	ɪ	u
	(e)		(o)
<b>Open</b>	a		

FIGURE 3.40 – Voyelles de l’ikema, d’après [Shinohara 2023].

	Labial (Labio- velar)		Alveolar		Alveolo- palatal		Palatal		Velar		Glottal	
<b>Voicing</b>	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
<b>Plosive</b>	(p)	b	t	d					k	g		
	pp		tt	dd					kk			
<b>Fricative</b>	f		s	z	ɕ	ʑ	ç					h
	fɸ	vɸ	ss	zz	ɕɕ							
<b>Affricate</b>			ts	dz	tɕ	dʑ						
			tts		tɕ	ddʑ						
<b>Nasal</b>		m		n								
		ɸm	mm	ɸn	nn							
<b>Approximant</b>		(w)						j				
<b>Liquid</b>				r								

FIGURE 3.41 – Consonnes de l’ikema, d’après [Shinohara 2023].

Notre étude porte sur les consonnes nasales dévoisées. Nous avons analysé les enregistrements aérodynamiques et acoustiques de dix locuteurs. Les mesures acoustiques (fréquence fondamentale et Harmonique1\*(corrigé) - Harmonique2\*(corrigé)) visaient à identifier des indices de voisement dans la voyelle suivante.

Nos résultats indiquent que les schémas d’écoulement de l’air des nasales non voisées sont similaires à ceux observés en birman, à l’exception d’un taux de voisement plus élevé durant

la consonne en ikema. Les mesures acoustiques ne révèlent aucun indice d'amélioration de la caractéristique de voisement. Ce résultat pourrait s'expliquer par la durée plus longue du voisement dans les consonnes nasales sourdes.

Par ailleurs, nos résultats sur la durée ne montrent aucune différence significative entre les consonnes géminées voisées et les séquences géminées sourde + sonore, comme illustré dans la figure ci-dessous.

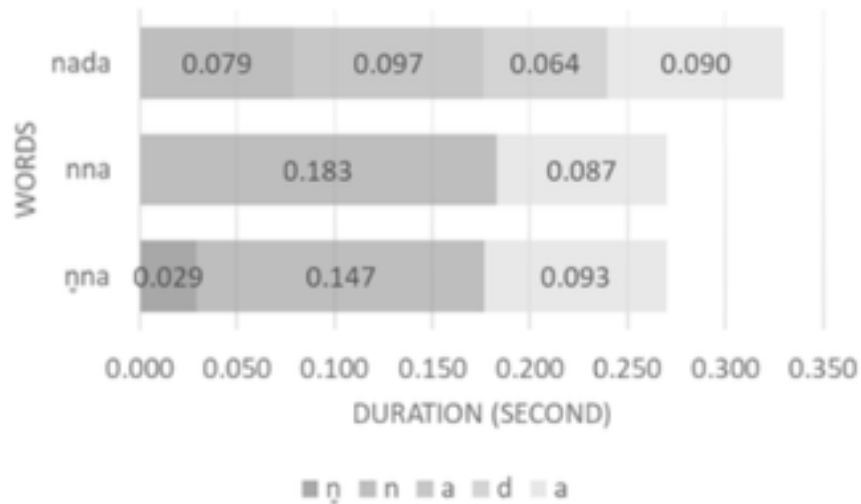


FIGURE 3.42 – Durée des segments consonantiques /n/ dans /nada/ (« larmes »), /nn/ dans /nna/ (« coquille en spirale ») et /ṅn/ dans /ṅna/ (« corde »), d'après [Shinohara 2023].

Les données de l'ikema se distinguent de celles des langues tibéto-birmanes étudiées précédemment, notamment parce que l'ikema présente des consonnes géminées et que la consonne nasale sourde apparaît uniquement en position initiale, suivant une consonne nasale voisée. Comme le montre la figure 3.43, le DAN est très élevé durant la production de la consonne dévoisée, qui apparaît clairement sans vibration sur les signaux aérodynamiques non filtrés. Ensuite, le DAN diminue pendant la production de la consonne nasale sonore, mais comme le DAB reste nul, il s'agit bien d'une consonne nasale. Il est intéressant de noter que, sur la figure ci-dessous, le DAB est nul pour les deux consonnes nasales.

Les courbes de DAB sont similaires entre les géminées sourdes et les géminées sonores ainsi qu'entre les deux lieux d'articulation, indiquant une fermeture complète du conduit vocal.

En revanche, les flux d'air nasaux diffèrent entre les géminées sourdes et les géminées sonores ainsi qu'entre les deux lieux d'articulation. Les nasales sourdes en position initiale présentent une augmentation progressive du flux d'air nasal, sans qu'aucune frication ne soit observée (aucun bruit de frication n'apparaît dans les oscillogrammes ou les spectrogrammes). Le DAN atteint son maximum au milieu de la consonne, puis diminue pendant l'intervalle voisé. Il s'interrompt lorsque le DAB augmente au début de la voyelle, c'est-à-dire que le DAN se termine au moment où le DAB s'élève. La différence est particulièrement marquée par rapport à la figure 3.46, qui représente deux consonnes nasales sonores géminées.

A l'observation des données aérodynamiques, il est possible d'affirmer qu'il existe également en ikema des consonnes nasales sourdes. Il serait intéressant de faire une étude de perception sur l'ensemble des consonnes nasales sourdes des différentes langues que j'ai étudiées.

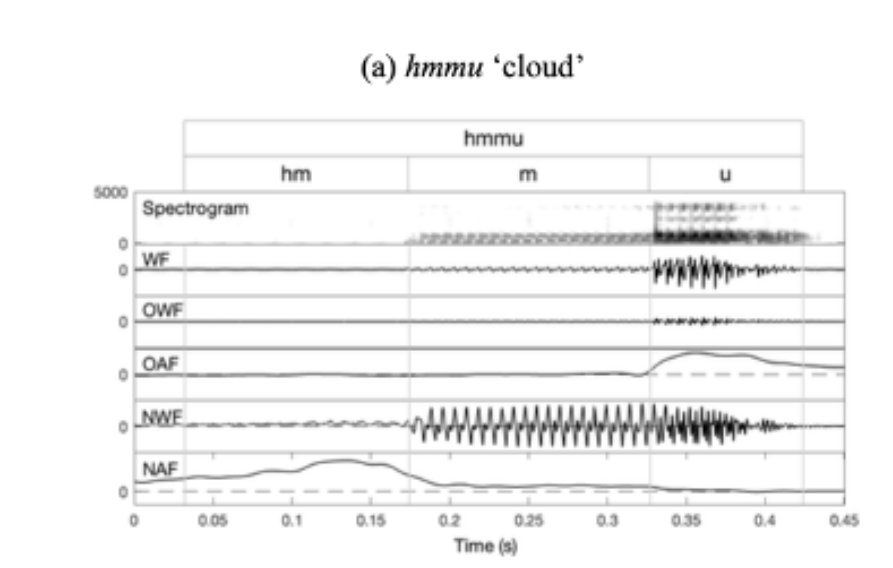


FIGURE 3.43 – Illustration du mot /*hmmu*/ (« nuage ») géminée consonne nasale sourde suivie d’une consonne nasale sonore en ikema produite par le locuteur 4 ; spectrogramme, signal acoustique issu du microphone, signal **DAB** non filtré, signal **DAB** filtré, signal **DAN** non filtré et signal **DAN** filtré, d’après [Shinohara 2023].

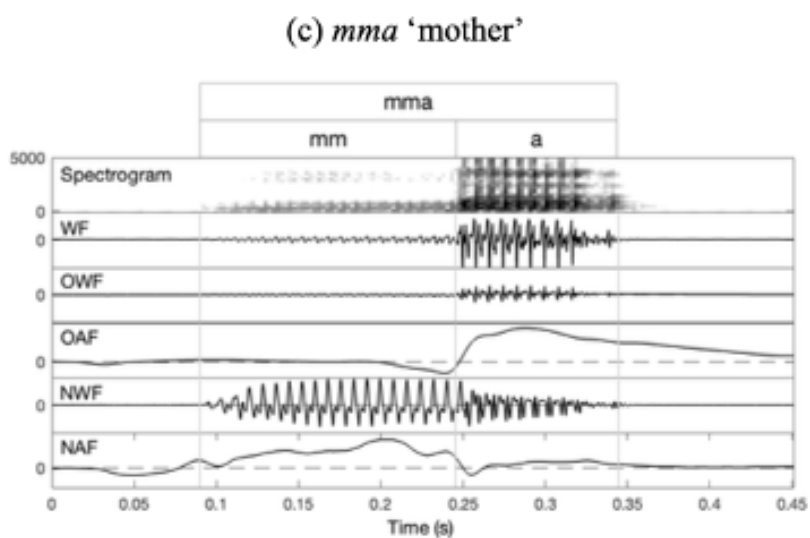


FIGURE 3.44 – Illustration du mot /*mma*/ (« mère ») géminée consonne nasale sonore suivie d’une consonne nasale sonore en ikema produite par le locuteur 4 ; spectrogramme, signal acoustique issu du microphone, signal **DAB** non filtré, signal **DAB** filtré, signal **DAN** non filtré et signal **DAN** filtré, d’après [Shinohara 2023].

### 3.4.3 nasa yuwe

J'ai eu l'opportunité de contribuer à la mise en place d'enregistrements multi-instrumentaux sur une langue rare, le nasa yuwe (également appelé paes), une langue parlée en Colombie. Ces enregistrements ont été réalisés grâce à Didier Demolin et Lise Crevier-Buchman [Demolin 2016]. À la suite de ces enregistrements, j'ai développé un script d'analyse en Matlab, disponible ([ici](#)).

Le système vocalique de cette langue comprend quatre voyelles de base [i, e, a, u], qui peuvent être orales ou nasales (courtes et longues), inspirées, inspirées nasales, glottales ou glottales nasales, ce qui donne un total de 32 voyelles contrastives.

Cette étude a examiné les caractéristiques acoustiques et articulatoires de chaque type de voyelle. Les données ont été obtenues à partir de mesures acoustiques, EGG et fibroscopiques synchronisées (25 images/sec). Le caractère respiratoire apparaît dans la dernière partie de la voyelle et se manifeste par une ouverture légèrement plus large entre les plis vocaux ou une légère ouverture entre les aryténoïdes.

Le caractère glottal des voyelles apparaît également en fin de voyelle. Les données montrent clairement que les voyelles glottales se distinguent des voyelles laryngées. Les observations spectrographiques et EGG révèlent des irrégularités vers la fin des voyelles glottales, suivies d'une fermeture ou d'un rétrécissement au niveau de la glotte ou du tube épilaryngé. Les données fibroscopiques et EGG confirment qu'une fermeture glottale intervient à la fin de ces voyelles, précédant une fermeture des bandes ventriculaires. Un exemple de données acquises et exploitées est visible ci-dessous :

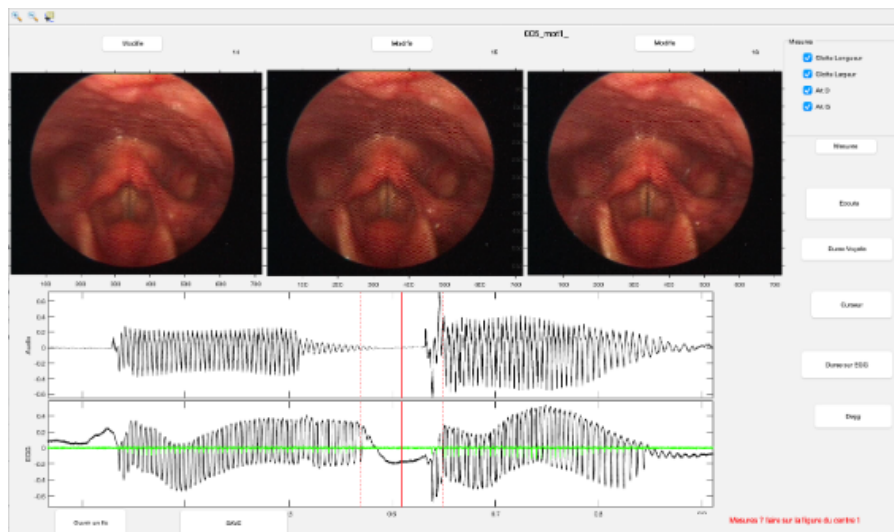


FIGURE 3.45 – Exemple de données en nasa yuwe produites par un locuteur et copie d'écran qui script développé en Matlab pour la synchronisation et l'analyse des données, d'après [Demolin 2016].

### 3.4.4 mbugu et iraqw

Le mbugu et l'iraqw sont deux langues parlées en Tanzanie. J'ai eu l'opportunité de partir en mission de terrain avec Didier Demolin, équipés de l'AeroMask afin d'enregistrer des locuteurs

parlant le mbugu et nous devrions retourner en Tanzanie fin 2025 pour enregistrer des locuteurs de Iraqw avec le même setup. Je parlais plus en détail de ces langues dans le Chapitre 5.

## 3.5 Chant

Cette thématique de recherche a été enclenchée par l'obtention d'un projet européen dans lequel j'ai été associée obtenu sur la période 2013-2017 (Integrated Project (IP) of the European Union's 7th Framework Programme 'ICT for Access to Cultural Resources' FP7-ICT-2011-9-600676-i-Treasures). Le projet Intangible Treasures - Capturing the Intangible Cultural Heritage and Learning the Rare Know-How of Living Human Treasures (*i-Treasures*) dont le porteur scientifique pour le LPP était Lise Crevier-Buchman. Nous avons travaillé en collaboration avec des universités de divers pays : en Grèce, en Belgique, en Italie, en Angleterre, en Turquie et aux Etats-Unis.

Dans le cadre de ce projet, nous considérons que l'expression ne se limite pas à l'architecture, aux monuments ou aux collections d'objets. Elle comprend également les expressions vivantes immatérielles fragiles, impliquant des connaissances et des compétences, comme la musique, la danse, le chant, le théâtre, les compétences humaines et l'artisanat. Ces manifestations de l'intelligence et de la créativité humaines constituent un PCI. Le PCI est à la fois traditionnel, contemporain et vivant. Il ne se réfère pas seulement aux connaissances héritées, mais aussi au renouvellement des expressions culturelles contemporaines. Il renvoie au passé, au présent et, certainement, à l'avenir, et constitue le moteur de la diversité culturelle de l'humanité.

L'objectif principal de *i-Treasures* était de développer une plateforme ouverte et extensible pour donner accès aux ressources du PCI, permettre l'échange de connaissances entre chercheurs et contribuer à la transmission de savoir-faires rares des Trésors Humains Vivants aux apprentis. À cette fin, le projet visait à aller au-delà de la simple numérisation du contenu culturel. Sa principale contribution était la création de nouvelles connaissances en proposant de nouvelles méthodologies et de nouveaux paradigmes technologiques pour l'analyse et la modélisation du PCI. L'un des principaux objectifs de la proposition était le développement d'une méthodologie appropriée basée sur la technologie multisensorielle pour la création d'informations (trésors immatériels) qui n'avaient jamais été analysées ou étudiées auparavant. Dans le cadre du projet *i-Treasures*, la facilité d'utilisation de la plateforme sera démontrée dans quatre études de cas différentes : 1. chansons traditionnelles rares, 2. interactions de danses rares, 3. artisanat traditionnel et 4. composition de musique contemporaine.

Le LPP a beaucoup travaillé sur la plateforme instrumentale qui permet d'acquérir des données Ultrason (US), accéléromètre piezoélectrique, EGG et vidéo des lèvres en simultané. Des enregistrements de chants Corse, Sarde et BeatBox ont pu être acquis, j'ai aidé à l'élaboration de la plateforme d'acquisition et j'ai participé à l'acquisition des chants Corse; le Cantu in Paghjella et du HBB.

Bien qu'il s'agisse d'instrumentation et que j'ai une participation active dans l'élaboration de cette plateforme, je ne l'ai pas intégrée au Chapitre 2, du fait qu'il s'agit d'un travail en collaboration avec plusieurs post-doctorant qui travaillaient pour le LPP ou pour l'Institut Langevin (anciennement École Supérieure de Physique et Chimie Appliquées (ESPCI)), Patrick Chawah, Thibaut Fux pour le LPP. Un système portable basé sur un casque a été développé pour capturer le comportement des organes impliquées dans la production de la parole et du chant. Le système, nommé hyperhelmet est basé sur des méthodes de détection du tractus vocal. Il se compose d'un casque léger contenant un transducteur US pour capturer les mouvements de

la langue, une caméra vidéo pour les lèvres et un microphone serre-tête, couplé à un ensemble de capteurs supplémentaires comprenant un **EGG**, un accéléromètre piézoélectrique fixé sur le nez et une ceinture utilisée comme capteur de respiration (*cf.* figure 3.46)

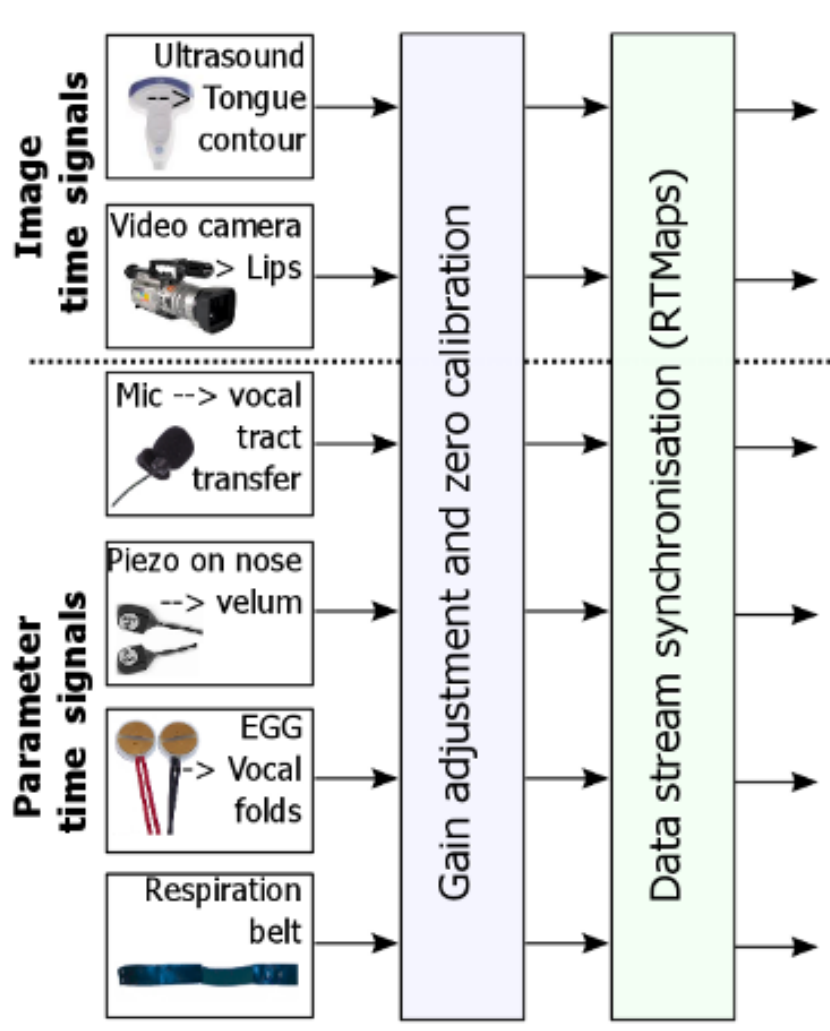


FIGURE 3.46 – Vue d’ensemble du système de capture du tractus vocal pour les rares cas de sous-utilisation du chant. Six capteurs (à gauche) capturent le mouvement de cinq événements physiques : (1) la langue, (2) les lèvres, (3) l’onde acoustique de la parole, (4) la résonance nasale, (5) les cordes vocales et (6) les muscles respiratoires. Chaque instrument est traité (au milieu) et enregistré numériquement (à droite), d’après [Al Kork 2014].

La figure 3.46 représente l’ensemble des capteurs utilisés en simultanément. Le plus gros défi dans ce travail était de réussir à synchroniser des instruments avec des fréquences d’échantillonnage toutes différentes. Le système d’acquisition de données devait être capable d’enregistrer de manière synchrone des données **US** et vidéo à des fréquences d’images suffisamment élevées pour caractériser correctement les mouvements de la langue et des lèvres, ainsi que les signaux acoustiques de la parole, l’**EGG**, l’accéléromètre piézoélectrique et les formes d’ondes respiratoires. Ceci a été rendu possible par l’utilisation d’un langage de programmation spécifique **RTMaps**, qui a permis d’implémenter une horloge interne à l’ordinateur cadencant le déclenchement des

différents instruments et la synchronisation des données. Ainsi, la plateforme d'acquisition de données grâce au logiciel interfacé, i-THRec, a la capacité d'enregistrer et d'afficher des données en temps réel, et les données acquises peuvent être stockées localement ou transférées sur un réseau.

La figure 3.47 présente une capture d'écran de la plateforme. Les images échographiques et vidéos sont transmises à une vitesse de 60 images par seconde, puis stockées au format .bmp ou .jpeg. La taille de l'image pour l'US et la caméra est respectivement de 320 par 240 pixels et de 640 par 480 pixels. L'EGG, le microphone, l'accéléromètre piézoélectrique et la ceinture respiratoire sont reliés à une carte son USB à quatre entrées (AudiBox44VSL) dont la sortie est reliée au système d'acquisition. Ces quatre signaux d'entrée analogiques sont échantillonnés à 44100 Hz avec un encodage 16 bits. Les signaux analogiques échantillonnés sont sauvegardés au format .wav.

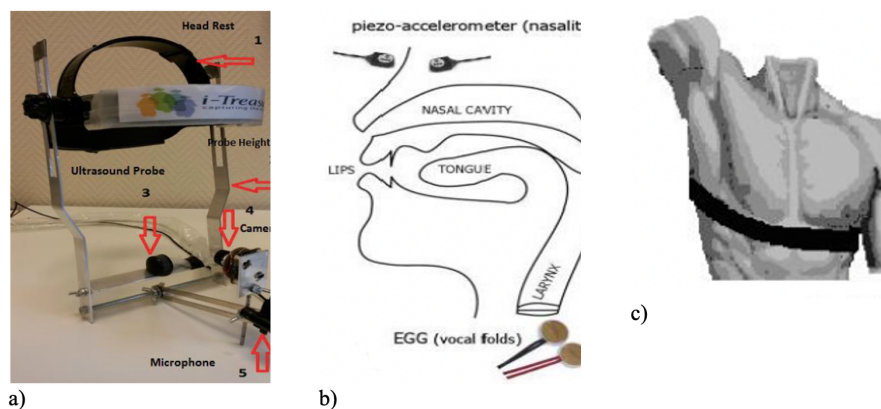


FIGURE 3.47 – a) Casque multi-capteurs : 1) Bandeau réglable, 2) Support de réglage de la hauteur de la sonde, 3) Plate-forme réglable de la sonde US, 4) Caméra labiale avec réglage de la proximité et de l'orientation, 5) Microphone. b) Schéma de l'emplacement des capteurs hors casque : accéléromètre piézoélectrique et l'EGG. c) Schéma de l'emplacement de la ceinture respiratoire, d'après [Al Kork 2014].

L'interface utilisateur développée en RTMaps permet d'avoir un retour visuel sur tous les capteurs au moment de l'acquisition des données, comme le montre la figure 3.49.

Le défi technique pour cette plateforme était de vérifier la synchronisation de tous les instruments. Une fois les synchronisations validées, une première étude pilote a permis d'enregistrer un chanteur de Cantu in Paghjella, un chanteur de Human Beat Box et un chanteur de chant Byzantin.

Un script, i-THAn, interfacé en Matlab permet d'analyser les données acquises. Il fournit un ensemble complet de fonctionnalités permettant de créer des rapports de mesure, des figures, des images et de la documentation. La dernière version de i-THAn comprend des outils qui traitent les signaux vocaux et EGG. Les informations sur la hauteur, le quotient ouvert et le spectrogramme peuvent être calculés et visualisés de manière synchrone avec les signaux, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous :



FIGURE 3.48 – Interface utilisateur d’acquisition de données RTMaps, montrant l’enregistrement et la visualisation simultanés des images ultrasoniques de la langue, de la vidéo des lèvres et des quatre capteurs analogiques, d’après [Al Kork 2014].

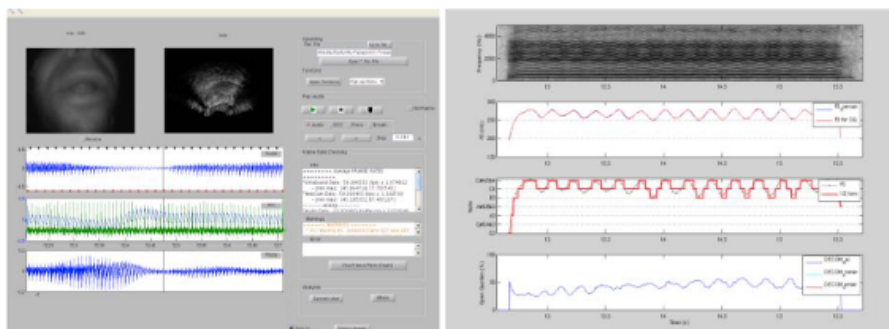


FIGURE 3.49 – (Gauche) Capture d’écran de i-THAn pour l’enregistrement de la voyelle chantée soutenue /i/ d’un Paghjella corse. Les images de la lèvre et de la langue ; de haut en bas : le signal acoustique, la forme d’onde EGG (bleu) et son dérivé (vert), le signal piézoélectrique. (Droite) Figure d’analyse montrant de haut en bas : le spectrogramme à bande étroite, la fréquence fondamentale (F0) de la parole directement sur le signal EGG et la fréquence du fondamentale utilisée pour calculer le OO, la F0 dans une échelle de notes musicales et l’OO, d’après [Crevier-Buchman 2014a].

### 3.5.1 Cantu in Paghjella de Corse

Nous avons fait des études préliminaires sur le Cantu in Paghjella [Crevier-Buchman 2014a] ; [Crevier-Buchman 2015a] ; [Herrgott 2014] ; [Pillot-Loiseau 2016]). L'article de 2014 est disponible (ici) et celui de 2015 (ici).

Le chant polyphonique Cantu in Paghjella de Corse a été inscrit fin 2009 sur la liste du patrimoine culturel immatériel en péril de l'UNESCO. Il s'agit d'un chant masculin interprété a cappella par trois voix distinctes : *seconda*, *bassu* et *terza*. La transmission de ce chant se fait oralement, par contact intergénérationnel et par imitation au sein des communautés locales.

Ce chant est souvent décrit comme très orné (mélismatique), avec une nasalisation marquée des voyelles et, parfois, une constriction glottale, accompagnée d'un usage fréquent d'intervalles réduits (quarts de ton, etc.).

Dans le but d'étudier les différents aspects du Cantu in Paghjella et d'en extraire des informations acoustiques et articulatoires, nous avons procédé à des enregistrements comprenant :

1. des voyelles isolées produites dans des tâches de chant et de parole (/i/, /u/, /e/, /o/, /a/),
2. des voyelles chantées extraites de l'ensemble du chant.

Les voyelles isolées parlées et chantées sont ensuite comparées aux voyelles intégrées dans le texte afin de mieux comprendre les modifications acoustiques spécifiques au chant. À partir du signal acoustique, nous avons étudié l'espace vocalique en utilisant le triangle vocalique et comparé les situations de parole et de chant. De plus, nous avons analysé le signal de l'accéléromètre piézoélectrique afin de comparer l'utilisation des cavités nasales dans le contexte du chant. Le comportement du larynx au niveau glottique a été examiné en calculant le quotient d'ouverture à partir du signal EGG.

Ces études de cas reposent sur l'enregistrement d'un chanteur expert en *Paghjella* corse. Il a d'abord produit une voix parlée et chantée avec les principales voyelles et consonnes corses, puis a interprété deux chants de *Paghjella* (*Alto Mare et O Columba*) dans sa tessiture, la voix *secunda*.

Les résultats ont montré une différence de fréquence du fondamental selon le mode phonatoire, parlé ou chanté. La fréquence fondamentale moyenne était de 128 Hz (écart-type : 34) pour les voyelles parlées et de 259 Hz (écart-type : 17) pour les voyelles chantées. Les mesures formantiques de ces mêmes voyelles concordent avec les résultats de [Sundberg 1987] (cf. figure 3.50 :

1. les fréquences des deuxième et troisième formants des voyelles antérieures chantées n'atteignent pas les valeurs élevées qu'elles présentent dans la parole ;
2. les fréquences du quatrième formant varient beaucoup moins dans le chant que dans la parole ; dans nos données, on observe un regroupement des fréquences des formants F3 et F4 autour de 3000 Hz pendant le chant, en particulier pour les voyelles postérieures ;
3. l'augmentation de F1 entre la parole et le chant, pour chaque voyelle, est attribuable à l'augmentation de F0 et probablement à une ouverture accrue de la mandibule ;
4. la fréquence F2 diminue entre la parole et le chant uniquement pour les voyelles antérieures /i/ et /e/, en raison de « l'assombrissement » et du « recouvrement » de ces voyelles dans le chant. Ce phénomène ne concerne pas /u/ et /o/.

Enfin, la montée de F3 autour de 3000 Hz pourrait contribuer à une énergie acoustique plus élevée.

Ces études sont, à ma connaissance, les premières à utiliser un accéléromètre piézoélectrique pour des tâches de chant. Nous avons utilisé des scripts que j'avais développés pour d'autres

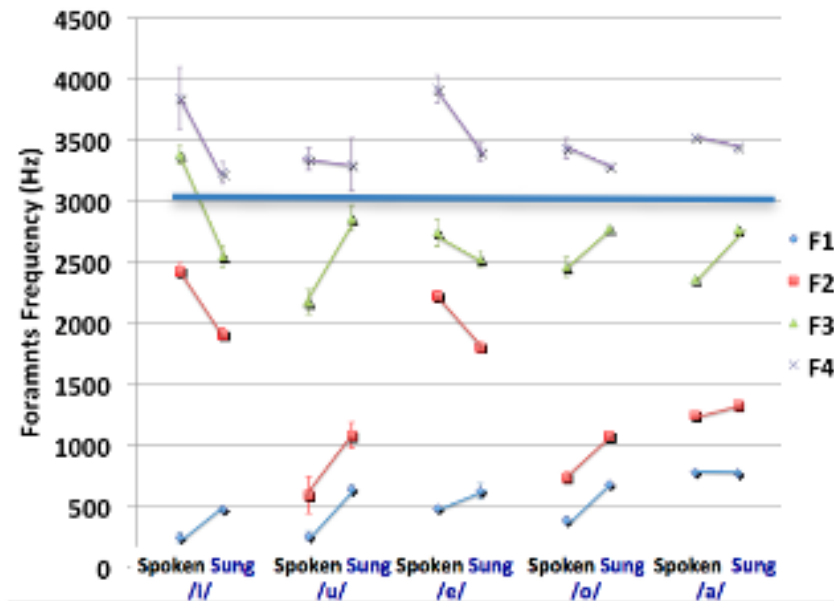


FIGURE 3.50 – Valeur moyenne et écart-type des fréquences des formants (Hz) F1 à F4 pour les voyelles isolées parlées et chantées. La ligne en gras autour de 3000 Hz est située entre F3 et F4, où le formant de chant est attendu, d’après [Crevier-Buchman 2015a].

études (*cf.* Chapitre 2). Les données montrent que le signal de l’accéléromètre augmente de manière significative pendant le chant. Les résultats soulignent l’importance de la cavité nasale dans le chant de la *Paghjella*. Enfin, le mécanisme laryngé a été évalué en calculant le OQ extrait du signal EGG au niveau de la glotte pour chaque voyelle parlée et chantée.

Chez notre chanteur, le OQ pendant le chant est plus faible que celui observé pendant la parole (fréquence du fondamental : 263 Hz, OQ : 0,4 et fréquence du fondamental : 127 Hz, OQ : 0,5 respectivement), ce qui reflète une forte contraction des muscles laryngés. Ce comportement contribue à une meilleure projection acoustique.

### 3.5.2 Human BeatBox (HBB)

La plateforme développée pour i-Treasures nous a également permis de mener des études sur le HBB. Les enregistrements avec le casque ont ensuite été complétées par des mesures fibroscopiques et aérodynamiques [Crevier-Buchman 2021] ; [Crevier-Buchman 2014b] ; [Crevier-Buchman 2015b] ; [Pillot-Loiseau 2020]. Certains de ces articles sont disponibles ([ici](#)), ([ici](#)) et ([ici](#)).

Le HBB consiste en l’imitation vocale et physique d’instruments de musique : vents (trompette, trompette bouchée, saxophone), cordes (guitare électrique, guitare saturée), percussions (cymbales, charleston, grosses caisses, caisses claires), ainsi que de sons électroniques ou électroacoustiques comme le scratching (action de déplacer un disque vinyle sous le diamant de la platine, plus ou moins rapidement, avec la main, d’avant en arrière : l’effet de scratch résulte de la combinaison des mouvements du disque et de ceux du crossfader d’une table de mixage). Cette technique permet de créer une musique polyphonique, mais inclut également l’imitation de mélodies, de sons ou de bruitages sans référents (vocalisation par le nez ou humming, voix

ventriculaire, falsetto). En somme, le **HBB** est une technique vocale à caractère musical, en raison de la nature des sons imités, mais reste liée à la parole, car elle mobilise les mêmes organes impliqués dans la production de la parole pour transformer le timbre vocal en celui d'instruments de musique ou de sons électroniques.

L'objectif des études fibroscopiques menées sur le **HBB** était de fournir des informations sur l'articulation laryngée complexe et les types de phonation, sans qu'aucune pathologie laryngée associée ne soit observée. Ces multiples combinaisons inattendues de postures laryngées peuvent être expliquées par le modèle de l'articulateur laryngé. La description que nous avons faite du **HBB**, à partir d'enregistrements fibroscopiques, acoustiques et aérodynamiques, indique que les « sons graves » marquent le rythme, tandis que l'imitation des instruments et des sons électroniques apporte la musicalité. La production des sons du beatbox implique à la fois l'inhalation et l'exhalation, ainsi que l'utilisation de flux d'air pulmonaire et non pulmonaire. L'utilisation de flux d'air non pulmonaire permet une dissociation partielle entre la production du son et la respiration, avec des flux d'air à la fois égressifs et ingressifs. Les sons de fredonnement sont produits via un flux d'air lingual ingressif (vélaire) ou égressif, ce qui permet au beatboxer de réaliser simultanément plusieurs actions, comme respirer ou produire une ligne mélodique par le nez sans interrompre le son. Le **HBB** incorpore également des sons inhalés qui remplissent au moins deux fonctions : d'une part, ils permettent à l'interprète d'assurer des cycles respiratoires sans interrompre la continuité d'une séquence de battements, et d'autre part, ils permettent de produire des sons impossibles à réaliser par expiration.

Dans l'article de [Pillot-Loiseau 2020], nous avons décrit des sons produits par trois chanteurs de **HBB**. Nos analyses acoustiques comparatives entre les instruments de musique non électroniques (cuivres et percussions) et leur imitation par ces trois chanteurs enregistrés montrent que les stratégies d'attaque, de répartition harmonique, de pentes spectrales ainsi que les formes des oscillogrammes et des spectrogrammes sont analogues dans la plupart des exemples analysés.

Enfin, les données aérodynamiques apportent des informations cruciales sur les mécanismes de production de ces sons.

La figure 3.51 est particulièrement intéressante : le comportement aérodynamique observé durant la production des sons dits « charleston » apporte des informations non visibles dans le signal acoustique et inattendues, car très éloignées des phénomènes propres à la parole. Comment, par exemple, expliquer ce flux d'air régressif visible sur le **DAN**? Les explosions visibles sur le signal acoustique correspondent également à une manifestation d'air régressif, observable sur le **DAB**, ce qui, à l'écoute, ne semblait pas prévisible.

Le **HBB** présente des comportements très différents de ceux observés dans la production sonore de nombreuses langues, comme le français, mais il est tout à fait envisageable que ces sons existent dans d'autres langues. Grâce à ce travail, nous avons pu mieux comprendre les limites physiologiques du conduit vocal dans cette technique située aux frontières du chant (formes articulatoires extrêmes mobilisant de manière indépendante toutes les structures du laryngo-pharynx), la réalisation de plusieurs sons simultanés, et l'importance des « consonnes » dans cette technique.

Malheureusement, faute de temps et de ressources humaines, de nombreuses données acquises, notamment sur le Cantu in Paghjella, n'ont pas encore été exploitées. Les données, enregistrées sur le **HBB**, que ce soit avec la plateforme i-Treasures ou à l'hôpital (données fibroscopiques et aérodynamiques), ont ensuite été analysées par Alexis Dehais-Underdown dans le cadre de son doctorat. Dans le chapitre 5, j'évoquerai l'avenir de ces données, car le **LPP** a eu la chance d'obtenir un contrat post-doctoral financé par l'Université Sorbonne Nouvelle. Louise

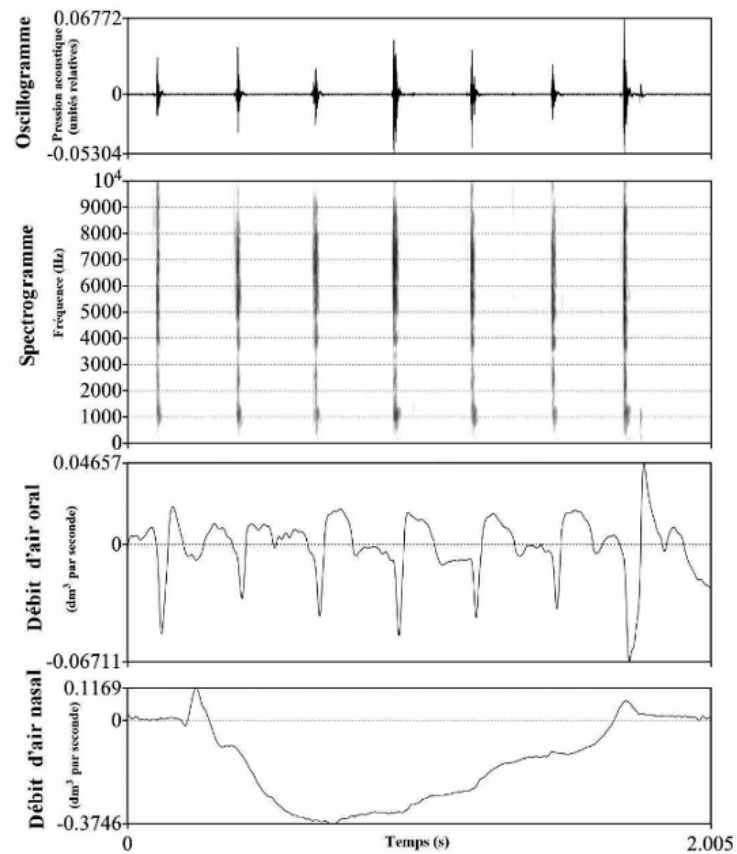


FIGURE 3.51 – De haut en bas : oscillogramme, spectrogramme, débit d'air oral et débit d'air nasal pour sept sons charleston s'apparentant au mécanisme d'un clic, d'après [Pillot-Loiseau 2020].

McKeever a rejoint le laboratoire et reprendra les analyses [US](#), [EGG](#) et celles de l'accéléromètre piézoélectrique sur certains chants.

### 3.6 Henri IV

Ce projet est assez récent. Philippe Charlier (Laboratoire Anthropologie Archéologie Biologie, UFR Simone Veil, UVSQ) et Robin Baudouin (Hôpital Foch), par l'intermédiaire de Stéphane Hans, m'ont contacté pour me demander s'il serait possible de « reconstituer » les paramètres acoustiques d'une maquette statique pouvant s'approcher du conduit vocal d'Henri IV (roi de France de 1589 à 1610) à partir de sa tête momifiée [[Charlier 2014](#)]. Ils se sont inspirés des travaux de [[Howard 2020](#)] et voulaient savoir si leur méthodologie pourrait être appliquée à d'autres têtes momifiées. Nous avons à notre disposition des images issues d'une laryngoscopie directe et des images de scanner. Ce projet est un travail collaboratif avec Robin Baudouin.



FIGURE 3.52 – À Gauche : l'image endoscopique montrant le plan glottique et à droite image obtenue au scanner de la tête momifiée.

La figure 3.52 montre la tête momifiée passée au scanner sur laquelle nous avons travaillé, la première étape a été de vérifier à partir d'une exploration fibroscopique si le larynx était encore en place.

Mon premier travail a consisté à repérer le larynx d'Henri IV sur les images du scanner et à le reconstruire en 3D afin de l'imprimer à l'aide d'une imprimante 3D. Ce travail, assez long et fastidieux, car aucune méthode de détection automatique des contours n'a fonctionné en raison de la qualité des images obtenues, m'a permis d'obtenir le résultat ci-dessous. Les parties en noir sur la figure ci-dessous représentent les zones manquantes que j'ai dû extrapoler.

Ce travail a été publié en 2023, et le larynx reconstruit a été exposé au musée de [Draguignan](#) en 2022 [[Baudouin 2023](#)].

A la suite de ce travail, Robin Baudouin et moi-même nous sommes intéressés aux sinus de Henri IV et nous avons entrepris le même travail de détournement. Les sinus maxillaires m'intéressent particulièrement car je souhaitais connaître leur fréquence de résonance afin de mieux comprendre les mécanismes de résonances liés à la cavité nasale et aux sinus maxillaires.

Nos résultats montrent que la tomographie des sinus paranasaux a révélé des anomalies de forme et de nombre. Henri IV souffrait d'aplasie sinusienne : aucun sinus sphénoïdal gauche ni frontal n'a été trouvé, contrastant nettement avec une pneumatisation remarquable des processus clinoides droits s'étendant sur toute la hauteur du processus ptérygoïdien droit.

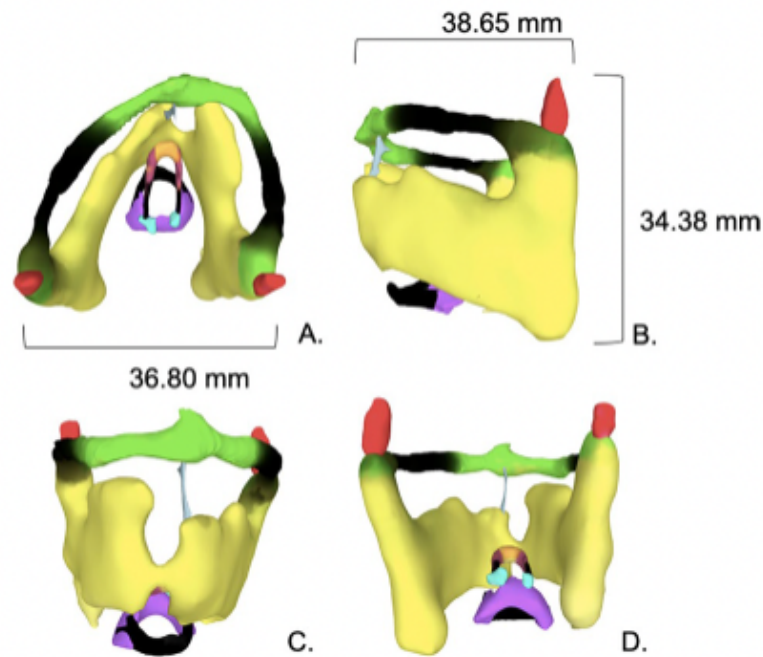


FIGURE 3.53 – Étude et reconstitution du larynx de la tête momifiée d’Henri IV.

Le volume total des cellules mastoïdiennes d’Henri IV a été estimé à 27 et 26 mL respectivement pour les côtés droit et gauche, dépassant largement la moyenne normale et la fourchette supérieure des sujets modernes. Aucun signe de maladie chronique de l’oreille ou des sinus n’a été trouvé. Ce travail a été publié en 2024 [Baudouin 2024].

Quant aux mesures que j’ai effectuées pour calculer les fréquences de résonances des sinus maxillaires, le tableau récapitulant les valeurs est disponible ci-dessous. J’ai joué volontairement sur la taille de l’ostium, que je n’ai pas réussi à identifier sur les images du scanner. Les valeurs en gras sont, selon moi, les plus proches de la réalité.

Il me reste encore à exciter les copies tridimensionnelles de la géométrie des sinus acoustiquement à partir des impressions 3D. Ce qui devrait être fait prochainement. La figure 3.54 montre le résultat final pour le maxillaire gauche.

La tête momifiée est positionnée de manière inadaptée à la phonation standard et des organes essentiels sont manquants. Premièrement, la bouche est grande ouverte avec la mandibule abaissée, et le cou montre une extension significative avec une rotation/torsion vers la droite, probablement due à une inclinaison de la tête vers la droite dans la tombe. Deuxièmement, bien que la base de la langue, le voile du palais et les lèvres ne soient pas complètement disparus, partiellement préservés par le processus d’embaumement, ils apparaissent déshydratés et réduits à de simples restes de tissus rétractés. Des ajustements manuels sont nécessaires pour rétablir une composition anatomique cohérente avec une position standard pour la phonation.

Robin Baudouin a travaillé sur la rotation du crâne, la fermeture de la mandibule, le réalignement des vertèbres et le positionnement de chaque suture et articulation à partir de Fusion 360. La langue et le voile du palais doivent être pris en compte dans un modèle de phonation. Il nous fallait connaître l’espace disponible pour le placement de ces deux structures molles, inextensibles et définies par les structures mandibulo-maxillaires reconstruites. Pour cela, j’ai

Sinus	Volume Sinus ITKSnap (mm <sup>3</sup> )	Volume Meat ITKSnap (mm <sup>3</sup> )	Volume Sinus + Meat (mm <sup>3</sup> )	Diamètre Ostium (mm)	Longueur Ostium (mm)	Fréquence Théorique (Hz)
Sinus Maxillaire Droit	18055,5	1554	19609,5	1,5	1	343
<b>Sinus Maxillaire Droit</b>	<b>18055,5</b>	<b>1554</b>	<b>19609,5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>254</b>
Sinus Maxillaire Droit	18055,5	1554	19609,5	0,5	1	145
Sinus Maxillaire Gauche	17187,9	1554	18741,9	1,5	1	350
<b>Sinus Maxillaire Gauche</b>	<b>17187,9</b>	<b>1554</b>	<b>18741,9</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>259</b>
Sinus Maxillaire Gauche	17187,9	1554	18741,9	0,5	1	148

TABLE 3.6 – Valeurs calculées de la fréquence de résonance des sinus maxillaires droit et gauche de la tête momifiée d’Henri IV.



FIGURE 3.54 – Modélisation du sinus maxillaire gauche avec le méat prêt à être imprimé puis excité acoustiquement.

travaillé sur la craniométrie de la tête momifiée en comparaison avec une base de données en open source. L'idée était de se faire une idée concrète de la taille des structures osseuses d'Henri IV pour pouvoir comparer avec la base de données de locuteurs enregistrés avec l'IRM, (cf. *Chapitre 5*). Cette étape devait permettre de trouver des organes manquants compatibles. La figure ci-dessous présente les différents points de mesure utilisés, en accord avec la littérature existante [Howells 1973] :

- Basion (B) : milieu du bord antérieur du foramen magnum ;
- Bregma (B') : intersection des sutures frontale et sagittale ;
- Circonférence Crânienne (CC) : mesurée à partir de N, se terminant au bord de l'orbite ;
- Nasion (N) : jonction des sutures nasale et frontale ;
- Opisthocranion (Q) : point le plus proéminent de l'occiput ;
- Porion (P) : point le plus élevé sur le foramen auditif externe ;
- Prosthion (M) : point sur la crête alvéolaire entre les incisives centrale ;
- Point Suborbitaire (O) : point le plus bas du rebord orbitaire.

La comparaison avec la base de données de Howell a révélé que les mesures crâniennes d'Henri IV se situaient dans les plages normales, à l'exception de la mesure ZYB (z-score = -5,7), [Howells 1973]. La largeur bizygomatique (ZYB), mesurant la largeur maximale des arches zygomatiques perpendiculairement au plan médian, s'est avérée anormalement faible. Cette observation semble cohérente avec les représentations contemporaines du roi et avec la reconstitution 3D antérieure de son visage, qui mettaient en évidence un nez et un front proéminents.

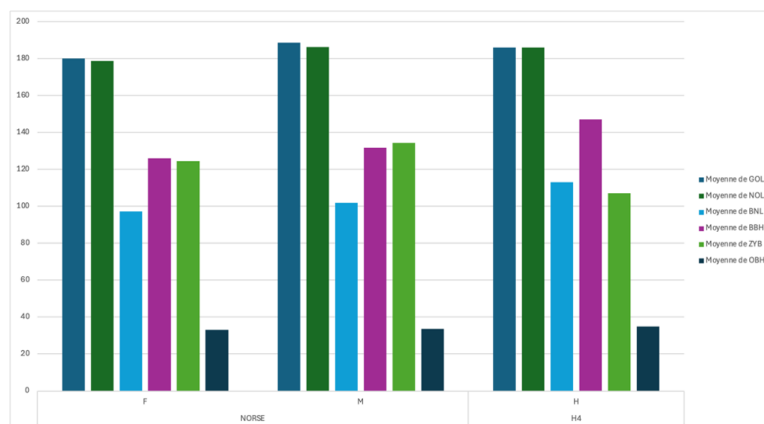


FIGURE 3.55 – Graphique reprenant les mesures et intégrant les valeurs de Henri IV en fonction de la base de données de Howell, 1973 (hommes et femmes séparés).

À partir d'une population de cinq locuteurs masculins ayant participé à l'étude IRM de l'ANR Full3DTalkingHead, nous avons sélectionné un locuteur dont la morphologie se rapprochait le plus des valeurs moyennes, [Howells 1973]. La langue et le voile du palais de ce locuteur ont été segmentés manuellement, remodelés et placés dans le modèle osseux tridimensionnel d'Henri IV. Seul l'alignement précis de ces deux structures anatomiques dans l'espace maxillo-mandibulaire, correctement positionné par rapport à l'os hyoïde, et assurant un espace adéquat pour la langue et le voile du palais dans les régions palatale et rétro-vélaire respectivement, a

été considéré. J'ai ensuite ajouté des dents « standards » sur la mandibule me servant du fichier .obj téléchargeable ([ici](#)). A partir de ces éléments, nous avons reconstruit le conduit vocal qui semblait plausible :

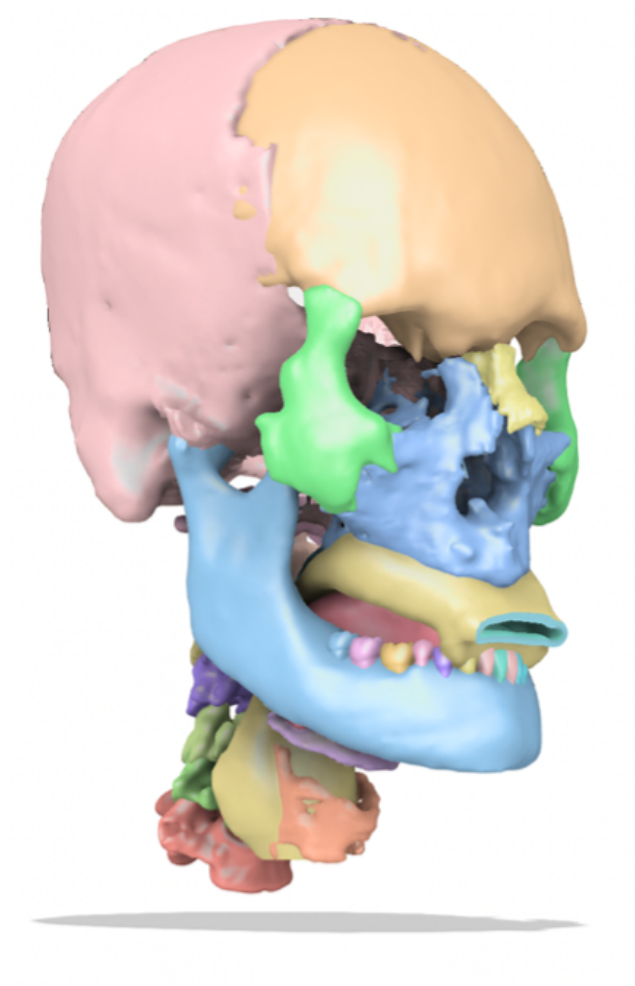


FIGURE 3.56 – Reconstruction de la tête d’Henri IV et modélisation du conduit vocal en jaune sur l’image.

La prochaine étape de ce projet consiste à modéliser acoustiquement un son. Pour ce faire, je travaille en deux étapes : 1. Extraction du conduit vocal en deux dimensions : Je vais utiliser le modèle de Maeda pour extraire le conduit vocal en deux dimensions afin de déterminer les formants de notre reconstruction. Cette étape permettra de vérifier la plausibilité de notre modèle et d’apporter les ajustements nécessaires si besoin. 2. Calcul des zones de renforcements. J’écris actuellement un script qui permettra de calculer l’aire de la cavité à partir des données extraites du modèle de Maeda. Ces informations serviront à déterminer les zones de renforcements, qui sont des régions spécifiques du conduit vocal où les fréquences sonores sont amplifiées. Ce processus permettra de valider notre reconstruction du conduit vocal et de mieux comprendre les mécanismes acoustiques liés à la production de la voix.

Il reste encore des étapes pour ce projet et, au-delà de la « voix » d’Henri IV, ce qui me motive dans ce projet et que je souhaite approfondir, c’est qu’il s’agit d’une méthodologie innovante, développée pour la première fois, afin de formuler des hypothèses sur l’apport de la

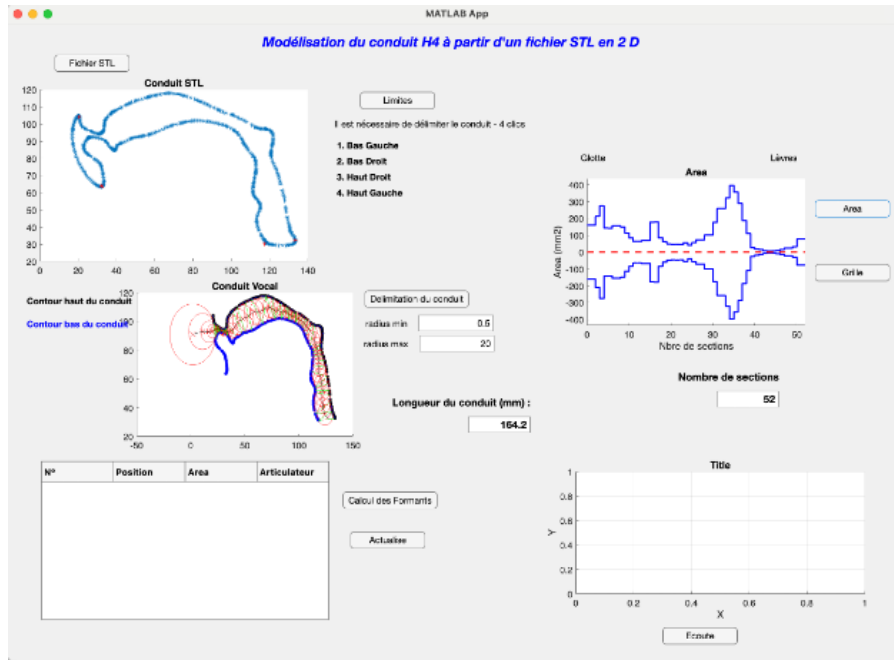


FIGURE 3.57 – Copie d’écran du script Matlab en cours d’achèvement pour la modélisation acoustique du conduit vocal.

modélisation non seulement dans le domaine de l’archéologie, mais également dans le domaine clinique. Jusqu’à présent, les études sur la modélisation du tractus vocal se sont principalement concentrées sur des sujets en bonne santé. Il s’agit d’essais de représentation plutôt que de restitution de l’anatomie vocale. En revanche, l’objectif de la restitution/reconstruction est de se concentrer sur une anatomie altérée ou modifiée. L’anatomie altérée fait référence aux transformations appliquées au fil du temps et aux résultats des techniques possibles de momification des sujets anciens disponibles dans les collections d’anthropologie médicale ou de médecine légale. Restaurer le conduit vocal de figures historiques illustres ou d’humains primitifs dont les restes sont préservés représente un défi fascinant. De plus, cette reconstruction de tels sujets anciens offre un modèle pratique idéal pour développer des méthodologies visant les individus dont l’anatomie a été modifiée par une maladie ou une chirurgie. Comprendre les mécanismes de l’altération et de la réhabilitation de la voix permet non seulement d’avancer dans la recherche sur le tractus vocal, mais aussi d’appliquer ces découvertes à l’archéologie, à la paléopathologie et à la pratique clinique contemporaine.

### 3.7 Une approche collaborative de la recherche

Comme en attestent mes publications, ma pratique de la recherche est éminemment collaborative. Ainsi, sauf rares exceptions mes publications sont toujours cosignées par les coauteurs ayant contribué à des degrés divers au travail présenté. Cela correspond aux pratiques auxquelles j’ai été habitués dès mes premiers pas dans la recherche et qui sont largement partagées dans la communauté francophone et internationale de recherche en phonétique et en sciences de la parole. Par ailleurs, ce travail collaboratif est largement lié à mon poste au CNRS comme personnel d’appui à la recherche. Dans ce document, qui fait une synthèse de mes activités

de recherche, je n'y ai intégré spécifiquement que les aspects pour lesquels j'ai eu une forte implication et contribution.

## Chapitre 4 : Activités transverses

*Depuis 2003, j'assure régulièrement des activités d'enseignement à l'université Sorbonne Nouvelle. J'ai d'abord animé des ateliers d'initiation en phonétique expérimentale pendant mon doctorat, puis j'ai été recrutée comme **ATER** pour enseigner l'informatique de base aux étudiants de licence. Dès 2011, j'ai pu dispenser des cours de méthodologie et de rythme/prononciation en licence et master. À partir de 2015, j'ai également enseigné la théorie de la phonétique, les instrumentations pour la plateforme physiologique, et intervenue dans des séminaires et masters pro. En 2023, j'ai choisi de me consacrer à de nouveaux enseignements au **CNAM**. J'encadre régulièrement des étudiants de master, de mémoire d'orthophonie, ainsi que des stagiaires de différents horizons. J'ai également codirigé trois thèses de doctorat sur des sujets liés à la phonétique expérimentale. Depuis 2023, je suis maître de mémoire en orthophonie. J'ai participé à de nombreux projets financés, notamment en tant que responsable scientifique pour le **LPP** de l'**ANR** Full3DTalkingHead et de l'**ANR** PhoTon. Depuis 2020, je suis élue au Comité national de la recherche scientifique (section 34). Je suis également impliquée dans des comités liés à l'hygiène et la sécurité au travail, et j'ai le rôle d'assistant de prévention pour le **LPP***

### 4.1 Activités d'enseignement

J'ai débuté mes activités d'enseignement durant mon doctorat, en animant des ateliers d'initiation dans le cadre du master (anciennement Diplôme d'Études Approfondies (**DEA**)). J'y enseignais les bases de logiciels utilisés en phonétique, tels que Praat, Winsoori, Unice, et la programmation en Praat (scripts). Ces ateliers se tenaient une semaine avant le début des cours du premier semestre universitaire, et étaient coordonnés par Jacqueline Vaissière. À la fin de mon doctorat (2003-2005), j'ai été recruté pour deux ans comme **ATER** à l'Université Sorbonne Nouvelle (anciennement Paris 3) pour enseigner des modules d'informatique dans le cadre de la licence de Sciences du Langage. Ces modules, appelés "Mineur informatique", étaient obligatoires pour tous les étudiants souhaitant valider leur licence. J'assurais une charge d'enseignement équivalente à un temps plein, répartie sur deux semestres, avec une moyenne de cinquante étudiants par module.

Modules d'enseignement (TP)	Vol. horaire	Descriptif
Word	12h/Semestre	Apprentissage d'un éditeur de texte niveau débutant

Excel	12h/Semestre	Apprentissage d'un tableur niveau débutant
PowerPoint	12h/Semestre	Apprentissage d'un logiciel de présentation niveau débutant
Word avancé	12h/Semestre	Apprentissage d'un éditeur de texte niveau avancé
Excel avancé	12h/Semestre	Apprentissage d'un tableur niveau avancé
Access	12h/Semestre	Apprentissage d'un logiciel de bases de données

TABLE 4.1 – Tableau regroupant les enseignements principaux effectués en tant qu'ATER (2003-2005).

Dès ma prise de poste comme ingénieur d'études à l'université Sorbonne Nouvelle, j'ai eu l'opportunité d'enseigner au niveau licence et master. J'ai commencé en 2011 avec le cours de « Méthodologie et Rédaction de mémoire », dispensé sur une moitié du semestre. J'ai assuré cet enseignement jusqu'en 2023.

Modules d'enseignement (TP)	Vol. horaire	Descriptif
Méthodologie de la rédaction du mémoire	12h/an	Données des outils pour réussir sa recherche, rédiger et présenter son mémoire, syllabus ( <a href="#">ici</a> )
Cours de rythme et de prononciation	12h/Semestre	Apprentissage d'un tableur niveau débutant
PowerPoint	24h/an	Cours pour le <a href="#">DUPALF</a> orienté autour de la prononciation du français et du rythme

TABLE 4.2 – Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2011 et 2014.

A partir de 2015, j'ai augmenté ma charge d'enseignement pour l'[ILPGA](#). En plus du cours de méthodologie j'ai également enseigné les cours indiqués à la table [4.3](#).

Modules d'enseignement	Vol. horaire/an	Descriptif
Théorie de Phonétique	48h (CM)	Cours pour le <a href="#">DUPALF</a> ; enseignement théorique de la phonétique, syllabus ( <a href="#">ici</a> )

Méthodologie de la rédaction du mémoire	12h (TP)	Donner des outils pour réussir sa recherche, rédiger et présenter son mémoire, syllabus ( <a href="#">ici</a> )
Cours d'instrumentations pour la plateforme physiologique	19h30 (TP)	Cours pour les Master 1 et 2 pour apprendre à utiliser la plateforme physiologique du <a href="#">LPP</a> , syllabus ( <a href="#">ici</a> )
Interventions dans le séminaire de phonétique clinique, commencées en 2019	2h (CM)	Cours détaillant les instrumentations utilisées en phonétique clinique
Intervention dans le cadre du Master Pro durant 2 années 2019 et 2021	2h (CM).	Cours expliquant le parcours professionnel des ingénieurs dans le secteur de l'université et de la recherche
Phonétique physiologique et acoustique (2022-2023)	12h (CM)	Cours à destination des étudiants de Master 1 partagé avec Cédric Gendrot lié à la physiologie de la parole, syllabus ( <a href="#">ici</a> )

TABLE 4.3 – Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2015 et 2023.

Depuis 2023, j'ai choisi d'arrêter plusieurs charges d'enseignement à l'université Sorbonne Nouvelle, pour me consacrer à un enseignement dispensé au [CNAM](#) dans le cadre du diplôme d'État d'Audioprothésiste, pour ne pas me surcharger. En 2025, le [DUPALF](#) sera remanié et les enseignements seront répartis différemment. Il s'agit de ma dernière année d'enseignement en ce qui concerne le cours de Théorie de la Phonétique, à destination des étudiants du [FLE](#), tel qu'il est proposé actuellement.

Modules d'enseignement	Vol. horaire/an	Descriptif
Théorie de Phonétique	48h (CM)	Cours pour le <a href="#">DUPALF</a> ; enseignement théorique de la phonétique, syllabus ( <a href="#">ici</a> )
Cours de Linguistique et de Phonétique	36h (CM)	Cours de linguistique et de phonétique dans le cadre de la deuxième année du diplôme d'État d'Audioprothésiste (niveau licence), syllabus ( <a href="#">ici</a> )
Cours d'instrumentations pour la plateforme physiologique	19h30 (TP)	Cours pour les Master 1 et 2 pour apprendre à utiliser la plateforme physiologique du <a href="#">LPP</a> , syllabus ( <a href="#">ici</a> )

TABLE 4.4 – Tableau regroupant les enseignements effectués entre 2023 et 2025.

## 4.2 Encadrement d'étudiants et recrutements

J'encadre régulièrement des étudiants de Master 1 et Master 2, des étudiants en mémoire d'orthophonie, des stagiaires de différentes écoles ou universités, ainsi que des doctorants et des postdoctorants. J'ai également eu l'opportunité de recruter des vacataires et des ingénieurs pour m'assister dans les différents projets ANR auxquels j'ai participé ou que j'ai portés.

### 4.2.1 Master et mémoire d'orthophonie

Depuis 2023, je suis Maître de mémoire en orthophonie, document disponible ([ici](#)).

Dans cette rubrique, j'ai regroupé au même endroit les étudiants de Master et les étudiants en orthophonie listés dans le tableau 4.5.

Etudiant	Année de soutenance	Diplôme	Sujet
Laure Pautel et Priscille Escoffier	2024	Mémoire d'Orthophonie (co-encadrement)	Téléphones portables et mesures acoustiques vocales : une équation fiable?, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Rui Zhang	2023	Master 1	
Sumera Shamsi	2022	Master 1	Perception et production des voyelles orales et nasales du français et d'ourdou par des bilingues Pakistanais, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Marcelo Stoppa	2022	Master 2	Étude phonétique des variétés de portugais brésilien
Song Ying	2020	Master 2	Les voyelles nasales en français produites et perçues par les apprenants chinois
Song Ying	2019	Master 1	Recherche d'articulation des voyelles nasales en français par les apprenants chinois, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )

Amélie Elmerich	2019	Master 2 (co-encadrement)	Évolution de la nasalité dans un contexte de polypose naso-sinusienne : évaluation multiparamétrique articulatoire, aérodynamique, acoustique et perceptive, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Yue Zhang	2019	Master 2 (co-encadrement)	La production et la perception des occlusives françaises par les apprenants chinois du FLE avec/sans expériences phonétique, Shanghaiens ou non-Shanghaiens, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Bénédicte Mas et Mathilde Giron	2017	Mémoire d'Orthophonie (co-encadrement)	Évaluation de la qualité vocale avant et après chirurgie Naso-Sinusienne, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Ruolan Wang	2017	Master 1 (co-encadrement)	La perception catégorielle du voisement des occlusives françaises par des apprenants du mandarin
Asma Souissi	2014	Master 1	La réalisation des voyelles nasales du français /ã/ et /õ/ par les Tunisiens
Alice Juigner	2011	Mémoire d'Orthophonie (co-encadrement)	Effet de l'anesthésie locale intra-nasale sur les caractéristiques acoustiques de la voix et des phonèmes, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Altijana Brkan	2009	Master 2 (co-encadrement)	Étude aérodynamique de la nasalité contextuelle en français standard et en bosniaque, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
Véronique Stoeckling	2009	Mémoire d'Orthophonie (co-encadrement)	Mesures d'intensité comparées entre Praat et un Sonomètre, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )

Aline Patricia De Santiago Gonçalves	2008	Master 2 (co-encadrement)	Étude comparative de la nasalité contextuelle en Portugais du Brésil et en français, résumé disponible ( <a href="#">ici</a> )
--------------------------------------	------	---------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

TABLE 4.5 – Tableau récapitulant l’ensemble des étudiants de Master que j’ai encadrés ou co-encadrés.

## 4.2.2 Stagiaires

Le LPP accueille régulièrement des stagiaires qui viennent d’horizon divers comme des écoles d’ingénieurs, d’école d’orthophonie ou encore de l’université Paris Saclay.

Stagiaire	Année	Sujet de stage	Ecole
David Jacquinot	2024	Travail sur le Design du masque AeroMAsk	Ecole Condé, Paris
Ouneys Makda et Matthieu Brion	2023	Utilisation d’une carte Arduino pour l’acquisition de données aérodynamiques	ESME, Paris
Augustin Esnoux	2023	Modélisation géométrique des conduit vocaux pour la production des voyelles	ESILV, Paris
Christian Kozac, Gillian Guenier, Aliraza Khan, Mohamed Moustapha	2022	Script Python pour l’acquisition de données aérodynamiques	Informatique Sup’ Galilée, Paris 13
Laure Pautel	2022	Travail sur les données enregistrées avec des téléphones portables	École d’orthophonie, Paris
Florian Belhasen Dubois	2022	Travail sur un script Matlab pour enregistrer des données aérodynamiques	RInformatique Sup’ Galilée, Paris 13
Manon Dalmet	2021	Travail sur les données issues d’un Nasometer	École d’orthophonie, Paris
Théo Bompas	2020	Travail sur les données issues d’un Nasometer	École d’orthophonie, Paris
Carla Turc	2020	Utilisation de k-Wave dans la modélisation 3D	Telecom Sud, Paris
Célia Afiri	2019	Mesures de F0 sur des données d’ePGG	Université Paris Sud

Darshan Sa- thiyanarayanan	2017	Estimation de la résistance laryngée et étude de l'ePGG	Université Paris Sud
Cong Wang	2015	MMise en place d'un site web pour archiver des don- nées de parole	

TABLE 4.6 – Tableau récapitulatif des stagiaires que j'ai encadrés depuis 2015.

### 4.2.3 Doctorants

Je pense avoir apporté une contribution significative aux travaux de recherche de plusieurs doctorants du LPP. J'ai évoqué les travaux de plusieurs d'entre eux dans les chapitres précédents. Je voudrais ici mentionner les doctorants dont j'ai codirigé le travail. En dehors des thèses en codirection, j'ai participé à deux autres thèses en tant que membre du jury : la thèse de David Bustamente-Arango et celle de Rita Demasi.

#### 4.2.3.1 Travail de doctorat d'Ahmad Nawafleh

J'ai codirigé la thèse d'Ahmad Nawafleh avec Jacqueline Vaissière. Il a soutenu son travail intitulé « Difficulté de prononciation et de perception de voyelles du français par des apprenants jordaniens » en 2012. Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'application des connaissances acquises grâce à des expériences de phonétique expérimentale à l'enseignement de la prononciation des voyelles dans le cadre du FLE. Les formants des voyelles orales du français et de l'arabe prononcées par des locuteurs natifs indiquent que /i : a : u :/ de l'arabe diffèrent phonétiquement des /i a u/ du français, en particulier /i : u :/ qui se rapprochent plutôt de /e o/ du français.

L'étude acoustique des voyelles du français montre que la voyelle /u/ perd son identité lorsqu'elle est réalisée par des apprenants jordaniens : les formants de /u/ réalisés par des débutants sont proches de /ø/, et ceux de niveau avancé sont proches de /o/. Les études perceptives confirment que /u/ est confondue avec /o et ø/ et indiquent que les apprenants réalisent seulement un timbre des paires [e - ε], [ø- œ] et [o - ɔ], et qu'ils réussissent à reproduire et à identifier /y ø/ pourtant absentes de leur système phonologique. En revanche, les voyelles nasales représentent, pour eux, une grosse difficulté. Ils les confondent entre elles et avec les voyelles orales.

L'étude aérodynamique des voyelles /ã ã ã/ des apprenants jordaniens montre qu'ils synchronisent différemment l'arrivée du débit d'air nasal et qu'ils répartissent différemment sa quantité sur les voyelles par rapport aux locuteurs natifs. La mesure des formants dans la partie orale, au début, des voyelles nasales montre que les apprenants ne possèdent pas les mêmes cibles articulatoires pour /ã ã ã/ que les locuteurs natifs.

La thèse s'achève par une réflexion portant sur des stratégies de correction phonétique, ainsi que des propositions matérielles et techniques d'entraînement à la prononciation.

#### 4.2.3.2 Travail de doctorat d'Altijana Brkan

J'ai codirigé la thèse d'Altijana Brkan avec Jacqueline Vaissière. Elle a soutenu son doctorat en 2018, intitulé « Étude comparative des phénomènes de coarticulation nasale en anglais

américain, bosniaque, français, norvégien et ourdou ». Ce travail concernait la comparaison des stratégies de coarticulation nasale sur les voyelles dans deux langues possédant des voyelles nasales phonologiques (français et ourdou) et trois langues ne possédant pas de voyelles nasales phonologiques (l'anglais américain, le bosniaque et le norvégien).

Pour évaluer le degré de nasalité produit, l'étudiante a utilisé un accéléromètre piézoélectrique, une méthode non invasive et transportable. Cinq locuteurs natifs par langue ont enregistré un corpus de logatomes (CVNC) et un ensemble de mots et de phrases. Ce travail a montré : 1. une différence interlangues de stratégies existe, confirmant ainsi un fait déjà connu, 2. l'existence d'un contraste phonologique entre voyelles nasales et voyelles orales n'a pas d'influence prévisible sur la propagation de la nasalité, confirmant ainsi un fait déjà connu, 3. un modèle d'anticipation de nasalité peut être plus adéquat pour une langue que pour une autre, 4. les auditeurs francophones ne distinguent pas entre plusieurs degrés de nasalisation contextuelle, mais il existe une corrélation entre la quantité de vibrations issue de l'accéléromètre piézoélectrique et la perception du degré de nasalisation pour les auditeurs de l'ourdou.

L'intérêt de cette étude était que la comparaison de phénomènes de coarticulation nasale des différentes voyelles dans les cinq langues a été faite avec la même instrumentation et dans les mêmes conditions. Un autre intérêt était de montrer l'utilité de la méthode choisie et de valider l'instrument et le protocole de mesures mis en place.

#### 4.2.3.3 Travail de doctorat d'Amélie Elmerich

J'ai codirigé la thèse d'Amélie Elmerich avec Lise Crevier-Buchman. Elle a soutenu son doctorat en 2024, intitulé « Évaluation multiparamétrique de la nasalité : Conception et utilisation d'un masque aérodynamique appliquée à une population témoin et pathologique : l'AeroMask.

Ce travail s'intéressait à l'évaluation multiparamétrique de la nasalité à travers quatre axes : aérodynamique, acoustique, volumétrique et perceptif. Il a été l'occasion de tester l'instrument d'acquisition aérodynamique développé au LPP : l'AeroMask (masque en fibre de papier), décrit au chapitre 2 de ce document. Ce système d'acquisition permet de pallier certains inconvénients des outils d'acquisition aérodynamiques actuels.

L'objectif principal était de contribuer à la compréhension de la perturbation de la nasalité dans le cadre de la polypose naso-sinusienne et de sa chirurgie. La population était composée de quatre patients atteints de polypose naso-sinusienne, enregistrés avant et après chirurgie, et les résultats ont été comparés avec ceux d'une population de huit locuteurs sains. Le corpus comprenait des logatomes de type VCV.

Outre la variabilité individuelle, les résultats montrent que la population pathologique reste proche des locuteurs sains pour les études aérodynamique, acoustique et perceptive. En effet, les patrons aérodynamiques, les moyennes de DAN et de DAB des patients sont similaires à ceux des locuteurs sains. Pour l'étude acoustique, la différence de durée entre voyelles orales et nasales se maintient en pré- et post-opératoire, et les moyennes de spectre moyen oral et nasal des patients sont proches de celles des locuteurs sains. L'étude volumétrique a montré une augmentation du volume naso-sinusien après chirurgie, se rapprochant de celui des témoins.

Enfin, l'étude perceptive a montré que la voix et la parole ne sont pas un handicap pour le patient, et que la qualité vocale des patients n'est pas perçue comme altérée. La relation entre les différentes mesures s'avère complexe, l'étudiante n'ayant pas pu relever de liens tangibles en raison de la forte variabilité individuelle. Néanmoins, les résultats de ce travail sont novateurs en montrant l'efficacité de l'AeroMask pour l'étude de la nasalité.

Pour une description plus détaillée de ce travail, (*cf.* Chapitre 3 ; Polypose naso-sinusienne).

#### 4.2.4 Post-Doctorants

Depuis l'obtention de l'ANR PhoTon (voir partie 4.3 de ce chapitre et [\(ici\)](#)), j'ai recruté une post-doctorante et aidé une étudiante a monté un projet de recherche qui a été sélectionné et financé par l'université Sorbonne Nouvelle.

Amélie Elmerich a été recrutée par et pour cette ANR au LPP depuis août 2024. Elle a en charge l'analyse phonétique des langues qui seront acquises durant différentes campagnes d'enregistrements en Chine. À ce jour, elle travaille sur les données de la langue Ersu, et a en charge une analyse acoustique sur trois des tons de cette langue, pour lesquels elle doit comparer les valeurs des formants, de  $f_0$  et des harmoniques, afin de voir s'il existe une corrélation entre les différents tons et la qualité de voix, comme cela a été montré pour d'autres langues. Depuis septembre 2024, elle a également pris en charge les enregistrements qui ont été effectués dans la province du Sichuan durant la période estivale.

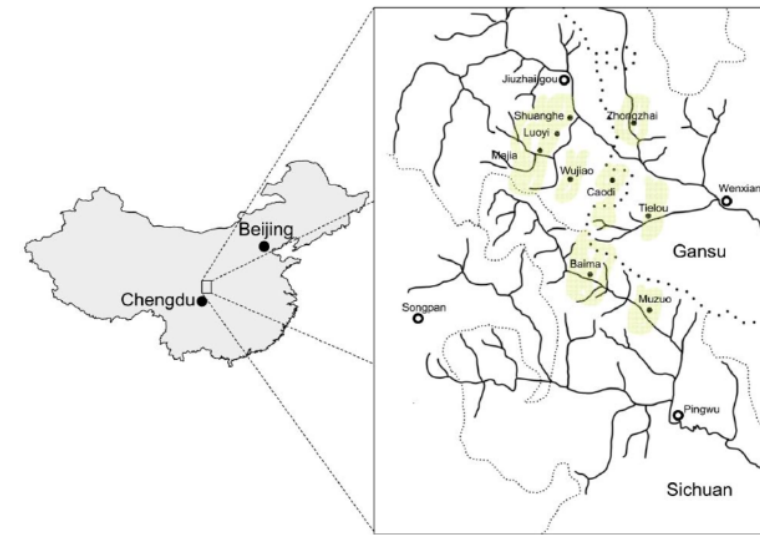


FIGURE 4.1 – Localisation sur la carte des enregistrements effectués en juillet 2024 ainsi que la répartition des langues acquises.

Amélie Elmerich a mené une première analyse sur les données du Baima, pour quatre locuteurs pour lesquels, elle a mesuré le OQ des plis vocaux. Les mesures du OQ sont obtenues à partir des données de l'EKG et montrent une bonne adéquation entre la différence de tons et l'ouverture des plis vocaux chez les hommes et méritent d'être approfondis.

Ces analyses préliminaires ont fait l'objet d'une présentation à un colloque à Nankai le 26 octobre 2024 [[Chirkova 2024](#)], le résumé est disponible [\(ici\)](#).

La seconde post-doctorante, Louise McKeever, a bénéficié d'une bourse de l'université Sorbonne Nouvelle pour un contrat postdoctoral de deux ans, à compter du 1er octobre 2024. L'objectif principal de ce projet est de recueillir et d'analyser des données linguistiques, laryngées et labiales complètes provenant de chanteurs et de personnes atteintes de pathologies vocales. Ce protocole permettra de développer un modèle prédictif comprenant trois états : la réalisation maximale dans le chant (tâche 1), la réalisation minimale dans la parole altérée (tâche 3) et une réalisation standardisée représentant le modèle attendu (tâche 2). Le dossier complet est disponible [\(ici\)](#).

Langues	Variétés enregistrées	Nombre de locuteurs enregistrés en 2024	Instuments
Qiang	Mawo	12	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistreur audio
	Zhimulin	11	<input checked="" type="checkbox"/> un électroglottographe
	Xiaoxing	10	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistrement vidéo
	Yonghe	-	<input checked="" type="checkbox"/> un microphone externe
	Longxi	-	-
Tibétique	Baima	9	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistreur audio
	Zhongu	1	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistrement vidéo
	Kun sngon	-	<input checked="" type="checkbox"/> un microphone externe
	Chos-rje	-	-

FIGURE 4.2 – Nombre de locuteurs et instruments utilisés pour les langues enregistrées en 2024 (1ère mission de terrain) et à enregistrer.

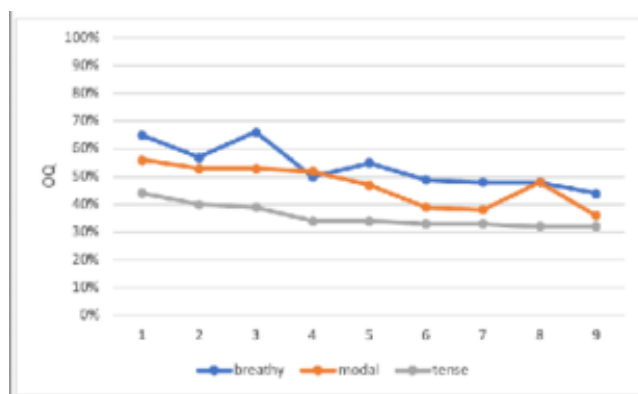


FIGURE 4.3 – Différence de OQ (en pourcentage) chez les locuteurs masculins pour les mots /nô/ ‘inside’ – /nō/ ‘sky’ – /nò/ ‘exist’.

## 4.3 Projets financés

### 4.3.1 Participation à des projets financés

J'ai participé à plusieurs projets financés, en tant qu'ingénieur pour le LPP en apportant mon expertise sur l'instrumentation en phonétique et rédiger des scripts pour aider à l'analyse des données :

Acronyme et Dates	Résumé	Responsable	Type de projet
<a href="#">ARTSPEECH</a> (2016 - 2020)	Synthèse Articulaire Phonétique	Didier Demolin	<a href="#">ANR</a> - Interactions humain-machine, objets connectés, contenus numériques, données massives et connaissance 2015
<a href="#">Labex Empical Foundations of Linguistics</a> (2011 - 2024)	Le LPP est membre du laboratoire d'excellence Empirical Foundations of Linguistics ( <a href="#">EFL</a> )	Jacqueline Vaisière fut l'investigateur principale et a longtemps été directrice du Labex-EFL	Investissement d'avenir Labex
<a href="#">Projet Gueules cassées</a> (2017 - 2018)	Evaluation des modifications de la voix dans les traumatismes chirurgicaux nano-sinusiens	Lise Crevier-Buchman	Union des Blessés de la Face et de la Tête / Fondation des « Gueules Cassées »
<a href="#">i-TREASURE</a> (2013 - 2017)	Intangible Treasures – Capturing the Intangible Cultural Heritage and Learning the Rare Know-How of Living Human Treasures	Lise Crevier-Buchman	Projet européen FP7 2011
<a href="#">REPER</a> (2013 - 2017)	Le phonème /R/ du français standard est caractérisé par une grande variabilité	Cédric Gendrot	<a href="#">ANR</a> - Jeune Chercheur 13

ESAPVI (2010 - 2012)	Etablissement d'une Plate-forme pour l'Analyse de la Parole avec Visualisation et Instrumentation	Kiyoshi Honda	Chaire d'excellence senior
IUF Acoustic, perceptual and physiological aspects of speech (2010 - 2015)	Tools, theoretical considerations and applications	Jacqueline Vaisière	IUF Sénior
REVOIX (2009 - 2012)	Restitution de la Voix d'Origine pour Handicapés de la Parole	Lise Crevier-Buchman	ANR - Blanc 09
Les cavités nasales et les sinus dans la parole (2020 - 2023)	La compréhension du rôle des cavités nasales et des sinus dans la parole : un apport majeur pour la nasalité	Amélie Elmerich	Projet Innovant de la Sorbonne Nouvelle

TABLE 4.7 – Tableau récapitulant les projets financés auxquels j'ai participé.

## 4.3.2 Porteur de projets financés

### 4.3.2.1 Labex-EFL

Entre 2015 et 2018, j'ai été responsable scientifique de l'opération LR-3.5 "Acoustic and physiological data for multi-sensor investigation of normal speech" dans l'axe 6 "Language Resources" du [Labex-EFL](#). J'ai géré un budget annuel d'environ 15 000 €, ce qui m'a permis de recruter un ingénieur à mi-temps, Rémi Guisse, pour travailler sur l'[ePGG](#).

Entre 2021 et 2023, j'ai obtenu un projet en collaboration avec Lise Crevier-Buchman sur l'action "Défi de la Pathologie/Action Défis Sociétaux" dans le cadre du [Labex-EFL](#). J'ai géré un budget de 10 000 € sur 12 mois. Cela m'a permis de financer plusieurs stagiaires et d'acheter une imprimante 3D pour faire de la modélisation acoustique.

*Titre de l'action :*

Comprendre la production des sons du langage sain et pathologique : Comment sont produits les sons du langage ?

*Résumé :*

Le conduit vocal est constitué du conduit buccal, comprenant les lèvres, la langue et le voile du palais, du conduit nasal composé des fosses nasales et des cavités sinusiennes, ainsi que du conduit laryngé avec les plis vocaux. De tous ces organes, nous n'avons souvent conscience que de notre langue et de nos lèvres. Ce projet expliquera la production des sons grâce à des modélisations tridimensionnelles complètes du conduit vocal. Grand public et étudiants pourront ainsi observer la configuration des organes, et les voir s'animer pour aboutir au langage, en illustrant les conséquences articulatoires et acoustiques d'altérations associées à certaines pathologies de la parole. Le projet complet soumis est disponible ([ici](#)).

Entre 2023 et 2024, j'ai obtenu un nouveau projet en collaboration avec Lise Crevier-Buchman sur l'action Défi de la Pathologie/Action Défis Sociétaux dans le cadre du [Labex-EFL](#). Je gérai un Budget : 10000 € sur 12 mois. Ce qui m'a permis de recruter un ingénieur durant 3 mois pour m'aider à améliorer l'AeroMask et le dupliquer.

### *Titre de l'action :*

Distribution de l'AeroMask : système d'acquisition de données aérodynamiques et acoustiques en simultané.

### *Résumé :*

Dans le cadre de l'axe 1 et plus particulièrement des opérations 1 et 6, nous souhaitons réaliser d'autres systèmes complets de l'AeroMask. L'objectif est de pérenniser un système d'acquisition à l'hôpital Bicêtre, dans le service du Professeur Jean-François Papon où Amélie Elmerich a mené ses enregistrements de thèse, ainsi que dans le service de chirurgie maxillo-faciale et de chirurgie plastique de l'hôpital Necker. Nous souhaitons également satisfaire les demandes de différents laboratoires de recherche en leur fournissant un système qu'ils pourront conserver pour toutes leurs expérimentations, et pas seulement un système limité à des emprunts ponctuels. Plus le système sera utilisé, plus il nous sera possible de voir les limites et d'apporter des améliorations. Le projet complet soumis est disponible ([ici](#)).

### **4.3.2.2 ANR : Full3DTalkingHead**

Entre 2021 et 2025, j'ai été le Responsable scientifique pour le [LPP](#) de l'[ANR Full3DTalkingHead](#) (ANR-20-CE23-008) dont le coordinateur est Yves Laprie, du [Loria](#) à Nancy. Je gérais un budget alloué au [LPP](#) d'environ 106650€. Ce budget a permis de recruter un doctorant qui a été dirigé par Didier Demolin.

L'objectif du projet était de réaliser une tête parlante numérique tridimensionnelle complète, comprenant le conduit vocal depuis les plis vocaux jusqu'aux lèvres, le visage, et intégrant la simulation des phénomènes aéro-acoustiques. La parole étant l'expression la plus directe de l'intelligence humaine, sa synthèse relève naturellement de l'Intelligence Artificielle ([IA](#)). Les développements récents de l'[IA](#) bouleversent en profondeur les approches proposées jusqu'à présent. Résumé de la soumission : Le défi est d'apprendre à contrôler la forme du conduit vocal et du visage lors de la production de la parole, d'intégrer la dimension des expressions, de traiter des volumes de données importants dont des images [IRM](#) temps réel du conduit vocal pour lesquelles il n'existe pas encore d'approche efficace, et enfin de lier étroitement les simulations numériques de l'acoustique et l'apprentissage automatique.

Le premier verrou est la possibilité d'observer les déformations géométriques bidimensionnelles ou tridimensionnelles du conduit vocal à une fréquence suffisante, au moins 50 Hz. L'[EMA](#) et l'échographie n'offrent qu'une vue partielle. L'arrivée de l'[IRM](#) temps réel (à 50 Hz) permet

d'acquérir de grandes bases de données sur l'évolution temporelle du conduit vocal, bouleversant la modélisation temporelle de sa géométrie. Cependant, les données [IRM](#) ne correspondent qu'à un plan du conduit vocal, l'objectif est donc d'obtenir une information dans la direction transverse.

Le second verrou est l'apprentissage du contrôle temporel du conduit vocal et du visage. Il s'agit d'abord du suivi du contour des articulateurs dans les images [IRM](#), puis de l'apprentissage du contrôle lui-même. L'utilisation de techniques d'apprentissage profond, supervisé ou faiblement supervisé, sera nécessaire.

Le troisième verrou est la coordination entre les différentes contributions à la production de la parole : la source de pression et la respiration, l'ouverture à la glotte, la vibration des plis vocaux et les gestes du conduit vocal et du visage. Les points mal maîtrisés restent la précision requise pour cette coordination, l'apprentissage des commandes et les simplifications géométriques.

Ces travaux s'appuient sur les progrès des simulations aéro-acoustiques, reliant les traits phonétiques à leur origine articulaire. L'accès à des données couvrant toutes les facettes de la production de la parole reste difficile. La piste suivie est de combiner des techniques d'apprentissage avec des simulations physiques et numériques, les simulations physiques fournissant une vérité terrain.

Partenaire	Nom	Rôle et responsabilités dans le projet
Laboratoire lorain de recherche en informatique et ses applications ( <a href="#">Loria</a> )/ <a href="#">CNRS</a>	Yves Laprie	Coordinateur scientifique Responsable tâche 5
<a href="#">Loria</a> /Université de Lorraine	Slim Ouni	Responsable Tâche 3
<a href="#">Loria</a> /Université de Lorraine	Vincent Colotte	Participant Tâche 3
<a href="#">Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle (IADI)</a> /Université de Lorraine	Pierre-André Vuissoz	Responsable Tâche 2
<a href="#">IADI</a> /Institut national de la santé et de la recherche médicale ( <a href="#">INSERM</a> )	Freddy Odille	Participant Tâche 1 et 2
<a href="#">LPP</a> / <a href="#">CNRS</a>	Angélique Amelot	Partenaire Scientifique, responsable Tâche 1
<a href="#">LPP</a> / <a href="#">CNRS</a>	Didier Demolin	Participant Tâche 1

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI)/CNRS	Annemie Van Hirtum	Responsable Tâche 4
LEGI/CNRS	Xavier Pelorson	Participant Tâche 4

TABLE 4.8 – Tableau reprenant les différents partenaires de l’ANR Full3DTalkingHead.

*Contribution du LPP au projet ANR :*

L’objectif du LPP dans ce projet est d’investiguer les relations entre le système respiratoire et le système phonatoire. Cette étude se situe au niveau de la source de la parole, c’est-à-dire sur les mécanismes physiologiques qui déclenchent une phase aérodynamique, qui résulte ensuite en ondes sonores audibles et intelligibles par les auditeurs. L’investigation est composée de trois phases.

La première phase concerne des données physiologiques et aérodynamiques de la production de la parole, en s’intéressant notamment aux phénomènes respiratoires nécessaires et suffisants pour mettre en place la phonation. Des instruments de mesure tels que la pléthysmographie (méthode non invasive pour enregistrer la pression sous-glottique), l’EMGs et les accéléromètres 3D seront utilisés.

Pour la deuxième phase, nous nous situons à un niveau supérieur à la respiration. Nous cherchons à comprendre les corrélations entre les mécanismes physiologiques, les processus aérodynamiques et l’acoustique des sons produits, afin d’explicitier les phénomènes qui sont de l’ordre de l’automatisme et ceux qui sont contrôlés et produits intentionnellement. Des instruments comme l’EGG, l’ePGG, et des mesures aérodynamiques (pression et débit) et acoustiques seront utilisés.

Dans la troisième phase, nous nous pencherons sur les activités cérébrales (en utilisant EEG) pour examiner le contrôle neuronal qui sous-tend les mécanismes de la production de la parole.

*Les questions spécifiques soulevées :*

1. les principaux mécanismes de régulation de la respiration et la phonation et leurs interactions (plethysmographe, Électromyographie (EMG), accéléromètres 3D) ;
2. les interactions du système respiratoire et du système laryngé durant la production de la parole (EGG, ePGG) ;
3. les interactions entre système laryngé, aérodynamique et acoustique (débit et pression d’air, acoustique) ;
4. la nature physiologique de l’accentuation dans les énoncés ;
5. les mécanismes de la déclinaison de la fréquence fondamentale ;
6. les mécanismes de contrôle du cerveau sur la production de la parole.

Les méthodes d’investigation utilisées dans cette étude comprennent l’acquisition de données aérodynamiques par des instruments de mesure tels que la station Evaluation Vocale Assistée (EVA), permettant de mesurer le débit d’air oral et la pression intra-orale.

Du côté des données physiologiques, l’EMGs sera employée pour mesurer les activités des muscles impliqués dans la respiration et dans la production de la parole. Pour les muscles difficiles à atteindre par l’EMGs, des accéléromètres 3D seront utilisés afin de mesurer la déformation des muscles (contraction et élongation) et d’en inférer leur activité. Le projet complet est disponible ([ici](#)). Iraj Hashemi a été recruté comme doctorant pour ce projet ANR par le

**LPP**. Il devrait soutenir sa thèse en juillet 2025. Sa thèse explore l'interaction complexe entre les rythmes cérébraux et la phonation. À l'aide d'un paradigme expérimental soigneusement conçu, il a étudié les dynamiques neurophysiologiques sous-jacentes à la production prolongée d'une syllabe simple sans reprise respiratoire. Les enregistrements de l'activité électromyographique de muscles respiratoires clés (scalène, intercostal externe, oblique externe, droit de l'abdomen) ont été synchronisés avec les données du débit d'air, de la pression intra-orale et de l'**EEG**. Cette approche permet d'analyser les mécanismes de régulation de la pression sous-glottique, essentielle à l'activité phonatoire. Il s'intéresse à l'implication neuronale dans la coordination séquentielle des muscles respiratoires lors de la phonation prolongée. Ses résultats mettent en évidence le rôle des rythmes cérébraux delta, thêta et alpha, ainsi que de leurs générateurs corticaux et sous-corticaux, dans le contrôle de cette coordination. Ces résultats révèlent des mécanismes fondamentaux de l'interaction entre le cerveau et les muscles respiratoires au cours de la phonation.

#### 4.3.2.3 ANR : PhoTon

Depuis 2023 et jusqu'en 2026, je suis responsable scientifique de l'**ANR PhoTon** (Projet de Recherche Collaborative (PRC)) dont la coordinatrice est Katia Chirkova du Centre de recherches linguistiques sur l'Asie orientale (**CRLAO**) à Paris. J'ai un budget alloué au **LPP** d'environ 263 000€ à gérer. Ceci a permis de recruter une post-doctorant qui est sous ma supervision.

Ce projet explore et teste empiriquement des contrastes récemment découverts impliquant des sons du conduit vocal inférieur dans les langues qianguiques et tibétiques (sino-tibétaines) de l'ouest du Sichuan, en Chine. Ces contrastes sont parmi les découvertes récentes les plus remarquables dans cette région multilingue. Compte tenu de leur rareté dans les langues du monde, ils sont d'un grand intérêt pour notre compréhension des sons du conduit vocal inférieur, et, plus généralement, pour la typologie des systèmes phonologiques. Ces contrastes ont également le potentiel de contribuer de manière significative à notre compréhension du changement sonore et des relations génétiques de diverses langues sino-tibétaines phylogénétiquement obscures de l'ouest du Sichuan.

Ce projet combine des méthodologies de trois domaines - documentation linguistique et linguistique descriptive, phonétique instrumentale et expérimentale, linguistique historique et comparative - pour fournir une analyse et une description approfondies des contrastes récemment découverts dans deux groupements linguistiques : la langue qiang (qianguique) et les variétés tibétiques avoisinantes. Ces deux groupements, géographiquement adjacents mais génétiquement distincts, offrent la possibilité d'examiner à la fois les aspects synchroniques et diachroniques des contrastes.

Le projet commencera par des analyses acoustiques, électroglottographiques et ultrasonores des contrastes rapportés dans la variété mawo du qiang, et dans les variétés tibétiques chos-rje et baima, pour en fournir les toutes premières descriptions complètes. L'objectif principal de l'analyse synchronique est de comprendre les facteurs physiques internes qui sous-tendent ces contrastes, leur nature physiologique et les interactions linguo-laryngées-pharyngées associées. Le Laryngeal Articulation Model servira de guide pour ce travail.

Ensuite, les aspects diachroniques seront examinés en appliquant des méthodes historiques comparatives à deux types de preuves : 1. les correspondances des contrastes dans les variétés étroitement apparentées, et 2. les preuves diachroniques dans le tibétain ancien. Cette partie du travail se concentrera sur les interprétations phonologiques des événements laryngés, en

référence au Phonological Potentials Model.

Les résultats du projet s'étendront sur trois domaines : 1. la phonétique et la phonologie, 2. les langues et la linguistique sino-tibétaines et 3. la documentation des langues en danger. Ils incluront une abondance de données expérimentales, des reconstructions des origines des contrastes, une analyse du rôle du contact linguistique, et une exploration du potentiel des méthodes phonétiques instrumentales pour la documentation des langues en danger.

Partenaire	Nom	Rôle et responsabilités dans le projet
CRLAO/CNRS	Katia Chirkova	Coordinateur scientifique Responsable tâche A,C,D,E,J,K,L,M,O,P
CRLAO/CNRS	Redouane Djamouri	tâche J,K,L,M,O,P
CRLAO/CNRS	Guillaume Jacques	tâche J,K,L,M,P
LPP/CNRS	Angélique Amelot	Partenaire Scientifique Tâche B,G,H,I,M,O,P
LPP/CNRS	Claire Pillot-Loiseau	Tâche H,I,J,K,L,M,O,P
LPP/CNRS	Lise Crevier-Buchman	Tâche H,I,J,K,L,M,P
Extérieur	Nathaniel Sims	Tâche C,D,E,J,K,L,P

TABLE 4.9 – Tableau reprenant les différents partenaires de l'ANR PhoTon.

*Contribution du LPP au projet ANR :*

La partie phonétique du projet sera réalisée par les trois phonéticiennes de notre équipe de recherche : Claire Pillot-Loiseau, Lise Crevier-Buchman et moi-même, ainsi que par le chercheur post-doctoral expert en phonétique et phonologie, affilié au LPP.

En particulier, le chercheur post-doctoral se concentrera sur les analyses acoustiques et articulatoires globales des données collectées (tâche G). Une analyse détaillée du point de vue de l'articulation laryngée et de son interaction avec les articulateurs du tractus vocal supérieur (oral) sera effectuée conjointement par les quatre phonéticiens (tâche H). L'expertise de Lise Crevier-Buchman et Claire Pillot-Loiseau sur les qualités vocales modales et non modales, ainsi que sur les sons produits dans le tractus vocal inférieur, sera précieuse pour une analyse fine des données.

Les résultats essentiels de ce volet de travail consisteront en des études instrumentales des ensembles contrastifs, en lien avec leurs diverses manifestations dans les variétés étroitement apparentées de langues qiang et tibétiques, destinées aux phonéticiens et scientifiques du langage (tâche I).

Le Workpackage 3 (Analyse Comparative et Historique) vise à fournir une analyse comparative et historique approfondie des données collectées. Cette partie du travail se concentrera sur

les interprétations phonologiques des événements laryngés dans les langues étudiées et cherchera à expliquer leur développement historique en référence au Modèle des Potentiels Phonologiques.

Cette partie du travail se rapportera à l'hypothèse selon laquelle les contrastes récemment mis en évidence dans les variétés qiang et tibétiques représentent un trait aréal qui se diffuse au-delà des frontières génétiques. Les principales questions concerneront l'apparition des contrastes au sein de chaque groupe linguistique, et leur propagation au sein et entre les groupes. Cela impliquera une analyse des facteurs internes (changements phonétiques) (tâche J) et externes (interférences induites par le contact linguistique) (tâche K). Les méthodes associées incluront l'identification des correspondances phonétiques régulières, la comparaison avec l'ancien tibétain, les reconstructions des voies de développement, et l'examen du rôle du contact linguistique. Le projet complet est disponible ([ici](#)).

## 4.4 Comité national de la recherche scientifique

Depuis 2020, je siége au Comité National du [CNRS](#) en tant qu'élu C en section 34. La section 34 est la section "Sciences du langage" pilotée par l'Institut des Sciences Humaines et Sociales. Il s'agit d'un mandat de 5 ans. Le Conseil scientifique du [CNRS](#) veille à la cohérence de la politique scientifique du centre en liaison avec l'ensemble des instances scientifiques consultatives du Comité national. Il donne notamment un avis sur :

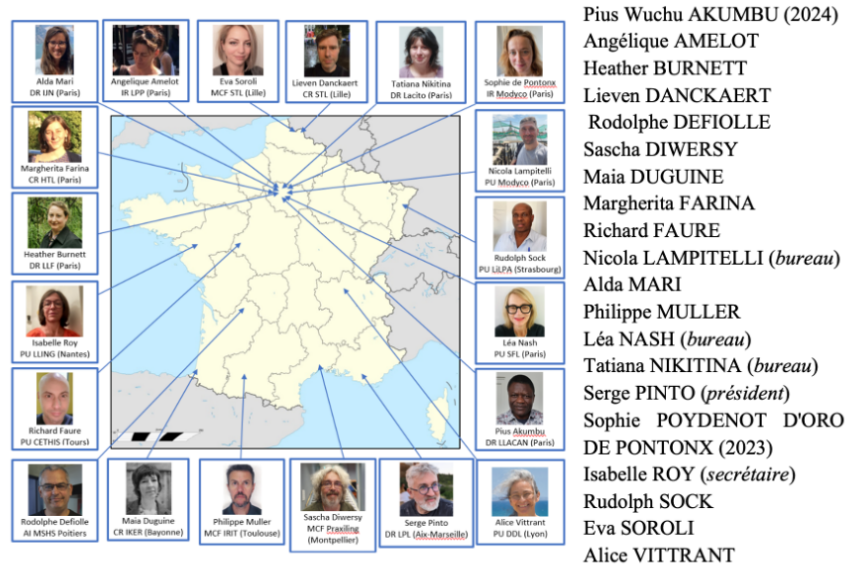
- les grandes orientations de la politique scientifique du [CNRS](#) ;
- les principes communs d'évaluation de la qualité des recherches et de l'activité des chercheurs ;
- la création ou la suppression de programmes intéressant un ou plusieurs instituts ;
- les modalités de répartition des moyens financiers et humains entre les instituts, les programmes intéressant plusieurs instituts et les services communs ;
- le plan stratégique et le contrat pluriannuel (État/CNRS).

Il donne un avis sur les propositions de nomination des membres des conseils scientifiques d'institut et peut demander un avis au Comité d'éthique du [CNRS](#). Le Président du Conseil scientifique assiste au conseil d'administration avec voix consultative.

*Composition de la section 34 :*

Le périmètre de la section 34 prend sa forme actuelle en 2016 avec les mots-clés suivants :

- linguistique fondamentale : phonétique, phonologie, morphologie, syntaxe, sémantique, lexicale ;
- signification et usage du langage : philosophie du langage, pragmatique ;
- typologie : universaux et diversité ;
- changement linguistique et évolution des langues : linguistique historique, contact de langues, linguistique anthropologique ;
- interaction et langage : sociolinguistique, analyse discursive, textes ;
- linguistique computationnelle : traitement automatique des langues, traitement du langage naturel, modélisation et simulation de phénomènes linguistiques ;
- psycho- et neuro-linguistique : approches expérimentales et cliniques du langage ;



Anciens membres : William SAYER (2021-2022), Rachid RIDOUANE (2021-2023), Ur SHLONSKY (2021-2023)

FIGURE 4.4 – Membres de la section 34 pour le mandat de 2020-2025.

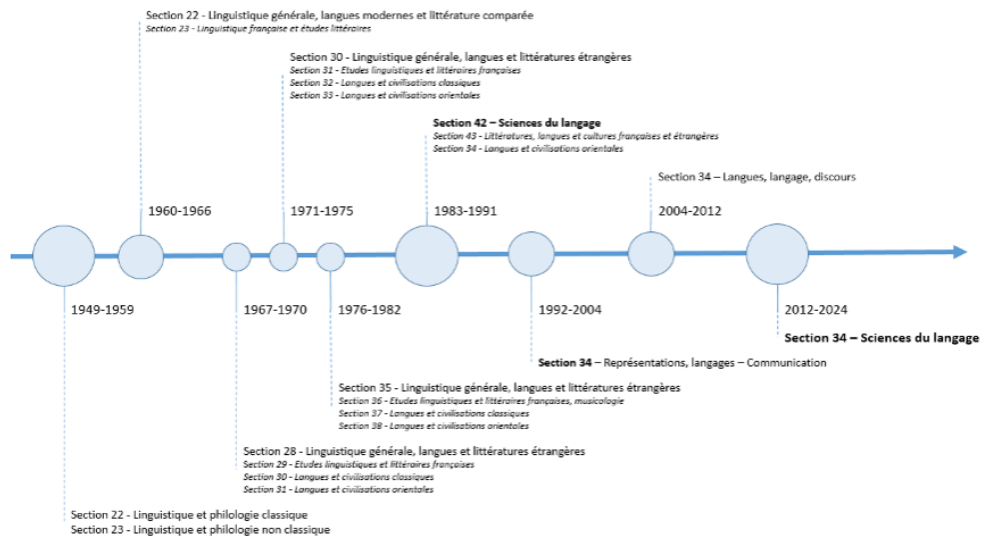


FIGURE 4.5 – Évolution de l'intitulé de la section 34 « Sciences du langage » de 1949 à 2024.

— histoire des théories linguistiques.

Durant ce mandat de cinq ans, le comité a rédigé un rapport de conjoncture, disponible ([ici](#)). Une de mes missions a été d'alimenter le site web de la section, visible ([ici](#)).

En tant que membre du comité, j'ai participé à trois évaluations [HCERES](#) en 2022 et 2023. Je participe également, en tant que responsable des instances d'évaluation, à la procédure de recrutements d'[ITA](#) au [CNRS](#) *via* le processus du concours externe qui a lieu chaque année.

J'ai par ailleurs été invitée à participer à un processus de recrutement en interne, toujours en qualité d'élue. Il m'est également arrivée de participer à trois concours externes pour le recrutement d'[ITA](#) en tant que membre expert pour le [CNRS](#) et un pour l'université Sorbonne Nouvelle.

## 4.5 Comité régional d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

J'ai été membre élue au Comité Régional d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail ([CRHSCT](#)) pour le [CNRS](#) et plus précisément pour la [délégation Paris-Villejuif](#) de 2015 à 2019. Depuis 2024, je suis suppléante aux Formations spécialisées de service en matière de santé, de sécurité et des conditions de travail ([F4SCT](#)), anciennement [CRHSCT](#), toujours pour la [délégation Paris-Villejuif](#).

Les [F4SCT](#) sont des instances consultatives mises en place au niveau régional. Leur champ d'action s'étend à tous les personnels des structures de recherche [INSERM](#) de la circonscription régionale. Elles ont pour mission de veiller au respect de l'application des règles de santé et sécurité au travail et de participer à l'élaboration de la politique régionale de prévention. Elles peuvent notamment :

- analyser les conditions de travail et les risques professionnels auxquels peuvent être exposés les personnels au sein des unités et services ;
- contribuer à la promotion de la prévention des risques professionnels et formuler des propositions d'amélioration ;
- procéder à la visite de services ou unités ;
- proposer des actions de prévention des risques dans les domaines techniques, humains ou organisationnels ;
- réaliser des enquêtes, dans un but de prévention, notamment à la suite d'accidents du travail, en cas de maladie professionnelle ou de danger grave et imminent.

## 4.6 Assistant de prévention

Je suis Assistant de Prévention ([AP](#)) depuis 2015 pour le [LPP](#). Dans ce cadre, j'ai la charge de rédiger et d'actualiser annuellement le cahier d'hygiène et de sécurité du laboratoire et consigner les accidents de travail survenus. De plus, je suis le référent Sauveteur Secouriste du Travail ([SST](#)) pour le laboratoire.

## 4.7 Réseaux

### 4.7.1 GDR-Lift

Je suis membre du réseau [GDR-Lift](#) depuis 2021, dans ce cadre il m’arrive régulièrement de faire des relectures d’articles soumis pour les écoles thématiques organisées par les membres du réseau et de participer aux réunions d’organisation. Ce réseau se consacre à la linguistique informatique. A travers des écoles thématiques et des conférences, il valorise à l’intention des linguistes, des connaissances et des savoir-faires concernant un large éventail de techniques et de ressources qui ouvrent des perspectives nouvelles pour l’analyse linguistique, que ce soit pour collecter et annoter des données ou pour extraire ou vérifier des généralisations linguistiques.

### 4.7.2 Focus Linguistique

Depuis 2024, je suis impliquée dans le projet Focus Linguistique du [CNRS](#). Il s’agit d’un Projet initié par le [CNRS Sciences humaines et sociales](#), destiné à mettre en lumière la discipline sciences du langage pour la faire découvrir à un large public. Cet événement sera ponctué par plusieurs actions :

- une publication à CNRS éditions (infographie sur les sciences du langage, ouvrage coordonné par Ricardo Etxepare et Serge Pinto) ;
- un article publié régulièrement dans la Lettre de l’Institut (mensuelle) ;
- des podcasts ;
- une exposition virtuelle grand public.

Trois groupes de travail ont été constitués pour mettre en oeuvre ce projet :

1. Histoire de l’évolution technique des sciences du langage (GT1) ;
2. Le patrimoine linguistique en territoire francophone qui accueillera aussi bien les langues régionales que les langues des outre-mer (GT2) ;
3. Science partagée, sous la forme d’une enquête en ligne par exemple (GT3).

GT1	GT2	GT3
Angélique Amelot		Julien Thiburce
Fabrice Hirsch		Justine Lascar
Rudolph Sock	Ricardo Etxepare	Margherita Farina
Olivier Baude	Fabrice Hirsch	Serge Pinto
Nathalie Vallée		

TABLE 4.10 – Répartition des personnes en fonction des trois groupes de travail.

D’autres membres rejoignent progressivement les différents groupes de travail.



## Chapitre 5 : Projet de Recherche

*Mon projet scientifique est lié au Chapitre 3. Beaucoup de choses sont encore à explorer pour comprendre l'interaction entre articulatoire/aérodynamique/acoustique/perceptif, et le phénomène de la nasalité s'y prête particulièrement bien. Ce projet de recherche vise à développer une plateforme multi-instrumentale pour l'acquisition de données synchronisées de la parole, normales et pathologiques, dans le but de créer une base de données multilingue et multi-instrumentale. Les données serviront à étudier la production de la parole, en particulier les traits distinctifs, et à créer des maquettes physiques tridimensionnelles statiques du conduit vocal pour simuler l'acoustique des sons de parole.*

### 5.1 Multi-instrumentation

L'objectif principal de mon projet de recherche est de développer des protocoles pour l'acquisition de données multi-instruments synchronisées dans le cadre d'une plateforme instrumentale : Le but est de constituer une base de données multilingues et multi-instrumentale de parole normale et pathologique, et de construire des maquettes physiques tri-dimensionnelles à partir des données de configuration de conduits vocaux statiques normaux ou pathologique (via les images d'IRM et de scanner).

Mon projet s'inscrit dans l'objectif de mieux comprendre comment les aspects physiques, anatomiques et articulatoires contribuent à la production de la parole et quels sont leurs liens. Pour répondre à cette question il faut : développer une plateforme multi-instrumentale, concevoir un protocole pour la construction de bases de données multi-instrumentales pertinentes, acquérir et faire parler ces données multilingues. La dimension clinique et la réalisation de maquettes complètent ce projet en apportant les outils pour étudier le lien entre la forme géométrique du conduit vocal sain ou pathologique et son impact sur l'acoustique produite.

Ces données permettront de répondre à des questions de recherche concernant la production de la parole, en particulier la réalisation des traits distinctifs définis par [Jakobson 1976], face à des contraintes physiologiques parfois contradictoires. Les données instrumentales, acquises au LPP, incluent des mesures articulatoires, aérodynamiques, acoustiques et perceptives. Ces mesures seront ensuite mises en relation. Cette approche par données multi-instrumentales synchronisées est un complément aux études qui abordent la parole à travers des statistiques sur des bases de données de plus en plus importantes, aboutissant à des applications de plus en plus performantes. Cette approche est aussi complémentaire des démarches qui reposent sur une description macroscopique et qui ne fournissent pas toujours les réponses pour les descriptions

Instruments/Instruments	Electroscoplogramme	Marqueurs infrarouges	Electromyographie	Electroglottographie	Plectyomyographie	Camera Vidéo	Glottographie photoélectrique	Microphone nasal / accéléromètre piezoélectrique	Echographie	Electropalatographie	Articulographie électromagnétique	Capteurs aérodynamiques	Nasofibroscope	PhotoNasographie	Endoscope	Nasomètre	IRM (Nancy)
	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire & Terrain	non invasif / Laboratoire & Terrain	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire & Terrain	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire	non invasif / Laboratoire & Terrain	invasif / Hôpital	invasif / Hôpital	invasif / Hôpital	non invasif / Laboratoire & Terrain	Invasif / Hôpital
Electroscoplogramme		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Marqueurs infrarouges	x		x	x	x		x	x	x	x		x					
Electromyographie	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		
Electroglottographie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
Plectyomyographie	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Camera Vidéo	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Glottographie photoélectrique	x	x	x	x	x		x		x			x	x	x	x	x	
Microphone nasal / accéléromètre piezoélectrique	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
Echographie	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	
Electropalatographie	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
Articulographie électromagnétique	x				x	x		x									
Capteurs aérodynamiques	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
Nasofibroscope	x		x	x	x	x	x	x		x		x		x			
PhotoNasographie	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x				
Endoscope	x		x	x	x	x	x	x				x					
Nasomètre	x	x	x	x	x		x	x	x			x					

FIGURE 5.1 – Différents instruments disponibles au LPP : avantages et inconvénient, couplage et situation d’enregistrement possibles.

liées à des événements plus fins.

Une étude multi-instrumentale implique l’enregistrement simultané de données provenant de plusieurs instruments. Ces instruments incluent des microphones pour mesurer la pression acoustique, des capteurs aérodynamiques pour mesurer le flux d’air oral et nasal, la pression intra-orale et/ou nasale, des capteurs articulatoires pour mesurer les mouvements de la langue ou des lèvres, et des capteurs de type vibration de contact, tels que l’EGG ou les vibrations sur les parois extérieures du nez. Une acquisition multi-instrumentale permet de fournir une description plus globale d’un trait distinctif que des données mono-instrumentales. Concevoir une expérimentation couplant des instruments fournissant plusieurs paramètres de la production enrichit considérablement les connaissances sur les mécanismes de production d’un son. La plateforme du LPP a la particularité d’avoir un instrument dédié à chaque organe de parole comme on peut le voir sur la figure 1.2.

La figure 5.1 décrit les combinaisons possibles entre les différents instruments, le caractère invasif ou non invasif de chacune des instrumentations et les lieux possibles d’enregistrement (milieu hospitalier/laboratoire/terrain). Les croix dans le tableau représentent les possibilités d’associer les instruments entre eux pour faire de l’acquisition multi-canal. Chaque instrument a ses avantages et ses inconvénients, que mon expérience m’a appris à bien connaître, certains étant mieux adaptés que d’autres selon l’étude envisagée.

Je pense avoir acquis au fil du temps les connaissances nécessaires pour conseiller les étudiants, chercheurs et enseignants-chercheurs, sur les instruments à utiliser selon leur(s) hypothèse(s) ou la situation d’acquisition, afin de les aider à mener à bien leur projet de recherche.

Toutes les instrumentations figurant sur la figure 5.1 ne sont pas propres au LPP, j’y ai fait figurer l’IRM en bleu, pour signifier la possibilité de disposer de ce type de données. L’accès à une base de données obtenues par IRM temps réel de la parole est lié à des projets de recherche communs avec Yves Laprie du Loria. J’ai également la possibilité d’obtenir des données de scanner pour les locuteurs présentant des pathologies, par l’intermédiaire de l’hôpital Foch, notamment des images de scanners de personnes souffrant de polyposse naso-sinusienne.

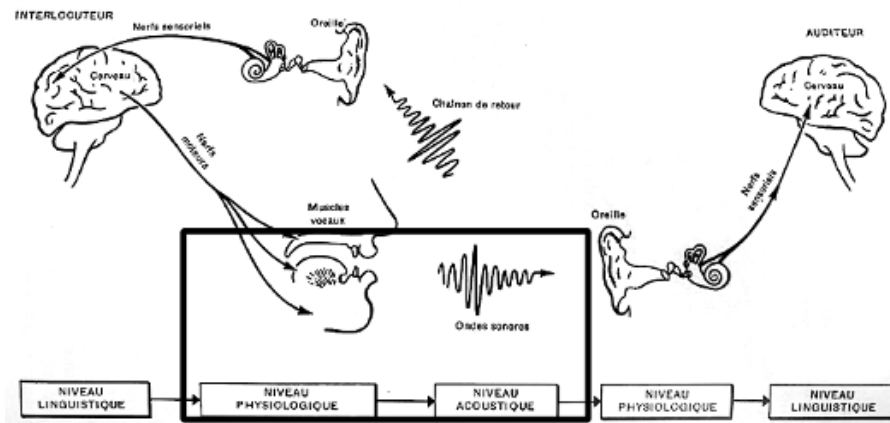


FIGURE 5.2 – La chaîne de la communication verbale : les différentes phases du message parlé dans son trajet du cerveau du lecteur à celui de l’auditeur [Denes 1960] p.4.

### 5.1.1 L’acquisition de données multi-instrumentales synchronisées pour décrire les phénomènes de parole

Le chapitre 3 de cette Habilitation à Diriger les Recherches (HDR) rappelle la complexité de l’acte langagier : 1. l’activité mentale dans le cerveau du locuteur engendre un message linguistique, formé d’une succession de mots, 2. ce message linguistique est transformé en une série de commandes au niveau des cellules nerveuses, qui vont permettre aux nerfs de démarrer l’activité musculaire, 3. les mouvements des différents organes de la parole permettent de générer une onde sonore et 4. cette onde sonore se déplacera jusqu’au système auditif de l’auditeur qui, grâce à des processus complexes (encore mal compris), pourra décoder le message linguistique.

Je suis particulièrement intéressée dans mon projet de recherche par la partie encadrée de la figure 5.2 : niveau physiologie de la production de parole et niveau acoustique.

Je m’appuierai sur le schéma ci-dessous (*cf.* figure 5.3) qui lie les étapes de description de phénomènes de parole au niveau physiologique et acoustique avec les instruments à ma disposition (*cf.* figure 1.2) :

J’ai élaboré ce schéma à partir des titres d’ouvrages de référence sur la physiologie de la production de la parole, tels que [Rousselot 1897], [Hardcastle 1976] ou encore [Hardcastle 1989]. Les éléments en bleu clair font référence à mon projet de recherche à court terme, en vert et en rose à mon projet à moyen et long terme et sont liés à mes collaborations, avec le laboratoire du Loria, l’hôpital Foch et LNMB de Bruxelles. Ses projets pourront évoluer en fonction des travaux dans lesquels je serai amenés à m’engager selon les chercheurs, enseignants-chercheurs et étudiants qui solliciteront mon expertise.

Chaque étape, numérotée de 1 à 5 sur la figure 5.3, peut être investiguée à partir d’instruments dédiés et disponibles au LPP, et peut faire l’objet d’une étude multi-instrumentations. L’investigation directe d’un organe de la parole (comme le voile du palais ou les plis vocaux), bien que très informative n’est pas toujours facile à mettre en œuvre, mais elle peut être suppléée par d’autres méthodes d’investigation indirectes.

La nasalité est un phénomène complexe. Mes travaux de recherche passés et en cours sur le trait de nasalité ont démontré l’importance d’une base de données multi-instrumentale (*cf.* chapitre 3). Mes travaux ont montré qu’il n’existe pas de rapport direct entre l’abaissement du voile du palais, la pression orale et le flux d’air, l’ouverture du port vélo-pharyngé, l’apparition

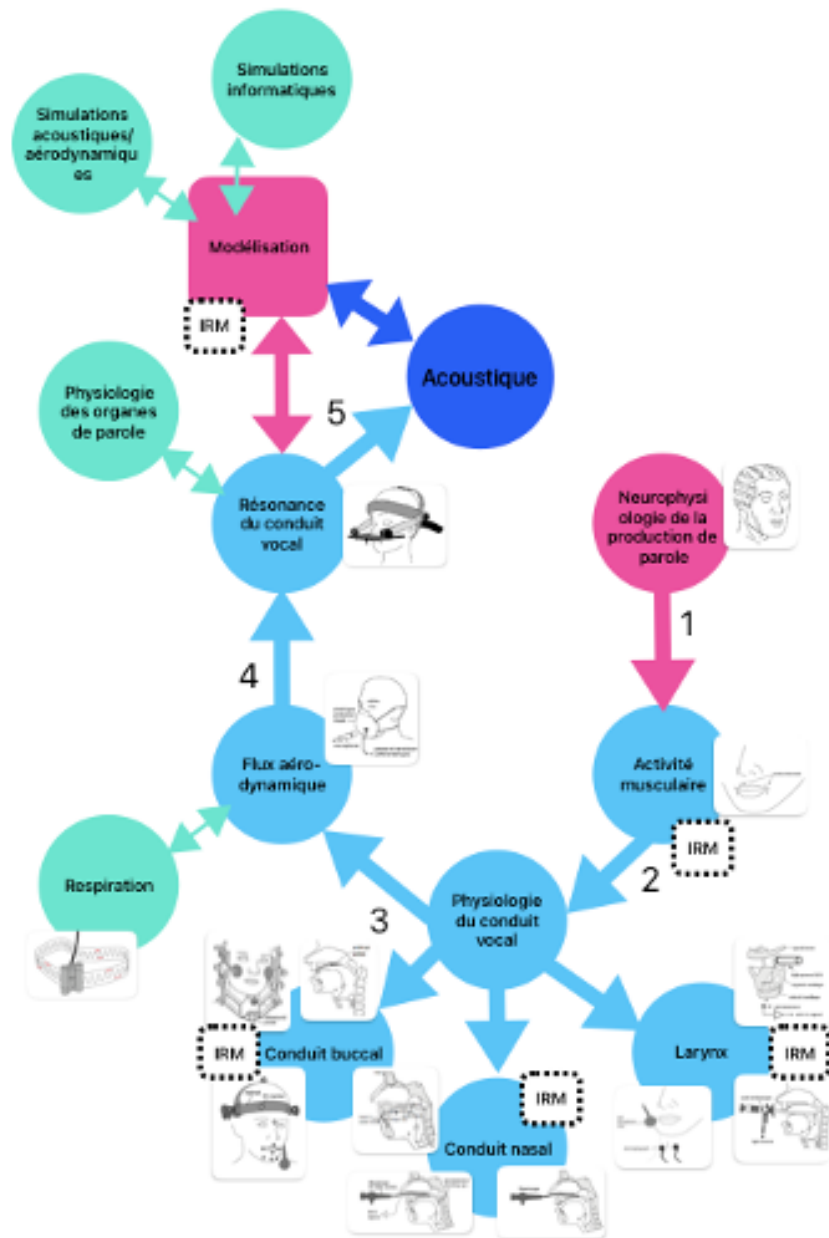


FIGURE 5.3 – Schéma représentant les différents processus physiologiques activés durant la production d'un énoncé.

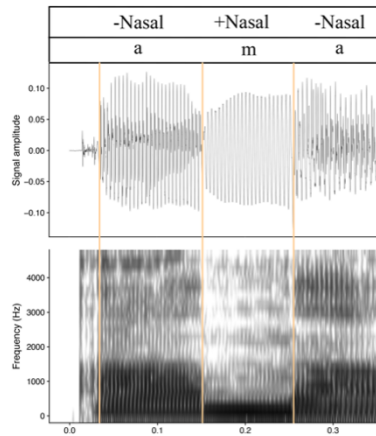


FIGURE 5.4 – Signal acoustique et spectrogramme du logatome [ama] prononcé par un locuteur féminin.

du flux d’air nasal, le couplage acoustique et la perception de la nasalité. Des conclusions contradictoires dans la littérature peuvent être expliquées par la différence des instrumentations utilisées.

Pour comprendre la démarche de mon projet de recherche, je vais partir de l’onde acoustique du logatome [ama] et de son spectrogramme produit par une locutrice. Le trait de nasalité, qui a été au cœur de mes recherches durant et après ma thèse, peut être décrit selon la définition de [Chomsky 1968] :

*“Nasals sounds are produced with a lowered velum which allows the air to escape through the nose; non nasal sounds are produced with a raised velum so that the air from the lungs can escape only through the mouth.” [Chomsky 1968] p.316).*

Dans cet exemple, le logatome été produit à l’isolée par une locutrice féminine, n’ayant pas de pathologie de la voix apparente. Le logatome [ama] sert à illustrer les conclusions de mes travaux de recherche sur la nasalité concernant notamment : le mouvement du voile du palais, l’ouverture du port vélo-pharyngé, les débits d’air et l’acoustique. Pour plus de clarté, j’ai volontairement choisi la consonne nasale /m/ et non les voyelles nasales qui du fait de l’ouverture buccale apporte une complexité supplémentaire dans l’enchaînement des phénomènes physiologiques lors de la production d’un phonème nasal. La segmentation en phonèmes est obtenue à partir des indices acoustiques visibles sur le signal acoustique et le spectrogramme. Les courbes schématisées de la figure 5.5 sont déduites pour la plupart de mes travaux de recherche antérieurs.

Les indices acoustiques pertinents liés à la nasalité restent difficiles à identifier. Selon [Delattre 1954], l’acoustique d’un phonème nasal est caractérisée en premier lieu par un formant bas vers 250 Hz, un formant de fréquence assez fixe vers 2000 Hz (identique à celui des voyelles nasales) et un formant de fréquence variable vers les 900 Hz. [Fujimura 1962] a également identifié un formant dans les basses fréquences et des anti-formants situés autour de 600 Hz et 1400 Hz. Les indices acoustiques de la nasalité dépendent de l’anatomie du locuteur, des sinus, de l’asymétrie de la cavité nasale, de la position dans le mot, de l’accentuation, *etc.*, et pour les voyelles, de la configuration du conduit vocal. Les corrélats acoustiques pour les voyelles peuvent être confondus avec des corrélats liés à la qualité de voix et à l’effort vocal. Sur la figure

5.4, le premier formant à 250 Hz est visible, celui à 2000 Hz n'est pas présent sur la totalité de la consonne et les formants attendus à 900 Hz ou 1400 Hz sont absents.

Concernant le trait de nasalité, une grande partie de l'acoustique correspondant à la consonne nasale peut être remplacée par du silence ou du bruit sans que son identité en soit affectée. L'analyse spectrale de la partie acoustique correspondant à la consonne nasale ne permet pas toujours de déterminer le lieu d'articulation de celle-ci. Les indices acoustiques liés à la consonne nasale sont généralement plus proéminents sur la voyelle qui suit.

Il est important de s'intéresser à tous les processus physiologiques de la production des sons afin de comprendre comment ils sont produits et de pouvoir établir un lien avec les corrélats acoustiques, qui ne sont pas toujours clairs pour certains traits distinctifs.

Pour illustrer cela, je vais m'appuyer sur la figure 5.5 et détailler les différentes étapes de production du logatome [ama]. Les courbes schématisées sont déduites pour la plupart de mes travaux de recherche antérieurs et de la littérature.

Les tracés schématiques de la figure 5.5 illustrent la non-linéarité des événements physiologiques et leur interdépendance.

1. Étape 1, l'activité nerveuse qui génère l'activité musculaire commence dans le système nerveux central, où un signal électrique est envoyé depuis le cerveau. Ce signal atteint les fibres musculaires via la jonction neuromusculaire. L'influx nerveux atteint la terminaison nerveuse, il libère un neurotransmetteur qui se lie aux récepteurs présents sur la membrane de la cellule musculaire. Cette interaction déclenche une série de réactions biochimiques impliquées dans la contraction des fibres musculaires. En se contractant, les muscles vont produire un mouvement. Pour le logatome [ama], le mouvement ciblé est lié à l'activité du voile du palais. Une activité musculaire détectée à partir d'un instrument comme l'EMG permettra d'enrichir la figure 7 en définissant l'instant pendant la production du logatome où l'activité musculaire aura une incidence sur le mouvement du vélum [Bell-Berti 1976]. Il est intéressant de constater que pour produire un phonème +nasal, l'activité musculaire du muscle releveur du voile du palais (*levator veli palatini*) s'arrête durant le phonème précédent. C'est dans ce cas l'arrêt de l'activité musculaire qui va permettre au voile du palais de s'abaisser. Dans ce cas, l'intérêt est d'étudier l'empan de l'arrêt de l'activité musculaire et d'établir le timing permettant de produire la consonne nasale entre les deux voyelles orales.
2. Étape 2 : La nasofibroscopie est une instrumentation qui peut être utilisée pour étudier les mouvements du voile du palais. La figure 5.5 montre que le voile du palais commence à s'abaisser avant le début acoustique du phonème nasal /m/ et remonte au début acoustique du phonème /a/ suivant la consonne nasale. Il est intéressant de constater que le mouvement du voile du palais montre des phénomènes d'anticipation et de propagation qui pourraient impacter les phonèmes adjacents [Amelot 2007a].
3. L'étape 3 : L'instrument utilisé est un PhotoNasographe qui permet d'observer non pas les mouvements du voile du palais mais l'ouverture du port vélo-pharyngé. La figure 5.5 montre que le port vélo-pharyngé s'ouvre après l'abaissement du voile du palais permettant une délimitation plus fine entre phonème oral et phonème nasal que dans l'étape 2 et apporte une information dans la description que les données articulatoires ne fournissent pas [Amelot 2008].
4. L'étape 4 : L'instrument utilisé est l'AeroMask, il permet de mesurer le flux d'air. Il consiste à capter les flux aérodynamiques influencés par la forme du conduit vocal. Pour

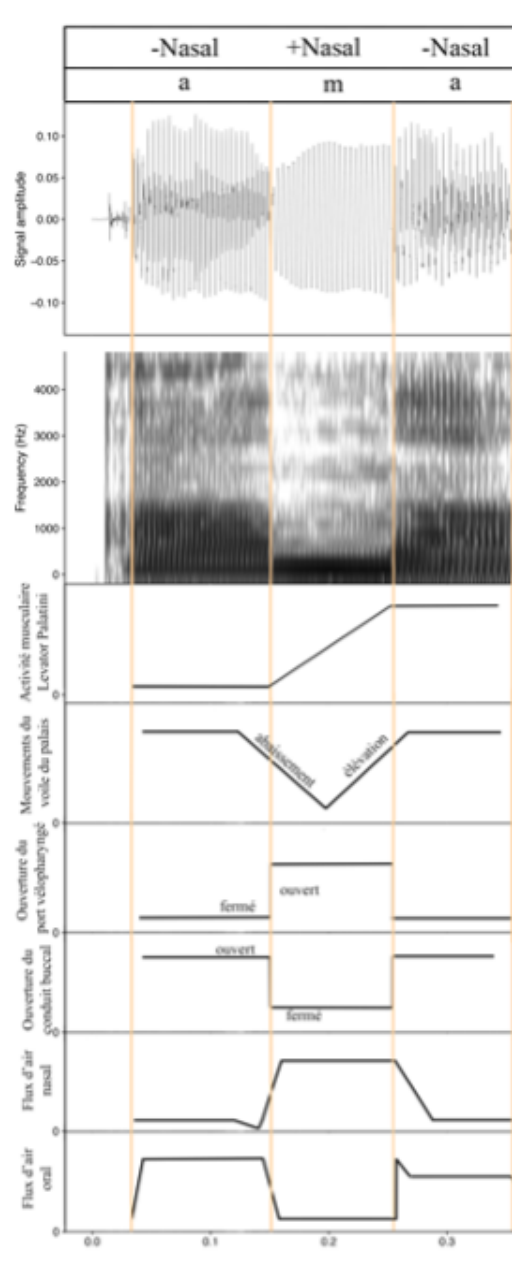


FIGURE 5.5 – Signal acoustique, spectrogramme, schémas de l’activité musculaire du levator palatini, mouvements du voile du palais, ouverture du port vélo-pharyngé, ouverture du conduit buccal, répartition des flux d’air oral et nasal durant la production du logatome [ama] par une locutrice. Les tracés schématiques hors Activité musculaire qui est déduite d’après les travaux de [Bell-Berti 1976], sont liés à une synthèse de mes précédentes recherches ( [Amelot 2004a]; [Amelot 2007a]; [Amelot 2008]; [Demasi 2016]).

étudier la nasalité, il est nécessaire d'estimer la répartition du flux d'air entre la cavité buccale et la cavité nasale, en tenant compte de la configuration du conduit vocal requise pour chaque phonème. La production d'une consonne bilabiale implique une fermeture de la cavité buccale aux lèvres. Cette fermeture permet à l'air provenant des poumons de passer exclusivement par la cavité nasale. Lorsque la bouche s'ouvre à nouveau pour la voyelle, l'air peut à nouveau passer par la cavité buccale et pour garder le caractère oral de la voyelle, ne devra plus passer par la cavité nasale. Le flux d'air schématise sur la figure 5.5 illustre certaines particularités, telles qu'un flux d'air nasal négatif qui peut être associé à l'abaissement du voile du palais et une propagation du flux d'air nasal maintenu durant la voyelle orale, alors que le port vélo-pharyngé est fermé, il s'agit d'un flux résiduel lié au voile du palais qui se relève [Amelot 2004a].

Cette description étape par étape n'est possible que par le biais d'une étude multi-instrumentale. Elle illustre la complexité de la réalisation du trait [+nasal]. Et elle montre, selon l'aspect scientifique étudié, la description d'un trait peut différer.

Les mesures de la pression orale et nasale sont essentielles pour comprendre l'importance de l'impédance dans les différents conduits. Je prévois d'intégrer l'ensemble des mesures dans mon projet de recherche à court terme de création d'une base de données multi-instrumentale et multilingue concernant la nasalité.

L'établissement d'une base de données multi-instrumentale et multilingue pour plusieurs locuteurs pourrait aider à approfondir les connaissances sur le trait de nasalité, et le trait de voisement. Cela permettrait également d'approfondir les connaissances sur les liens entre les événements physiologiques :

- temps d'abaissement et ouverture du voile du palais ;
- abaissement/ ouverture du voile du palais et apparition d'un flux d'air nasal négatif/positif ;
- ouverture glottique et vibration des plis vocaux ;
- flux d'air et pression ;
- arrêt du flux d'air oral/nasal et configuration du conduit vocal/port vélo-pharyngé ;
- ...

## 5.1.2 Description des protocoles pour la constitution d'une base de données multi-instruments

Cette partie décrit les différents protocoles pour la constitution de la base de données, en lien avec les différentes étapes décrites sur la figure 5.3.

### 5.1.2.1 Lien entre activité cérébrale et activité musculaire respiratoire

Cette étape est rendue possible grâce au projet ANR FULL3DTalking (2021-2025) dirigé par Yves Laprie, dont je suis le porteur scientifique pour le LPP. Ce projet consiste à créer une tête parlante numérique tridimensionnelle complète, comprenant le conduit vocal des plis vocaux aux lèvres, le visage, et intégrant la simulation numérique des phénomènes aéroacoustiques. L'activité cérébrale sera obtenue à partir de mesures d'EEG, et l'activité musculaire sera étudiée directement à partir d'EMG de surface sur les muscles impliqués lors de la respiration, dans un premier temps à l'unité de recherche en neurophysiologie et de biomécanique du mouvement de Bruxelles, puis au LPP. Ce projet ANR nous a déjà permis d'établir un protocole rigoureux pour

étudier l'interaction complexe entre les rythmes cérébraux, les articulateurs et la respiration. Le corpus permet d'explorer les liens entre la respiration, la ligne de déclinaison de la fréquence fondamentale, et l'intensité, qui seront ensuite mis en regard à l'étape 2.

### **5.1.2.2 Activité musculaire respiratoire, physiologie du larynx et vibration des plis vocaux**

Cette étape s'intéressera aux liens entre l'activité musculaire liée à la respiration et l'activité laryngée, et comment la pression sous-glottique interagit avec les vibrations glottiques. Les outils que j'ai aidé à développer et les avancées faites dans les différents projets ANR devraient permettre de faire des progrès significatifs sur la compréhension de ces liens. La coordination entre la source de pression, et donc la respiration, l'ouverture de la glotte et la vibration des plis vocaux nécessite d'être étudiée avec précision.

### **5.1.2.3 Lien entre activité laryngée et aérodynamique**

Cette étape peut facilement être mise en œuvre en acquérant des données synchrones des vibrations des plis vocaux à l'aide d'un EGG, ainsi que les données de flux et de pression d'air. Par exemple, il existe une relation peu étudiée entre le mécanisme de voisement et l'apparition du flux d'air nasal. Il sera alors possible de mieux appréhender le flux aérodynamique provenant des poumons, et de voir comment, une fois modulé par l'activité laryngée, il influence la pression acoustique de certains sons. Par ailleurs, des études menées par mes étudiants ont montré que l'apparition du voisement favorise la production de la nasalité.

### **5.1.2.4 Lien entre aérodynamique et forme du conduit vocal**

Les IRM sont actuellement le moyen le moins invasif pour obtenir une cartographie complète du conduit vocal en trois dimensions. À la suite des deux projets ANR obtenus par Yves Laprie, nous disposons d'une large base de données [Isaieva 2021] montrant les structures des conduits vocaux de plusieurs locuteurs pendant l'acte langagier. Il n'est pas possible de synchroniser les données IRM avec des données issues d'autres instruments, hormis le signal acoustique. Cependant, il est possible de prendre des données post-synchronisées pour un même sujet. Dans ce cas, il serait intéressant, en fonction des tailles des cavités estimées à partir de l'IRM, de faire le lien avec la pression intra-orale et intra-nasale ainsi que les flux d'air résultants. Par exemple, dans le cas des voyelles nasales du français, la pression intra-orale est un élément à maîtriser pour que le flux d'air passe à la fois par la cavité nasale et la cavité buccale. Mesurer les pressions dans la cavité buccale et au niveau du nez (à la sortie de la narine) permettrait d'estimer le moment où les pressions sont suffisantes pour produire les indices acoustiques permettant le couplage acoustique entre les cavités.

### **5.1.2.5 Lien entre résonances du conduit vocal et acoustique résultante**

Cette étape permettra de comprendre les ajustements fins du conduit vocal et les compensations que chaque individu réalise pour garantir les propriétés acoustiques attendues. Bien que je ne pense pas encore avoir toutes les connaissances et compétences nécessaires, cette dernière étape s'intègre parfaitement dans une demande de projet ANR ARTANY que nous avons soumise pour l'évaluation de 2025. Le consortium de ce projet réunit le Laboratoire IADI (INSERM U1254, Nancy), l'équipe Multispeech du LORIA (Nancy) et LPP.

Ces étapes seront validées, illustrées et complétées par la richesse de la base de données IRM [Isaieva 2021]. Cette base de données est unique, car elle permet de capter la dynamique temporelle de tous les articulateurs du conduit vocal, permettant ainsi des analyses fines des phénomènes d’anticipation et de coarticulation dans la parole naturelle. Pour des raisons pratiques, les différentes étapes de constitution de cette base de données multi-instrumentale ainsi que les protocoles seront basés sur le français. Cependant, elle sera enrichie ponctuellement par les données d’autres langues du monde et surtout elle pourra servir de référence pour comparer les données entre langues.

## 5.2 Données Multilingues

Mes différentes collaborations, que ce soit au LPP avec Shigeko Shinohara et Didier Demolin (phonéticien expérimental), ou à l’extérieur, au CRLAO, avec Katia Chirkova, m’ont permis de découvrir d’autres systèmes phonologiques bien plus complexes du point de vue physiologique que le français. Par exemple, au cours de ma formation linguistique, et de mes expériences sur la nasalité, j’ai longtemps pensé qu’il n’était pas possible de produire aérodynamiquement des phonèmes nasals sourds, sans vibration des plis vocaux. Mes collaborations avec des linguistes de terrain m’ont permis de réaliser que je me trompais, et qu’il existe des langues ayant dans leur inventaire des phonèmes nasals sourds, parfaitement identifiables.

Il est donc indispensable de confronter les données entre elles. Mes collaborations avec les linguistes de terrain sont pour moi, et pour mon projet de recherche, une chance d’observer d’autres phonèmes avec des réalisations différentes de celles du français, afin de tester les contraintes physiques et physiologiques dans le processus de production des phonèmes et de les confronter à la définition en trait distinctifs.

Pour le projet ANR PhoTon (2023-2026) dont la responsable est Katia Chirkova et dont je suis le porteur scientifique pour le LPP, nous cherchons à explorer et tester empiriquement des contrastes récemment découverts impliquant des sons laryngés dans les langues qiangiques et tibétiques (sino-tibétaines) de l’ouest du Sichuan, en Chine. Ces contrastes font partie des découvertes récentes les plus remarquables dans cette région multilingue [Chirkova 2022]. Compte tenu de leur rareté dans les langues du monde, ils sont d’un grand intérêt pour notre compréhension des sons produits au niveau du conduit vocal inférieur (niveau laryngé) et, plus généralement, pour la typologie des systèmes phonologiques. Ces contrastes peuvent également contribuer de manière significative à notre compréhension des changements sonores et des relations génétiques de diverses langues sino-tibétaines de l’ouest du Sichuan, dont la phylogénie est restée jusqu’à présent obscure. C’est une grande chance pour moi de pouvoir inclure ces données dans mon projet de recherche.

Pour mener à bien ce projet, nous avons déjà acquis des données de pression acoustique couplées à des données d’EGG et de vidéo [Chirkova 2024] lors d’une première campagne d’enregistrement sur le terrain. Nous souhaitons compléter ces enregistrements avec des données échographiques, nous permettant d’obtenir des images des mouvements de la surface de la langue. Ces enregistrements sont possibles grâce à des instrumentations non invasives et utilisables sur le terrain.

Si la seconde campagne d’enregistrements est réalisée avec succès nous espérons mener une dernière campagne d’enregistrement de données aérodynamiques nous permettant de donner une description physiologique des langues suivantes sur trois aspects et qui couvrirait les étapes 3, 4 et 5 décrites précédemment :

Tableau 1 : Langues enregistrées et à enregistrer

Langues	Variétés enregistrées	Contrastes laryngés rapportés précédemment	Description phonétique / phonologique détaillée disponible
Qiang	Mawo	✓	✓
	Zhimulin	✓	✓
	Xiaoxing	x	x
	Yonghe	x	x
	Longxi	x	x
Tibétique	Baima	✓	x
	Zhongu	x	x
	Kun sngon	x	x
	Chos-rje	✓	x

Tableau 2 : Nombre de locuteurs et instruments utilisés pour les langues enregistrées en 2024 (1ère mission de terrain) et à enregistrer

Langues	Variétés enregistrées	Nombre de locuteurs enregistrés en 2024	Instruments
Qiang	Mawo	12	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistreur audio
	Zhimulin	11	<input checked="" type="checkbox"/> un électroglottographe
	Xiaoxing	10	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistrement vidéo
	Yonghe	-	<input checked="" type="checkbox"/> un microphone externe
	Longxi	-	-
Tibétique	Baima	9	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistreur audio
	Zhongu	1	<input checked="" type="checkbox"/> un enregistrement vidéo
	Kun sngon	-	<input checked="" type="checkbox"/> un microphone externe
	Chos-rje	-	-

FIGURE 5.6 – Langues enregistrées en 2024 avec les instruments.

Ces données seront complétées par des données provenant de langues africaines. En collaboration avec Didier Demolin, nous avons pour projet de compléter des enregistrements de locuteurs de Mbugu (langue parlée en Tanzanie). Une campagne d'enregistrement de données a eu lieu en 2024 avec l'AeroMask [Demolin 2024], elle sera complétée par des enregistrements de locuteurs parlant différents dialectes du Congo et en procédant à des enregistrements multi-instruments par l'intermédiaire de l'opération PPC11 du Labex-EFL et du projet Sysori (CNRS). Nous acquerrons simultanément le flux d'air oral et nasal, la pression intra-orale, l'EGG et le signal acoustique. Le Mbugu se caractérise par la présence, dans son inventaire phonologique, de consonnes prénasalisées sourdes, nos premiers enregistrements ont montré la richesse de cette langue par ses particularités phonétiques.

Ce projet de recherche sera, avec ces différents d'enregistrement et ces différentes langues, l'occasion d'enrichir la base de données probablement unique au monde qui pourra ensuite être mise en ligne et à la disposition de tous les linguistes intéressés via des plateformes comme Cocoon.

### 5.3 Aspect clinique

Un autre volet de mon projet de recherche sera réalisé en étroite collaboration avec les chirurgiens et les orthophonistes de l'hôpital Foch. Cet aspect concerne le moyen terme.

L'acquisition de données articulatoires détaillées sera effectuée afin de développer des stratégies diagnostiques et thérapeutiques efficaces.

[Jiménez-Monsalve 2017] soulignent l'importance des mesures articulatoires dans la description des troubles de la voix, en particulier en ce qui concerne le contrôle moteur du conduit vocal et la coordination des articulateurs. La mesure du contrôle moteur de la parole est directement liée à l'évaluation de la sur-articulation et de la sous-articulation, car elle donne un aperçu de l'efficacité et de la coordination des articulateurs de la parole, ce qui est fondamental

pour la production de parole claire et intelligible.

Les données articulatoires sont indispensables et selon les pathologies, il faut les compléter avec d'autres explorations comme le flux d'air. À la suite d'une étude aérodynamique sur des patients souffrant de dystrophie musculaire occulopharyngée, j'ai montré qu'un flux d'air nasal constant même durant la production de phonèmes oraux n'est pas un indice efficace [Amelot 2006a]. Les tests de perception ont en effet montré que les phonèmes sont identifiés comme oraux malgré un flux d'air nasal positif. Seule une étude multi-instrumentale pourrait expliquer comment les locuteurs mettent en place des stratégies de compensation pour maintenir l'opposition entre phonème oral et phonème nasal.

Pour la première étape de mon projet de recherche clinique consistera à compléter une étude sur des patients atteints de PNS, dans la suite du travail d' [Elmerich 2024a]. La PNS, également appelée polypose nasale, est une maladie inflammatoire chronique affectant les sinus de la face. Elle se caractérise par une congestion des muqueuses nasales et sinusiennes. Les causes exactes sont encore mal comprises. La muqueuse des sinus s'épaissit en raison d'une multiplication anormale des cellules. Cela peut entraîner une gêne respiratoire, voire une perte d'odorat, selon le stade d'évolution de la maladie. De multiples polypes peuvent se développer dans les cavités nasales. Les effets de la PNS sur la production des phonèmes sont encore méconnus.

J'ai accès à des données aérodynamiques, acoustiques et articulatoires pour une cohorte de patients atteints de PNS, qui n'a pas encore été entièrement exploitée. Je travaille en collaboration avec Robin Baudouin, chirurgien ORL, qui peut régulièrement intégrer de nouveaux patients à cette cohorte. Les personnes atteintes de PNS ont souvent des polypes qui obstruent la cavité nasale et/les sinus. Mes connaissances sur les phénomènes de nasalité sont un atout précieux pour évaluer les difficultés de ces locuteurs.

À plus long terme, je pourrais mettre à profit ma collaboration active avec l'Hôpital Necker (Service de chirurgie maxillo-faciale) qui m'a fourni une grande quantité d'enregistrements acoustiques d'enfants avec une fente labio-palatine (20 enfants au total). Les fentes labio-palatines sont le plus souvent dues à une malformation congénitale, mais peuvent également apparaître à la suite d'un accident. Elles résultent d'une absence ou d'une insuffisance de fusion de la lèvre supérieure, du rebord alvéolaire (la gencive) du maxillaire, du palais osseux et du voile du palais. Pour pallier le déficit de l'alimentation du patient lié à une incapacité de déglutir, le chirurgien effectue une suture pour refermer les deux parties séparées. Cette chirurgie rétablit immédiatement la fonction de déglutition, mais elle perturbe la production de la parole, ce qui a des conséquences sociales importantes. Chaque année en France, environ 800 enfants naissent avec une fente labio-palatine. Il a été démontré qu'environ 30 à 40% de ces enfants présentent un retard d'acquisition de la lecture, et que 25% redoublent une classe ou arrêtent leurs études prématurément. Les modifications chirurgicales interviennent au niveau labial, alvéolaire, palatal ou vélaire et perturbent dans la plupart des cas la connexion entre la cavité nasale et la cavité orale. Elles altèrent donc les repères articulatoires, les résonances acoustiques et éventuellement la vibration des plis vocaux, ce qui rajoute un challenge supplémentaire à la PNS.

Les connaissances actuelles ne permettent pas de prévoir les conséquences acoustiques de la mise en couplage de la cavité nasale et orale qui résulte d'une fente labio-palatine. Plus généralement elles ne permettent pas de mesurer l'influence sur la production acoustique d'un système comportant une modification importante de la forme du conduit vocal en amont et en aval du voile du palais et notamment sa topologie avec l'apparition d'une bifurcation.

Je m'intéresse plus particulièrement à ces deux groupes de pathologies, PNS et fente labio-

palatine, mais à plus long terme, il sera possible de couvrir d'autres pathologies pour élargir potentiellement à toutes les modifications anatomiques du conduit vocal liées à une pathologie.

L'objectif attendu de ce volet de mon projet de recherche est de pouvoir confronter les données de locuteurs pathologiques à une base de données de référence, prises avec les mêmes instruments, avec les mêmes protocoles. La base de données multi-instrumentale acquise lors de mon projet de recherche à court et moyen terme pourrait servir de référence. Avoir une idée plus précise de l'altération physiologique lors de la production langagière chez les patients pourrait apporter des informations essentielles aux chirurgiens et aux orthophonistes.

Enrichir la base de données avec des enregistrements à l'aide d'instruments permettant des mesures articulatoires, électromyographiques de surface, aérodynamiques et acoustiques sur les patients est un véritable challenge. Cependant, cela permettra de mettre en évidence les différences de productions entre les populations et de mieux comprendre les mécanismes de production et les compensations mises en place dans la production des sons.

### 5.4 Les maquettes physiques tridimensionnelles statiques

Cette partie de mon projet de recherche fait suite à l'élaboration des protocoles pour les enregistrements multi-instrumentaux et a été rendue possible grâce à ma collaboration avec Yves Laprie. Pour ce projet de recherche, je vise à simuler le processus physique de la production des sons de parole via des maquettes physiques 3D statiques.

Il s'agit de générer une suite de formes du conduit vocal entier respectant les contraintes anatomiques que la maquette physique en 3D permet de maîtriser. Chaque dimension ou forme peut être imprimée avec une précision millimétrique, et il sera possible de modifier artificiellement une partie de la configuration pour comparer les caractéristiques acoustiques du signal produit avec celui produit par la forme originale, comme cela a été simulé avec succès par les [ORL](#) dans le passé avec le modèle articulatoire simplifié de Shinji Maeda. Ce dernier volet de mon projet de recherche porte sur le développement de maquettes statiques très précises d'un point de vue géométrique, afin de faire le lien avec l'acoustique produite.

Ce projet est divisé en cinq tâches qui sont :

1. enregistrements des locuteurs (voir la partie 1.2) ;
2. protocole de détourages pour la modélisation ;
3. construction de maquettes physiques à l'aide d'imprimantes 3D ;
4. implémentation de formes contraintes par l'anatomie du locuteur (voir la partie 3) ;
5. mise en place d'un banc acoustique pour créer une forme d'onde qui sera implémentée dans la maquette physique ;
6. comparaison des résultats obtenus les maquettes avec la réalité acoustique et avec des modèles articulatoires informatiques, comme le modèle [VocalTractLab](#) de [Peter Birkholz](#).

Certaines de ses tâches ont déjà démarré, cela permet d'être optimiste sur la faisabilité de ce projet.

#### 5.4.1 Description du protocole de détourage

Cette étape est fondamentale pour cette partie du projet et n'aurait pas pu voir le jour sans les collaborations avec le milieu hospitalier et le [Loria](#). Les coupes tomodynamométriques

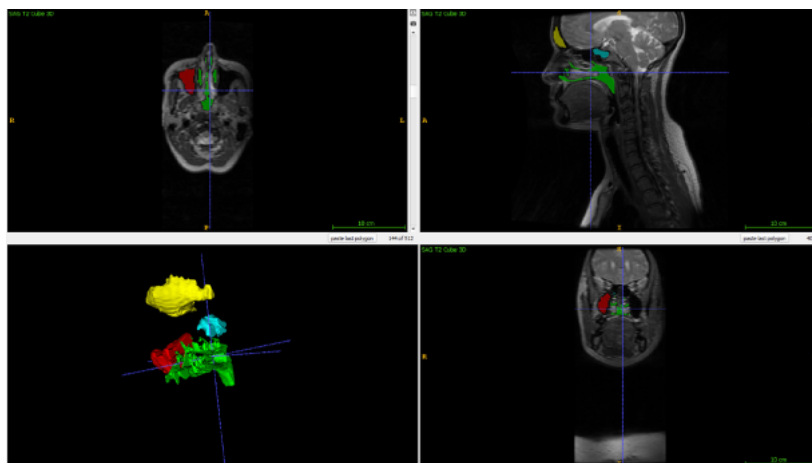


FIGURE 5.7 – Exemple de données issues d’un scanner sur un patient et détournage de la cavité nasale avec les sinus. Affichage obtenu à partir du logiciel ITK-Snap d’après [Elmerich 2024a].

sont importées dans une application utilisée pour segmenter les structures dans les images biomédicales 3D et 4D permettant ainsi de reconstruire les images du scanner ou des données IRM dans les trois plans de l’espace et de quantifier le volume. Il s’agit d’estimer la zone qui sera segmenter et extraite dans les trois plans en fichier stéréolithographique.

#### 5.4.2 Protocole pour la réalisation de la maquette

Pour cette tâche, qui a déjà débuté, il s’agit d’utiliser des images issues d’IRM et de scanner statiques obtenues pour différents locuteurs afin d’extraire la cavité vocale en trois dimensions. Ces détournages sont essentiels à la création de maquettes tridimensionnelles. La réalisation de ces maquettes s’inspire des travaux de [Chiba 1941] et d’[Araï 2001]. Les maillages des conduits buccal et nasal sont reconstruits automatiquement, puis corrigés manuellement. À partir de ces maillages, les maquettes physiques sont créées, imprimées en 3D et placées sur un banc expérimental créant une source voisée pour exciter la maquette. Il sera nécessaire, à cette étape, de comparer le signal acoustique sortant de la maquette physique au signal acoustique des sujets enregistrés préalablement. Je serai probablement confrontée à des problèmes de rigidité des parois, qu’il faudra résoudre. Ensuite, il sera important de modifier les maillages afin d’observer l’influence de la géométrie du conduit vocal (oral et nasal) sur l’acoustique. Par exemple, il s’agira de comprendre l’influence de l’abaissement du voile du palais, l’importance de la cavité nasale et des sinus sur la résonance acoustique, *etc.*

Au-delà du conduit vocal, je m’intéresse également à la modélisation de la cavité nasale. Les images d’IRM et de scanner donne de bonnes indications sur la forme de la cavité nasale ; la taille du cavum, des sinus, l’asymétrie gauche/droite de la cavité nasale. Il me semble important de trouver des méthodes pour expliquer l’impact acoustique de la cavité nasale et des sinus maxillaires dans la production de la parole. À ma connaissance, l’utilisation de maquettes physiques est l’une des seules possibilités pour estimer l’impact des sinus sur la résonance de la cavité nasale. Dans ce cadre, mon objectif est d’utiliser la même méthode que précédemment, mais cette fois-ci appliquée directement à la modélisation des sinus maxillaires et de la cavité nasale.

Les premiers travaux que j’ai effectué sur la modélisation des cavités sinusiennes concernent

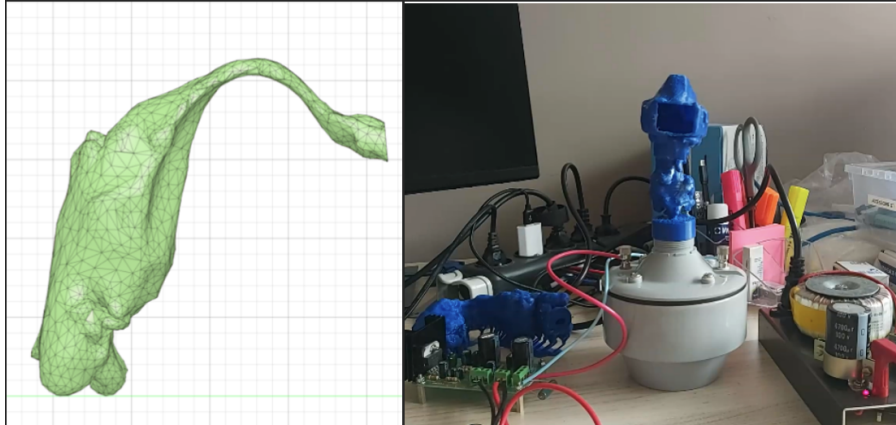


FIGURE 5.8 – À gauche illustration Maquette 3D de la voyelle /i/ ; à droite banc pour créer la source acoustique surmonté de la maquette 3D de /a/.

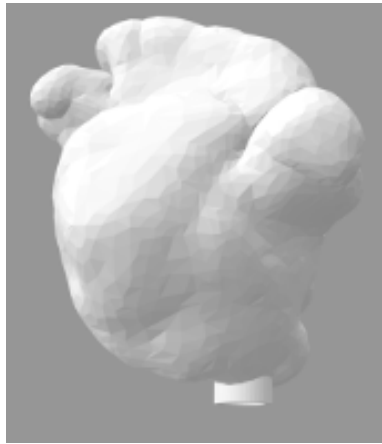


FIGURE 5.9 – Exemple d'un sinus maxillaire gauche d'un locuteur obtenu à parti du Scanner et modélisé puis imprimé en 3D, l'ostium a été rajouté artificiellement.

les sinus maxillaires et ont été menés avec Amélie Elmerich. Nous avons déjà élaboré plusieurs modèles tri-dimensionnels de sinus avec différents volumes nous permettant de les exciter acoustiquement. Le but est de calculer les résonances des fréquences des sinus et de faire le lien avec les données acoustiques. Nous utilisons des sinus modélisés à partir de données de scanner et des enregistrements acoustiques obtenus à partir de l'AeroMask, et ainsi voir si les données que nous calculons à partir des modélisations apparaissent sur le signal acoustique nasal des enregistrements. Nos premiers résultats indiquent des valeurs liées aux résonances des sinus et notamment du maxillaire sont assez complexes et dépendent de nombreux paramètres comme la forme, la longueur et le diamètre de l'ostium.

Pour cette tâche, j'ai développé un script Matlab qui permet de calculer les fréquences de résonances de Helmholtz à partir des valeurs obtenues sur les logiciels de détournage. Le script est disponible ([ici](#)). Il reste encore beaucoup d'étapes à franchir afin de caractériser au mieux les corrélats acoustiques de la nasalité qui pourraient être liés aux sinus. Mais ce domaine qui allie connaissances phonétiques, acoustiques, physiologiques et nouvelles technologies est passionnant.

Mon projet scientifique vise à mieux comprendre la production de la parole en combinant des données articulatoires, aérodynamiques, acoustiques et perceptives de manière multi-instrumentale. Une plateforme d'acquisition permettra d'étudier les liens entre les différents processus physiologiques impliqués, du niveau cérébral à la réalisation acoustique. Mon projet inclut également une dimension clinique, utilisant ces données pour étudier l'impact de certaines pathologies sur la production de la parole, ainsi que la construction de maquettes physiques 3D pour simuler l'effet de la géométrie du conduit vocal sur l'acoustique. Les données seront collectées en français mais aussi dans d'autres langues, afin de couvrir une plus grande diversité de réalisations phonétiques.

# Bibliographie

- [Al Kork 2014] S.K. Al Kork, A. Jaumard-Hakoun, M. Adda-Decker, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, P. Chawah, G. Dreyfus, T. Fux, C. Pillot-Loiseau et P. Roussel. *A Multi-Sensor Helmet to Capture Rare Singing, an Intangible Cultural Heritage Study*. In 10th International Seminar on Speech Production (ISSP), volume 1, pages 5–8, 2014.
- [Amelot 2002a] A. Amelot, P. Basset, L. Crevier-Buchman et B. Roubeau. *Nasalité En Français Spontané : Mesures Aérodynamiques et Fibroscopiques, Études Préliminaires*. In XXIVèmes Journées d’Etude sur la Parole (JEP), pages 361–364, 2002.
- [Amelot 2002b] A. Amelot, B. Roubeau, L. Crevier-Buchman et S. Maeda. *Prise de Données Simultanées Aérodynamiques et Fibroscopiques Durant La Production Des Voyelles Nasales : Comparaison Avec Des Données Prises Séparément*. In Journée d’Etude Sur La Parole, Fès, Maroc, 2002.
- [Amelot 2003] A. Amelot, L. Crevier-Buchman et S. Maeda. *Observations of Velopharyngeal Closure Mechanism in Horizontal and Lateral Direction from Fiberscopic Data*. In 15th International Congress of Phonetic Sciences, pages 3021–3024. University of Barcelona, 2003.
- [Amelot 2004a] A. Amelot. *Etude aérodynamique, fibroscopique, acoustique et perceptive des voyelles nasales du français*. PhD thesis, Université Sorbonne Nouvelle, Paris, 2004.
- [Amelot 2004b] A. Amelot, B. Roubeau, P. Basset, S. Maeda et L. Crevier-Buchman. *Etude Simultanée Des Mouvements Du Voile Du Palais et de l’ouverture Du Port Vélopharyngé*. In XXVIè Journées d’Etude sur la Parole (JEP), 2004.
- [Amelot 2006a] A. Amelot. *Étude Aérodynamique et Évaluation Perceptive Sur Des Patients Souffrant de Dystrophie Musculaire*. Diplôme InterUniversitaire. Directeur de Mémoire : Robert, Danielle, Toulouse, 2006.
- [Amelot 2006b] A. Amelot et P. Basset. *Anticipation de La Nasalité En Parole Spontanée*. In Colloque transdisciplinaire : retour sur l’anticipation, Hagueneau, 2006.
- [Amelot 2006c] A. Amelot et A. Michaud. *Effets Aérodynamiques Du Mouvement Du Velum : Le Cas Des Voyelles Nasales Du Français*. In Actes Des XXVIe Journées d’Etude de La Parole, Dinard (2006), pages pp–247. INRIA, 2006.
- [Amelot 2007a] A. Amelot, P. Basset, C. Vincent, S. Hans et L. Crevier-Buchman. *Les mouvements du voile du palais à la lumière d’une caméra ultrarapide*. In Premières Journées des Sciences de la Parole, 2007.

- [Amelot 2007b] A. Amelot et S. Rossato. *Velar Movements for Two French Speakers*. In 16th International International Seminar on Speech Production (ISSP), page 489, 2007.
- [Amelot 2007c] A. Amelot et B. Roubeau. *Etude Aérodynamique et Évaluation Perceptive Sur Des Patients Souffrant de Dystrophie Musculaire*. In Premières Journées Des Sciences de La Parole, 2007.
- [Amelot 2008] A. Amelot, P. Basset, S. Maeda, K. Honda et L. Crevier-Buchman. *Etude Simultanée Des Mouvements Du Voile Du Palais et de l'ouverture Du Port Vélopharyngé*. In XXVII<sup>e</sup> Journées d'Etude sur la Parole (JEP), pages 65–68, 2008.
- [Amelot 2009] A. Amelot. Dispositifs d'imagerie pour l'observation de l'activité vélo-pharyngée, pages 65–82. L'imagerie médicale pour l'étude de la parole, Hermès, 2009.
- [Amelot 2018] A. Amelot, D. Sathiyarayanan, S. Maeda, K. Honda et L. Crevier-Buchman. *Validation of a Noninvasive System to Observe Glottal Opening and Closing : External PhotoGlottograph (ePGG)*. In 11th International Conference on Voice Physiology & Biomechanics, 2018.
- [Amelot 2023a] A. Amelot, A. Elmerich, S. Maeda et L. Crevier-Buchman. *Présentation d'un Masque Acoustiquement Transparent Pour La Prise de Données Aérodynamiques*, 2023.
- [Amelot 2023b] A. Amelot, A. Ghio et D. Demolin. *Restoration of Portable Kymograph*. In 20th International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), pages 3226–3231, Prague, 2023.
- [Amelot 2024] A. Amelot, D. Demolin et A. Elmerich. *Instruments Used in Experimental Phonetics at the Beginning of the 20th Century at the Institute of Phonetics in Paris*. In Proc. HSCR 2024, pages 167–176, 2024.
- [Araï 2001] Takayuki Araï. *The Replication of Chiba and Kajiyama's Mechanical Models of the Human Vocal Cavity*. Journal of Phonetic of Japan, vol. 5, no. 2, pages 31–38, 2001.
- [Audibert 2011] N. Audibert et A. Amelot. *Comparison of Nasalance Measurements from Accelerometers and Microphones and Preliminary Development of Novel Features*. In INTERSPEECH 2011-12th Annual Conference of the International Speech Communication Association, pages 2825–2828, 2011.
- [Barbier 2022] H. Barbier, L. Redouloux, C. Chapuis-Vandenbogaerde, N. Kadlub, C. Fougeron et A. Amelot. *Étude de Normalisation et de Validation Du Nasomètre En Français Sur Une Population Pédiatrique (8-10 Ans). Comparaison Des Résultats Avec Un Dispositif Similaire Elaboré Par Le LPP (CNRS / Sorbonne Nouvelle)*. In XI<sup>e</sup>me Congrès de l'Association Francophone Des Fentes Faciales., Strasbourg, 2022.
- [Barbier 2024] H. Barbier, L. Redouloux, C. Chapuis-Vandenbogaerde, A. Picard, A. Amelot, C. Fougeron, E. Sanquer et N. Kadlub. *Normative Data on Nasalance Scores for French Speaking Children*. Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery, page 102089, Septembre 2024.
- [Basset 2001] P. Basset, A. Amelot, J. Vaissière et B. Roubeau. *Nasal Airflow in French Spontaneous Speech*. Journal of the International Phonetic Association, vol. 31, no. 1, pages 87–99, 2001.
- [Baudouin 2023] R. Baudouin, A. Amelot, Y. Laprie, L. Crevier-Buchman, S. Maeda, I. Huynh-Charlier, S. Hans et P. Charlier. *Henri IV of France's Larynx 3D Reconstitution*. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, vol. 280, no. 2, pages 919–924, 2023.

- [Baudouin 2024] R. Baudouin, A. Amelot, I. Huynh-Charlier, Q. Lisan, S. Hans et P. Charlier. *Three-Dimensional Reconstruction of King Henri IV's Paranasal Sinuses and Mastoid Cells*. *Clinical Anatomy*, vol. n/a, no. n/a, 2024.
- [Baudry 1864] F. Baudry. *De la science du langage et de son état actuel*. A. Durand, Paris, France, 1864.
- [Bell-Berti 1976] F. Bell-Berti. *An electromyographic study of velopharyngeal function in speech*. *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 19, pages 225–240, 1976.
- [Bell-Berti 1980] Fredericka Bell-Berti. *Velopharyngeal Function : A Spatial–Temporal Model*. In *Speech and Language*, volume 4, pages 291–316. Elsevier, 1980.
- [Bell 1858] A.M. Bell. *Letters and sounds*. The sounds, instead of the names of letters, are made the basis of instruction, and the lessons are strictly phonetic without new letters, or interference with ordinary spelling. A nursery and school book, 1858.
- [Benguereel 1974] André-Pierre Benguereel. *Nasal Airflow Patterns and Velar Coarticulation in French*. pages 105–112. Janvier 1974.
- [Bopp 1866] F. Bopp et M. Bréal. *Grammaire comparée des langues indo-européennes : comprenant le sanscrit, le zend, l’arménien, le grec, le latin, le lithuanien, l’ancien slave, le gothique et l’allemand*. Impr. Nation., Paris, France, 1866.
- [Borel-Maisonny 1970] Suzanne Borel-Maisonny. *Orthophonie*. *Bulletin du groupe d’acoustique musicale*, no. 46, 1970.
- [Bouvet 2017] A. Bouvet, A. Van Hirtum, X. Pelorson, S. Maeda, K. Honda et A. Amelot. *Calibration of External Lighting and Sensing Photoglottograph*. In *10th International Workshop Models and Analysis of the Vocal Emissions for Biomedical Applications (MAVEBA)*, 2017.
- [Bouvet 2019] A. Bouvet, A. Amelot, X. Pelorson, S. Maeda et A. Van Hirtum. *External Lighting and Sensing Photoglottography : Characterization and MSePPG Algorithm*. *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 51, pages 318–327, 2019.
- [Brkan 2011] A. Brkan, C. Pillot-Loiseau et A. Amelot. *Etude de la nasalité du FLE à l’aide d’un accéléromètre piézoélectrique chez les locutrices natives et bosniaques : comparaison des données du corpus IPFC et d’un corpus spécifique*. In *Journées IPFC (Inter Phonologie du Français Contemporain)*, 2011, 2011.
- [Brkan 2012] A. Brkan, A. Amelot et C. Pillot-Loiseau. *Utilisation d’un accéléromètre piezo-électrique pour l’étude de la nasalité du Français Langue Etrangère*. In *Journées d’Etude sur la Parole (JEP)*, volume 1, page 689, 2012.
- [Brkan 2018] Altijana Brkan. *Étude comparative des phénomènes de coarticulation nasale en anglais américain, bosnien, français, norvégien et ourdou*. PhD thesis, Université Sorbonne Paris Cité, 2018.
- [Bustamante Arango 2021] David Alejandro Bustamante Arango. *Perception et Production Des Voyelles Nasales Du Français Par Des Hispanophones d’Espagne et de Colombie*. These de doctorat, Paris 3, Octobre 2021.
- [Bustamante 2014] D. Bustamante, A. Amelot et C. Pillot-Loiseau. *Etude de la production des voyelles nasales du français chez des apprenantes espagnoles et colombiennes*. In *XXXème édition des Journées d’Etude sur la Parole (JEP)*, volume 1, page 576. LIUM, AFCEP, LINA, Juin 2014.

- [Charlier 2014] Philippe Charlier, Philippe Froesch, Isabelle Huynh-Charlier, Aurélie Fort, Agathe Hurel et Franz Jullien. *Use of 3D Surface Scanning to Match Facial Shapes against Altered Exhumed Remains in a Context of Forensic Individual Identification*. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, vol. 10, no. 4, pages 654–661, D?embre 2014.
- [Chawah 2014] P. Chawah, S. Al Kork, T. Fux, M. Adda-Decker, A. Amelot, N. Audibert, B. Denby, G. Dreyfus, A. Jaumard-Hakoun, C. Pillot-Loiseau, P. Roussel, M. Stone, K. Xu et L. Crevier-Buchman. *An Educational Platform to Capture, Visualize and Analyze Rare Singing*. In INTERSPEECH, 2014.
- [Chen 1997] Marilyn Y. Chen. *Acoustic Correlates of English and French Nasalized Vowels*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102, no. 4, pages 2360–2370, Octobre 1997.
- [Chiba 1941] T. Chiba. *The vowel, its nature and structure*. 1941.
- [Chifflet 1680] L. Chifflet. *Essay d’une parfaite grammaire de la langue françoise*. (sixième, dernière éd.), 1680.
- [Chirkova 2015] K. Chirkova, D. Wang, Y. Chen, A. Amelot et T. Kocjančič Antolík. *Ersu*. *Journal of the International Phonetic Association*, vol. 45, no. 2, pages 187–211, 2015.
- [Chirkova 2019] K. Chirkova, P. Basset et A. Amelot. *Voiceless Nasal Sounds in Three Tibeto-Burman Languages*. *Journal of the International Phonetic Association*, vol. 49, no. 1, pages 1–32, 2019.
- [Chirkova 2022] K. Chirkova, T. Kocjančič Antolík et A. Amelot. *Baima*. *Journal of the International Phonetic Association*, pages 1–30, 2022.
- [Chirkova 2023] K. Chirkova, P.-Y. Hou, R. Chirkova et A. Amelot. *Acoustic Correlates of Prominence in Kala Lizu (Tibeto-Burman)*. *Journal of Chinese Linguistics*, 2023.
- [Chirkova 2024] K. Chirkova, A. Elmerich et A. Amelot. *Tone and Phonation in Baima (Tibeto-Burman)*. Nankai, Chine, Octobre 2024.
- [Chomsky 1968] N. Chomsky et M. Halle. *The sound pattern of english*. Newyork Evanston London : Harper & Row, 1968.
- [Clements 2015] G.N. Clements, J. Vaissière, A. Amelot et J. Montagu. *The feature [nasal]*, pages 195–215. *Features in phonology and phonetics : unpublished work from George N. Clements and his colleagues*, De Gruyter Mouton Berlin, 2015.
- [Cohn 1990] Abigail C. Cohn. *Phonetic and Phonological Rules of Nasalization*. *UCLS Working Papers in Phonetics*, vol. 76, 1990.
- [Crevier-Buchman 2014a] L. Crevier-Buchman, T. Fux, A. Amelot, S.K. Kork, M. Adda-Decker, N. Audibert, P. Chawah, B. Denby, G. Dreyfus, A. Jaumard-Hakoun, P. Rousel, M. Stone, J. Vaissière, K. Xu et C. Pillot-Loiseau. *Acoustic Data Analysis from Multi-Sensor Capture in Rare Singing : Cantu in Paghjella Case Study*. In *In Proc. 1st Workshop on ICT for the Preservation and Transmission of Intangible Cultural Heritage, International Euro-Mediterranean Conference on Cultural Heritage (Euromed2014)*, volume 5, 2014.
- [Crevier-Buchman 2014b] L. Crevier-Buchman, T. Fux, C. Pillot-Loiseau, A. Amelot et M. Adda-Decker. *Measuring Vocal Tract Agility from Videofiberscopic Data : The Human BeatBox Example*. In *Voice Foundation Symposium*, page 16, 2014.

- [Crevier-Buchman 2015a] L. Crevier-Buchman, A. Amelot, S. K. Al Kork, M. Adda-Decker, N. Audibert, P. Chawah, B. Denby, T. Fux, A. Jaumard-Hakoun, P. Roussel, M. Stone, J. Vaissiere, K. Xu et C. Pillot-Loiseau. *Acoustic Data Analysis from Multi-Sensor Capture in Rare Singing : Cantu in Paghjella Case Study*. International Journal of Heritage in the Digital Era, vol. 4, no. 1, pages 121–132, 2015.
- [Crevier-Buchman 2015b] L. Crevier-Buchman, L. Garrigues, C. Pillot-Loiseau et A. Amelot. *Gestion des sons non pulmonaires et de l'inspiration dans le Human Beatbox*. In 71ème Congrès de la Société Française de Phoniatrie et des Pathologies de la Communication, 2015.
- [Crevier-Buchman 2021] L. Crevier-Buchman, A. Amelot, D. Demolin et C. Pillot-Loiseau. *Video-Fiberscopic Laryngopharyngeal Examination in Beatboxing*. In 13th Congress of the European Laryngological Society, 2021.
- [Dalston 1982] R. M. Dalston. *Photodetector Assessment of Velopharyngeal Activity*. The Cleft Palate Journal, vol. 19, no. 1, pages 1–8, Janvier 1982.
- [Dauzat 1908] A. Dauzat. *La langue française d'aujourd'hui : évolution, problèmes actuels*. Librairie Armand Colin, Paris, France, 1908.
- [Delattre 1954] P. Delattre. *Les attributs acoustiques de la nasalité vocalique et consonantique*. Studia Linguistica. Revue de linguistique générale et comparée, vol. 8, pages 103–109, 1954.
- [Delvaux 2007] Véronique Delvaux, A. Amelot et S. Rossato. *Nasal Processes at the Interface between Phonetics and Phonology*. In Proceedings of the 16th International Congress of Phonetic Sciences, pages 245–248, 2007.
- [Demasi 2016] R. Demasi, A. Amelot, L. Crevier-Buchman et D. Demolin. *A Nasograph and Fibrescopic Analysis of Nasal Diphthongs in Brazilian Portuguese*. volume 140, pages 3107–3107, 2016.
- [Demasi 2019] R. Demasi, D. Demolin, A. Amelot et L. Crevier-Buchman. *A Nasofiberscopic Study of Nasalized Diphthongs in Brazilian Portuguese*. In International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), 2019.
- [Demasi 2023] Rita de Cassia Demasi. *Dynamic Modeling of the Velopharyngeal Trajectory in Brazilian Portuguese Nasal Diphthongs*. These en préparation, Paris 3, 2023.
- [Demolin 2016] D. Demolin, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, T. Rojas et E. Diaz. *The Vowel System of Nasa Yuwe*. volume 140, pages 3106–3106, Octobre 2016.
- [Demolin 2024] D. Demolin et A. Amelot. *Les modifications du langage dans le parler de Celfrouin du 19è au 21è siècle*. In Colloque anniversaire en hommage à l'abbé Rousselot : de la création au rayonnement de la phonétique expérimentale, Institut Catholique de Paris (France), 28 et 29 octobre 2024.
- [Denes 1960] P.B. Denes et E.N. Pinson. *La chaîne de communication verbale : Physique et biologie du langage*. Laboratoires du Téléphone Bell, 1960.
- [Durand 1953] Marguerite Durand. *De La Formation Des Voyelles Nasales*. Studia Linguistica, vol. 7, no. 1-2, pages 33–53, Juin 1953.
- [Elie 2019] B. Elie, A. Amelot, Y. Laprie et S. Maeda. *Glottal Opening Measurements in VCV and VCCV Sequences*. In ICA 2019 - 23rd International Congress on Acoustics, Septembre 2019.

- [Elmerich 2020a] A. Elmerich, A. Amelot et L. Crevier-Buchman. *Approche multidimensionnelle de la nasalité : prototypage d'un masque pour les données aérodynamiques et acoustiques*. In Rencontre Jeunes Chercheurs, Juin 2020.
- [Elmerich 2020b] A. Elmerich, A. Amelot et L. Crevier-Buchman. *Modifications des flux aérodynamiques de la parole après chirurgie naso-sinusienne*. In 6e conférence conjointe Journées d'Études sur la Parole (JEP, 33e édition), Volume 1, page 199. ATALA ; AFCP, 2020.
- [Elmerich 2020c] A. Elmerich, A. Amelot, S. Maeda, Y. Laprie, J.-F. Papon et L. Crevier-Buchman. *F1 and F2 Measurements for French Oral Vowel with a New Pneumotachograph Mask*. In ISSP 2020 - 12th International Seminar on Speech Production, D ?embre 2020.
- [Elmerich 2021] A. Elmerich, A. Amelot, L. Crevier-Buchman et J.-F. Papon. *La polypose naso-sinusienne : perturbation aérodynamique et mesures de qualité de vie. Étude de cas et perspectives*. In Journées de Phonétique Clinique, Mai 2021.
- [Elmerich 2023a] A. Elmerich, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, S. Maeda et J.-F. Papon. *La polypose naso-sinusienne : impacts spectraux. Étude préliminaire*. In Actes des 9èmes Journées de Phonétique Clinique, 2023.
- [Elmerich 2023b] A. Elmerich, A. Amelot, S. Maeda, L. Crevier-Buchman et J.-F. Papon. *Rôle Des Sinus Maxillaires Dans Les Résonances Acoustiques de La Cavité Nasale*, 2023.
- [Elmerich 2023c] A. Elmerich, J. Gao, A. Amelot, L. Crevier-Buchman et S. Maeda. *Combining Acoustic and Aerodynamic Data Collection : A Perceptual Evaluation of Acoustic Distortions*. In Interspeech 2023, Dublin, Ireland, Ao ?t 2023.
- [Elmerich 2023d] A. Elmerich, L. Kim, C. Gendrot, A. Amelot, L. Crevier-Buchman et S. Maeda. *Nasality Detection from Acoustic Data with a Convolutional Neural Network and Comparison with Aerodynamic Data*. In Proceedings of the 20th International Congress of Phonetic Sciences, Guarant International, pages 3151–3155. Radek Skarnitzl & Jan Volín (Eds.), 2023.
- [Elmerich 2024a] A. Elmerich. *Evaluation multiparamétrique de la nasalité à travers quatre axes : aérodynamique, acoustique, volumétrique et perceptif*. PhD thesis, Université Sorbonne Nouvelle, 2024.
- [Elmerich 2024b] Amélie Elmerich. *Évaluation multiparamétrique de la nasalité : Conception et utilisation d'un masque aérodynamique appliquée à une population témoin et pathologique : l'AeroMask*. École Doctorale 622 - « Sciences du langage », Université Sorbonne Nouvelle, Paris, France, 2024.
- [Esling 2019] John H. Esling, Scott R. Moisik, Allison Benner et Lise Crevier-Buchman. *Voice quality : The laryngeal articulator model*. Cambridge Studies in Linguistics. Cambridge University Press, 2019.
- [Fant 1973] G. Fant. *Speech sounds and features*. The MIT Press, 1973.
- [Fersing 2024] C. Fersing, D. Thevarajah, E. Sanquer, C. Chapuis, A. Amelot, C. Fougeron, L. Aljancic, A. Picard et N. Kadlub. *Validation of an Objective Assessment Tool for Velopharyngeal Insufficiency in Cleft Lip and Palate Children*. Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery, page 101968, Juillet 2024.

- [Fleisch 1925] Alfred Fleisch. *Der Pneumotachograph; ein Apparat zur Geschwindigkeitsregistrierung der Atemluft*. Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, vol. 209, no. 1, pages 713–722, D?embre 1925.
- [Fougeron 2023] C. Fougeron, A. Amelot et A. Rialland. *On the History of the Phonetic Institute of the Universite de Paris from 1911 to 1950*. In Proceedings of the 20th International Congress of Phonetic Sciences, pages 3226–3230, Prague, 2023. Radek Skarnitzl & Jan Volín.
- [Fujimura 1962] O. Fujimura. *Analysis of nasal consonants*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 34, no. 1865-1875, 1962.
- [Fux 2014] T. Fux, A. Amelot, C. Pillot-Loiseau et M. Adda-Decker. *On the Use of Accelerometer Sensors to Study Nasalisation in Speech and Singing Voice*. In International Seminar on Speech Production (ISSP 2014), Mai 2014.
- [Gao 2011] Jiayin Gao, Pierre Hallé, Kiyoshi Honda, S. Maeda et M. Toda. *Shanghai Slack Voice : Acoustic and ePGG Data*. In 17th ICPhSth, Ao?t 2011.
- [Ghio 2002] Alain Ghio et Bernard Teston. *Caractéristiques de La Dynamique d'un Pneumotachographe Pour l'étude de La Production de La Parole : Aspects Acoustiques et Aérodynamique*. In Journées d'Etude Sur La Parole, pages 337–340, Nancy, France, 2002. INRIA et AFCP.
- [Hardcastle 1976] W.J. Hardcastle. *Physiology of speech production : An introduction for speech scientists*. Academic Press, 1976.
- [Hardcastle 1989] W.J. Hardcastle et A. Marchal, editeurs. *Speech production and speech modelling*. william j. hardcastle and alain marchal (eds.). dordrecht : Kluwer academic, 1990. pp. xi + 448. 128.00., volume 15. *Dordrecht : Kluwer Academic*, 1989.
- [Herrgott 2014] C. Herrgott, M. Adda-Decker, S. Al Kork, A. Amelot, P. Chawah, T. Fux, B. Denby et L. Crevier-Buchman. *Transmission of Traditional Corsican Cantu in Paghjella : What Role for Technology ?* In In Proc. 1st Workshop on ICT for the Preservation and Transmission of Intangible Cultural Heritage, International Euro-Mediterranean Conference on Cultural Heritage (Euromed2014), Corse, 2014.
- [Hirano 1966] M. Hirano, Y. Takeuchi et I. Hiroto. *Intranasal Sound Pressure during Utterance of Speech Sounds*. Folia Phoniatica, vol. 18, no. 5, pages 369–381, 1966.
- [Honda 2006] K. Honda, S. Maeda, S. Hans et L. Crevier-Buchman. *A Photoglottographic (PGG) Method with External Lighting and Sensing*. volume 120 of *The Journal of the Acoustical Society of America*, page 3353, Novembre 2006.
- [Horii 1980] Y. Horii. *An Accelerometric Approach to Nasality Measurement : A Preliminary Report*. The Cleft Palate Journal, vol. 17, no. 3, pages 254–261, 1980.
- [Howard 2020] D. M. Howard, J. Schofield, J. Fletcher, K. Baxter, G. R. Iball et S. A. Buckley. *Synthesis of a Vocal Sound from the 3,000 Year Old Mummy, Nesyamun 'True of Voice'*. Scientific Reports, vol. 10, no. 1, page 45000, Janvier 2020.
- [Howells 1973] W.W. Howells. *Cranial variation in man. a study by multivariate analysis of patterns of differences among recent human populations*. papers of the peabody museum of archeology and ethnology, volume 67. Cambridge, Mass. : Peabody Museum, 1973.
- [Hyunsoon 2017] K. Hyunsoon, S. Maeda, K. Honda et L. Crevier-Buchman. *The Mechanism and Representation of Korean Three-Way Phonation Contrast : External Photoglottography, Intra-Oral Air Pressure, Airflow, and Acoustic Data*. Phonetica, vol. 75, no. 1, pages 57–84, 2017.

- [Isaieva 2021] K. Isaieva, Y. Laprie, J. Leclère, I.K. Douros, J. Felblinger et P.A. Vuissoz. *Multimodal dataset of real-time 2D and static 3D MRI of healthy French speakers*. Science Data, vol. 8, no. 1, page 258, 2021.
- [Jaeger 1993] C. Jaeger. *Dystrophie Myotonique de Steinert*. Evry : Association française contre les myopathies, 1993.
- [Jakobson 1976] R. Jakobson, G. Fant et M. Halle. Preliminaries to speech analysis. Massachusetts institute of technology, Cambridge, 1976. Comprend des notes bibliogr. Index : p. 62-64.
- [Jaumard-Hakoun 2013] A. Jaumard-Hakoun, S. K. Al Kork, M. Adda-Decker, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, G. Dreyfus, T. Fux, P. Roussel, C. Pillot-Loiseau, Maureen Stone et B. Denby. *Capturing, Analyzing, and Transmitting Intangible Cultural Heritage with the i-Treasures Project*. In Ultrafest VI, page 1, Novembre 2013.
- [Jiménez-Monsalve 2017] J. C. Jiménez-Monsalve et et al. *Phonation and Articulation Analyses in Laryngeal Pathologies*. Cleft Lip and Palate, and Parkinson’s Disease. In Biomedical Applications Based on Natural and Artificial Computing, vol. 10338, pages ISBN : 978-3-319-59772-0., 2017.
- [Kamiyama 2011] Takeki Kamiyama, Barbara Kühnert et Jacqueline Vaissière. *Do French-speaking learners simply omit the English /h/?* 2011.
- [Kim 2023] L. Kim, C. Gendrot, A. Elmerich, A. Amelot et S. Maeda. *Détection de la nasalité du locuteur à partir de réseaux de neurones convolutifs et validation par des données aérodynamiques*. In 18e Conférence en Recherche d’Information et Applications – 16e Rencontres Jeunes Chercheurs en RI – 30e Conférence sur le Traitement Automatique des Langues Naturelles – 25e Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement Automatique des Langues, page 101. ATALA, 2023.
- [Klossek 2005] J. M. Klossek, F. Neukirch, C. Pribil, R. Jankowski, E. Serrano, I. Chanal et A. El Hasnaoui. *Prevalence of Nasal Polyposis in France : A Cross-Sectional, Case-Control Study*. Allergy, vol. 60, no. 2, pages 233–237, Février 2005.
- [Koenig 1889] R. Koenig. Catalogue des appareils d’acoustique construits par Rudolph Koenig. Paris, France, 1889.
- [Kummer 1992] A. W. Kummer, C. Curtis, M. Wiggs, L. Lee et J. L. Strife. *Comparison of Velopharyngeal Gap Size in Patients with Hypernasality, Hypernasality and Nasal Emission, or Nasal Turbulence (Rustle) as the Primary Speech Characteristic*. The Cleft Palate-Craniofacial Journal : Official Publication of the American Cleft Palate-Craniofacial Association, vol. 29, no. 2, pages 152–156, Mars 1992.
- [Landron 2013] S. Landron, A. Amelot et C. Pillot-Loiseau. *Comparaison des pourcentages de présence de barre de voisement sur les occlusives voisées du français /b, d/ entre trois apprenantes avancées d’origine taiwanaise et trois natives du français*. In 27ème Congrès International de Linguistique et de Philologie Romanes., volume Section 3 : Phonétique, phonologie, morphophonologie et morphologie, Nancy, ATILF, page 77, 2013.
- [Léon 2010] P. Léon et M. Léon. *Le Couple Fouché-Mercier Ou l’art de La Maïeutique*. Documents pour l’histoire du français langue étrangère ou seconde, no. 44, pages 79–87, Janvier 2010.
- [Lilly 1950] J.C. Lilly. *Flow Meter for Recording Respiratory Flow of Human Subjects*. Method Med Res, vol. 2, page 113, 1950.

- [Lovatto 2007] L. Lovatto, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, P. Basset et J. Vaissière. *A Fiberscopic Analysis of Nasal Vowels in Brazilian Portuguese*. In Proceedings of the 16th International Congress of Phonetic Sciences, page 549, 2007.
- [Lovatto 2008] L. Lovatto, A. Amelot et P. Basset. *La hauteur du voile du palais durant trois voyelles nasales en Portugais Brésilien en fonction de l'entourage consonantique, de la position dans le mot et par rapport à l'accent*. In Rencontres Jeunes Chercheurs, 2008.
- [Maddieson 1984] Ian Maddieson. Patterns of sounds, volume 22. Cambridge University Press, Cambridge, 1984.
- [Maeda 2008] S. Maeda, A. Amelot et P. Basset. *Technique de photonasographie pour l'estimation de l'ouverture du port vélopharyngé*, 2008.
- [Marage 1900] R. Marage. Théorie de la formation des voyelles. 1900.
- [Marey 1868] É.-J. Marey. Du mouvement dans les fonctions de la vie : leçons faites au Collège de France. France, 1868.
- [Marey 1878] É.-J. Marey. La méthode graphique dans les sciences expérimentales et particulièrement en physiologie et en médecine. G. Masson, Paris, France, 1878.
- [Marey 1898] É.-J. Marey. *Inscription des phénomènes phonétiques. Première partie : méthodes directes*. Revue Générale des Sciences pures et appliquées, no. 11, pages 445–456, 1898.
- [Marichelle 1897] H. Marichelle. La Parole d'après le tracé du phonographe. Delagrave, Paris, 1897.
- [Marichelle 1902] H. Marichelle. La Chronophotographie de la parole. Atelier typographique de l'Institution nationale des sourds-muets, Paris, 1902.
- [Mersenne 1636] M. Mersenne. Harmonie universelle, contenant la theorie et la pratique de la musique, où il est traité de la nature des sons, & des mouvemens, des consonances, des dissonances, des genres, des modes, de la composition, de la voix, des chants, & de toutes sortes d'instrumens harmoniques. Paris, France, chez sebastien cramoisy, imprimeur ordinaire du roy édition, 1636.
- [Michaud 2006] A. Michaud, T. Vu-Ngoc, A. Amelot et B. Roubeau. *Nasal Release, Nasal Finals and Tonal Contrasts in Hanoi Vietnamese : An Aerodynamic Experiment*. Mon-Khmer Studies, vol. 36, pages pp–121, 2006.
- [Miklošič 1852] F. Miklošič. Vergleichende grammatik der slavischen sprachen. Založba ZRC, Wien, 1852.
- [Moisik 2015] S. Moisik, J. Esling, L. Crevier-Buchman, A. Amelot et P. Halimi. *Multimodal Imaging of Glottal Stop and Creaky Voice : Evaluating the Role of Epilaryngeal Constriction*. In International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), 2015.
- [Montagu 2005] J. Montagu et A. Amelot. *Comparaison Des Apports de Différentes Méthodes d'enregistrement de La Nasalité*. In Rencontre Jeunes Chercheurs, pages 17–21. Université Paul Sabatier, Toulouse, 2005.
- [Montagu 2007] Julie Montagu. *Analyse acoustique et perceptive des voyelles nasales et nasalisées du Français parisien*. PhD thesis, 2007. 2007PA030148.
- [Ohala 1971] John J. Ohala. *Monitoring Soft Palate Movements in Speech*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 50, no. 1A\_Supplement, pages 140–140, Juillet 1971.
- [Ohala 1974] John Ohala. *A Mathematical Model of Speech Aerodynamics*. Annual Report of the Institute of Phonetics of the University of Copenhagen, vol. 8, 1974.

- [Pillot-Loiseau 2010a] C. Pillot-Loiseau, A. Amelot et F. Fredet. *Apports de La Phonétique Expérimentale à La Didactique de La Prononciation Du Français Langue Étrangère : Étape 1 : Réflexion Autour de l'établissement d'un Corpus*. Les Cahiers de l'APLIUT, no. Vol. XXIX N° 2, pages 75–88, Juin 2010.
- [Pillot-Loiseau 2010b] C. Pillot-Loiseau, A. Amelot et F. Fredet. *Contributions of Experimental Phonetics to the Didactics of the Pronunciation of the French as a Foreign Language : Stage 1 : Reflection around the Establishment of a Speaking Materials*. pages 3–5, 2010.
- [Pillot-Loiseau 2016] C. Pillot-Loiseau, P. Chawah, A. Amelot, Grégoire Bachman, Herrgott Catherine, M. Adda-Decker et L. Crevier-Buchman. *Production des voyelles parlées et chantées dans le Cantu in Paghjella*. In Journées d'Etude sur la Parole (JEP), page 545, Juillet 2016.
- [Pillot-Loiseau 2020] C. Pillot-Loiseau, L. Garrigues, D. Demolin, T. Fux, A. Amelot et L. Crevier-Buchman. *Le Human Beatbox Entre Musique et Parole : Quelques Indices Acoustiques et Physiologiques*. Volume!, no. 16 : 2 / 17 : 1, pages 125–143, Juin 2020.
- [Randall 1960] Peter Randall, Frank P. Bakes et Charles Kennedy. *Cleft Palate-Type Speech in the Absence of Cleft Palate*. Plastic and Reconstructive Surgery, vol. 25, no. 5, page 484, Mai 1960.
- [Ridouane 2012] R. Ridouane, N. Audibert et V.M. Nguyen. *Les Ajustements Laryngaux En Français (Laryngeal Adjustments in French) [in French]*. In Laurent Besacier, Benjamin Lecouteux et Gilles Sérasset, editeurs, Proceedings of the Joint Conference JEP-TALN-RECITAL 2012, Volume 1 : JEP, pages 249–256, Grenoble, France, Juin 2012. ATALA/AFCP.
- [Rosapelly 1876] C.L. Rosapelly. Inscrition des mouvements phonétiques, volume 2, pages 109–130. Travaux Du Laboratoire de Marey, 1876.
- [Rossato 2007] S. Rossato et A. Amelot. *Velar Movements and the Feature [+nasal] in French*. In International Conference "Where Do Features Come From?", Septembre 2007.
- [Rousselot 1891] Pierre-Jean Rousselot. Les modifications phonétiques du langage étudiées dans le patois d'une famille de Cellefrouin (Charente) : thèse présentée à la Faculté des lettres de Paris. H. Welter, Paris, France, 1891.
- [Rousselot 1897] P.-J. Rousselot. Principes de phonétique expérimentale. H. Welter, Paris, France, Pays multiples, 1897.
- [Rousselot 1911] P.-J. Rousselot. *Phonétique Expérimentale et "Instrumentalphonetik"*. Revue de Phonétique, vol. 1, pages 11–16, 1911.
- [Rousselot 1922] P.-J. Rousselot. La phonétique expérimentale : Leçon d'ouverture du cours professé au Collège de France. Boivin,, Paris, France, 1922.
- [Salomonson 1988] J. Salomonson, H. Kawamoto et L. Wilson. *Velopharyngeal Incompetence as the Presenting Symptom of Myotonic Dystrophy*. The Cleft Palate Journal, vol. 25, no. 3, pages 296–300, Juillet 1988.
- [Seara 2012] I. Christine Seara et A. Amelot. *Dados aerodinâmicos e acústicos e a representação fonológica da vogal nasal no PB*. In IV Seminário Internacional de Fonologia, 2012, Porto Alegre, page 5, D?embre 2012.
- [Sefton 2005] S.E. Sefton et P.S. Beddor. *Nasals and nasalization : The interplay between segmental duration and coarticulation*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 117, page 2620, 2005.
- [Shinohara 2022] S. Shinohara, Q. Hussain et A. Amelot. *Étude acoustique et aérodynamique des consonnes géminées nasales sourdes du parler d'ikema-miyako des langues ryukyu en voie de disparition*. In 19èmes rencontres du Réseau Français de Phonologie, Juin 2022.

- [Shinohara 2023] S. Shinohara, A. Amelot et Q. Hussain. *Positional asymetry in length and voicing cues in the alveolar plosives of Ikema Miyako Ryukyuan*. In Radek Skarnitzl et Jan Volín, éditeurs, The 20th International Congress of Phonetic Sciences, Prague 2023, pages 2254–2258, Prague, Czech Republic, 2023. Guarant International.
- [Stevens 1975] K. N. Stevens, D. N. Kalikow et T. R. Willemain. *A Miniature Accelerometer for Detecting Glottal Waveforms and Nasalization*. *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 18, no. 3, pages 594–599, Septembre 1975.
- [Straka 1965] Georges Straka. *Album phonétique*. Québec : Presses de l’université laval édition, 1965.
- [Styler 2017] Will Styler. *On the Acoustical Features of Vowel Nasality in English and French*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 142, pages 2469–2482, Octobre 2017.
- [Sundberg 1987] Johan Sundberg. *The Science of the Singing Voice*. Northern Illinois University Press, 1987.
- [Teston 2009] B. Teston. *Histoire de phonétique clinique*, 2009.
- [Teston 2010] B. Teston. *Le Rôle d’Étienne-Jules Marey Dans l’émergence de La Phonétique Expérimentale*. In *Un Siècle de Phonétique Expérimentale, Fondation et Éléments de Développement : Hommage à Théodore Rosset et John Ohala*, pages 59–89. Lyon, France, ens éditions édition, 2010.
- [Trubetzkoy 1939] N.S. Trubetzkoy. *Principles of phonology*. Universty of California Press, 1939.
- [Vaissière 1986] Jacqueline Vaissière. *Comment on ‘Invariance and Variability in Speech Production : A Distinction between Linguistic Intent and Its Neuromotor Implementation’ by J. H. Abbs*. page 220. Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
- [Vaissiere 1998] Jacqueline Vaissiere, Patricia Basset, Tsu-Tin Su, Angélique Amelot et Olivier Corbin. *corpus AUPELF-UREF*, 1998.
- [Vaissière 2007] J. Vaissière. *Demande d’équipement Mi-Lourd, Document Interne*. Rapport technique, Laboratoire de Phonétique et Phonologie, Paris, France, 2007.
- [Vaissière 2009] J. Vaissière et A. Amelot. *Problems in the Interpretation of the Data Related to Nasality*, 2009.
- [Vaissière 2010] J. Vaissière, K. Honda, A. Amelot, S. Maeda et L. Crevier-Buchman. *Multisensor Platform for Speech Physiology Research in a Phonetics Laboratory*. no. 2, 2010.
- [Vilain 2010] C.E. Vilain, L.-J. Boë et F. Préfacier Carton. *Un siècle de phonétique expérimentale, fondation et éléments de développement : hommage à Théodore Rosset et John Ohala*. ENS éditions, Lyon, France, 2010.
- [Vincent 2010] C. Vincent, A. Amelot, L. Crevier-Buchman, C. Fougeron, K. Honda, G. Lo Bue, S. Maeda et J. Vaissière. *PEP2, La Plateforme d’Étude Physiologique de La Parole Du Laboratoire de Phonétique et Phonologie*. In *5e Colloque Interdisciplinaire En Instrumentation (C2i 2010)*, pages 751–759. Hermès-Lavoisier, 2010.
- [Warren 1964] Donald W. Warren et Arthur B. DuBois. *A Pressure-Flow Technique for Measuring Velopharyngeal Orifice Area During Continuous Speech*. *The Cleft Palate Journal*, vol. 1, no. 1, pages 52–71, Janvier 1964.
- [Young 1807] T. Young. *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*. Johnson, London, pays inconnu, 1807.
- [Zamora 1967] V. Zamora. *Dialectología española*. GREDOS, Madrid, 1967.



# Annexe

L'ensemble des documents cités dans le texte sont disponibles sur un drive CNRS à cette adresse : <https://sdrive.cnrs.fr/s/oFXJCDLBAHF6Laj>

Les documents sont répartis ainsi :

- Annexes
- Encadrement
- Publications
- Scripts
- Syllabus
- These



**Résumé :**

Ce manuscrit, intitulé « Des données multi-instrumentales, multilingues, normales et pathologiques aux maquettes tridimensionnelles statiques », présente mon activité d'ingénieur de recherche au CNRS et mon travail scientifique sur la production des sons du langage. Il détaille l'analyse des phonèmes nasals du français, leurs propriétés acoustiques, aérodynamiques et articulatoires, ainsi que leur réalisation dans des langues rares. Il décrit également les recherches que j'ai menées sur l'apprentissage du français langue étrangère, l'analyse de l'activité laryngée pour la parole et le chant. Enfin, il expose mon projet de développement d'une plateforme multi-instrumentale pour l'acquisition de données synchronisées de la parole, normales et pathologiques, afin de créer une base de données multilingue et multi-instrumentale.

**Abstract :**

This manuscript, titled "From Multi-instrumental, Multilingual, Normal and Pathological Data to Static Three-Dimensional Models," presents my work as a research engineer at the CNRS and my scientific research on the production of speech sounds. It details the analysis of French nasal phonemes, their acoustic, aerodynamic, and articulatory properties, as well as their realization in rare languages. It also describes my research on French as a foreign language learning, the analysis of laryngeal activity for speech and singing. Finally, it outlines my project to develop a multi-instrumental platform for the synchronized acquisition of normal and pathological speech data, to create a multilingual and multi-instrumental database.