Production des consonnes plosives du français : du contrôle des bruits de plosion

Thibault Cattelain

▶ **To cite this version:**

Thibault Cattelain. Production des consonnes plosives du français : du contrôle des bruits de plosion. Linguistique. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAS011 . tel-02418881

HAL Id: tel-02418881
https://theses.hal.science/tel-02418881

Submitted on 19 Dec 2019

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.

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **SCIENCES COGNITIVES, PSYCHOLOGIE COGNITIVE, NEUROCOGNITION (PCN)**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Thibault CATTELAIN

Thèse dirigée par **Pascal PERRIER, Professeur Université Grenoble Alpes, Laboratoire GIPSA**,
et codirigée par **Maëva GARNIER, CR CNRS, Laboratoire GIPSA**

préparée au sein du **Laboratoire GIPSA, Département Parole et Cognition**
dans **l'École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement (EDISCE)**

Production des consonnes plosives du français : du contrôle des bruits de plosion

Thèse soutenue publiquement le **24 juin 2019,**
devant le jury composé de :

M. Yves LAPRIE
DR CNRS, LORIA Nancy, Rapporteur
Mme. Véronique DELVAUX
Chercheuse FNRS, Université de Mons (Belgique), Rapporteuse
M. Rafaël LABOISSIÈRE
CR CNRS, LPNC Grenoble, Examinateur et Président du Jury
M. Alain GHIO
IR CNRS, LPL Aix-en-Provence, Examinateur
M. Pierre BADIN
DR CNRS, GIPSA-lab, Grenoble, Examinateur
M. Pascal PERRIER
Professeur Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse
Mme. Maëva GARNIER
CR CNRS, GIPSA-lab Grenoble, Co-Directrice de thèse

RESUMÉ

L'étude de la production des consonnes occlusives (/p/, /b/, etc) a un intérêt particulier pour la compréhension du contrôle moteur de la production de la parole. En effet, la production de ces consonnes requiert une coordination fine des 3 niveaux de production : respiration, vibration des cordes vocales, articulation.
L'objectif de mes travaux de thèse est d'étudier la coordination des gestes respiratoires, laryngés et articulatoires permettant de contrôler la variation de certains traits acoustiques des consonnes occlusives, plus spécifiquement les caractéristiques acoustiques de leurs bruits de plosion (intensité, durée, spectre, cruciaux pour l'intelligibilité des consonnes occlusives). Une partie importante de mes travaux de thèse s'intéresse également au contrôle musculaire de cette coordination gestuelle.
Ces objectifs demandent un travail méthodologique préliminaire pour comparer, développer et implémenter différentes techniques de mesure et d'estimation des efforts articulatoires de production de parole, à différents points de vue, physiologiques et mécaniques (cinématique du mouvement labial, capteurs de force, électromyographie orofaciale). L'exploration de ces questions a donné lieu à l'acquisition d'une large base de données (acoustiques et physiologiques) de production de consonnes occlusives du français chez une vingtaine de locuteurs adultes sains, incluant 2 modes de phonation (modal et chuchoté), 2 débits de parole (normal et rapide) et plusieurs niveaux d'effort articulatoire.
L'analyse de cette base de données a permis de confirmer certaines relations déjà établies en parole conversationnelle entre l'intensité acoustique du bruit de plosion et le maximum de Pression Intra-Orale (ou la vitesse d'ouverture des lèvres pour les consonnes labiales), et entre les paramètres spectraux du bruit de plosion (skewness et kurtosis) et les paramètres articulatoires de déplacement de la langue pour les consonnes alvéolaires et vélaires. D'autres relations (non décrites dans la littérature) ont été observées en parole conversationnelle : 1- l'intensité acoustique du bruit de plosion augmente lorsque le degré de compression labial et la vitesse de fermeture des lèvres augmentent pour les consonnes labiales ; 2- l'intensité acoustique du bruit de plosion augmente lorsque la vitesse tangentielle du mouvement d'élévation de la langue augmente pour les consonnes palatales ; 3- le degré de compression labial, les vitesses de fermeture et d'ouverture des lèvres augmentent significativement lorsque les activités des muscles Orbicularis Oris Supérieur (OOS) et Dépresseur de la Lèvre Inférieure (DLI) augmentent (dans les phases du mouvement où ils sont agonistes). Ces relations évoluent en fonction du mode de phonation (l'accent est mis en qualité chuchotée sur l'utilisation de paramètres cinématiques au détriment des paramètres aérodynamiques, articulatoires et temporels) et du débit de parole (la plupart des paramètres physiologiques et articulatoires perdent avec le débit leur efficacité de contrôle des caractéristiques acoustiques).

ABSTRACT

Stop consonants (/p/, /b/, etc) are of particular interest for the understanding of speech motor control. Indeed, the production of these stop consonant requires the coordination of the 3 production levels: breathing, vocal folds vibration and articulation.
The main goal of my thesis is to study how respiratory, laryngeal and articulatory gestures coordinate to control the variation of acoustic features of stop consonants, especially of their burts (intensity, duration, spectrum), which are crucial for stop consonant intelligibility. An important part of my thesis work also focuses on the muscular control of lip gestures in the production of bilabial stops.
These goals needed a preliminary methodological work to compare, develop and implement different techniques, in order to measure and estimate articulatory efforts of speech production, physiologically and mechanically (lip movement kinematics, force sensors, orofacial electromyography). This methodological exploration has given rise to the acquisition of a large database (acoustic and physiological data) of French stop consonant productions, for twenty healthy speakers, including 2 phonation modes (modal and whispered), 2 speech rates (normal and fast) and several levels of articulatory effort.
The analysis of this database has confirmed relationships already established in conversational speech between burst intensity and the maximum of intra-oral pressure (or opening velocity of lips for labial stops), and between spectral features of the burst and articulatory parameters of tongue movements for alveolar and velar stops. New other relationships have been observed in conversational : 1- the burst acoustic intensity increase when the lips compression and opening velocity increase (for labial stop consonants) ; 2- the burst acoustic intensity increase when the elevation tangential velocity of the tongue increase (for palatal stop consonants) ; 3- the lips compression, lips opening and closing velocities significantly increase when the activities of the OOS (Superior Orbicularis Oris) and DLI (Depressor of the Inferior Lip) muscles increase (during the movement phasis where muscles are agonists). These relationships depend on phonation quality (in whispered speech the accent is made on using kinematic parameters at the cost of aerodynamic, articulatory and temporal ones) and speech rate (most of physiological and articulatory parameters lost efficacies for acoustic control when speech rate increase).

REMERCIEMENTS

Il y a des bouts de vie, comme celui-là, que l'on n'oubliera jamais. Un mélange assez incongru entre originalité, joie, douceur, horreur, et complexité. Un peu comme-ci chaque matin la question de l'existence a plus d'importance que celle du lendemain. Et l'on avance malgré tout, à travers les orages et les tempêtes. Ce système logique cache un peu paradoxalement la beauté de l'existence. On oublie si vite au quotidien que le fait d'avancer, de rencontrer, de respirer, de rire et de croire, est le plus beau cadeau que l'on puisse avoir sur terre. Autant s'en saisir à pleine main et le croquer à pleine dent. Pourquoi donc ne pas remercier simplement la vie, en premier lieu ?

C'est donc ma première pensée dans ce chapitre de remerciements. Et dieu seul sait à quel point je sais de quoi je parle. Je tiens donc tout d'abord à remercier la Vie, qui ne m'a jamais abandonné, qui m'a tout donné et m'a toujours aimé. Cette même vie qui m'a offert l'opportunité de mener à bien ses travaux de thèse, qui m'aide à être heureux au quotidien, et à croire en l'être humain.

Ensuite, de manière moins élaborée et plus terre-à-terre, je remercie du fond du cœur l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse, et ce manuscrit. La tâche n'a certainement pas dû être aisée. Merci mille fois à chacun d'entre vous, autant pour le temps passé à zigzaguer à travers les fautes de frappes et les coquilles, que pour votre objectivité, votre bienveillance et votre tact (que l'on pourrait appeler humour). Je me souviendrais longtemps de cette après-midi du 24 juin 2019, mais en bien, ce qui est loin d'être une victoire triviale.

Je remercie bien sur mes directeurs de thèse, Maëva et Pascal, sans qui cette thèse aurait paradoxalement été simple et impossible, à la foi.

Merci tout d'abord à toi, Maëva, pour le projet que tu as accepté de partager avec moi, et le temps important que tu as consacré à mes travaux.

Une fois de plus je me lance dans un paragraphe à ton égard. Je tiens à te remercier infiniment, Pascal, pour ces 4 ans passés à tes côtés (et même bien plus si l'on compte les 2 années d'ingénieur qui ont précédées ma thèse). Au cours de ces 4 années, j'ai eu la chance et l'honneur de travailler avec toi, de voyager avec toi, de jouer au rugby avec toi, de rire et de pleurer, de boire beaucoup de thé mais aussi des cafés si courts que juste les vapeurs réveilleraient un somnambule. Merci de m'avoir consacré autant de temps, d'avoir été autant à l'écoute, merci d'avoir toujours cherché à me comprendre et à m'encourager, merci d'avoir été bienveillant et attentionné. Merci, aussi, de m'avoir démontré à travers ta détermination et ta passion que la recherche en parole est un bel univers, où l'on peut vivre l'entraide et le respect tel que je l'idéalise, où l'on peut se surpasser scientifiquement au quotidien, où l'on peut apporter à l'humain une brique de bien-être et de bonheur à chaque instant. Merci aussi d'avoir cru en moi et de m'avoir fait confiance. Et ce n'est pas rien, c'est même un point qui

me touche réellement au plus profond de moi-même. Merci de m'avoir forcé à bien des moments à aller au bout de certaines entreprises, qu'elles soient scientifiques ou personnelles, et à plus petite échelle de m'avoir forcé à terminer cette thèse… En bref, merci d'être l'homme et l'ami que tu es. Merci d'être là pour moi quand il le faut. Merci du fond du cœur…

Je remercie infiniment mes parents, Dominique et Chantal, qui je l'espère sont fiers de moi. Merci de m'avoir tant donné, tant appris, tant aimé, et de m'avoir montré que l'amour, l'amitié et la vie sont plus fort que les maux de cette planète et de nos quotidiens.

Merci mille fois à mes deux petites sœurs, Julie et Camille, et à mes grands-parents, maternels ou paternels, qui me soutiennent constamment et qui font partis d'un entourage de choc, où le bien-être est une valeur indispensable.

Je veux également te remercier, Pierre, pour le bonheur que l'on a vécu ensemble, pour les rires, pour cette complicité unique au monde, pour tout ce que tu m'as appris en montagne et dans la vie, et tout ce que tu m'as transmis. Et enfin pour m'avoir prouvé que la persévérance et la détermination peuvent faire reculer toutes les limites de l'impossible. Saches que je n'oublierais jamais toutes ces choses, et qu'elles animent aujourd'hui mes actions, mes croyances, ma vie et mes envies.

Passons ensuite aux remerciements en vrac et en masse, qui sont pourtant parmi les plus importants. Je me dis en écrivant ces lignes que ce genre de remerciements ne devraient pas être fait que dans une thèse, mais bien plus régulièrement … Une fois par an, au minimum. Ils sont cruciaux pour le bonheur commun que l'on partage dans une vie en collectivité, au contact des amis et des êtres chers qui nous entourent.

A toutes les personnes qui suivent, et à tous ceux que j'oublierai dans ce manuscrit mais qui font partis de ma vie … je suis très heureux et très fier que nos chemins aient pu se croiser un jour. Mille mercis d'exister, de respirer, et de rayonner lorsque les lumières s'éteignent et lorsque l'espoir disparaît.

Tout d'abord, un grand et infini merci à Océane, qui m'a supporté, encouragé et accompagné, pendant mes deux dernières années de doctorat… et fichtre que la dernière fut épique et difficile. Merci de croire en moi, de me donner autant au quotidien, et de m'aimer, comme tu sais si bien le faire. Merci de me pousser toujours plus loin, sans hésitations et sans peurs. Merci du fond du cœur pour les moments de bonheur, de partage, de montagne, d'émotion, et les gestes tendres qui ensorcellent et subliment la vie. Un grand merci ému à toute ta famille, de Sylvie à Marion, en passant par les frères, sœurs, cousins, cousines, oncles, tantes, et grands-parents qui m'ont toujours accueilli comme un membre de leur famille. C'est une attention qui me touche énormément, merci.

Merci à tous les collègues du GIPSA-lab, et plus généralement les collègues en recherche, pour les moments, repas et discussions partagés. Un remerciement spécial à Tiphaine et Jean-François, alias Picolito, qui ont été des collègues de bureau extraordinaires ! D'une ouverture d'esprit unique au monde, d'une gentillesse inégalable, d'une douceur réparatrice, et d'une

énergie transcendante … Vous êtes extraordinaires, mercis mille fois à vous deux ! Et merci aussi de m'avoir montré à quel point on peut aimer **sa** recherche, et la vivre positivement. Chapeau bas !

Un gigantesque merci à Mikaël, qui a été depuis 4 ans, et est encore aujourd'hui, une personne fabuleuse sur qui je peux compter les yeux fermés. Merci d'avoir subi mes expériences étranges, merci pour les sessions de grimpe entre midi et deux, merci pour les tranches de rire et de bonheur, merci pour tous les coups de pouce informatiques (et c'est peu dire !). Merci infiniment, avant tout d'être un véritable ami et non un collègue.

Merci énormément à Silvain, sans qui strictement aucune statistique n'aurait pu attester de la véracité et de la rigueur de mes recherches. Merci d'avoir été attentif, détesrminé, motivé, et curieux. Et de m'avoir tant apporté d'un point de vue scientifique et humain. Merci aussi à Christophe Savarial (un Savarial, des Savariaux), qui m'a transmis sans aucun doute l'amour de l'expérimentation, dans tous ces aspects les plus complexes.

Un merci tout particulier, très fort de sens à mes yeux, pour Jérôme. Tu m'as offert à deux reprises l'opportunité de persévérer, de me battre et de triompher, avec le sourire et l'envie. Je n'oublierais jamais tes gestes de confiance, et je te remercie du fond du cœur d'avoir été si humain et attentionné à mon égard.

Notez que le manuscrit que vous vous apprêtez à lire est une soucoupe volante dans la vie d'un petit homme vert de la recherche … Ma vie tourne avant tout autour de la montagne, de la verticalité et de l'adrénaline depuis une dizaine d'années. Il est donc crucial pour moi, à présent, de me plonger dans cet univers, et de remercier l'ensemble des extraterrestres qui l'animent et la subliment au quotidien.

Il est évident, en revanche, et avec force et conviction, que je ne remercierais pas l'ensemble des personnes qui m'ont rendu la vie impossible par moment, quoi qu'elles aient pu faire de positif à un autre moment.

Merci du fond du cœur, tout d'abord, à Pierrick. Merci d'être présent au quotidien dans mon univers de l'escalade. Merci de m'avoir tant appris dans ce sport, de croire en moi et de me supporter, même dans les projets les plus fous. Merci pour les fous rires et l'humour sans limites, pour les FAs à gogo, et surtout pour ton amitié réelle et forte.

Merci à Kenny et Cyrielle, dont la persévérance et la gentillesse sont des exemples pour moi au quotidien.

Merci à Thomas, qui m'a soutenu et encouragé à des moments délicats de ma thèse, et qui m'a montré que l'on peut avoir des vrais amis, ingénieurs et fabuleux à la fois (et c'est peu dire !) ;-). Dans la même génération d'amis et d'amies, merci à Paola, Delphine, Mike, Thibault.R. Et merci bien sur à toi, Catherine, dont la bienveillance reste pour moi une richesse extraordinaire, forte et rayonnante.

Merci à Alexis et Aline. Des voisins hors-normes, amis impondérables, et lumières dans l'obscurité. Merci à vous deux d'aimer la vie comme vous le faites, de vivre vos rêves, de croire aux rires et à l'espérance, et d'être constamment là pour moi, quoi qu'il arrive.

Merci à Nicolas.G, pour tous les coups de pouce salvateurs, pour la confiance perpétuelle et forte, pour l'amitié quotidienne. Et pour m'avoir prouvé que le bénévolat et l'investissement est une force rare qu'il est important de cultiver sans réserve !

Merci à Claire et Xavier, pour m'avoir montré que l'amitié peut surpasser toutes les épreuves de la vie. Du fond du cœur, merci pour votre amitié, votre soutient et vos sourires. Merci d'être resté vous-même, coûte que coûte, face à l'adversité, et d'aimer la vie à mes côtés.

Merci à mes amis d'enfance Kito, Damien, Romain, Dorian et tous les autres, de m'avoir aidé et accompagné lorsque je devenais doucement et légèrement l'homme que je suis aujourd'hui.

Merci également du fond à cœur à toutes les autres personnes qui colorent ma vie, qui parfois me font confiance dans mes projets délirants et improbables, et qui me transcendent tous chaque jour plus que le précédent, à coup d'arts, de montagne, de musique, d'audio-visuel, de vertical, de sangle molle, de gastronomie, de partage, ou de quoi que ce soit d'autre … : Mélanie, Thaïs, Solveig, Marc, Thibault.D, Nadia, Emmanuel.T, Andrée, Emmelieke, Camille, Arnaud, Julien.F, Marieke, Pipo, Clément, Jules, Julien.B, Maëva, Irène, Marie, Aymeric, Théo.S, Louis, Luc, Steve, Sandrine, Amélie, Eric, Lucas, Maxime, Gaëtan, Niels.G, … sans oublier les amis Russes et Algériens (vive 2019, et vive l'amitié et le partage sans frontières !).

Merci à tous les montagnards que je côtoie avec sourire, les jours de tempêtes comme les jours de beau temps, des jeunes alpis aux amis guides, en passant par les ami(e)s grimpeurs, les ami(e)s slackeurs, et tous les autres.

Une pincée de merveilles, que jamais l'on oublie.

À Dominique et Chantal, à chaque souffle de vie.

À Pierre, à l'infini.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

PARTIE 1 : ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART SUR LES CONSONNES OCCLUSIVES 5

1. Généralités sur les consonnes occlusives du Français 6
1.1. Les différents évènements propres à la production des occlusives 6
1.2. Les différentes consonnes occlusives du français, et leurs traits phonétiques 7
1.3. Les indices acoustiques permettant de distinguer le voisement et le lieu d'articulation des consonnes occlusives 7
1.3.1. Le VOT 7
1.3.2. Les transitions formantiques 8
1.3.3. La durée consonantique et la durée de la voyelle précédant l'occlusion 10
1.3.4. La F0 initiale 10
1.3.5. Les caractéristiques spectrales du bruit de plosion 10

2. Contraintes physiques et contrôle moteur de la production des consonnes occlusives 12
2.1. Contraintes et contrôle du voisement 12
2.2. Contraintes et contrôle des bruits de plosion/friction 13
2.3. Contraintes et contrôle des transitions formantiques 14
2.4. Variations des indices acoustiques et paramètres physiologiques en fonction du mode et des conditions de production 14
2.4.1. Contextes et conditions variés de production de parole 14
2.4.2. Dans le cas d'un mode de production : la parole chuchotée 15

3. Synthèse 15

CHAPITRE 2 : CONTROLE MUSCULAIRE DES MOUVEMENTS OROFACIAUX 17

1. Anatomie des muscles orofaciaux et péri-oraux 18
1.1. Liste et fonction 18
1.2. Bilan des études portant sur la description fonctionnelle des muscles orofaciaux 23
1.3. Mouvements de base 23
1.4. Unités motrices faciales et (in)dépendances physiologiques 25
1.5. Variabilité inter-individuelle 27

2. Rôle des différents muscles péri-oraux dans différents gestes labiaux 28
2.1. Gestes de base (sans fonction particulière dans la vie courante) 28
2.2. Expressions faciales émotionnelles 30
2.3. Gestes de parole 32
2.4. Autres gestes 35
2.5. Bilan en termes de synergies et d'antagonismes musculaires 36

3. Exploration EMG de l'activité musculaire périorale 37
3.1. Principes généraux de l'électromyographie 37
3.1.1. L'innervation musculaire 37
3.1.2. Mesure électromyographique (EMG) 38
3.2. Placement des électrodes pour l'exploration EMG de l'activité péri-orale 40
3.2.1. Localisation correcte des muscles, et variabilité inter-individuelle 40
3.2.2. Phénomènes de diaphonie / crosstalk 41
3.3. Traitement et descripteurs du signal EMG 42
3.3.1. Filtrage 43
3.3.2. Détection d'activité (par rapport au bruit): 43
3.3.3. Fenêtres et pas d'analyse 44
3.3.4. Normalisation 44
3.3.5. Extraction de descripteurs 44
3.3.6. Décomposition dynamique du mouvement 46

4. Bilan de cet état de l'art : apports et limites des études antérieures 46

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODE

CHAPITRE 3 : ACQUISITION ET ANALYSE DE DONNEES 49

1. Matériel et Méthodes 50
1.1. Sujets 50
1.2. Tâches 50
1.2.1. Session 1 50
1.2.2. Session 2 51
1.3. Matériel 52
1.4. Étiquetage des évènements acoustiques (sous Praat) 55
1.5 . Pré-traitement des signaux articulatoires et acoustiques 56
1.5.1. Étiquetage des évènements cinématiques de la production des labiales 56
1.5.2. Pré-traitement des signaux EMG 56
1.5.3. Pré-traitement des données EMA. 56

2. Descripteurs acoustiques et physiologiques 57
2.1. Les indices acoustiques 57
2.2. Les descripteurs électromyographiques 58
2.3. Les descripteurs aérodynamiques 59
2.4. Les descripteurs cinématiques de l'articulation 59
2.5. Les indices temporels 60
2.6. Les descripteurs laryngés 63

3. Méthodes statistiques 63
3.1. Schéma global des analyses 63
3.2. Statistiques descriptives et étude des relations entre paramètres de contrôle 64
3.3. Classification Ascendante Hiérarchique : regroupement de sujets. 64
3.4. Partitionnement récursif 65

4. Synthèse 67

PARTIE 3 : RESULTATS

CHAPITRE 4 : OBSERVATION DES DONNEES 71

1. Observations en parole modale, débit normal 73
1.1. Descripteurs acoustiques du bruit de plosion 73
1.2. Descripteurs physiologiques 75
1.2.1. Descripteurs aérodynamiques 75
1.2.2. Descripteurs articulatoires 76

2. Variations de production 81
2.1. Effet du mode de phonation 81
2.2. Effets de l'effort et du débit 82

3. Relations entre les différents descripteurs de contrôle de la production des occlusives 87

4. Variabilité interindividuelle 88

5. Bilan 92

CHAPITRE 5 : COVARIATION DES DESCRIPTEURS ACOUSTIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DE LA PRODUCTION DES CONSONNES OCCLUSIVES 93

1. Classification des stratégies inter-individuelles 94
1.1. Distinction de groupes d'individus par Classification Ascendante Hiérarchique 94
1.2. Parole modale et débit normal 95
1.2.1. Regroupement des sujets selon les relations liant les paramètres d'entrée et l'indice acoustique Intensité du bruit de plosion sur les 5 premières ms du bruit 95
1.2.2. Regroupements de sujets selon les relations entre les paramètres d'entrée et les variables de sortie. 96
1.3. Synthèse des regroupements de sujet pour les toutes les conditions de paroles 98
1.4. Bilan 98

2. Modélisation fonctionnelle du contrôle des bruits de plosion 99
2.1. Contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion, en parole modale et débit normal 99
2.1.1. Contrôle de l'intensité du bruit de plosion 99
2.1.2. Contrôle du centre de gravité spectral du bruit de plosion (CDG) 102
2.1.3. Contrôle du Skewness du spectre du bruit de plosion 102
2.1.4. Contrôle du Kurtosis du spectre du bruit de plosion 103
2.1.5. Contrôle de la durée du bruit de plosion 104
2.2. Influence de l'augmentation du débit de parole sur le contrôle des bruits de plosion 106
2.2.1. Pertinence des paramètres de contrôle 106
2.2.2. Effet du voisement, de la place d'articulation et du contexte vocalique 107
2.2.3. Stratégies globales et individuelles de contrôle des indices acoustiques en débit rapide 107
2.2.4. Bilan global sur le contrôle des indices en parole rapide 108
2.3. Influence du chuchotement sur le contrôle des bruits de plosion 109
2.3.1. Contrôle de l'intensité du bruit de plosion en parole chuchotée 109
2.3.2. Contrôle du Centre de Gravité Spectral du bruit de plosion en parole chuchotée 111
2.3.3. Contrôle du Skewness du bruit de plosion en parole chuchotée 112
2.3.4. Contrôle du Kurtosis du bruit de plosion en parole chuchotée 112
2.3.5. Contrôle de la durée du Bruit de plosion en parole chuchotée 113
2.3.6. Effet de l'augmentation du débit de parole sur le contrôle des indices du bruit de plosion en parole chuchotée 113
2.3.7. Bilan sur le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole chuchotée 113

3. Bilan et ouverture à l'interprétation des relations entre descripteurs physiologiques et caractéristiques acoustiques des bruits de plosion 114

CHAPITRE 6 : CONTROLE MUSCULAIRE DES MOUVEMENTS LABIAUX DE PRODUCTION DES OCCLUSIVES LABIALES 116

1. Décomposition des mouvements de parole et description des patrons temporels d'activation musculaire 117
1.1. Décomposition temporelle fine des mouvements en parole 118
1.2. Description globale des patrons d'activation musculaire orofaciaux des 5 muscles étudiés 119
1.3. Influence du mode de production et du débit de parole sur les patrons d'activation musculaire orofaciaux 120
1.3.1. Influence du mode de production 120
1.3.2. Influence du débit de parole 121
1.4. Influence du contexte vocalique sur les patrons d'activation musculaire orofaciaux 121
1.5. Bilan sur les patrons temporels d'activation musculaire orofaciaux 122

2. Résultats sur le contrôle musculaire des gestes d'ouvertures, fermetures et compression des lèvres 122
2.1. Distinction de groupes d'individus par Classification Ascendante Hiérarchique 123
2.2. Contrôle du degré de compression interlabiale 123
2.3. Contrôle de la vitesse de fermeture labiale 126
2.4. Contrôle de la vitesse d'ouverture labiale 127

3. Discussion : contrôle musculaire des gestes de production des occlusives labiales 128

4. Conclusion 131

PARTIE 4 : DISCUSSION ET CONCLUSION

CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE 135

1. Couplage entre les vitesses articulatoires de fermeture et d'ouverture 136

2. Contrôle de la durée du bruit de plosion. 139

3. Peut-on contrôler indépendamment le Centre de Gravité Spectral et le Skewness du bruit de plosion ? 139

4. Le Kurtosis : un indice acoustique complexe, et difficilement interprétable. 141

5. Absence d'effet des paramètres laryngés 141

6. Le chuchotement : modification des relations de contrôle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion 141

7. Quel est l'effet de l'augmentation du débit de parole sur les relations physio-acoustiques ? 142

8. Notion d'efficacité et d'effort dans la production des consonnes occlusives 143

9. Bilan global et ouvertures scientifiques 144

CONCLUSION GÉNÉRALE 147

1. Apports et principaux résultats de la thèse 147
1.1. Apports méthodologiques 147
1.2. Apports théoriques 147

2. Limites 149

3. Perspectives 149

BIBLIOGRAPHIE 151

TABLE DES FIGURES 159

LISTE DES TABLEAUX 163

INTRODUCTION

La parole, bien qu'utilisée couramment et de manière automatique dans la vie de tous les jours, requiert une coordination très précise des gestes respiratoires, laryngés et articulatoires, à la fois dans le temps, mais également dans leurs rapports de forces et d'amplitude. Cette coordination de gestes est notamment cruciale chez l'enfant pour l'apprentissage de la parole, et peut dysfonctionner dans le cas de pathologies de production de parole (bégaiement, dysarthrie parkinsonienne, etc).

Dans ce cadre, l'étude de la production des consonnes occlusives (/p/, /b/, etc) a un intérêt particulier car la production de ces consonnes requiert justement une coordination des 3 niveaux de production : respiration, vibration des cordes vocales, articulation. Le projet ANR StopNCo, dont ma thèse est partie intégrante, vise ainsi à mieux comprendre la coordination des gestes de parole lors de la production de consonnes occlusives, en commençant par étudier dans un premier temps le contrôle moteur de la production de la parole chez des locuteurs adultes sains (objet de ma thèse), puis de le comparer avec celui de bébés/enfants et d'adultes présentant des troubles de la production de la parole (bégaiement, parkinson, etc).

Concrètement, l'objectif principal de mes travaux de thèse est d'étudier la coordination des gestes respiratoires, laryngés et articulatoires permettant de contrôler la variation de certains traits acoustiques des consonnes occlusives, plus spécifiquement les indices acoustiques de leurs bruits de plosion (intensité, durée, spectre, cruciaux pour l'intelligibilité des consonnes occlusives). Il s'agit donc de caractériser, décrire et modéliser les relations entre descripteurs physiologiques et acoustiques de la production de consonnes occlusives par des locuteurs adultes sains, sous l'angle de plusieurs questions : Quels paramètres physiologiques sont corrélés et ne peuvent que co-varier ? Lesquels peuvent être contrôlés et variés indépendamment ? Quelles relations entre descripteurs physiologiques et acoustiques sont universelles, lesquelles témoignent de stratégies individuelles ? Y-a-t'il autant de stratégies que d'individus ou peut-on en dégager un nombre limité ? Quel degré de variabilité acoustique et physiologique est observé au sein de chaque catégorie phonétique (/p/, /b/, /t/, /d/, /k/, g/), en fonction de l'effort vocal, du mode de phonation (modal, chuchoté), du débit de parole et quel est son ordre de grandeur, comparé à la variabilité acoustique et physiologique inter-catégorielle ? Enfin quels muscles orofaciaux contrôlent l'amplitude et la force des mouvements labiaux de production des occlusives bilabiales, avec quelle coordination temporelle ?

Ces objectifs demandent un travail méthodologique préliminaire pour comparer, développer et implémenter différentes techniques de mesure et d'estimation des efforts articulatoires de production de parole, à différents points de vue, physiologiques et mécaniques. L'exploration de ces questions a également nécessité / donné lieu à l'acquisition d'une large base de données acoustiques et physiologiques de production de consonnes occlusives du français chez une vingtaine de locuteurs adultes sains.

Ce manuscrit de thèse est composé de 7 chapitres. Les deux premiers présenteront un état de l'art des consonnes occlusives, des caractéristiques acoustiques aux paramètres physiologiques, et des activités musculaires orofaciales. Le 3ème chapitre présentera la méthodologie (d'acquisition de données et de traitement statistique) développée au cours de ces travaux de thèse ainsi que la base de données acquise. Les chapitres 4, 5 et 6 me permettront de détailler les résultats obtenus, et enfin le chapitre 7 sera une discussion générale des résultats, amenant à des perspectives et ouvertures scientifiques.

Partie 1

Etat de l’art

CHAPITRE 1

État de l'art sur les consonnes occlusives

1. Généralités sur les consonnes occlusives du Français

2. Contraintes physiques et contrôle moteur de la production des consonnes occlusives

3. Synthèse

1. Généralités sur les consonnes occlusives du Français

1.1. Les différents évènements propres à la production des occlusives

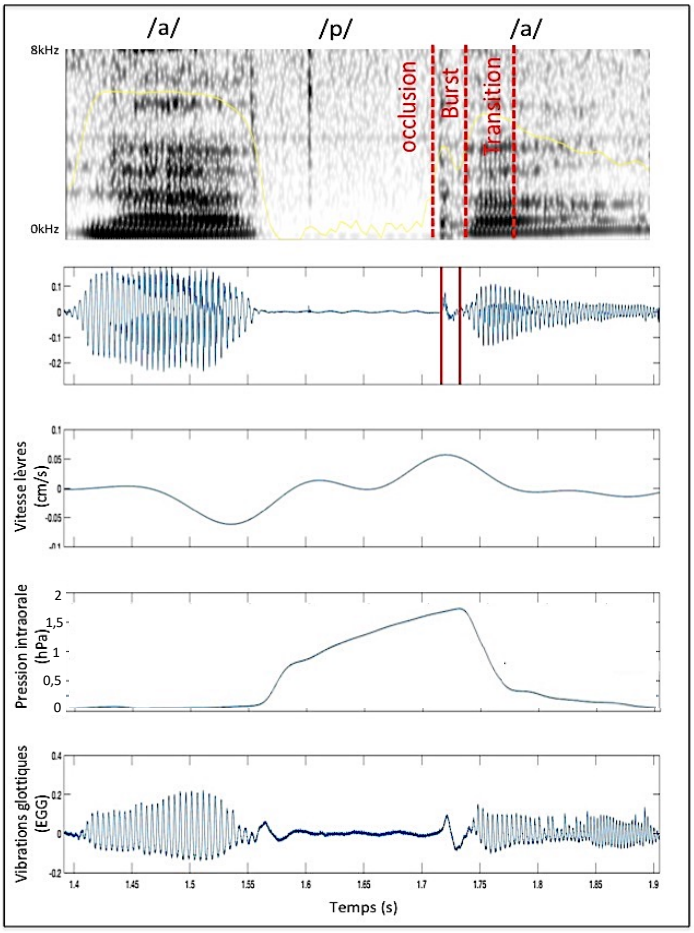


Figure 1 : Évènements acoustiques, articulatoires et aérodynamiques correspondant à la production du logatome /apa/.

Parmi les multiples sons du français, les consonnes occlusives sont particulièrement intéressantes. D'un point de vue articulatoire et acoustique, ces consonnes se définissent par :

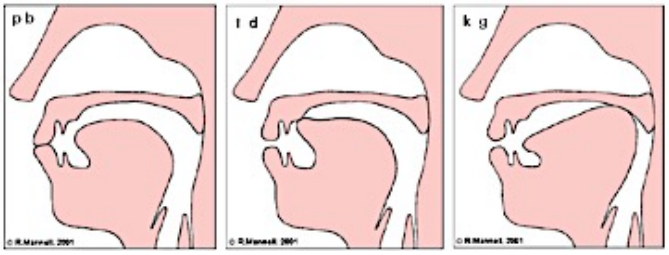
- L'occlusion du conduit vocal en un lieu d'articulation contrôlé par les lèvres ou la langue : il s'agit de la phase durant laquelle l'air expiré s'accumule dans la cavité orale et la pression intra-orale augmente (cf. Figure 1). Au cours de la phase d'occlusion, les plis vocaux peuvent vibrer (consonnes occlusives voisées), ou non (consonnes occlusives non voisées, cf. dernier graphe de la Figure 1).
- Le relâchement articulatoire de l'occlusion libérant la pression accumulée derrière l'occlusion : le relâchement se traduit par un bruit très court (environ 10ms) d'énergie très forte (Stevens and Blumstein, 1978), nommé bruit de plosion (« burst » en anglais), et suivi d'un bruit de friction.
- La transition vers la voyelle suivante (s'il y en a une) : cette phase se traduit notamment par une reprise de voisement pour les consonnes non-voisées en qualité modale. Le conduit vocal se ré-ouvre, les articulateurs se déplacent vers la configuration de la voyelle suivante, entrainant une variation de la fréquence des formants (Liberman et al., 1958) appelée transition formantique.

1.2. Les différentes consonnes occlusives du français, et leurs traits phonétiques

En Français, il existe 9 consonnes occlusives, différenciées par trois traits phonétiques :
- Le voisement : les consonnes dites "voisées" (il y a vibration des plis vocaux au cours de la phase d'occlusion) sont les consonnes [b, d, g], et les consonnes "non-voisées" [p t k], nommées également consonnes sourdes (pas de vibration des plis vocaux).
- Le lieu d'articulation : les consonnes [p b], dites bilabiales, se caractérisent par une occlusion au niveau des lèvres ; [t d], dites apico-alvéolaires, proviennent d'une occlusion au niveau du palais dur ; enfin, [k g] sont les consonnes dorso-vélaires, l'occlusion se situe au niveau du palais mou, le velum, situé à l'arrière de la cavité orale (écrasement du dos de la langue contre le velum).
- l'oralité/nasalité : les consonnes [m n ɲ] sont caractérisées par une occlusion du conduit oral, mais par une expiration de l'air via la cavité nasale durant l'occlusion. Les plis vocaux vibrent donc de manière continue au cours de la production des consonnes nasales. Les autres consonnes sont dites orales.

Le voisement s'observe de deux manières différentes, sur le signal acoustique temporel ou sur le spectrogramme :
- Sur le signal acoustique : le voisement se caractérise par une oscillation périodique temporelle.
- Sur le spectrogramme : Le voisement se caractérise par une barre horizontale d'énergie faible (correspondant à la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux) - cf. Figure 1.

On illustre les caractéristiques de ces différentes consonnes sur la Figure 2.



	Oral stops	
	voiceless	voiced
Labial	p	b
Apico-alveolar	t	d
Dorso-velar	k	g

Figure 2 : Consonnes occlusives du français ; à gauche les différents lieux d'articulation correspondant à ces consonnes ; à droite, une organisation de ces consonnes par lieu d'articulation et trait de voisement. (R.Mannell, 2001)

1.3. Les indices acoustiques permettant de distinguer le voisement et le lieu d'articulation des consonnes occlusives

1.3.1. Le VOT

Introduit par Lisker (Lisker and Abramson, 1967, 1964), le VOT (Voice Onset Time) permet de distinguer les consonnes occlusives voisées des consonnes occlusives non-voisées (Lisker, 1975).

Il y a deux manières de mesurer un VOT, une proposée par Lisker (1964), et une seconde proposée par Klatt (1975). Les voici :
- le VOT de Lisker (Lisker and Abramson, 1964) : durée de l'intervalle séparant le relâchement consonantique (i.e. instant du début du bruit de plosion) de la reprise de la vibration glottique, i.e. réapparition du voisement.
- le VOT de Klatt (Klatt, 1975) : durée de l'intervalle séparant le relâchement consonantique (i.e. instant du début du bruit de plosion) de l'apparition du F2 correspondant à la voyelle suivante.

Le VOT de Lisker permet alors de différentier le trait de voisement : En Français, le VOT est négatif pour les consonnes occlusives voisées (la vibration des plis vocaux existe tout au long de la phase d'occlusion, et ce jusqu'à la production du bruit de plosion), et positif pour les consonnes occlusives sourdes.

La Figure 3 synthétise les ordres de grandeur du VOT des consonnes occlusives du français (Serniclaes et al., 1984).

Consonnes occlusives	VOT (ordre de grandeur, msec)
p	20
b	-145
t	30
d	-125
k	40
g	-110

Figure 3 : Ordre de grandeur du VOT (millisecondes), en fonction de la catégorie consonantique (Serniclaes, 1984).

1.3.2. Les transitions formantiques

La notion de transition formantique correspond aux variations de la fréquence des formants de l'instant du relâchement consonantique à l'instant de la voyelle suivante où le formant est stable. La durée des transitions formantiques est généralement de l'ordre de 40 millisecondes (Delattre et al., 1955; Liberman et al., 1958).

Dans le cas des consonnes sourdes [p, t, k], les articulateurs supra-glottiques (respectivement les lèvres et la langue) réalisent un mouvement très rapide au moment du relâchement de l'occlusion. Les plis vocaux ne se mettent donc à vibrer que pour la voyelle suivante. Les transitions formantiques existent également pour les consonnes non-voisées, mais sont plus courtes que pour les consonnes voisées (Stevens and Klatt, 1974, cf. Figure 4).

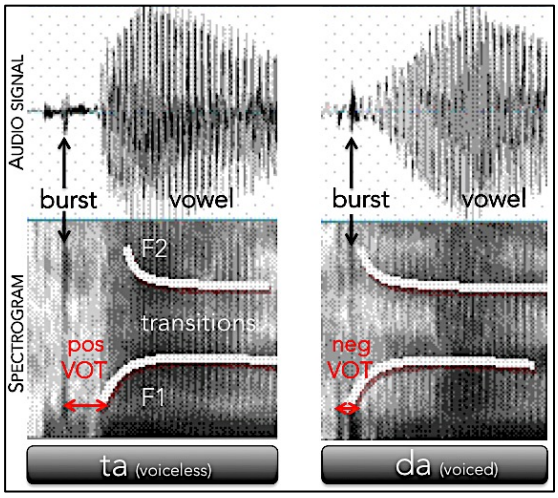


Figure 4 : Différences entre consonne occlusive voisée et non-voisée en termes de VOT et de transitions formantiques

D'un point de vue perceptif, le VOT ne suffit pas tout le temps à différencier une consonne occlusive voisée d'une non-voisée. Plusieurs auteurs suggèrent que la différenciation perceptive des consonnes sourdes et voisées en position initiale de syllabes (Delattre et al., 1955; Liberman et al., 1954; Stevens and Klatt, 1974) se base sur les transitions formantiques. Liberman et al (1954) étudient et quantifient les transitions des premiers et seconds formants à l'aide de deux expériences mêlant production et perception des occlusives linguales, labiales et nasales, dans plusieurs contextes vocaliques (Liberman et al., 1954). L'idée principale est de caractériser la rapidité et l'amplitude de la transition pour chaque logatome consonne-voyelle. La Figure 5, extraite de leurs travaux, schématise les transitions du second formant (de -4 à +6) perçues par une cohorte de 132 sujets.

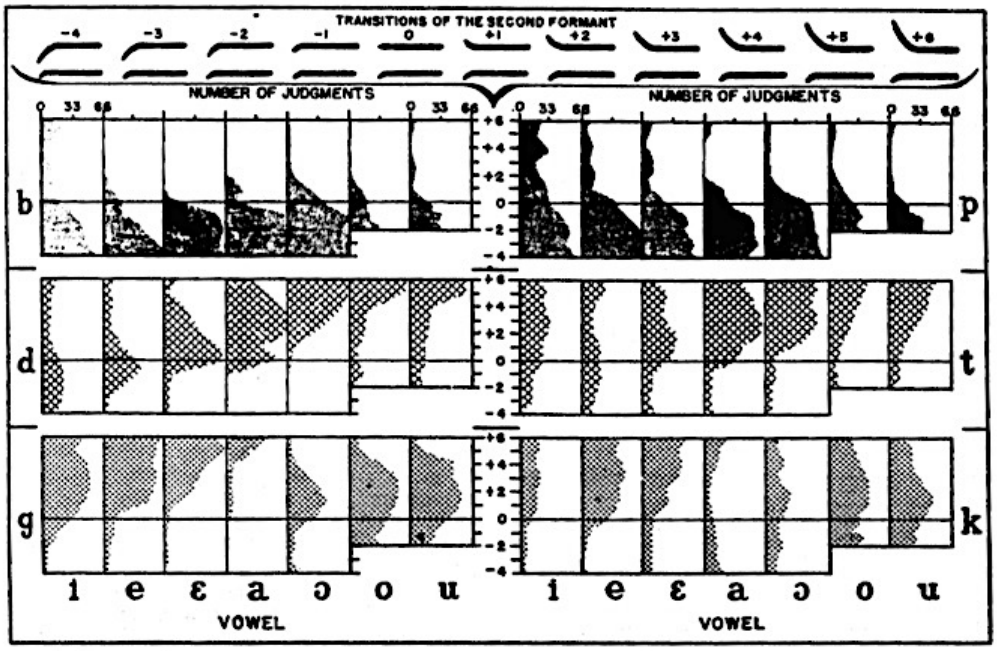


Figure 5 : Transitions formantiques du formant F2 perçues (en ordonnées des graphes) par une cohorte de 132 sujets (en abscisses), pour les consonnes [p b t d k g] et pour les 7 contextes vocaliques [i e ɛ ɐ o u] (Liberman, 1954)

Lisker (1975) montre que les transitions formantiques ne sont ni nécessaires ni suffisantes pour différentier les différentes catégories des consonnes occlusives. Il propose évidemment de se servir de l'indice de VOT et de la f0.

1.3.3. La durée consonantique et la durée de la voyelle précédant l'occlusion

Lisker et Abramson (1967) précisent que le VOT n'est pas le seul paramètre temporel différentiant les occlusives voisées des non-voisées. D'autres paramètres acoustiques tels que la durée de l'occlusion, ou la durée de la voyelle précédant jouent un rôle discriminant (Raphael, 1972; Suen and Beddoes, 1974). L'utilité de ces indices acoustiques dans la perception du voisement a été discutée devant la considération systématique du VOT comme indice discriminant : (Crystal and House, 1988; Klatt, 1976; Luce and Charles-Luce, 1985) : ces indices seraient plus discriminants dans le cas d'un débit élevé de parole (Lisker and Abramson, 1967), ou avant une pause syntaxique (Suen and Beddoes, 1974).

La durée de la voyelle précédant une consonne occlusive voisée est plus longue que celle précédant une consonne occlusive sourde (Abdelli-Beruh, 2004; Delattre, 1962).

Les durées consonantiques des consonnes occlusives voisées sont plus courtes que celles des consonnes occlusives sourdes (Laeufer, 1996, 1992). Pour le français, l'ordre de grandeur de la différence de durée entre les deux groupes de consonnes est de 20 millisecondes (Abdelli-Beruh, 2004).

1.3.4. La F0 initiale

La fréquence fondamentale (f0) de vibration des plis vocaux, à l'instant de la reprise des vibrations glottiques, permet de différentier les consonnes occlusives voisées des consonnes occlusives sourdes (Haggard et al., 1981; Ohde, 1984) : la position de l'os hyoïde et du larynx est plus basse dans le cas de la phase occlusive de production des consonnes voisées et plus haute pour celle de production des consonnes sourdes. Une position basse du larynx au cours de l'occlusion s'accompagne d'une f0 initiale basse.

1.3.5. Les caractéristiques spectrales du bruit de plosion

Plusieurs paramètres spectraux permettent de différentier le lieu d'articulation et le caractère voisé ou non voisé d'une consonne occlusive, et dépendent de son contexte vocalique, et du débit de parole (Delattre et al.; Stevens and Klatt, 1974).

La configuration articulatoire durant l'occlusion influence directement les caractéristiques spectrales du bruit de plosion au moment du relâchement. Le spectre du bruit de plosion créé par la production d'une plosive bilabiale est plat et décroissant en fréquence, celui d'une plosive apico-alvéolaire est croissant et asymétrique, tandis que celui d'une consonne dorso-vélaire est caractérisé par un pic central d'énergie aux alentours de 2kHz (Stevens and Blumstein, 1978). Stevens et Blumstein (1978) soutiennent l'idée que ces caractéristiques spectrales sont relativement invariantes et spécifiques à chaque lieu d'articulation.
La Figure 6 illustre les différences spectrales pour les 3 catégories de consonnes occlusives.

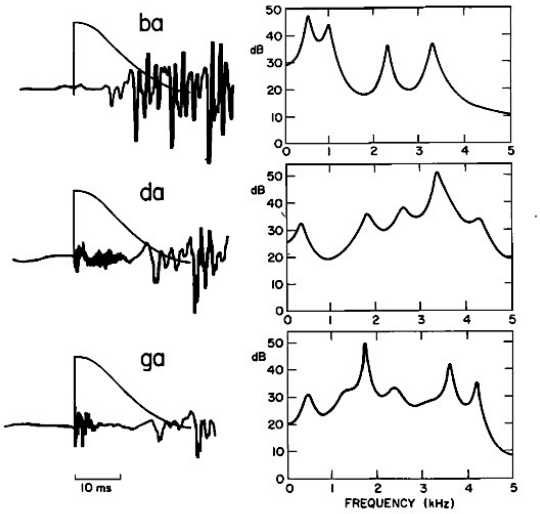


Figure 6 : caractéristiques spectrales des bruits de plosion pour les syllabes /ba/, /da/ et /ga/ (Stevens and Blumstein, 1978)

Forrest (1988) propose de décrire le spectre des bruits de plosion (Stevens and Blumstein, 1978) à partir de 4 moments spectraux. Le moment d'ordre 1 correspond à la fréquence du centre de gravité spectral. Le moment d'ordre 2 correspond à la variance du spectre en fréquences. Le moment d'ordre 3 est appelé skewness, il représente le degré d'asymétrie de l'enveloppe spectrale (cf. Figure 7). Le moment d'ordre 4, quant à lui, est appelé kurtosis, il décrit le degré d'aplatissement du spectre (DeCarlo, 1997) (cf. Figure 7).

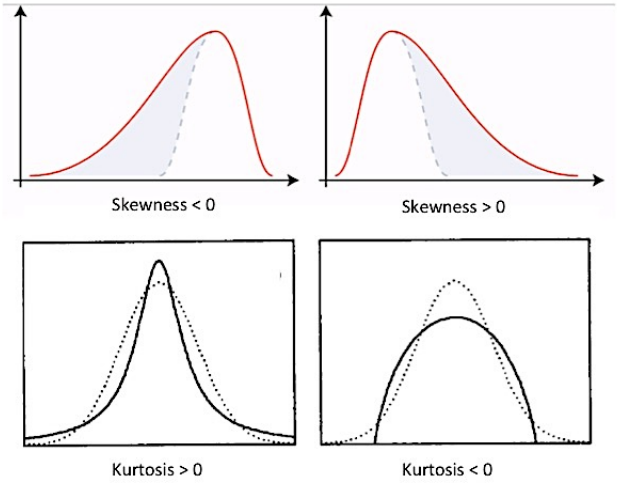


Figure 7 : illustration du skewness et du kurtosis d'une courbe de type gaussienne (d'après wikipédia, et DeCarlo, 1997)

D'après Forrest (1988), le coefficient d'asymétrie (i.e. skewness) et le centre de gravité spectral (i.e. CDG) permettent de distinguer les consonnes apico-alvéolaires (skewness ∈ [0 1] et CDG ∈ [4 5] kHz) des consonnes dorso-vélaires et bilabiales (skewness ∈ [1 3] et CDG ∈ [2 4] kHz). Le coefficient d'aplatissement (i.e. kurtosis) permet quant à lui de différentier les consonnes dorso-vélaires (kurtosis > 4) des autres types de consonnes occlusives (kurtosis < 4) (cf. Figure 8).

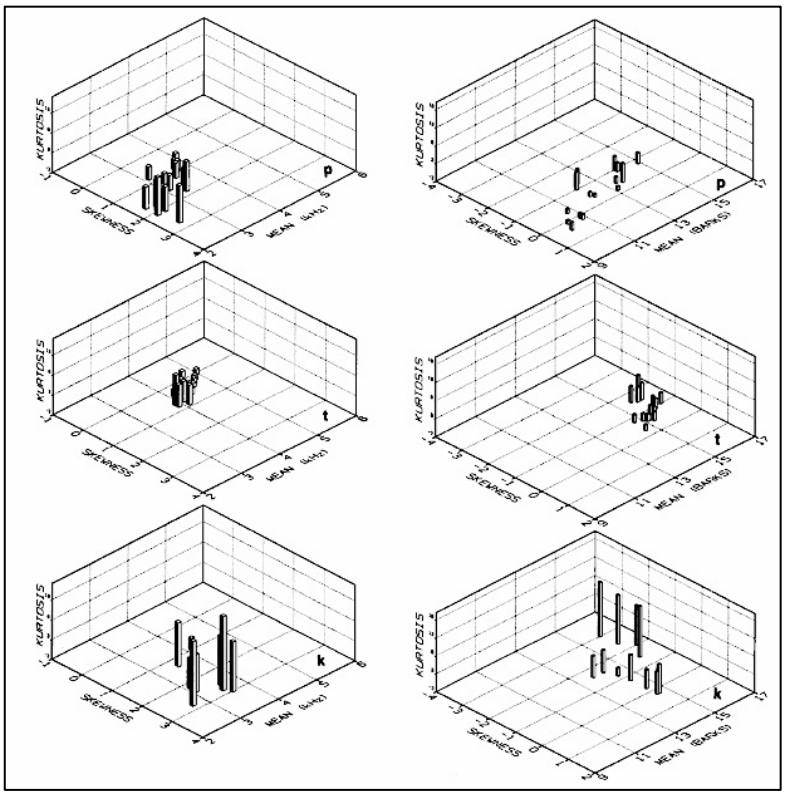


Figure 8 : représentations 3D des moments spectraux d'ordre 1, 3, et 4, en fonction de la consonne occlusive produite (de /p/ en haut à /k/ en bas) – (d'après Forrest, 1988).

2. Contraintes physiques et contrôle moteur de la production des consonnes occlusives

2.1. Contraintes et contrôle du voisement

De manière générale, les plis vocaux peuvent vibrer à partir du moment où la pression intra-orale (Pio) est plus faible que la pression sous-glottique (Psg) (Bernouilli).
Par conséquent, pour les consonnes occlusives voisées, le degré de Pio doit rester en dessous du niveau de Psg durant l'occlusion pour que le voisement puisse perdurer tout le temps de l'occlusion.
Pour les consonnes occlusives non voisées, la reprise du voisement après le relâchement de l'occlusion est également conditionnée physiquement par le fait que la Pio ait suffisamment diminué pour être inférieure à la Psg. Il existe donc une valeur minimum du VOT, dépendant du niveau de Pio observé pendant l'occlusion et de sa vitesse de décroissance au moment du relâchement.
De façon générale, cela signifie donc que plus le maximum de Pio est grand et plus le VOT sera long (Arkebauer et al., 1967; Koenig et al., 2011). Cela explique également que le maximum de Pio soit plus petit pour les occlusives voisées (/b/, /d/, /g/) que pour les consonnes sourdes (Koenig et al., 2008; Lubker and Parris, 1970).

Le niveau de Pio durant l'occlusion dépend lui-même de plusieurs facteurs, ayant donc une influence indirecte sur le VOT :

- le niveau de Pio augmente avec la durée d'occlusion
- le niveau de Pio augmente avec la postérioriation du lieu d'occlusion : En effet, plus la cavité derrière la constriction est petite et plus la pression s'accumule vite (Hardcastle, 1973; Maddieson, 1997; Solé, 2007).

La rapidité de décroissance de la Pio dépend également de plusieurs facteurs, influençant eux aussi indirectement le VOT :
- La vitesse des articulateurs (l'apex de la langue et les lèvres se déplacent plus rapidement que le dos ou l'arrière de la langue), pouvant également contribuer aux VOT plus courts observés pour les occlusives alvéolaires que palatales (Hardcastle, 1973).
- La surface de contact langue-palais plus important pour les vélaires (contact avec le dos de la langue) que les palato-dorsales où l'apex est alors concerné (Stevens et al., 1999). La surface d'occlusion est également un paramètre articulatoire qui fait varier la vitesse du phénomène de relâchement occlusif. En effet, en théorie plus la surface de contact entre les articulateurs de l'occlusion est grande et plus la force de l'effet de Bernoulli est importante. Ce qui induit un délais plus long de stabilisation des pressions, et donc une diminution proportionnelle de la vitesse d'ouverture des articulateurs (Stevens et al., 1999).

En lien avec la pression intra-orale, le degré de compression labiale est également plus important sur des consonnes occlusives bilabiales non voisées /p/ que voisées /b/ (Lubker and Parris, 1970), soulevant la question de savoir si ces deux paramètres de Pio et de compression interlabiale sont directement corrélés. (Il est complexe d'estimer le degré de compression de la langue sur le palais pour les consonnes palato-dorsales et vélaires, c'est certainement pour cette raison méthodologique que la relation précédente ne semble pas avoir été généralisée au cas des occlusives non-labiales)

D'un point de vue fréquentiel, les variations de f0 au sein de la consonne (avant, durant et après l'occlusion) sont contraintes par l'aérodynamique (Delebecque et al., 2014) et la coordination entre expiration et augmentation de pression sous-glottique au moment du relâchement de l'occlusion (Boe, 1973).

Bien que le VOT et les variations de f0 au sein de la consonne soient en partie contraints par les facteurs précédents, ils peuvent cependant être contrôlés par le locuteur dans une certaine mesure : plus la vitesse articulatoire de relâchement de l'occlusion est importante, et plus le VOT sera court (Belasco, 1953; Löfqvist and Gracco, 1997; Sussman et al., 1973).

2.2. Contraintes et contrôle des bruits de plosion/friction

Le volume de la cavité d'occlusion (volume fermé derrière le lieu d'occlusion), dépendant du lieu d'articulation (Kuhn, 1975), a une influence déterminante sur :
- l'intensité et les caractéristiques spectrales du bruit.
- l'enveloppe spectrale du bruit de plosion: large et plate pour les alvéolaires et les labiales, mais compacte pour les vélaires.

Les locuteurs peuvent donc contrôler l'intensité du bruit de plosion, et le spectre des bruits de plosion en faisant varier la place d'articulation des consonnes (Chodroff and Wilson, 2014;

Imbrie, 2005; Kirkham, 2011). Ces relations semblent non-linéaires : les variations de la place d'articulation dans la région antérieure génèrent des faibles variations des paramètres spectraux et de l'intensité du bruit de plosion, tandis que de faibles variations de la place d'articulation au niveau vélaire influence beaucoup les indices acoustiques (Osfar, 2011).

Dans le cas de la production des consonnes fricatives (/s/, /f/, etc), le spectre du bruit de friction est contrôlé par l'aire de contact au niveau de la constriction et par le débit d'air expiré (Grandchamp, 2009). Bien que Delebecque et al (2014) et Pelorson (1997) montrent que plus l'occlusion est postérieure et plus le VOT est grand, et que la Pio est très fortement corrélée à la vitesse et au mouvement des articulateurs (plus la Pio augmente, et plus la vitesse des articulateurs au relâchement est importante), aucune étude ne semble revendiquer l'étude de l'influence des paramètres aérodynamiques (Pio, débit d'air expiré) sur l'intensité et le spectre du bruit de plosion des consonnes occlusives.

2.3. Contraintes et contrôle des transitions formantiques

Le volume de la cavité derrière l'occlusion, dépendant du lieu d'articulation (Kuhn, 1975), a également une influence déterminante sur les transitions des formants F2 et F3 : plus la cavité est petite (cas de /t/ par exemple), et moins la transition des formants F2 et F3 est « ample », i.e. les composantes spectrales F2 et F3 restent inchangées au cours de l'étape de transition.

La fréquence du 1er formant F1 est principalement déterminée par la longueur du conduit vocal et son ouverture à l'extrémité des lèvres (Fant, 1960; Stevens and House, 1963). Plus précisément, F1 est influencé par le degré d'ouverture des lèvres et de la mâchoire, par le degré de dilatation du pharynx, par la longueur du conduit vocal (contrôlé par les mouvements verticaux du larynx ou la protrusion des lèvres) ou encore par le couplage oro-nasal.

La valeur de F1 peut également être influencée, dans une certaine mesure, par le degré d'ouverture du conduit vocal au niveau glottique (ouverture glottique, quotient ouvert laryngé) (Barney et al., 2007),
La rapidité et l'excursion en fréquence des transitions formantiques au moment du relâchement dépendent de la vitesse des articulateurs. Les fréquences initiales observées à la réapparition de la structure formantique dépendent aussi du voisement sous-jacent : ces fréquences initiales seront plus basses dans le cas d'un VOT court, et plus basses pour les consonnes voisées que pour les consonnes non voisées.

2.4. Variations des indices acoustiques et paramètres physiologiques en fonction du mode et des conditions de production

2.4.1. Contextes et conditions variés de production de parole

Le débit de parole, influençant naturellement la vitesse des articulateurs au cours de la parole (Gay and Hirose, 1973), affecte le VOT des consonnes occlusives (Kessinger and Blumstein, 1998) : plus le débit de parole est élevé et plus le VOT est court.

Les paramètres physiologiques (Pio) et les amplitudes des déplacements des articulateurs ne sont pas significativement influencés par une variation du débit de parole (Sock and Löfgvist, 1995).

Dans le cas de la parole claire (parole Lombard ou autre), l'intensité des bruit de plosions est plus élevée (Picheny et al., 1989, 1986), les transitions formantiques sont plus longues (Chen, 1980), les variations des formants sont plus grandes (Moon and Lindblom, 1989), le degré de compression labiale est plus important (Turner et al., 2016 ; Schulmann 1988)

2.4.2. Dans le cas d'un mode de production : la parole chuchotée

Une consonne voisée chuchotée est produite sans vibration des plis vocaux. Pour autant, le trait de voisement continue d'être marqué (ou les consonnes voisées continuent d'être distinguées des consonnes non voisées) par d'autres indices et paramètres physiologiques :

- la durée d'occlusion: les locuteurs augmentent la durée des consonnes non-voisées (Osfar, 2011).
- la pression intra-orale (plus importante pour les non-voisées) (Osfar, 2011).
- la pression de contact inter-articulateurs.

Par ailleurs, plusieurs modifications acoustiques et physiologiques des consonnes occlusives sont observées en parole chuchotée, que ce soit pour les consonnes voisées ou non voisées :

- des intensités de bruit de plosion en moyenne 12 dB plus faibles que celles relevées en qualité modale (Meynadier, 2015; Meynadier and Dufour, 2016; Meynadier and Gaydina, 2013).
- la surface de contact inter-articulateurs au cours de la production des consonnes occlusives est plus petite qu'en parole modale (Osfar, 2011).
- Les maximas des centre de gravité spectraux sont plus élevés en parole chuchotée qu'en parole modale (Osfar, 2011).

3. Synthèse

La production des consonnes occlusives requiert une coordination gestuelle faisant intervenir aérodynamique, articulation supra-glottique. Pour l'intelligibilité et la différenciation des différentes consonnes occlusives, il est crucial de maîtriser la coordination fine de ces gestes. Plusieurs indices acoustiques permettent de différencier les traits phonétiques des consonnes occlusives (trait de voisement et lieu d'articulation). Plusieurs de ces indices acoustiques peuvent co-varier, principalement de par le fait qu'ils sous sous-tendus par un même geste.

Les gestes de paroles peuvent être décrits au niveau articulatoire (cinématique et activités musculaires des mouvements), au niveau aérodynamique (Pio), et au niveau laryngé. Les différentes catégories d'occlusives (voisées vs. non voisées, labiales, alvéolaire ou vélaires, orales ou nasales) sont caractérisées par des variations significatives de ces gestes, ayant fait l'objet de très nombreuses études. En revanche, on connait encore moins comment la variation plus fine de ces gestes, au sein d'une même catégorie phonétique, affecte les caractéristiques acoustiques du son produit, en particulier du bruit de plosion

La réalisation d'un geste de production d'une consonne occlusive modifie ces différents paramètres, et ce processus de contrôle global influence les indices acoustiques, piliers de la production et de la perception du son. Dans le cas de la production d'une consonne occlusive, des études antérieures se sont intéressées au contrôle de certains indices acoustiques, comme le VOT, les indices temporels (durée de la voyelle précédant l'occlusion, et durée de l'occlusion), la f0 initiale et les transitions formantiques. En revanche, aucune étude ne semble approfondir le contrôle (aérodynamique, laryngé et articulatoire) des paramètres spectraux et de l'intensité des bruits de plosion, également importants dans la discrimination inter-catégorielle des consonnes occlusives.

CHAPITRE 2

Contrôle musculaire des mouvements orofaciaux

1. Anatomie des muscles orofaciaux et péri-oraux

2. Rôle des différents muscles péri-oraux dans différents gestes labiaux

3. Exploration EMG de l'activité musculaire périorale

4. Bilan de cet état de l'art : apports et limites des études antérieures

Les phénomènes d'activations musculaires intéressent tout particulièrement les nombreux chercheurs qui travaillent sur des notions de contrôle moteur, de fonctions motrices et de biomécanique. Le contrôle musculaire des gestes labiaux est associé à de nombreux aspects de la vie quotidienne, comme la parole, mais également la manifestation d'émotions et d'expressions faciales ou l'alimentation (succion, déglutition). Comprendre la manière dont sont activés les muscles qui contrôlent de telles fonctionnalités est crucial, autant d'un point de vue purement fondamental que d'un point de vue applicatif (rééducation de pathologies fonctionnelles du visage, chirurgie, innovations aux niveaux reconnaissances et synthèses vocales).

Ce chapitre a pour vocation d'être un état de l'art centré sur les phénomènes de recrutement musculaire lors de la production de gestes orofaciaux. Il se divise en plusieurs parties : une première purement anatomique qui permettra de présenter la musculature orofaciale, une seconde plutôt orientée anatomie fonctionnelle, une troisième qui présentera l'ensemble des aspects théoriques et techniques essentiels à l'utilisation des techniques de mesure des activités musculaires (techniques de mesures électromyographies).

1. Anatomie des muscles orofaciaux et péri-oraux

Les muscles orofaciaux sont l'ensemble des muscles qui composent le visage humain. Les muscles péri-oraux, en revanche, sont uniquement ceux qui juxtaposent le contour des lèvres (plus de détails ci-dessous).

1.1. Liste et fonction

La cartographie musculaire du visage est complexe et très fine, sans parler du maillage fonctionnel tout aussi complexe de ces muscles. Je présenterai dans cette partie les muscles péri-oraux qui interagissent le plus souvent au quotidien au cours de la production de la parole (mouvement des lèvres et de la mandibule,) en détaillant leurs structures et leurs caractéristiques, et je m'attellerai ensuite à décrire leur fonctionnement et de quelle manière ils sont recrutés.
On peut se référer à la Figure 9 pour visualiser l'emplacement et la structure de chacun des muscles orofaciaux. L'ensemble des muscles faciaux est symétrique par rapport au plan médio-sagittal.
Les connaissances anatomiques présentées ci-dessous proviennent de travaux de dissections réalisées par des anatomistes (Brand et al., 2013; Standring, 2005) .

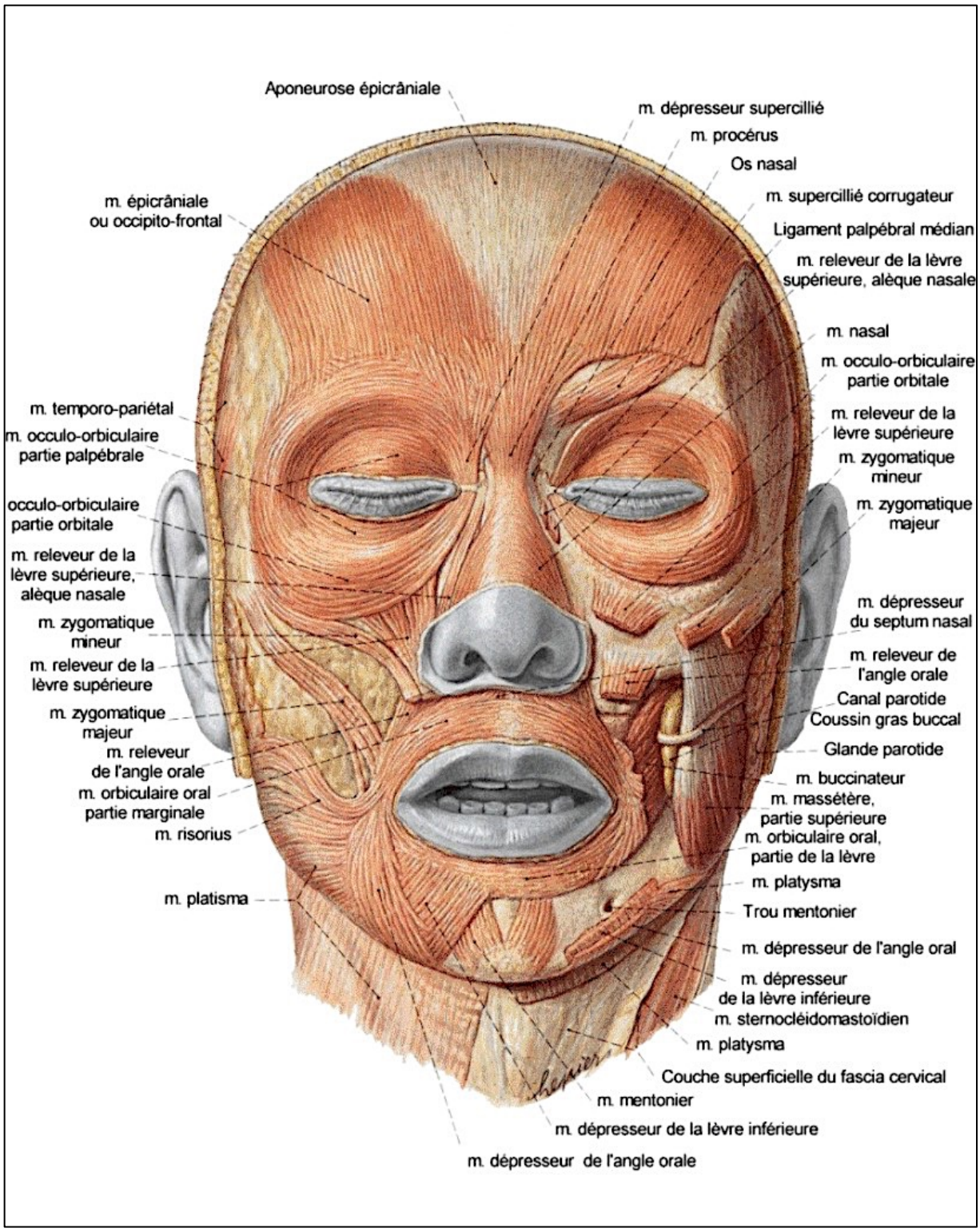


Figure 9: Planche anatomique du visage (réf : http://corpshumain.ca)

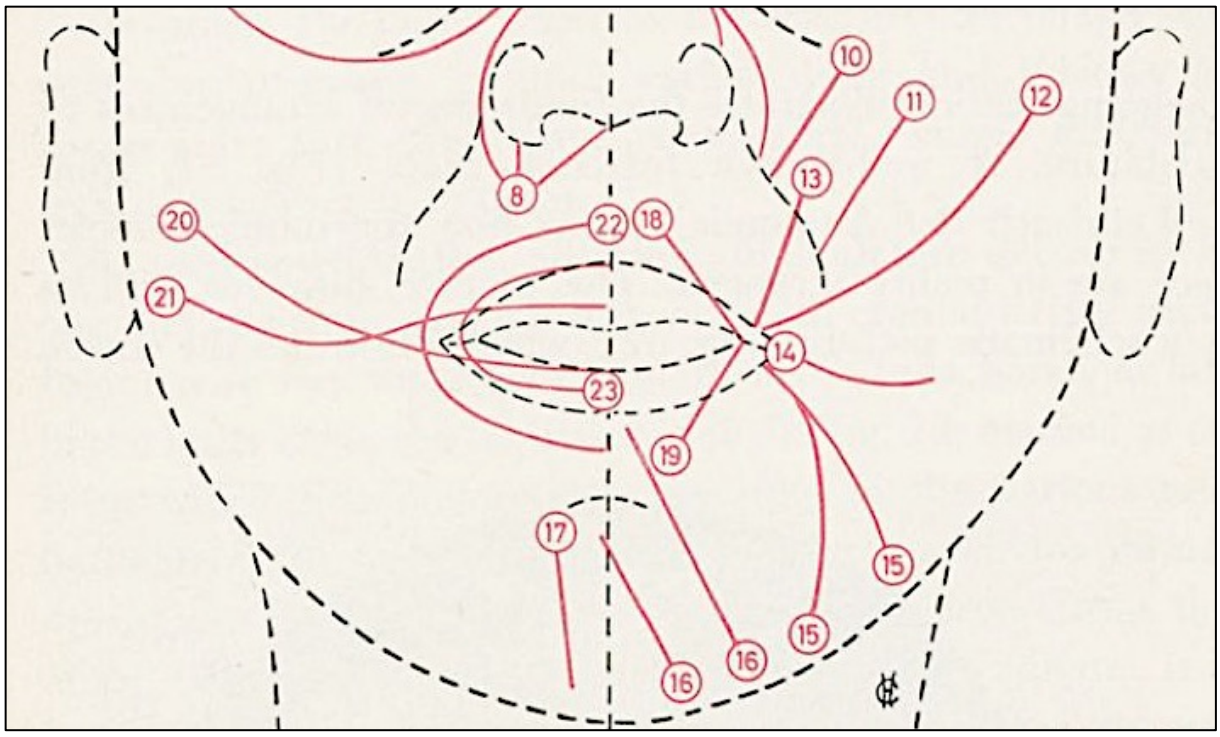


Figure 10 : détails des orientations fibreuses des muscles du pourtour des lèvres (Hjortsjö, 1970). 8 : muscle nasalis ; 10 : muscle élévateur de la lèvre supérieure; 11 : zygomatique mineur ; 12 : zygomatique majeur ; 13 : élévateur de l'angle de la bouche ; 14 : risorius ; 15 : dépresseur de l'angle de la bouche ; 16 : dépresseur de la lèvre inférieure ; 17 : Mentalis ; 18/19 : muscles incisives des lèvres supérieure et inférieure ; 20/21 : partie inférieure et partie supérieure du muscle Buccinateur ; 22/23 : Orbicularis Oris, respectivement partie périphérique et partie marginale.

On appelle Modiolus le point d'intersection (au niveau des commissures des lèvres) des 9 muscles labiaux (Nazari, 2006 ; Standring, 2005) : l'Orbicularis Oris (4 unités musculaires, comme présentées ci-dessus), le Risorius, le Buccinateur (BUC), le dépresseur et l'élévateur de l'angle de la bouche (DAO), et le Zygomatique majeur. Cette masse musculaire permet l'organisation fonctionnelle du recrutement agoniste et antagoniste des muscles péri-oraux contrôlant la production des mouvements labiaux.

Quatorze muscles participent à la mobilisation des lèvres (Hjortsjö, 1970). Ils sont décrits ci-dessous, et leur fonctionnalité est précisée (Hjortsjö, 1970) :

- *L'Orbicularis Oris (OOI et OOS)*: il s'agit d'un sphincter encerclant la bouche. Les fibres musculaires sont sous-dermales, et réparties en 2 sous-structures principales nommées orbicularis oris supérieur (sous le tubercule de la lèvre supérieure) et orbicularis oris inférieur (sous le vermillon de la lèvre inférieure). Les parties inférieure et supérieure de l'Orbicularis Oris peuvent également être considérées à leur tour comme deux ensembles de fibres distinctes (Hjortsjö., 1970 ; Honda et al., 1995), visibles sur la Figure 10 (Honda et al., 1995) : la partie marginale (cf. fibre 23 sur la Figure 10) et la partie labiale, nommée également partie périphérique (sous-jacente au niveau de la couche profonde au tubercule et au vermillon, et s'étendant en périphérie, cf. fibre 22 sur la Figure 10), semble plutôt recrutée au cours des mouvements d'arrondissement des lèvres. De manière

générale, le muscle Orbicularis Oris est recruté pour toute modification de la forme et de la rigidité des lèvres, permettant ainsi les ouvertures et constrictions labiales.

- *Le dépresseur de la lèvre inférieure (DLI)* et le dépresseur de l'angle de la bouche (DAO, nommé également « triangulaire »). Il s'agit de deux structures musculaires distinctes, qui se superposent en partie et s'ancrent au même endroit sur la mandibule. Le dépresseur de la lèvre inférieure (cf. fibre 16 sur la Figure 10) est attaché à la partie inférieure de l'orbicularis oris. Le dépresseur de l'angle de la bouche (cf. fibre 15 sur la Figure 10), lui, s'insère aux extrémités labiales formées par les commissures des lèvres. Le DLI est un muscle mobilisateur de la lèvre inférieure, il permet son abaissement, tandis que le DAO est un mobilisateur de l'angle de la bouche.
- Le mentonnier mentalis, du nom latin) (MENT) (cf. fibre 17 sur la Figure 10): les fibres musculaires de ce muscle se situent plus en profondeur, sous le maillage fibreux du dépresseur de la lèvre inférieure. Elles s'insèrent d'une part sous la partie inférieure de l'orbicularis oris et d'une autre part sur l'extrémité antérieure de la mandibule, couramment nommé « menton ». Le muscle mentalis, antagoniste du muscle DLI présenté ci-dessus, est également un mobilisateur de la lèvre inférieure, qui permet son élévation.
- Le buccinateur (BUC) (cf. fibres 20 et 21 sur la Figure 10) et le risorius (RIS) (cf. fibre 14 sur la Figure 10): ces deux muscles sont localisés au niveau des joues, le risorius en superficie dans le derme et le buccinateur, plus massif, en profondeur. Leurs fibres sont orientées des lèvres vers l'arrière du visage. Le buccinateur s'insère sous le sphincter buccal tandis que le risorius converge vers le Modiolus (numéro 14 sur la Figure 10). Le risorius est un muscle mobilisateur de l'angle de la bouche, tandis que le buccinateur est un muscle spécifique aux mouvements des joues (contrôle de la compliance des joues au gonflement, ou d'action de jouer de la trompette).
- Les zygomatiques majeur (ZYG Maj) (cf. fibre 12 sur la Figure 10) et mineur (ZYG Min) (cf. fibre 11 sur la Figure 10) : il s'agit de deux muscles en forme de « S » étiré, qui partent de sous les points du bord extérieur et inférieur des yeux pour converger vers le Modiolus pour le majeur et vers la partie haute de la partie supérieure de l'Orbicularis Oris pour le mineur. Le muscle Zygomatique majeur est un muscle mobilisateur de l'angle de la bouche, et le muscle Zygomatique mineur est quant à lui un muscle élévateur de la lèvre supérieure. Ces deux muscles sont souvent considérés comme les muscles recrutés pour sourire.
- Le muscle élévateur de la lèvre supérieure (LLS) (cf. fibre 10 sur la Figure 10) et le muscle élévateur de l'aile du nez et de la lèvre supérieure (LLSAN) (non visible sur la Figure 10) : ces deux muscles imbriqués sont des mobilisateurs élévateurs de la lèvre supérieure. Le muscle LLSAN s'insère sur les faces latérales du nez et recouvre l'intégralité de ce dernier, tandis que le muscle LLS s'insère directement sur la partie marginale de l'Orbicularis Oris Superior et remonte jusqu'à l'Orbicularis Oris Occuli (sphincter occulaire).
- Le muscle élévateur de l'angle de la bouche (LAO, également nommé « caninus ») (cf. fibre 13 sur la Figure 10) : de la même manière que le muscle dépresseur de l'angle de la bouche (DAO, voir ci-dessus), le muscle LAO s'insère sur le Modiolus et remonte verticalement vers l'Orbicularis Oris Occuli. Ce muscle est recruté pour la mobilisation de l'angle de la bouche, et représente le muscle antagoniste du muscle DAO.

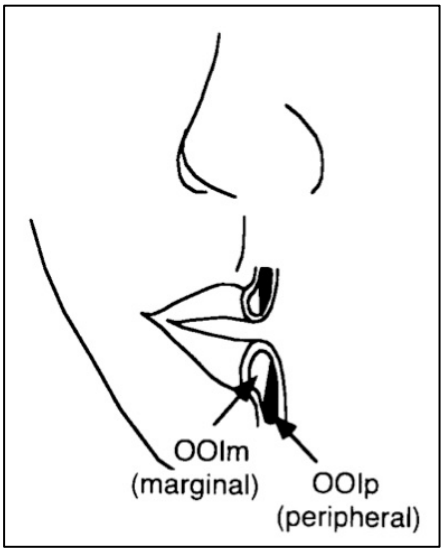


Figure 11 : illustration des parties marginale et périphérique du muscle Orbicularis Oris (Honda et al., 1995)

D'autres muscles périphériques ont un rôle indirect dans le mouvement des lèvres :

- Le Masséter : Un des muscles les plus volumineux du visage. Un peu en retrait vers les oreilles mais toujours sur le visage, situé sous la couche musculaire superficielle (OOS, dépresseurs, etc), le masseter s'étend de l'arc zygomatique (structure osseuse situé sous les yeux) à la mandibule.
- Le Digastrique : Le digastrique a deux parties : le ventre antérieur qui est situé sous la mandibule, de l'extrémité antérieure mandibulaire à l'os hyoïde, et le ventre postérieur qui part de l'os hyoïde et s'insère sur le processus mastoïdien qui est juste en dessous de l'oreille. La partie antérieure ressemble à un V à l'envers dont la pointe est située sur le menton lorsque l'on cherche à la localiser en demandant au sujet de lever la tête (cf. Figure 12).
- Le Platysma : c'est un muscle qui s'étend de la couche profonde de la peau au niveau du haut du buste à la partie basse de la mandibule et de la commissure des lèvres. Il aide par co-contraction à l'abaissement de la commissure des lèvres.
- Le Ptérygoïdien médial (dit interne) : c'est un muscle parallèle au muscle Masséter, interne à l'os mandibulaire, et qui a pour fonction de participer à l'élévation de la mandibule.

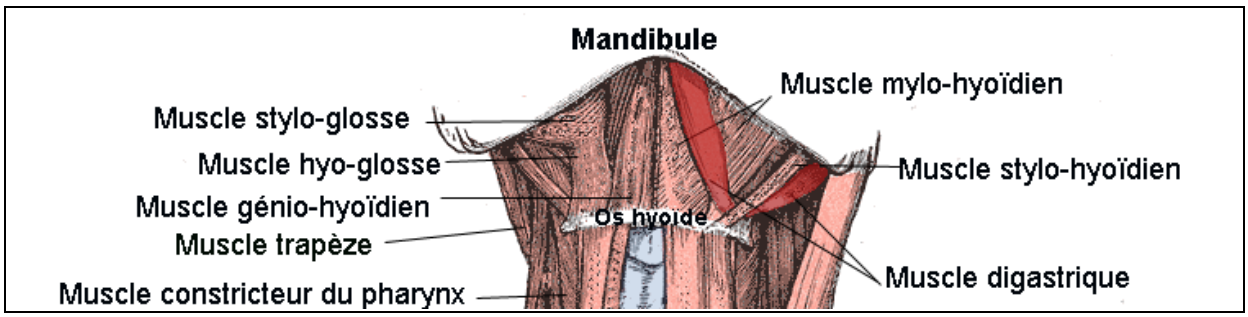


Figure 12 : illustration du positionnement du muscle digastrique (réf : wikipédia)

1.2. Bilan des études portant sur la description fonctionnelle des muscles orofaciaux

Duchenne (1862) a, le premier, utilisé une technique de stimulation électrique, non douloureuse, et mise en pratique à l'aide d'aiguilles intra-musculaires dans l'objectif d'établir une cartographie musculaire orofaciale précise en stimulant chaque muscle isolément. Il se confrontera alors à la superposition et au maillage complexe des muscles de la face.
Un peu plus d'un siècle plus tard, Hjortsjö (1969) apprend à contracter isolément chaque muscle de son visage et réalise 22 photographies pour distinguer 23 mouvements de base (sorte de répertoire gestuel de base) associés à certains muscles spécifiques (cf. Figure 13Figure 13). Ces mouvements de base sont des sortes d'« unités musculaires fonctionnelles », pas forcément associées à des fonctions de la vie courante ou la manifestation d'émotions.
Sept ans plus tard, Ekman et Friesen (Ekman and Friesen, 1976) adoptent la même démarche que Hjortsjö (1969) en se servant de stimulations électriques pour affiner la détection des muscles lorsqu'il y avait des incertitudes dans les travaux de Duchenne.
Les enregistrements EMGs apparaissent à la même époque, permettant de quantifier le recrutement musculaire de certaines fibres correctement localisées (techniques EMGs détaillées ci-dessous dans la section C). Plusieurs chercheurs ont recours à ces techniques pour étudier le positionnement des fibres musculaires orofaciales (Folkins, 1978; Isley and Basmajian, 1973; Lucero and Munhall, 1999; O'dwyer and Quinn, 1981). Folkins (1978) réalise des stimulations électriques des muscles régissant le mouvement de la lèvre inférieure (MENT, DLI, DAO, OOI) et corrèle l'activité électrique au déplacement de la lèvre inférieure à l'aide de photographies simultanées.
Lapatki et al (Lapatki et al., 2003, 2006) étudient 4 mouvements de base inspirés de l'étude d'Ekman et Friesen (1976) à l'aide de la technique de l'électromyographie à haute-densité (HD-EMG, voir ci-dessous). Le but des travaux de Lapatki et al est d'identifier et de localiser les fibres musculaires activées au cours des mouvements de lèvres, ainsi que la direction précise des fibres musculaires sous-jacentes.

1.3. Mouvements de base

Vingt-quatre mouvements de base (dont 11 sont des mouvements labiaux, cf. Figure 13) ont été introduits par Hjorstlö (1969) et précisés par Ekman et Friesen (1976), associés à la contraction isolée d'un ou deux muscles (sortes d'équivalents des répertoires de base pour les mouvements faciaux). Les FAUs (« Facial Action Unit », en anglais) sont alors définies par Ekman et Friesen (1976), dont 18 correspondent à des mouvements labiaux (cf. Figure 14 pour la description de Ekman et Figure 15 pour une illustration détaillée des mouvements labiaux correspondant aux FAUs). Cette notion d'unités d'action faciale est réutilisée ensuite par d'autres études de façon moins contrôlée (Zhang and Ji, 2005) .

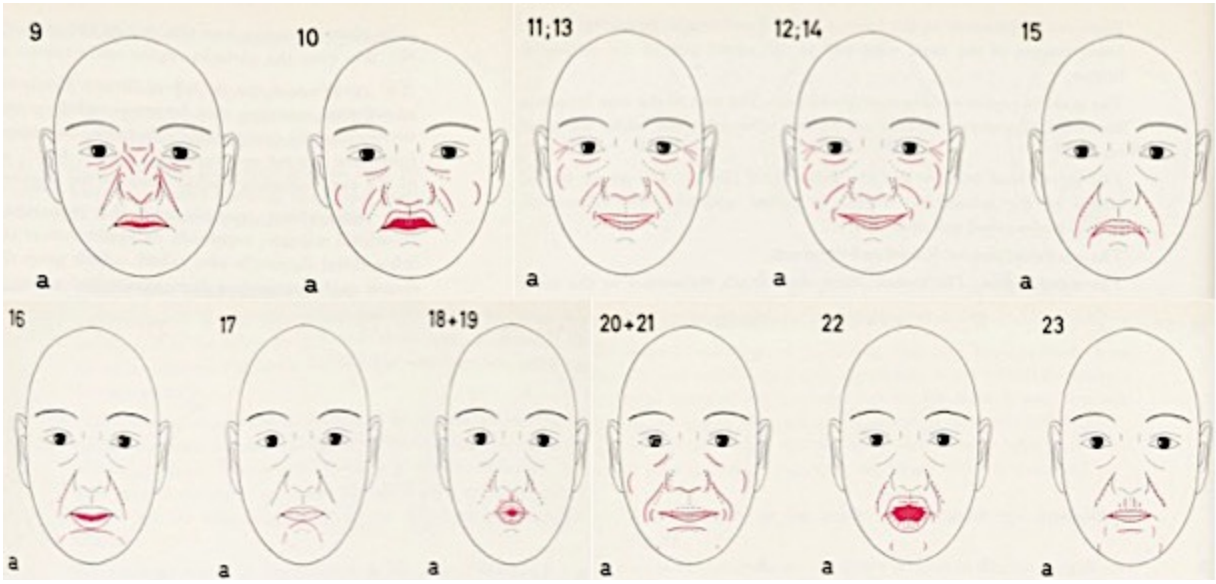


Figure 13 : Ensemble de 23 mouvements de base permis par la stimulation des muscles orofaciaux isolés (Victor's face, from Hjorstjö 1969)

9	Levator labii superioris alaeque nasi	Upper lip raised and inverted; superior part of the nasolabial furrow deepened; nostril dilated by the medial slip of the muscle
10	Levator labii superioris	Upper lip raised; nasolabial furrow deepened producing square-like furrows around nostrils
11	Levator anguli oris (a.k.a. Caninus)	Lower to medial part of the nasolabial furrow deepened
12	Zygomaticus major	Lip corners pulled up and laterally
13	Zygomaticus minor	Angle of the mouth elevated; only muscle in the deep layer of muscles that opens the lips
14	Buccinator	Lip corners tightened. Cheeks compressed against teeth
15	Depressor anguli oris (a.k.a. Triangularis)	Corner of the mouth pulled downward and inward
16	Depressor labii inferioris	Lower lip pulled down and laterally
17	Mentalis	Skin of chin elevated
18	Incisivii labii superioris andIncisivii labii inferioris	Lips pursed
20	Risorius w/ platysma	Lip corners pulled laterally
22	Orbicularis oris	Lips everted (funneled)
23	Orbicularis oris	Lips tightened
24	Orbicularis oris	Lips pressed together
25	Depressor labii inferioris, or relaxation of mentalis, or orbicularis oris	Lips parted
26	Masseter; relaxed temporal and internal pterygoid	Jaw dropped
27	Pterygoids and digastric	Mouth stretched open

Figure 14 : 18 unités d'action faciale définies par Ekman et al (1976)

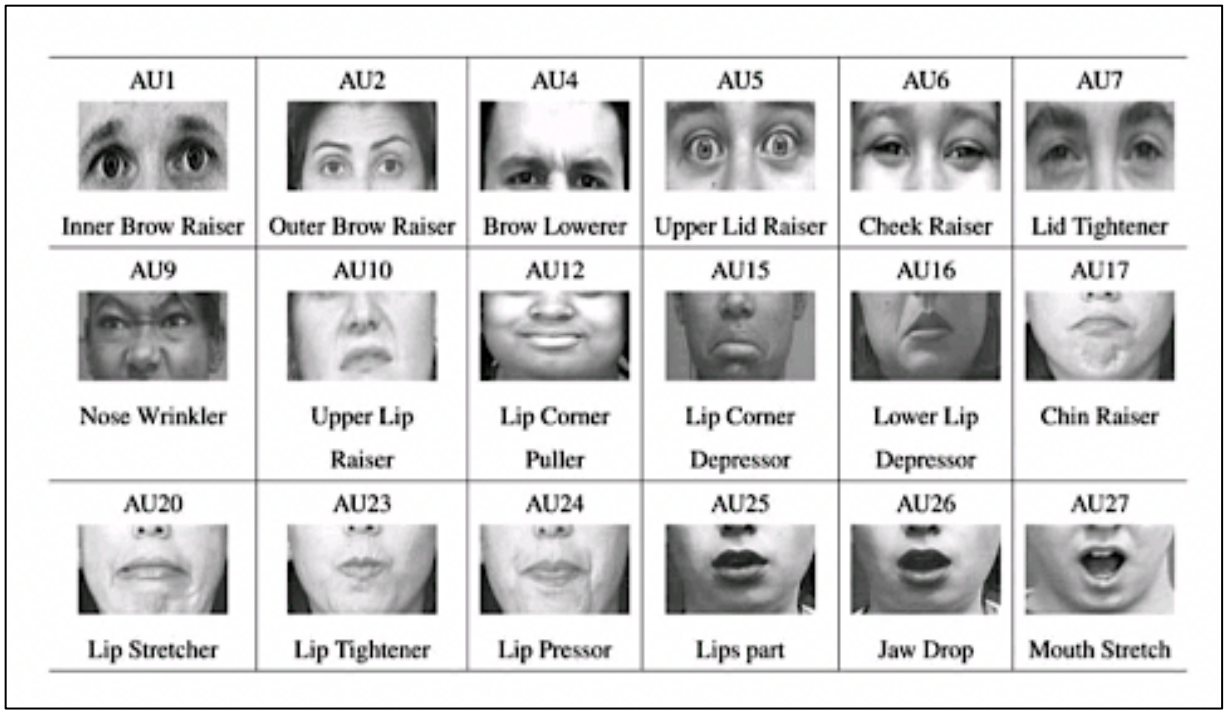


Figure 15 : illustration des 18 FAUs décrites par Ekman (1976) (Zhang and Ji., 2005)

1.4. Unités motrices faciales et (in)dépendances physiologiques

Les liens physiologiques correspondent aux liens fonctionnels qui régissent l'organisation entre organes et tissus du corps humain.

Comme la plupart des autres muscles du corps humain et du muscle Masséter, les muscles orofaciaux et linguaux sont recrutés de façon excentriques et concentriques (Cattaneo and Pavesi, 2014; McComas, 1998; Nazari, 2011). Les muscles orofaciaux sont innervés par de petites unités motrices, dont le nombre est assez important (contrairement aux unités motrices qui innervent les muscles des membres postérieurs et antérieurs). La distance assez courte entre les fibres musculaires orofaciales et les motoneurones (cf. section 3 de ce chapitre) permet un délai faible de propagation de l'influx électrique (Ito et al., 2004).

Comme l'illustre la Figure 16, il y a 5 groupes de muscles orofaciaux, selon leur innervation par le nerf facial, qui est subdivisé en 5 groupes de fibres nerveuses, appelées « branches » (de haut en bas, les branches temporale, zygomatique, buccale, mandibulaire et cervicale) :

- Les muscles innervés par la branche Zygomatique et la branche Buccale (LLSAN, LLS, LAO, Zyg_Min, Zyg_Maj)
- Les muscles innervés par la branche Buccale (Risorius, et BUC)
- Les muscles innervés par la branche Mandibulaire et par la branche Buccale (DAO, et les différentes parties musculaires du muscle Orbicularis Oris)
- Les muscles innervés par la branche Mandibulaire (DLI, MENT)
- Les muscles innervés par la branche cervicale (le Platysma, le DIG)

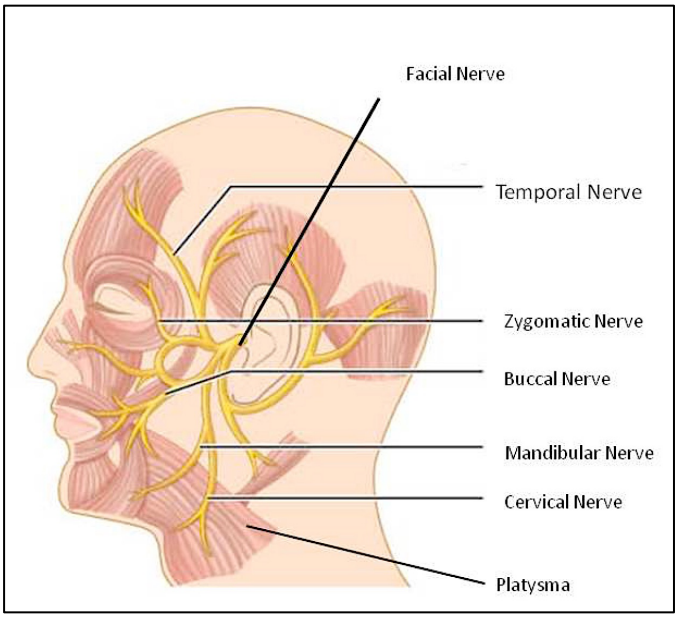


Figure 16 : Le nerf facial et ses différentes branches innervant les muscles orofaciaux (Nazari, 2011 ; Marieb and Hoehn, 2007)

Certains auteurs font l'hypothèse que l'Orbicularis Oris peut être divisé en 4 quadrants : 2 pour la partie supérieure du sphincter (droite et gauche), et 2 pour la partie inférieure (droite et gauche toujours). Bien que l'innervation des 4 « quadrants » du muscle Orbicularis Oris semble être la même, beaucoup d'études se sont intéressées à l'indépendance neurophysiologique de leur activation (Wohlert and Goffman, 1994) : est-il possible de recruter séparément et de manière non corrélée chacun des quadrants de ce sphincter ? Il semble qu'il y ait consensus sur le fait que les parties supérieures et inférieures du muscle soient indépendantes d'un point de vue neurophysiologique (Isley and Basmajian, 1973; Leanderson et al., 1972; Wohlert and Goffman, 1994) : les niveaux d'activation musculaire des parties OOS et OOI sont significativement différents pour certains gestes oraux comme la protrusion labiale, le sourire et la production de syllabes. En revanche, Wohlert and Goffman (1994) démontrent l'inter-dépendance physiologique des parties droites et gauches de l'Orbicularis Oris, ce qui permet de conclure d'un point de vue fonctionnel qu'il n'y a pas de latéralisation des activités EMGs de ce muscle.

Plusieurs études se sont intéressées récemment aux relations non-linéaires et neurophysiologiques entre l'activité des différents muscles orofaciaux. Basée sur les travaux de Schuman et al (Schumann et al., 2010) et de Flynn et al (Flynn et al., 2015), les résultats de Eskes et al (Eskes et al., 2018) permettent une estimation de l'activité de certains muscles à partir de l'activité d'autres muscles. On peut ainsi extraire les relations suivantes, estimées à partir de la mesure EMG de surface de l'activité des sept muscles d'intérêt sur six sujets produisant des expressions faciales contrôlées (Lapatki et al, 2005) :

(1) $OO_{périphérique}$ = 0.5 * (OOI + OOS) (subdivisions différentes du sphincter, et non muscles différents)

(2) $OO_{marginalis}$ = 0.1 * (OOI + OOS) (subdivisions différentes du sphincter, et non muscles différents)

(3) BUC = 0.5 * (RIS + ZYG)

(4) LAO = 0.75 * (LLSAN)

(5) DLI= 0.75 * DAO

1.5. Variabilité inter-individuelle

D'un point de vue purement anatomique, la variabilité inter-individuelle influence très fortement les formes et la taille des fibres musculaires du visage.
Les lèvres sont sensiblement différentes d'un sujet à un autre, au niveau de leur forme (Hjortsjö, 1970; Martin, 1928), cf. Figure 17.

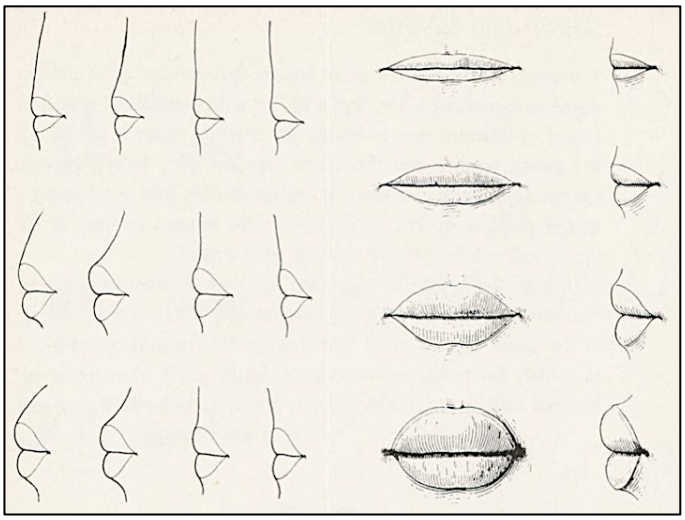


Figure 17 : différentes formes de lèvres, témoins de l'effet de la variabilité inter-individuelle sur l'anatomie orofaciale (Martin, 1928)

Il a été montré que la variabilité inter-individuelle au niveau de la forme des lèvres intrinsèque, au repos, provient entre autres d'une variabilité musculaire au niveau des fibres du sphincter labial Orbicularis Oris (Fuchs et al., 2015; Stavness et al., 2013). Les simulations réalisées par Stavness et al (2013) montrent notamment que la forme et la profondeur de la partie périphérique de l'Orbicularis Oris est associée à la protrusion et à l'aire labiale.
La présence du muscle risorius et du muscle zygomatique mineur n'est pas systématique sur une musculature orofaciale (Pessa et al., 1998). D'après l'étude anatomique de Pessa et al (1998) basée sur 50 dissections hémifaciales, le muscle zygomatique mineur est remplacé dans 34% des cas par un muscle zygomatique majeur bifide.
De la même manière que pour le zygomatique mineur, le faisceau inférieur du muscle Buccinateur n'est présent sur l'entrelacement musculaire orofacial que dans 35% des cas (Hur et al., 2011), ce qui influence directement les relations de coordination inter-musculaires, et notamment les relations entre l'Orbicularis Oris et le Buccinateur permettant la génération de certains gestes de parole et gestes de la vie quotidienne (cf. section 2 de ce chapitre).

Enfin, Volk et al (Volk et al., 2013) ont montré que le volume musculaire et la raideur des fibres orofaciales (au niveau des muscles OOS, DAO, DLI, et MENT) varient en fonction de l'âge et du genre du sujet.

2. Rôle des différents muscles péri-oraux dans différents gestes labiaux

Tandis que dans la partie précédente, nous nous focalisions sur chaque muscle isolément, dans le but de les décrire et de les comprendre, nous nous intéresserons dans cette partie à leur recrutement coordonné dans la réalisation de différents gestes (de parole, mais pas uniquement …).
Les nombreux muscles faciaux, et notamment ceux que l'on nomme péri-oraux, interagissent perpétuellement pour contrôler le mouvement des lèvres et de la mandibule. Le rôle de chaque muscle peut être différent en fonction du mouvement que l'on souhaite produire.

2.1. Gestes de base (sans fonction particulière dans la vie courante)

A la différence des mouvements de base (nommés également Unités d'Action Faciales) présentés dans la 1ère partie de ce chapitre, les gestes de base labiaux ci-dessous peuvent recruter plusieurs muscles simultanément. On s'intéresse à ces gestes de base car ils composent chacun des mouvements plus complexes ayant des fonctions biologiques importantes, parmi lesquelles on compte les expressions faciales émotionnelles ou les gestes de parole.

Les gestes de base principaux peuvent être énoncés comme suit (Eskes et al., 2018; Isley and Basmajian, 1973; Schumann et al., 2010) :
- La compression inter-labiale (T07 sur la Figure 18).
- Le sourire volontaire (T09 sur la Figure 18), ou étirement des lèvres.
- L'abaissement de la lèvre inférieure (T10 sur la Figure 18).
- La protrusion des lèvres, leur faisant prendre une forme de « cul de poule » (T14 sur la Figure 18).
- Le plissement du nez (T21 sur la Figure 18),
- La fermeture des yeux (T26 sur la Figure 18).

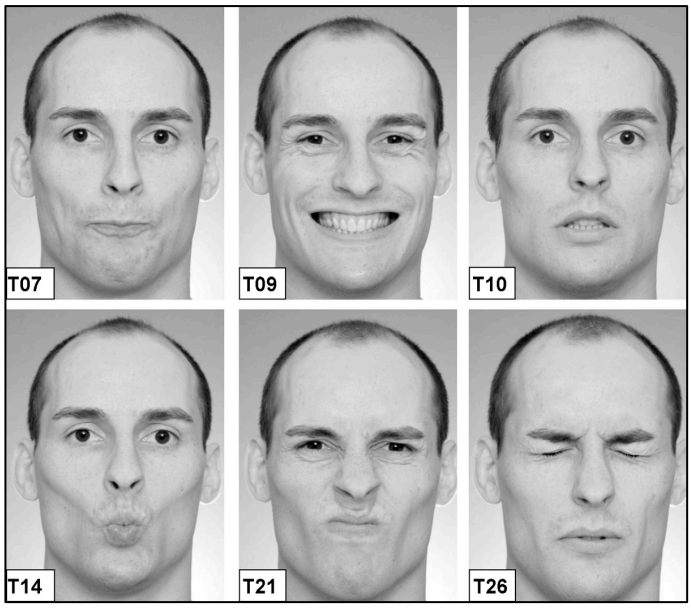


Figure 18 : gestes orofaciaux de base (Schuman et al, 2010)

Isley et Bajmajian (1973) utilisent les techniques délectromyographie intra-musculaire pour étudier le recrutement des muscles orofaciaux OOI, OOS, BUC, ZYG, LAO, DAO, LLSAN, DLI, MENT et Platysma au cours de ces gestes de base. Ils montrent notamment que les patrons de recrutement musculaire sont très variables d'un sujet à un autre, et qu'il existe une corrélation très forte entre le recrutement du muscle BUC et celui du muscle LAO : chaque mouvement d'élévation recrutant le muscle LAO induit un recrutement du muscle BUC, ce qui est un exemple fort de covariation musculaire au sein d'un geste de base. Les résultats de leur travaux ont été repris par deux études plus récentes (Eskes et al., 2018; Schumann et al., 2010), qui détaillent à l'aide de techniques de mesure plus robustes les patrons d'activation temporel des muscles orofaciaux d'intérêt au cours de ces gestes de bases.

Schuman et al (2010) mesurent à l'aide d'électrodes EMGs de surface (cf. section 3 de ce chapitre) les activités musculaires de 10 muscles orofaciaux (dont OOS, OOI, LLSAN, ZYG_Maj, ZYG_Min, Masséter, DAO, DLI et MENT) pour chacun des deux côtés du visage. La Figure 19 présente les différents patrons d'activation musculaire des 10 muscles considérés pour les 27 gestes de base. Eskes et al (2018) n'étudient plus récemment qu'un échantillon des 27 gestes de base (avancement labial, plissement du nez, abaissement des commissures des lèvres et sourire volontaire), leurs résultats sont représentés sur la Figure 20.

	Frontalis muscle		Superior orbicularis oculi muscles		Inferior orbicularis oculi muscles		Levator labii sup. muscles (-alaeque nasi)			Zygomatic muscles			Orbicularis oris muscles pars superior		Orbicularis oris muscles pars inferior		Mentalis muscles		Depressor labii muscles		Depressor anguli oris muscles	
epos	med	lat	med	lat	med	lat	sup	med	inf	sup	med	inf	med	lat	med	lat	sup	inf	sup	inf	sup	inf
left	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	39	35	41	37	43
right	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	40	36	42	38	44
T1	12	11	11	11	14	16	16	17	16	16	17	18	18	19	28	25	25	22	24	23	17	16
T2	12	12	12	12	15	15	16	15	16	17	18	19	18	21	32	27	30	23	24	28	16	17
T3	11	11	11	11	15	15	15	16	16	16	18	20	17	19	28	25	31	24	23	29	18	18
T4	10	10	10	10	13	1β	13	13	15	15	16	16	17	17	42	25	34	27	35	35	19	20
T5	11	11	10	11	15	13	15	18	21	13	16	18	27	32	37	52	27	23	28	23	22	21
T6	11	11	11	11	16	15	18	21	23	15	17	19	28	38	41	**75**	30	24	29	26	28	24
T7	14	14	15	14	22	21	27	36	46	29	35	42	**74**	**93**	**74**	**94**	**73**	67	58	56	55	46
T8	15	15	14	14	17	18	19	19	21	17	19	20	24	29	35	38	53	46	44	45	40	51
T9	15	15	15	16	22	35	33	27	29	57*	**72***	58*	38	57	42	55	39	33	39	37	33	28
T10	10	10	10	10	12	13	15	13	13	14	15	16	21	22	**78**	62	**102***	55	**90**	**71**	39	47
T11	14	13	14	14	18	16	21	30	33	16	17	21	61	67	43	54	62	54	50	51	53	63*
T12	10	11	12	10	22	18	25	46	44	15	16	14	29	32	19	21	19	18	18	17	12	13
T13	12	12	14	14	20	21	27	31	32	21	22	23	44	53	**128***	**93**	**85**	62	**113***	**107***	49	56
T14	13	12	14	13	21	15	23	33	50	18	21	27	**83***	**117***	**126**	**224***	**73**	59	**91**	69	62*	56
T15	14	14	15	14	19	17	23	30	38	22	25	25	**73**	**89**	**92**	**100**	**71**	68*	58	54	38	36
T16	12	12	12	12	14	14	16	21	25	14	15	17	30	34	46	41	60	45	37	36	23	24
T17	10	10	11	10	15	13	17	23	28	16	18	19	44	63	**75**	**121**	47	37	56	44	42	29
T18	11	10	11	11	15	13	15	20	25	13	15	17	29	39	37	32	58	61	43	42	27	31
T19	11	10	11	11	18	15	20	26	36	17	18	23	51	**75**	68	**97**	42	36	45	39	31	31
T20	18	21	17	17	27	32	34	35	40	32	29	27	38	46	**87**	**88**	**70**	47	**88**	**93**	39	40
T21	20	18	20	16	38	26	43*	**89***	**88***	22	23	19	28	31	13	16	13	16	13	13	14	13
T24	29	26	12	12	8	8	7	8	8	7	8	7	7	7	7	7	8	8	7	8	7	7
T25	32	33	21	13	9	8	7	11	10	6	6	6	7	7	7	7	9	8	7	6	7	6
T26	53*	**75***	**123***	**118***	**111***	**84***	37	28	21	20	17	14	16	16	11	12	51	37	61	39	26	30
T27	15	17	18	17	21	24	14	13	12	10	10	8	10	10	10	9	13	11	10	9	9	8

Figure 19 : tableau des valeurs les plus basses des activités EMG (valeurs en μV) de Schuman et al (2010) pour chacun des gestes orofaciaux de base. Les valeurs sont obtenues sur 27 sujets adultes en bonne santé. Les amplitudes EMG > 70 μV sont en gras. Les 3 amplitudes EMG les plus élevées par muscle sont soulignées. La valeur maximum observée sur chaque muscle est accompagnée d'un astérisque.

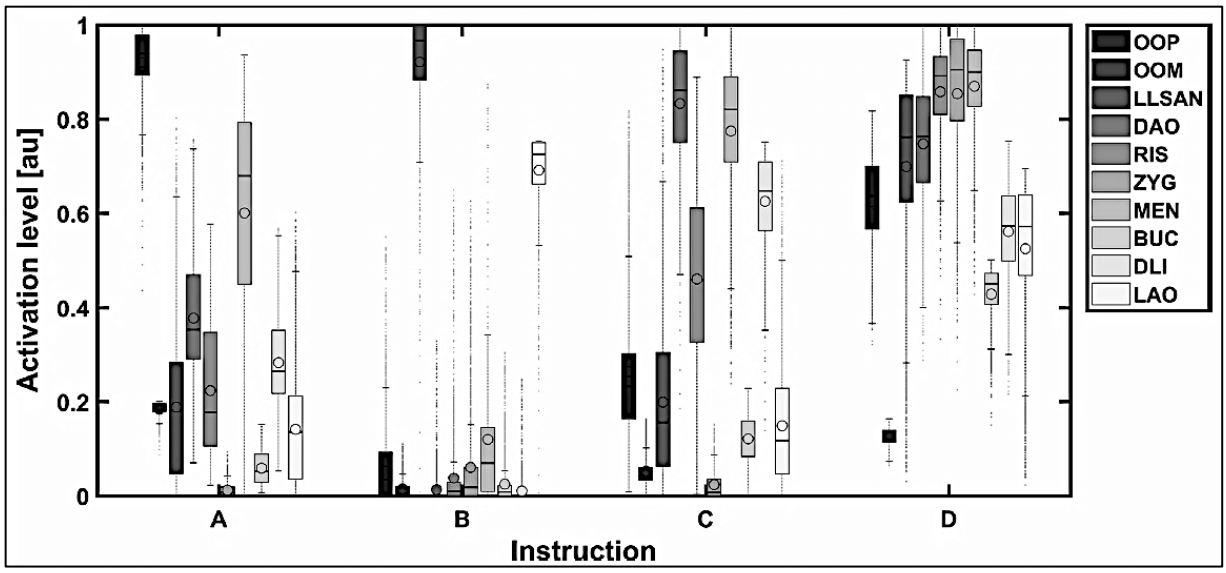


Figure 20 : patrons d'activation musculaire des muscles OOp, OOm, LLSAN, DAO, RIS, ZYG, MENT, BUC, DLI et LAO par Eskes et al (2018) (activités normalisées par tâche, par muscle et par sujets), étudiés pour 4 gestes de base (A- protrusion labiale, B- plissement du nez, C- abaissement des commissures des lèvres et D- sourire volontaire)

Le geste de compression inter-labiale est réalisé par un recrutement conjoint de la partie inférieure du muscle Orbicularis Oris et du muscle Mentalis. On parlera dans la suite de phénomène de co-activation (notion développée dans la partie 3 de ce chapitre). Le geste du sourire volontaire ou étirement labial recrute les fibres musculaires des muscles Zygomatiques (Schumann et al., 2010) mais également d'autres muscles périphériques, comme les muscles élévateurs et la partie supérieure de l'Orbicularis Oris (Eskes et al., 2018). Le geste de protrusion labiale (T14 dans Schuman et al., 2010 et A dans Eskes et al., 2018) recrute fortement 5 muscles distincts : l'OOS, l'OOI, le MENT, et les muscles dépresseurs DLI et DAO. Ces résultats, en accord avec les précédents travaux (Cacou et al, 1996 ; Isley and Basmajian, 1973; O'dwyer and Quinn, 1981), s'expliquent par une activité agoniste des muscles OOS, OOI et MENT, et une activité antagoniste des muscles DLI et DAO qui ont une fonction de stabilisation du mouvement. Le mouvement d'abaissement de la lèvre inférieure est régi par les activités conjointes des muscles MENT et DLI, le dépresseur ayant le rôle de muscle agoniste et l'élévateur (MENT) le rôle de muscle antagoniste (Schumann et al., 2010). Le plissement du nez recrute principalement le muscle LLSAN, et la fermeture oculaire l'Orbicularis Occuli (Schumann et al., 2010).

2.2. Expressions faciales émotionnelles

La deuxième classe de mouvements faciaux pour lesquels les muscles péri-oraux sont recrutés est composée d'expressions faciales transcrivant une ou plusieurs émotion(s). Hjortsjö (1969) définit 24 expressions faciales émotionnelles (cf. Figure 21) en se basant sur les 24 mouvements de base (aussi noté Unités d'Action Faciale – FAUs -, et présentés ci-dessus dans la partie 1 de ce chapitre).

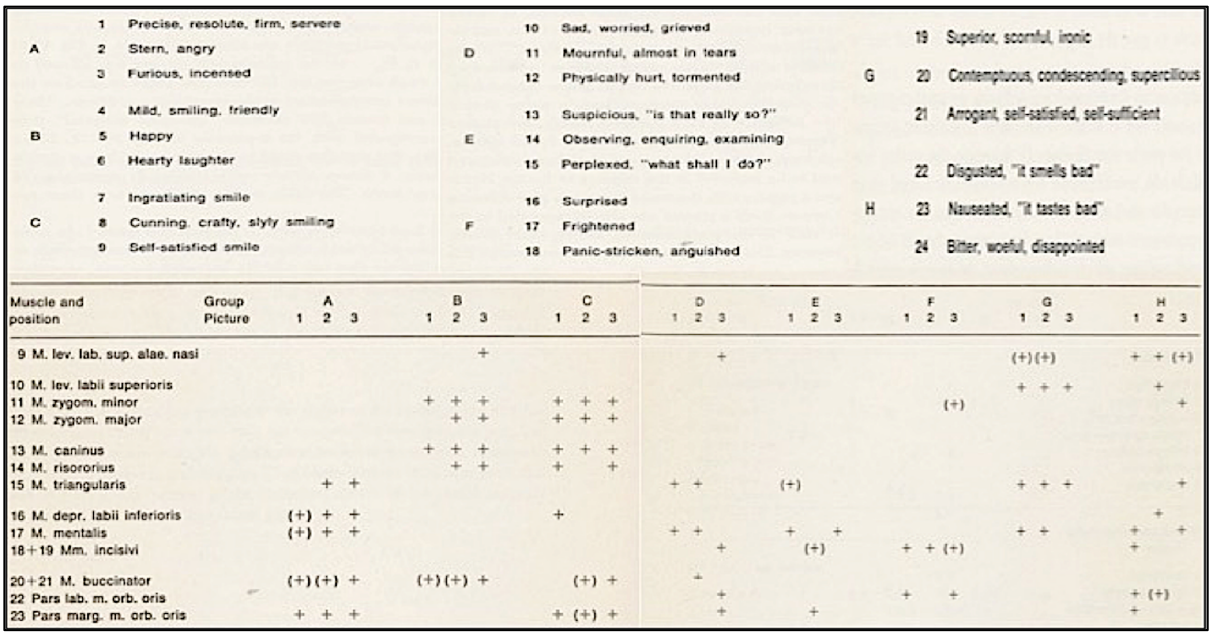


Figure 21 : 24 expressions faciales d'émotions (Hjortsjö, 1969)

En suivant la logique des recrutements musculaires observés sur les gestes de base du paragraphe précédent, et en regardant avec attention la Figure 21, on comprend aisément de quelle manière les patrons d'activation musculaire se construisent pour des expressions faciales émotionnelles : par exemple, pour l'expression de la joie (« Happy »), les muscles Zygomatiques, Risorius et Buccinateur sont les muscles majoritairement recrutés.

Les études ayant ensuite porté sur le recrutement musculaire orofacial au cours de la production d'expressions faciales émotionnelles montrent qu'il existe des différences significatives entre les patrons globaux d'activation au sein d'un ensemble d'émotions élémentaires, et notamment pour les expressions de la colère, du dégout et de la joie (van Boxtel, 2010; Cacioppo et al, 1987 ; Ekman and Friesen, 1976; Vrana, 1994).

Les résultats de ces travaux sont résumés dans la Figure 22, issue de la synthèse de Van Boxtel et al. (2010).

Elementary emotions	Muscles involved	Produced actions
Happiness	● Orbicularis oculi ● Zygomaticus major	Closing eyelids Pulling mouth corners upward and laterally
Surprise	● Frontalis ● Levator palpebrae superioris	Raising eyebrows Raising upper eyelid
Fear	● Frontalis ● Corrugator supercilii ● Levator palpebrae superioris	Raising eyebrows Lowering eyebrows Raising upper eyelid
Anger	● Corrugator supercilii ● Levator palpebrae superioris ● Orbicularis oculi	Lowering eyebrows Raising upper eyelid Closing eyelids
Sadness	● Frontalis ● Corrugator supercilii ● Depressor anguli oris	Raising eyebrows Lowering eyebrows Depressing lip corners
Disgust	● Levator labii superioris ● Levator labii superioris alaeque nasi	Raising upper lip Raising upper lip and wrinkling nasal skin

Figure 22 : Muscles orofaciaux recrutés pour la production des expressions faciales émotionnelles de base (Van Boxtel et al, 2010; inspiré de Ekman et Friesen., 1976)

2.3. Gestes de parole

Il y a différents traits articulatoires labiaux en Français qui permettent de distinguer les différentes catégories phonétiques (Benoît et al. 1992; Abry and Boe, 1986). Abry et Boe (1986) définissent un certain nombre de paramètres articulatoires labiaux (autant sur la vue de face que sur la vue de profil des lèvres) dans le but de décrire articulatoirement les gestes de production de parole (paramètres A, B et S pour la vue de face visible sur la Figure 23-A). La covariation des paramètres A et B, nommés respectivement aperture labiale (lip height) et étirement labial (lip width), permet notamment de catégoriser au niveau du geste les différents patrons de mouvement des lèvres en condition de production de parole (Figure 23-B). Benoît et al (1992) définissent à partir de l'ensemble des paramètres articulatoires mesurables 21 « visèmes » (analogues visibles des phonèmes dans le domaine audible), sortes d'unités de forme pour l'ensemble lèvres-mandibule dans le cas de la production de parole en langue Française. Ces 21 visèmes constituent un « espace labial » dans lequel on peut décrire de manière articulatoire chacun des gestes de parole. Cet espace possède en Français deux dimensions principales (Benoît et al., 1992) (observables sur la Figure 23) : une dimension verticale (ouvert-fermé) et une dimension horizontale (étiré-arrondi)(composante principale du repère dans lequel sont définies les lèvres).

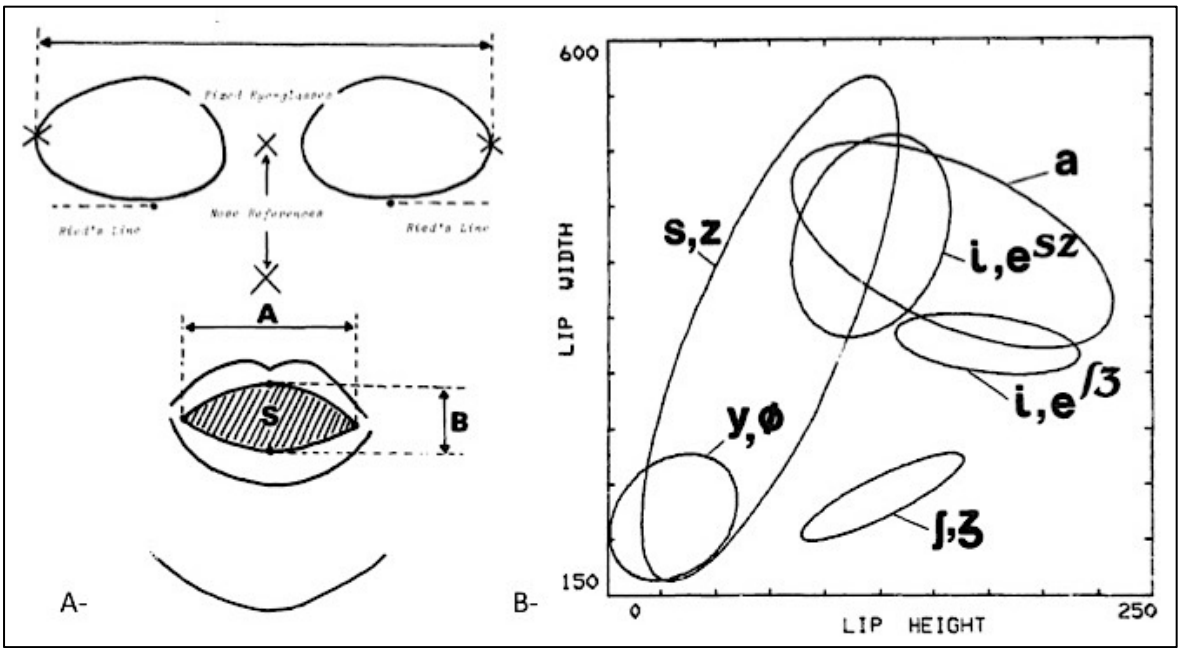


Figure 23: A- paramètres articulatoires labiaux mesurés sur la vue de face, B- variations des paramètres A (écartement, en ordonnée) et B (apertire en abscisse) selon la catégorie phonétique (Abry et Boe., 1986).

Plusieurs modèles biomécaniques et articulatoires des lèvres ont été proposés pour modéliser le contrôle musculaire des traits articulatoires présentés ci-dessus (Folkins, 1978; Honda et al., 1995; Nazari et al., 2011; Stavness et al., 2013), mais également à modéliser la force articulatoire associée (Nazari et al., 2011). Ces différents travaux de modélisation exploitant certaines mesures EMGs des recrutements musculaires orofaciaux ont permis de générer une certaine quantité de données à la fois articulatoires et physiologiques. Ces modèles (modèle de Nazari et al (2011), ou de Honda et al (1995)) permettent donc dans un second temps d'étudier les patrons d'activation musculaire orofaciale caractérisant les gestes complexes de production de parole.
Les simulations se focalisent sur les muscles suivants : OOS, OOI, LLS, DLI, LAO, DAO, MENT, et Risorius (Honda et al., 1995). Ces muscles sont ceux qui sont ciblés pour la compréhension des stratégies de contrôle physiologique des gestes de parole.

La caractérisation des activités musculaires orofaciales a été réalisée pour plusieurs catégories de gestes de parole, associées à des catégories phonétiques bien spécifiques.
Il semble y avoir un effet des catégories vocaliques sur les activités musculaires des muscles recrutés : Des différences significatives de coordination musculaire existent entre les catégories vocaliques (cf. Figure 24).
Les fricatives labiales sont caractérisées par une activation prédominante des muscles liés au mouvement de la mandibule et de la lèvre supérieure (OOS et DAO notamment). Cette stratégie physiologique s'accompagne d'une augmentation de la rigidité de l'ensemble des tissus musculaires du visage permettant une réalisation précise de la constriction (Gomi et al., 2002).

Un certain nombre d'études portent sur la variation au cours du temps de l'amplitude des activités musculaires lors de la production des consonnes occlusives bilabiales (Leanderson et al., 1972; Lubker and Parris, 1970; McClean and Clay, 1995; McClean and Tasko, 2003; Raphael, 1975; Slis, 1970; Tatham and Morton, 1969). Les muscles dont l'activité est mesurée

sont les muscles agonistes et antagonistes du geste d'occlusion labiale, il s'agit donc des muscles MENT, OOS, OOI, DAO, LAO, BUC et DLI (Gay and Hirose, 1973; Slis, 1970). Les patrons d'activation musculaires mesurés semblent être similaires pour les consonnes voisées et les consonnes sourdes (Tatham and Morton, 1969). Le degré de recrutement des muscles considérés est similaire pour l'ensemble des muscles d'intérêt au cours de la production du logatome incluant la consonne occlusive labiale, mais ne permet pas de clarifier quels sont les muscles agonistes et antagonistes (Gay and Hirose, 1973) (cf. Figure 25). Il n'y a pas d'effet significatif du débit de parole ou de l'effort acoustique sur la description musculaire des gestes de production des occlusives labiales (McClean and Clay, 1995; McClean and Tasko, 2003).

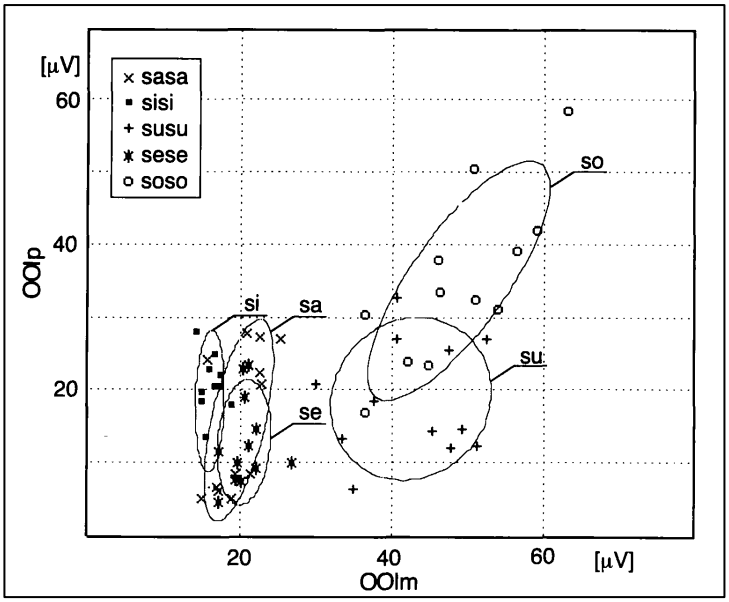


Figure 24: Activités musculaires des parties périphériques et marginales de l'Orbicularis Oris Inférieur au cours de la production de logatomes /sVsV/ (Honda et al., 1995)

L'étude de ces activités péri-orales lors de la production de parole (chez l'adulte sain) trouve des applications dans de multiples domaines :

1- la reconnaissance automatique de la parole via des gestes articulatoires sous-jacents dans le but de re-synthétiser des sons de paroles (Bhowmik et al., 2017; Meltzner et al, 2008; Schultz and Wand, 2010; Wand et al., 2013) ou d'animer des avatars et des têtes parlantes (Eskes et al., 2017a, 2018; Lucero and Munhall, 1999).
2- la description et compréhension de différents troubles de la parole : le bégaiement (Choo, 2008; Kelly et al., 1995; van Lieshout et al., 1993; McClean et al., 1984, 2004), les dysarthries et notamment les dysarthries parkinsoniennes (Leanderson et al., 1967), les apraxies (Hough and Klich, 1987).
3- la description et la compréhension du développement du contrôle labial chez l'enfant (Ruark and Moore, 1997; Wohlert and Smith, 2002)

	OOSM	OOSL	OOI	LAO	BUC	DAO
pi	83–127 (60–190)	(25–52)	58–69 (110–40)	27–38 (38–52)	46–126 (354–550)	690–710 (450–975)
pa	56–75 (60–83)	(25–125)	77–77 (50–65)	27–27 (33–60)	76–304 (30–142)	451–564 (605–950)
pu	67–71 (150–170)	(95–195)	70–74 (65–135)	26–37 (20–35)	77–191 (50–350)	504–616 (820–960)
ıp	54–82 (75–155)	(65–75)	37–47 (40–50)	22–26 (60–80)	65–156 (85–175)	626–788 (710–920)
ap	53–67 (65–105)	(60–95)	34–41 (35–40)	35–39 (35–40)	112–183 (65–410)	915–1009 (960–980)
up	77–88 (95–115)	(80–125)	95–111 (105–180)	138–149 (145–185)	135–242 (75–85)	837–1167 (850–960)
bi	78–114 (70–180)	(65–90)	59–69 (65–130)	27–68 (30–40)	81–230 (120–180)	671–965 (920–1020)
ba	99–108 (60–155)	(40–80)	63–69 (75–105)	39–61 (50–60)	132–514 (75–650)	730–854 (900–950)
ib	65–85 (40–160)	(40–45)	48–62 (40–60)	191–124 (60–240)	58–114 (60–350)	532–717 (225–950)
ab	64–80 (40–160)	(70–80)	47–54 (40–55)	81–47 (80–70)	103–134 (95–120)	763–938 (740–890)
mi	110–120 (45–190)	(35–95)	66–72 (42–65)	59–67 (55–85)	73–290 (40–560)	698–836 (475–980)
ma	85–113 (95–195)	(65–130)	53–58 (60–95)	37–65 (85–105)	179–560 (65–705)	662–704 (575–1145)
im	63–70 (70–110)	(35–65)	57–54 (45–55)	31–35 (30–35)	63–185 (50–170)	654–630 (550–950)
am	74–76 (55–170)	(80–95)	67–69 (70–80)	30–32 (50–55)	70–108 (190–275)	809–918 (640–950)
wi	68–78 (60–130)	(55–105)	88–69 (75–155)	22–26 (25–200)	124–145 (100–150)	318–367 (75–775)
wa	58–60 (55–60)	(65–150)	33–37 (55–95)	25–34 (25–30)	113–184 (105–200)	213–505 (50–650)

Figure 25 : valeurs moyennes des activités EMGs (en μV) des muscles péri-oraux (OOSm, OOSp, OOI, LAO, BUC, DAO) pour la production de logatomes incluant les consonnes labiales /p, b, m/ chez 1 sujet (Gay et Hirose, 1973). Chaque case est composée de la valeur moyenne de l'activité pour le débit modéré de production du logatome (valeur gauche) et de la valeur moyenne pour le débit rapide (valeur droite). Pour les muscles dont l'activité moyenne est forte, entre parenthèses sont indiquées des valeurs ponctuelles, propres au sujet.

2.4. Autres gestes

On peut évoquer ici d'autres gestes orofaciaux durant lesquels certains muscles péri-oraux sont recrutés.

Pour le geste de mastication, les muscles des lèvres (OOS, OOI, BUC, MENT) sont recrutés durant les phases pré et post-mastication, et le muscle Masséter est recruté de manière prédominante dans la phase de contact où la mastication a lieu (Santos and Vitti; Schieppati et al., 1989; Takada et al., 1996; Tomiyama et al., 2004). Les muscles de la langue et de la mandibule contribuent principalement au mouvement de mastication et de déglutition (Takada et al., 1996) : entre autre les muscles génioglossus (GG sur la Figure 26) et digastrique (DG sur la Figure 26) qui jouent un rôle crucial dans la fermeture mandibulaire et le position de la langue, avec contractions isométriques fortes.

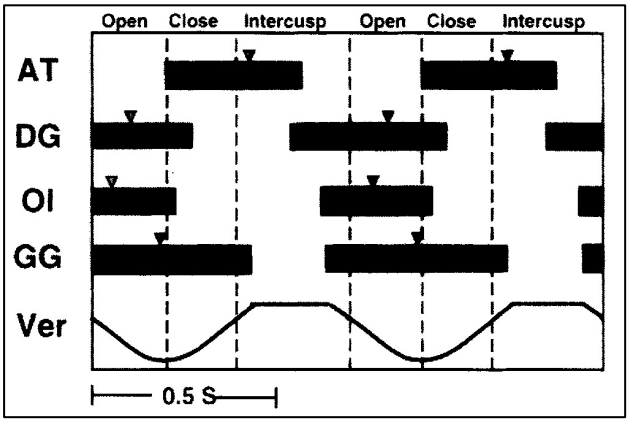


Figure 26: patrons d'activation des muscles AT (Temporalis Antérieur), DG (Digastrique), OI (Orbicularis Oris Inférieur) et GG (Génioglossus) au cours du mouvement de mastication (Takada et al., 1996). Le signal VER correspond au mouvement de la mandibule, les parties du signal correspondent donc à la partie mastication.

Le Buccinateur et les deux Orbicularis Oris sont également recrutés fortement lorsque l'on siffle, ou que l'on joue d'un instrument à vent, type trompette, clarinette, etc (Blanton et al., 1970; Fuhrimann et al.; Isley and Basmajian, 1973). Le Modiolus, notamment, est stimulé par une action agoniste des muscles Risorius et Buccinateur.

2.5. Bilan en termes de synergies et d'antagonismes musculaires

A l'intérieur du réseau musculaire complexe du visage, il existe plusieurs couples de muscles agonistes/antagonistes. Un muscle dit « agoniste » est un muscle recruté au cours de la production effective d'un mouvement : il participe à la génération du mouvement. Les muscles dits « antagonistes » sont des muscles qui sont également activés, mais dans le but de générer une stabilité et un contrôle des mouvements.
Au sein d'un réseau musculaire tel que celui-ci, Latash (Latash et al., 2007) décrit un processus de co-activation basé sur la notion de synergie et permettant au système nerveux de stabiliser la production de gestes à plusieurs degrés de liberté.

Deux muscles sont des « constricteurs » de l'orifice labial : l'OOS et l'OOI. Tous les autres muscles péri-oraux dilatateurs de l'orifice labial, en sont antagonistes Hjorstjo 1970). Les ensembles agonistes/antagonistes sont catégorisés selon leur fonction : Elévateur de la lèvre supérieure (LLSAN, LLS, ZYG_MIN) mobilisateurs de l'angle de la bouche (ZYG_MAJ, LAO, RIS, DAO), mobilisateurs de la lèvre inférieure (DLI, MENT), et muscle spécifique (BUC)

Le contrôle et la stabilité musculaire orofaciale est cruciale pour la bonne production de gestes labiaux et mandibulaires, silencieux ou de parole. Selon Latash (2007), une co-activation musculaire serait observée de façon quasi-permanente au niveau de groupe de muscles agonistes/antagonistes dans la plupart de nos mouvements, traduisant un effet de synergie musculaire, dont le rôle serait de contribuer à stabiliser les mouvements.

Bien que tous les muscles péri-oraux soient contrôlables indépendamment les uns des autres (Ekman and Friesen, 1976; Hjortsjö), en pratique on observe que le muscle élévateur de la lèvre inférieure (MENT) est quasiment toujours recruté en même temps que les muscles dépresseurs (DAO, DLI), que les muscles du sphincter buccal (OOI, OOS) et même que les

muscles Masséter ou Digastrique (Schumann et al., 2010). A contrario, le sphincter labial peut être étudié selon 4 pôles, plus ou moins indépendants d'un point de vue musculaire : l'OOI et l'OOS sont indépendants physiologiquement, mais ce n'est pas le cas des parties droites et gauche du muscle (Wohlert and Goffman, 1994)
Cette indépendance musculaire liée aux phénomènes de synergie et prodiguant à l'humain la capacité de contrôler la production de mouvements complexes tels que les expressions faciales, la production de parole ou la déglutition, réduit leur capacité à dissocier les muscles dans l'activité : les sujets non-entrainés ont beaucoup de difficulté à réaliser les gestes de base (Eskes et al., 2017b, 2017a).

3. Exploration EMG de l'activité musculaire périorale

3.1. Principes généraux de l'électromyographie

3.1.1. L'innervation musculaire

Quelle que soit sa localisation, le recrutement effectif d'un muscle résulte d'une succession d'évènements reliant le cortex moteur aux fibres du muscle (Merletti et Parker, 2004). La programmation motrice, réalisée dans les différentes aires du cortex moteur, excite les divers neurones du cortex moteur primaire, qui à leur tour excitent certains neurones situés cette fois-ci dans la moelle épinière ou le tronc cérébral (pour les muscles orofaciaux), et nommés motoneurones-alpha. Un signal électrique est généré par les motoneurones-alpha ainsi excités. Ce signal électrique est conduit par les axones (i.e. « fibres nerveuses ») reliant chaque motoneurones-alpha du système nerveux central à une ou plusieurs fibre(s) musculaire(s). On nomme l'ensemble {motoneurone, fibres musculaires excitées} unité motrice (MU selon l'anglais « motor unit »). Le nombre de fibres musculaires composant une unité motrice varie de 10 à 500, en fonction de la zone du corps et des caractéristiques du muscle (plutôt la partie basse de la fourchette pour les muscles squelettaux, et plutôt la partie haute pour les muscles orofaciaux). Le signal électrique se propageant le long des axones est composé de potentiels d'actions d'environ 1 à 2 millisecondes (augmentation puis chute de la charge électrique), provenant d'une dépolarisation et d'une repolarisation de la membrane interne de la cellule (ici le motoneurone-alpha). La propagation des potentiels d'actions le long des fibres musculaires conduit à un phénomène ionique responsable de la contraction du muscle.
La Figure 27 illustre ce processus physiologique.

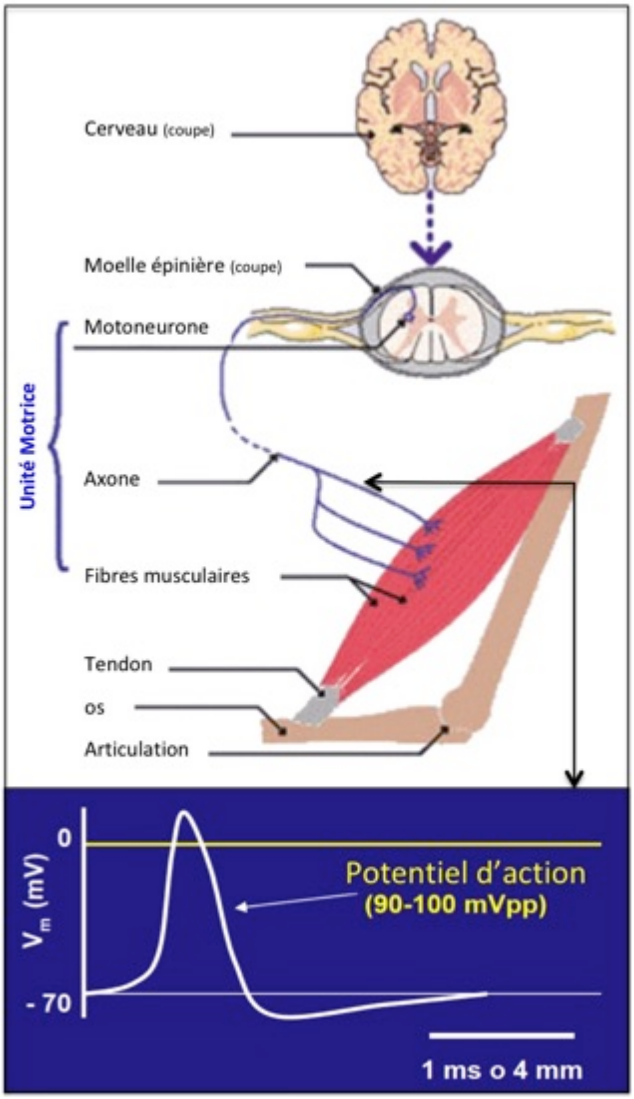


Figure 27 : schéma récapitulatif du processus d'innervation musculaire (ref : http://www.e-s-c.fr/ ; Merletti, 2004)

3.1.2. Mesure électromyographique (EMG)

La mesure électromyographique de l'activité d'un muscle (dite mesure EMG) est la mesure des potentiels d'action contrôlant le recrutement du muscle. Cette mesure est plus ou moins locale, en fonction de la technologie utilisée (c'est-à-dire qu'il y a plus ou moins de fibres musculaires dans la zone d'enregistrement).

Les techniques de mesure EMG se divisent en deux groupes principaux : l'EMG bipolaire (2 électrodes distinctes), et l'EMG monopolaire (une unique électrode). L'EMG bipolaire est la plus classique (Hugon, 1973), et c'est la méthode que nous utiliserons dans ces travaux de thèse.

La mesure EMG en configuration monopolaire consiste en l'acquisition brute du signal de potentiel d'action en un seul point de l'ensemble de fibres musculaires ciblé. On parle d'un lieu, nommé « point moteur », situé dans la partie géographique centrale du muscle et au niveau duquel l'amplitude moyenne du potentiel d'action est maximale.

Le principe général de la mesure EMG en configuration bipolaire est d'enregistrer la différence de potentiel électrique entre deux points voisins d'un même ensemble de fibres musculaires.

La configuration bipolaire permet de réduire considérablement le bruit que l'on pourrait acquérir sur une unique électrode, en monopolaire. On utilise ainsi deux électrodes distinctes (ou plus), dont la nature et la configuration varient en fonction de la technologie de mesure. Il existe 3 grandes sortes de technologie de mesure EMG : l'EMG d'aiguille, l'EMG de surface, et l'EMG de surface à haute-densité.
L'ordre de grandeur de l'espacement entre les deux électrodes de mesure varie entre 0.5mm (EMG d'aiguille) et 5mm (EMG de surface).

Durant un grand nombre d'années, la mesure EMG a été réalisée de manière invasive à l'aide d'aiguilles d'environ 1mm de diamètre, que l'on introduit dans le muscle dont on souhaite acquérir l'activité (Buchthal et al., 1957; Finsterer et al., 1997; Roeleveld et al., 1997). L'aiguille la plus couramment utilisée (Adrian et Bronk, 1929) est concentrique, biseauté, et possède une surface elliptique à son extrémité au niveau de laquelle sont insérées deux électrodes. L'aiguille sert uniquement à insérer l'électrode dans la fibre musculaire, elle est immédiatement retirée une fois l'électrode dans le muscle. Dans le cas de ce type d'acquisition EMG, le potentiel d'action acquis et correspondant à l'unité motrice ciblée est le plus souvent une moyenne des potentiels d'actions d'une quinzaine de fibres musculaires (Merletti et Parker, 2004).

L'électromyographie de surface, apparue plus tard au cours de la fin du XX^{ème} siècle, a recours à deux électrodes circulaires, le plus couramment constituées de chlorure d'argent (Ag-Cl), que l'on dispose sur la peau, le long des fibres musculaires cibles (cf. Figure 28, image B). La distance inter-électrode conseillée est d'environ 2 centimètres (Merletti et Parker, 2004). Cette méthode, parce que moins invasive que celle ayant recours aux aiguilles intra-musculaires, est plus globale et ne permet pas avec certitude de se prononcer sur les différentes fibres musculaires concernées par la mesure du signal EMG. Le derme est ici un facteur de bruit, à la manière d'un coefficient d'atténuation, pour le signal électrique acquis sur les électrodes EMGs de surface.

Depuis le début des années 2000s, un certain nombre de scientifiques développe et utilise une technologie plus locale que les électrodes de surface classiques et tout aussi peu invasive : l'EMG à haute-densité (cf. Figure 28, image A). Ils ont fabriqué des grilles d'électrodes (1x8, 1x15, 4x8, 8x8, etc) dont l'intérêt est de recouvrir une zone musculaire bien spécifique. A l'aide de techniques complexes et avancées de traitement de signal et de séparation de sources (Farina et al., 2004; Mijović et al., 2010; Negro et al., 2016), ils arrivent, sur des muscles assez volumineux comme les muscles extenseur et fléchisseur du radius du bras, par exemple (Farina et al., 2004) , en post-acquisition à extraire avec précision les signaux EMGs correspondant à une unique unité motrice.

Quelle que soit la méthode de mesure, on utilise une électrode de référence placée sur une partie du corps non-innervée musculairement. De cette électrode résulte une ligne isoélectrique permettant de mesurer l'amplitude du signal liée à l'activation. Cette électrode de référence est positionnée à un endroit où il n'y a aucun muscle, sur le lobe de l'oreille, derrière l'oreille au niveau de l'os temporal, ou encore sur la tête du Cubitus au niveau du poignet.

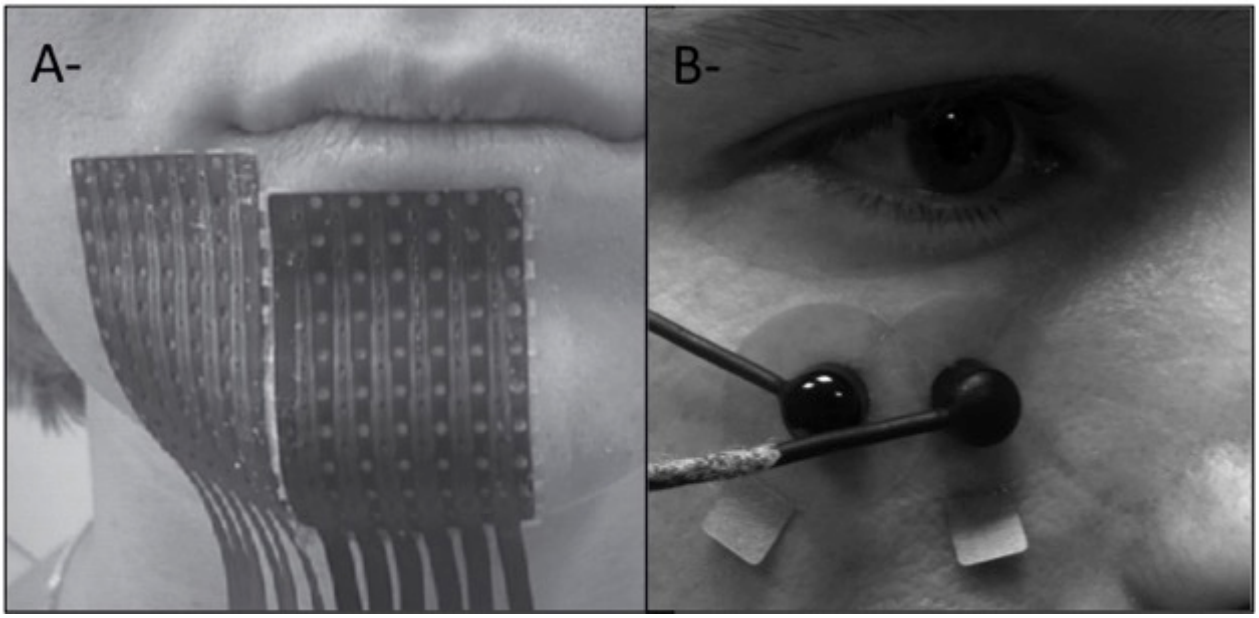


Figure 28: électrodes EMGs de surface (A- à haute-densité ; B- couple d'électrodes en configuration bipolaire) – (réf image A : Lapatki, 2010)

3.2. Placement des électrodes pour l'exploration EMG de l'activité péri-orale

L'analyse électromyographique de surface (sEMG) des mouvements labiaux requiert une connaissance préalable de l'anatomie péri-orale, des techniques robustes de placement des électrodes, et des méthodes de compréhension des phénomènes influant sur le contenu des signaux, en particulier la diaphonie. En effet, l'anatomie du visage est fine et complexe, la densité musculaire est élevée et certaines fibres musculaires se superposent à plusieurs endroits. Il est donc crucial de savoir positionner les électrodes de surface avec précision au-dessus des fibres musculaires ciblées.

3.2.1. Localisation correcte des muscles, et variabilité inter-individuelle

Folkins (1978) décrit des critères de placement des électrodes EMGs pour la mesure de l'activité des muscles MENT, SLI, OOI, DAO. Ces travaux, repris et complétés par O'dwyer and Quinn (O'dwyer and Quinn, 1981) posent une base de connaissances solides permettant l'utilisation de l'électromyographie sur le visage. Les travaux en question (Folkins, 1978 ; O'dwyer and Quinn, 1981) sont basés sur des connaissances en anatomie et en contrôle moteur, sur l'observation des signaux et sur des rapports de similarité. Les travaux de O'dwyer et Quinn (1981) se concentrent sur 10 muscles orofaciaux, incluant les muscles péri-oraux tels que l'orbicularis oris, le mentonnier et le dépresseur de la lèvre inférieure (principaux muscles recrutés dans les gestes de parole). En réalisant l'acquisition des signaux EMGs avec des aiguilles intra-musculaires (enregistrement très précis et très fiable, mais aussi très invasif), O'dwyer et al proposent l'utilisation d'un ensemble de mouvements orofaciaux silencieux qui permettent de déterminer efficacement l'emplacement des fibres musculaires sous le derme du visage. L'étude de O'dwyer et al (1981) est considérée dans la littérature comme une référence en acquisition électromyographique de l'activité des muscles du visage, du fait de l'utilisation des aiguilles. En effet, contrairement au cas de l'électromyographie utilisant les aiguilles intra-musculaires, les descripteurs EMG enregistrés avec les techniques

d'électromyographie de surface bipolaire varient beaucoup en fonction du positionnement des électrodes sur la surface de la peau (Beck et al., 2008; Campanini et al., 2007; Hogrel et al., 1998; Jensen et al., 1993; Roy et al., 1986).
O'dwyers et al (1981) préconisent l'utilisation de 6 gestes de base pour déterminer les emplacements optimaux des électrodes EMGs pouvant cibler l'activité des muscles péri-oraux (cf. section 2.1) : gonflement des joues (bouche fermée), compression inter-labiale, dépression des commissures des lèvres, dépression de la lèvre inférieure (mandibule fermée), élévation de la lèvre inférieure.

Une étude méthodologique (Lapatki et al., 2010) a mis à profit la technique de l'électromyographie à haute-densité (HD-EMG, i.e. matrices d'électrodes EMGs de surface) pour apporter des compléments topographiques précieux aux connaissances sur le positionnement des électrodes de surface bipolaires ciblant les muscles orofaciaux. Lapatki et al (2010) proposent ainsi une sorte de guide de localisation des fibres musculaires. Malheureusement, la forte variabilité anatomique inter-individuelle limite la possibilité de définir un placement « universel » des électrodes. Juste après les travaux de Lapatki et al (2010), dans une optique de reconnaissance automatique de la parole via l'acquisition et la classification des patrons d'activation musculaire orofaciaux, Meltzner et al (2011) ont cherché des positions d'électrodes optimisant les informations physiologiques relatives à la parole pour 6 régions anatomiques bien définies, dont les régions labiale, supra-labiale, sub-labiale, centrale et latérale du cou. Pour minimiser le biais de placement des électrodes lié à la variabilité anatomique inter-individuelle au niveau péri-oral, Meltzner et al (2011) utilisent un patron sur film plastique permettant de positionner les électrodes autour des lèvres.

3.2.2. Phénomènes de diaphonie / crosstalk

Un autre phénomène est également communément observé sur des réseaux musculaires de forte densité (comme le réseau musculaire orofacial) : l'activité d'un muscle A peut être acquise sur un couple d'électrodes EMG de surface ne ciblant pas ce muscle, mais situé à faible distance de celui-ci. On parle alors de diaphonie (ou contamination, crosstalk en anglais), due, entre autres, aux propriétés locales de conduction de la peau et des tissus sous-jacents (Reaz et al., 2006). La diaphonie est un véritable problème en soi, dans la mesure où elle fausse la mesure, quelle qu'elle soit. Les deux phénomènes de diaphonie et de co-activation musculaires sont difficiles à distinguer, analyser et comprendre (C Blair and Smith, 1986; Leijnse et al., 2008; McClean and Tasko, 2003; Smith, 1992; Vinti et al., 2013; Winter et al., 1994). Plusieurs techniques ont été développées pour détecter et quantifier le phénomène diaphonique. A plusieurs reprises, des corrélations de pics d'activités EMG ont été utilisées (Leijnse et al., 2008; Winter et al., 1994; Wohlert and Goffman, 1994). Lapatki et al (Lapatki et al., 2003) définissent un degré de crosstalk entre un muscle i et un couple d'électrodes adjacentes ciblant l'activité d'un muscle j (cf.Figure 29: A- placement des électrodes dans l'étude de Lapatki et al, 2003, et B – résultats extraits de l'analyse du taux de crosstalk entre les 7 muscles orofaciaux acquis) : le degré de crosstalk est calculé comme étant le quotient de l'activité RMS acquise sur les capteurs ciblant le muscle j sur l'activité RMS acquises sur les capteurs ciblant le muscle i. Le minimum du degré de crosstalk sur l'ensemble du corpus estime la contamination musculaire effective entre deux muscles. Par exemple, sur la Figure 29, Laptaki et al. montrent que le recrutement effectif du muscle OOI entraîne de manière systématique une contamination des électrodes adjacentes ciblant les activités des muscles

DLI, MENT, et DAO. Mezzarane et al (Mezzarane and Kohn, 2009) utilisent une technique de stimulation électrique pour induire une activité dans une fibre musculaire, et ainsi mesurer la quantité de signal utile transmis à un couple d'électrodes périphériques ne ciblant pas la fibre stimulée. A l'exception cette l'utilisation de l'électro-stimulation (trop invasive pour une étude en production de parole), les études sur la diaphonie se basent sur l'analyse de l'enveloppe redressée des signaux (« rectified full-wave signal »), ce qui ne tient pas compte de la forme d'onde des signaux.

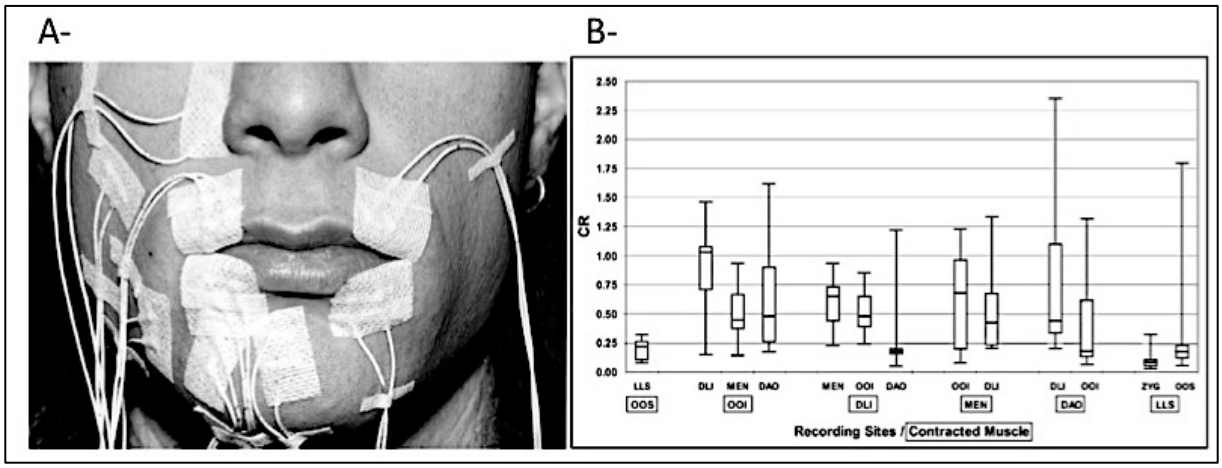


Figure 29: résultats du Crosstalk Ratio pour les muscles OOS, OOI, DLI, MENT, DAO et LLS (Lapatki et al, 2003)

Honda et al (1995) concluent à l'aide de modèle linéaire de prévision (reliant les formes de lèvres aux activités péri-orales) que les signaux représentant l'activité musculaire des muscles OOI, OOI et DLI est correcte, mais que l'on observe des phénomènes de contamination sur les électrodes ciblant le LAO, DAO, LLS, et Risorius, résultats appuyés par l'étude de Lapatki et al (2003) incluant le MENT (cf. Figure 29). Le muscle MENT semble fortement contaminé par les activités EMGs des muscles DLI et OOI, ce qui est compréhensible au niveau spatial (fibres très proches). Il ne semble pas y avoir de contamination ou de phénomène de co-activation entre les parties supérieure et inférieure de l'Orbicularis Oris (Wohlert and Goffman, 1994).

3.3. Traitement et descripteurs du signal EMG

L'enjeu du traitement des signaux EMGs et de l'extraction de descripteurs dans le cas de l'étude des mouvements de parole est d'être capable d'associer une activité articulatoire, objectivée par des niveaux d'activité musculaire (mesurée par EMG) à une production acoustique. Le mouvement de parole est un mouvement cinétique, nécessitant des recrutements excentriques et concentriques des muscles péri-oraux. Le descripteur physiologique extrait doit contenir l'information d'activation effective pouvant expliquer le résultat gestuel ou acoustique.

Comme présenté ci-dessus (paragraphe 3.1) les signaux EMGs représentent les potentiels d'action électrique parcourant les fibres musculaires. Il faut être capable de transformer l'information du potentiel électrique en « activité musculaire », et ce en s'affranchissant du bruit de mesure permanent (dû au derme à travers lequel se propagent les potentiels d'action avant d'être captés par les électrodes EMGs). De plus, de par la variabilité inter-individuelle anatomique et fonctionnelle, il est crucial de parvenir à normaliser les activités musculaires

de chaque muscle, afin de les comparer entre elles en termes de pourcentage de recrutement, d'un muscle à un autre et d'un sujet à un autre.

L'ensemble des recommandations propres au traitement des signaux EMGs et à l'extraction de descripteurs, et ce dans le cas spécifique du visage, sont synthétisées dans 3 études (van Boxtel, 2010; Pothirat et al., 2013; Stepp, 2012). Le traitement des signaux (pré-extraction de descripteurs) est divisé en plusieurs étapes : filtrage, détection d'activité significativement différente du bruit, et normalisation. Chacune de ces étapes est détaillée dans cette section.

3.3.1. Filtrage

Le spectre d'un signal EMG varie dans un domaine de fréquences comprises entre 20 et 500 Hz. Les signaux bruts EMGs sont souvent acquis à une fréquence d'échantillonnage supérieure à 500Hz. Ainsi, la plupart des chercheurs travaillant sur les mesures EMGs de l'activité des muscles orofaciaux filtrent les signaux bruts avec un filtre passe-bande. Van Boxtel (2010) recommande d'utiliser un filtre passe-bande laissant passer les fréquences comprises entre 20 et 500 Hz : le filtrage passe-haut à 20Hz est essentiel pour supprimer les composantes basse-fréquences du signal (ces composantes n'étant pas porteuses d'information sur les activités du muscle), qui représentent des artefacts de mouvements des électrodes (mouvement des yeux, respiration, déglutition ou mastication, ou juste mouvement de la peau sous-jacent à une activité musculaire effective).

3.3.2. Détection d'activité (par rapport au bruit):

Une fois le signal EMG filtré, la question du contenu utile du signal se pose : un bruit résiduel est présent dans chaque signal, et provient principalement de la zone dermique dans laquelle la transmission électrique se fait.
Classiquement, un calcul d'enveloppe est réalisé à l'aide de fenêtres glissantes. Meltzner et al (2008) utilisent par exemple des fenêtres de 40ms, décalées par pas de 20ms (cf. Figure 30-B). Cette enveloppe du signal EMG permet de calculer ensuite des activités musculaires (i.e. quantification du recrutement). Meltzner et al (2008) proposent ensuite de détecter les instants de début et de fin de chaque bouffée d'activité EMGs, afin de déterminer dans un dernier temps empiriquement un seuil au-dessus duquel l'activité est considérée comme utile (et non assimilée à du bruit).

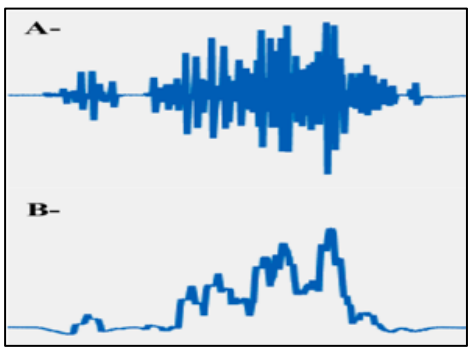


Figure 30 : exemple de signal EMGs de surface, a- brut, acquis à Fe = 20kHz sur la carte d'acquisition BIOPAC MP160 ; et b- l'enveloppe redressée du signal filtré

Yupapin et al. (2011) proposent une autre méthode, très similaire à celle de Meltzner et al. (2008), consistant à calculer le seuil selon la valeur du signal RMS moyen au repos, extrait du signal EMG lorsque le muscle est au repos, auquel on ajoute 3 fois la valeur de l'écart-type.

L'utilisation du filtrage de Hampel pour supprimer les artefacts basse ou haute fréquence est proposée par Bhowmik et al (2018). Cette technique de filtrage robuste ne dégrade pas le contenu utile du signal d'origine car il s'agit d'un filtrage statistique dont le principe est de remplacer les valeurs extrêmes d'une distribution d'éléments par la valeur médiane de la distribution.

3.3.3. Fenêtres et pas d'analyse

Le SENIAM (Surface Electromyography for the Noninvasive Assesment of Muscles, réf : http://www.seniam.org/), qui synthétise les notions basiques d'utilisation de l'électromyographie de surface dans les domaines médicaux, suggère d'utiliser des fenêtres d'analyse de 250 à 500ms, optimales pour évaluer correctement les amplitudes des activités correspondants à un recrutement musculaire effectif sur des mouvements de membres (Stepp, 2012). Des fenêtres beaucoup plus courtes sont néanmoins utilisées pour décrire des gestes de parole, plus rapides (Meltzner et al (2008)).

3.3.4. Normalisation

Une fois le signal EMG filtré et le bruit réduit, dans l'optique de le rendre comparable à celui d'un autre sujet ou d'un autre muscle, nous devons le normaliser par le maximum des enveloppes redressées que l'on observe sur l'ensemble du corpus pour le muscle dont on étudie l'activité (Lucero and Munhall, 1999).
Certains auteurs utilisent des tâches spécifiques pour déterminer le coefficient maximal normalisateur de chaque muscle, par exemple des tâches de MVC (Contraction maximale volontaire) (Pothirat et al., 2013) : sourire volontaire pour le Zyg_maj, élévation de la lèvre inférieure pour le muscle MENT, etc. D'autres auteurs, quant à eux, utilisent la valeur moyenne du signal d'enveloppe redressée, et non le maximum (Schumann et al., 2010).

3.3.5. Extraction de descripteurs

Dans la littérature, de nombreux descripteurs EMGs sont couramment extraits. Certains sont adaptés à l'étude effective d'un recrutement concentrique, et d'autres plus pour à des recrutements excentriques. Les descripteurs de la fatigue musculaire (liés à effort « statique ») sont destinés à l'étude des recrutements isométriques tandis que d'autres, plutôt typés description de l'effort cinétique (RMS, etc), sont conseillés pour décrire des recrutements isocinétiques ou sous-jacents à des mouvements balistiques (comme c'est le plutôt le cas des mouvements de parole).

De manière générale en électromyographie, 25 descripteurs ont été étudiés et comparés (Phinyomark et al., 2012; Pothirat et al., 2013) : ils sont présentés, et leurs calculs sont explicités, dans la Figure 31. Ces études avancent que le choix du ou des descripteurs doit être

fait en fonction du paradigme que l'on adopte et de la manière dont on étudie le recrutement des muscles, aucun descripteur représente à lui seul l'intégralité des aspects fonctionnels de l'activation. Les descripteurs fréquentiels sont orientés vers la description de la fatigue musculaire, tandis que les descripteurs d'amplitude (MAV, RMS, etc) sont orientés plutôt description du recrutement cinétique.

Feature extraction	Mathematical definition
Integrated EMG (IEMG)	$IEMG = \sum_{n=1}^{N} \lvert x_n \rvert$
Mean absolute value (MAV)	$MAV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \lvert x_n \rvert$
Modified Mean Absolute Value (MMAV)	$MMAV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} w_n \lvert x_n \rvert;$ $w_n = \begin{cases} 1, & if\ 0.25N \le n \le 0.75N \\ 0.5, & \text{otherwise} \end{cases}$
Simple Square Integral (SSI)	$SSI = \sum_{n=1}^{N} \lvert x_n \rvert^2$
Variance of EMG (VAR)	$VAR = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N} x_n^2$
Root Mean Square (RMS)	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} x_n^2}$
v-Order 2 and 3 (V2, V3)	$V2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}; V3 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \lvert x_i \rvert^3 \right)^{\frac{1}{3}}$
Log detector (LOG)	$LOG = e^{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \log \lvert x_n \rvert}$
Waveform length (WL)	$WL = \sum_{n=1}^{N-1} \lvert x_{n+1} - x_n \rvert$
Average amplitude change (AAC)	$AAC = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \lvert x_{n+1} - x_n \rvert$
Difference absolute standard deviation value (DASDV)	$DASDV = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (x_{n+1} - x_n)^2}$
Maximum Fractal Length (MFL)	$MFL = \log_{10} \left(\sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} (x_n - x_{n+1})^2} \right)$

Feature extraction	Mathematical definition
Mean power (MNP)	$MNP = \sum_{j=1}^{M} P_j \Big/ M$
Total power (TTP)	$TTP = \sum_{j=1}^{M} P_j$
Median Frequency (MDF)	$\sum_{j=1}^{MDF} P_j = \sum_{j=MDF}^{M} P_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M} P_j$
Mean Frequency (MNF)	$MNF = \sum_{j=1}^{M} f_j P_j \Big/ \sum_{j=1}^{M} P_j$
Peak frequency (PKF)	$PKF = \max(P_j), \quad j = 1, \ldots, M$
Frequency ratio (FR)	$FR = \sum_{j=LLC}^{ULC} P_j \Big/ \sum_{j=LHC}^{UHC} P_j$
Power spectrum ratio (PSR)	$PSR = \frac{P_0}{P} = \sum_{j=f_0-nl}^{f_0+nl} P_j \Big/ \sum_{j=-\infty}^{\infty} P_j$
The 1st, 2nd, and 3rd spectral moments (SM1, SM2, SM3)	$SM1 = \sum_{j=1}^{M} P_j f_j;\ SM2 = \sum_{j=1}^{M} P_j f_j^2;$ $SM3 = \sum_{j=1}^{M} P_j f_j^3$
Myopulse percentage rate (MYOP)	$MYOP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} [f(x_i)];$ $f(x) = \begin{cases} 1, & if\ x \ge threshold \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
Zero crossing (ZC)	$ZC = \sum_{n=1}^{N-1} [\operatorname{sgn}(x_n \times x_{n+1}) \cap \lvert x_n - x_{n+1} \rvert \ge 0];$ $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & if\ x \ge 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
Willison amplitude (WAMP)	$WAMP = \sum_{n=1}^{N-1} f(\lvert x_n - x_{n+1} \rvert);$ $f(x) = \begin{cases} 1, & if\ x \ge threshold \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

Figure 31 : 25 descripteurs EMG (Phinyomark et al., 2012)

Ainsi, plus spécifiquement dans le cas des gestes de parole et pour les muscles péri-oraux, les descripteurs de l'énergie RMS est le plus couramment utilisé. Il s'agit de la moyenne des échantillons au carré du signal EMG, à la puissance ½. Ce descripteur sert pour la caractérisation physiologique de gestes de base (Schuman et al., 2010 ; Eskes et al., 2018).

Pothirat et al (2013) trouvent que le descripteur musculaire permettant de discriminer de manière optimale les gestes orofaciaux abaissement de la mandibule avec résistance, sourire volontaire, élévation de la lèvre inférieure, dépression ou élévation des commissures labiales est muscle-dépendant : pour chacun des 5 muscles dont ils enregistrent les activités (DIG, Zyg_maj, LAO, MENT, et DAO), un descripteur différent est optimal pour décrire les 5 mouvements. Néanmoins, pour chacun des 5 muscles dont les activités sont acquises, le descripteur « énergie RMS » permet correctement de discriminer les mouvements orofaciaux.

3.3.6. Décomposition dynamique du mouvement

Certains auteurs se sont intéressés à l'étude précise des patrons d'activation musculaire orofaciaux (C Blair and Smith, 1986; McClean and Tasko, 2003), l'idée étant de décomposer le plus précisément possible un mouvement orofacial (mouvement de parole ou silencieux) en différentes phases afin d'en comprendre la dynamique physiologique, tout comme cela peut être fait pour des mouvements de la main du type « saisir un objet » : mouvement de la main vers l'objet, mouvement de fermeture des doigts, puis maintien de l'objet (Kita et al., 1998; Leouffre, 2006). McClean et Tasko (2003) proposent d'utiliser les signaux cinématiques de déplacements des lèvres et de la mandibule (maximas de la vitesse de la mandibule, et maximas de la vitesse de la lèvre inférieure) afin de décomposer un mouvement complexe de parole (/abœdœba/) en plusieurs unités, séparé au niveau des /b/ et du /d/. Ils mesurent dans leur étude l'activité des muscles Mentalis (MENT), Depresseur de la Lèvre Inférieure (DLI), Massetère (MAS) et Digastrique (ABD). Leur idée est d'extraire les descripteurs physiologiques aux instants du mouvement qui maximisent les recrutements musculaires effectifs (et non une moyenne des activités EMGs incluant des instants où l'activité des muscles n'est pas pertinente) : Ils mesurent donc l'activité des muscles MENT et DLI en prenant les maximas des pics d'activité EMG les plus proches des maximas locaux de la vitesse de déplacement labiale (pour les productions des segments /b/), et l'activités des muscles MAS et ABD en considérant les maximas des pics d'activités EMGs des deux muscles les plus proches des maximas des pics de vitesse de la mandibule (fermeture et ouverture de la mandibule pour le segment /d/).
A la précision près de la détection des évènements cinématiques, les patrons temporels d'activation musculaire de McClean et Tasko permettent l'extraction de descripteurs physiologiques fiables des mouvements labiaux et mandibulaires (i.e. très forte corrélation entre les vitesses de déplacement des articulateurs et les descripteurs physiologiques considérés : $|R| >> 0.6$).

4. Bilan de cet état de l'art : apports et limites des études antérieures

Les études sur la caractérisation des patrons d'activation musculaire ou des catégories de gestes offrent une description détaillée des muscles impliqués dans chaque geste de base, permettant ensuite d'utiliser les techniques d'EMG de surface sur le visage et de comprendre avec précision les patrons de recrutement que l'on mesure. Les travaux de machine learning, quant à eux, bien que fondamentaux pour nous pour le traitement et l'extraction de descripteurs des signaux EMGs, ne proposent pas de caractérisation utile pour nous aider à répondre aux questions de contrôle physiologique que l'on se pose.

Partie 2

Matériel et méthode

CHAPITRE 3

Acquisition et analyse de données

1. Matériel et Méthodes
2. Descripteurs acoustiques et physiologiques
3. Méthodes statistiques
4. Synthèse

Notre objectif principal est ici de mettre en place et de présenter une méthodologie expérimentale permettant d'acquérir des données acoustiques et articulatoires au cours de la production des consonnes occlusives du français, et ce de manière simultanée et fiable. En accord avec les connaissances présentées au CHAPITRE 1 de ce manuscrit, il sera également crucial de parvenir à générer de la variabilité, autant d'un point de vue articulatoire qu'acoustique.
Une méthodologie de prétraitement, d'étiquetage des données, d'analyse des signaux et d'extraction de paramètres (articulatoires, aérodynamiques, et acoustiques) a été également développée, spécifique à l'étude acoustique du bruit de plosion et à la mise en relation des paramètres articulo-acoustiques. Certains des points méthodologiques, plus-values de ces travaux, seront présentés dans ce chapitre. Enfin, une méthodologie d'analyse statistique sera présentée dans ce chapitre, ayant pour but d'aboutir à une modélisation fonctionnelle du contrôle des indices acoustiques, et notamment des caractéristiques spectrales du bruit de plosion.
L'ensemble de ce travail méthodologique a représenté une importante partie de ces travaux de thèse. La base de données acquise, ainsi que les méthodes d'analyses, permettront par la suite d'étudier d'autres problématiques (que nous n'avons pas eu le temps de traiter dans ces travaux).

1. Matériel et Méthodes

1.1. Sujets

Douze sujets ont été enregistrés pour cette étude. La moyenne d'âge est de 23,2 ans, avec des âges compris entre 18 et 38 ans.
Pour être inclus dans l'étude, les sujets devaient être majeurs, et de langue maternelle française. Par ailleurs, ils n'étaient pas inclus dans l'étude s'ils présentaient une allergie à la colle médicale utilisée pour fixer les bobines de l'articulographe électromagnétique, s'ils avaient des connaissances sur le contrôle de la parole (i.e. "non-naïf"), ou s'ils présentaient un trouble articulatoire de la parole quelconque. De plus, nous avons demandé aux sujets masculins de se raser avant la passation de la 1ère session (cf. détails ci-dessous).

1.2. Tâches

L'ensemble du protocole aboutissant aux mesures articulatoires étant lourd, nous avons décidé de scinder l'expérience en deux parties : une première session d'enregistrement pour la production des plosives labiales, et une seconde pour celle des occlusives alvéolaires et vélaires.

1.2.1. Session 1

La partie principale de l'éxpérience consistait à explorer la production des 4 logatomes /lapa/, /laba/, /lapi/, et /labi/ (consonnes occlusives labiales voisées ou non, dans deux contextes vocaliques /a/ et /i/) dans deux modes de phonation (voix modale et voix chuchotée).

Pour chaque logatome, le locuteur était invité à produire des séries de 5 items en voix modale, et de 3 en voix chuchotée, à débit de parole normal, en augmentant progressivement son effort articulatoire (de très faible, correspondant à du murmure, à très important, correspondant à une parole hyper-articulée). Chaque fichier d'enregistrement comprenait 4 à 5 répétitions de telles séries (soit 20-25 productions).
Dans un deuxième temps, le locuteur était invité à produire de nouveau des séries de 20-25 productions de chaque logatome en voix modale et chuchotée, cette fois sans variations du niveau d'effort articulatoire, mais par contre avec un débit de parole le plus rapide possible.

Dans une dernière partie de l'expérience, il était demandé au sujet de produire 5 gestes orofaciaux silencieux :
- Compression des lèvres, avec la mâchoire fermée
- Protrusion des lèvres vers l'avant
- Ouverture de la mâchoire, lèvres le plus au repos possible
- Abaissement de la lèvre inférieure, avec la mâchoire fermée
- Élévation de la lèvres inférieure (moue)

Ces gestes étaient effectués par séries de 20, et servaient à valider le bon positionnement des électrodes EMG de surface sur les muscles d'intérêts ciblés.

L'ordre des conditions était identique pour tous les sujets.

1.2.2. Session 2

L'expérience consistait cette fois à produire les 8 logatomes /pata/, /pati/, /pada/, /padi/, /paka/, /paka/, /paki/, /paga/ et /pagi/ (consonnes occlusives alvéolaires et vélaires, voisées ou non, dans deux contextes vocaliques /a/ et /i/) dans deux modes de phonation (voix modale et voix chuchotée).
De nouveau, le locuteur était invité à produire des séries de 5 items en voix modale, et de 3 en voix chuchotée, à débit de parole normal, en augmentant progressivement son effort articulatoire. Puis, dans un deuxième temps, à produire de nouveau des séries de 20-25 productions de chaque logatome en voix modale et chuchotée, sans variations du niveau d'effort articulatoire, mais avec un débit de parole rapide.

Dans une seconde partie un peu plus exploratoire, nous avons cherché à pousser le sujet à varier son lieu d'articulation et à explorer d'autres positions linguales moins habituelles ou typiques des consonnes occlusives du Français. Pour cela, nous avons mis en œuvre un paradigme d'imitation de sons synthétiques : Préalablement à l'expérience, nous avons enregistré deux logatomes /ata/ et /aka/ produits par un homme. A l'aide d'un script de morphing sous Matlab (Girin, 2003), nous avons ensuite généré 7 stimuli intermédiaires correspondant à un mélange spectral de ces deux logatomes originaux (0, 29, 34, 42, 57, 65 et 100%, de /ata/ vers /aka/). Durant l'expérience, ces stimuli étaient ensuite présentés au sujet de façon randomisée à l'aide d'un casque audio. Il lui était demandé de répéter immédiatement le logatome en cherchant à l'imiter. Dix répétitions de chaque son ont été enregistrées.
Il est à noter que le but de cette tâche était de susciter de la variabilité au niveau de la production, mais que nous n'attendions pas pour autant que l'imitation de ces stimuli montre de continuum: tout d'abord du fait qu'il existe une discontinuité fondamentale au niveau articulatoire, l'occlusion alvéolaire étant réalisée avec l'avant de la langue tandis que

l'occlusion vélaire l'étant avec l'arrière ; ensuite, du fait que d'un point de vue perceptif, il est probable que les sujets commençaient par catégoriser les stimuli en tant que /t/ ou /k/, avant de percevoir d'éventuelles variations de réalisations.

Le corpus décrit ci-dessus est schématisé sur la Figure 32.

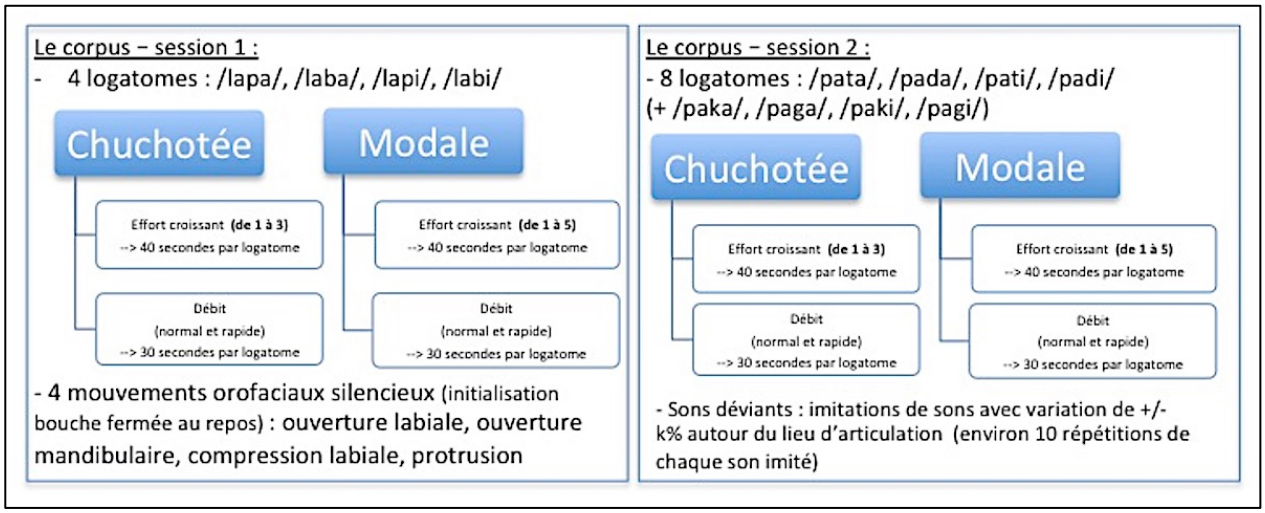


Figure 32 : Synthèse du corpus expérimental

1.3. Matériel

L'expérience visant à mettre en relation des variations des gestes de production de consonnes occlusives avec des variations acoustiques des sons produits, nous avons donc acquis simultanément :
- le signal audio calibré en intensité (pour les deux sessions).
- différents signaux physiologiques, permettant de caractériser la production
  - au niveau aérodynamique :
    - la pression intra-orale, à l'arrière de l'occlusion labiale (session 1), alvéolaire mais pas vélaire (session 2), à l'aide du système Europec-Eva2.
  - au niveau laryngé :
    - le signal électroglottographique (pour les deux sessions).
  - au niveau articulatoire :
    - le mouvement des lèvres en 2D, dans le plan frontal, extrait de vidéos ultra-rapides (1ère session)
    - le signal électromyographique de 7 muscles orofaciaux (1ère session)
    - les déplacements de la langue en 3D par articulographie électromagnétique (EMA) (2ème session)

L'acquisition de ces différents signaux a requis l'utilisation de plusieurs systèmes en parallèle :

- Une carte d'acquisition BIOPAC MP150 multi-canaux 16 entrées. Le logiciel « Acqknowledge » a été utilisé pour piloter l'acquisition des données par la carte. La carte d'acquisition MP150 pouvait également générer et recevoir des triggers de synchronisation. Les signaux acquis sur le BIOPAC MP150 étaient acquis à une fréquence d'échantillonnage de 20kHz.

- Un microphone Bruël&Kjaer ½ pouce (type 4189C), associé à un pré-amplificateur (B&K 2669C) et à un amplificateur Nexus permettant l'enregistrement des signaux acoustiques en intensité grâce à une calibration de cette chaine d'acquisition. Celle-ci est réalisée en enregistrant un signal calibré (1V à une fréquence de 159,2 Hz) généré par l'ampli Nexus. L'acquisition des signaux acoustiques via l'ensemble microphone/Nexus a été réalisée par le logiciel « Acqknowledge ». Pour chaque sujet, une valeur du gain en V/Pa a été relevée, permettant la conversion en dB de l'intensité du signal acoustique.

- Cinq couples d'électrodes EMG de surface, de composante Ag-AgCl, ainsi qu'une électrode de référence ont été utilisées pour acquérir les signaux EMG orofaciaux. Les cinq muscles ciblés sont les muscles mentalis (MENT), dépresseur de la lèvre inférieure (DLI), digastrique (DIG), orbicularis oris supérieur et inférieur (OOS et OOI). La description de ces muscles et la méthodologie de mesure sont détaillées au CHAPITRE 2. Du gel médical a été utilisé pour améliorer le contact électrode-tissus musculaires ainsi que des œillets double-face pour le maintien des électrodes sur la peau des sujets. L'acquisition des signaux EMG a également été réalisée par le logiciel « Acqknowledge » via la carte d'acquisition MP150.

- Le système Europec-Eva2 (logiciel Europec + système EVA2, (Teston 2007)) a permis l'acquisition des signaux de Pio et d'activité glottique (i.e. EGG).
- Les signaux de Pio ont été acquis via un capillaire en plastique (marque Pennine Healthcare, 3.3mm de diamètre) relié sur la pièce à main du système Europec-Eva2, et ce sur le calibreur faible pression (0 à 20 hPa). Les signaux de Pio ont été acquis à une fréquence d'échantillonnage de 6250Hz. Le capillaire est fixé à une dent, le plus souvent une des deux prémolaires du côté gauche de la mâchoire supérieure, à l'aide d'élastiques dentaires nommés « wedjets » (cf. Figure 33).
  Le système Europec-Eva2 peut également recevoir des triggers de synchronisation extérieurs.

- Les signaux électroglottographiques ont été enregistrés à l'aide d'un laryngograph EG2-standard, développé par la société GlottalEnterprises. Les signaux EGGs ont été acquis avec la carte MP150 à une fréquence d'échantillonnage de 25kHz.

- Les signaux EMA ont été acquis à l'aide d'un système NDI WAVE (5 ou 6 degrés de liberté ?). Nous utilisions 6 bobines. Voici les différentes étapes de préparation des bobines : 1- désinfection à froid avec du « steranios 20% », 2- enrobage de latex liquide pour protéger la bobine, 3- augmentation de la surface de pose de la bobine à l'aide de carrés de soie collés. Les bobines sont ensuite collées avec de la colle bio-médicale « PériAcryl90 HV » (GluStitch). Quatre bobines étaient situées sur le plan médio-sagital de la langue (Figure 34) : une au niveau de l'apex et une autre au niveau du dos. Les deux dernières étaient situées entre celle de l'apex et celle du dos de la langue, à des distances assez régulières les unes des autres (~1 centimètre). Une cinquième bobine a été collée sur la gencive des incisives inférieures, nous permettant d'enregistrer les déplacements de la mandibule, conjointement à ceux de la langue. Une bobine de référence était en dernier lieu collée sur le haut du nez, afin de corriger les mouvements de la tête des locuteurs dans le plan médio-sagital. Ces signaux cinématiques étaient acquis à la fréquence d'échantillonnage de 200Hz. Le système WAVE fournissait un signal de synchronisation avec l'audio. Il était nécessaire

d'enregistrer celui-ci en parallèle du signal audio B&K. Pour cela nous avons utilisé une carte d'acquisition USB (TASCAM US-600) permettant l'enregistrement en stéréo du signal acoustique (voie droite) et du signal de synchro (voie gauche). Un microphone AKG C-1000S a été utilisé pour réaliser l'acquisition du signal acoustique sur la carte NDI WAVE et placé à 30 cm du sujet.

- Un boitier de synchronisation analogique fabriqué au laboratoire GIPSA-lab était utilisé pour émettre un signal carré à une fréquence d'échantillonnage de 2kHz pendant 20ms. Ce boitier était équipé d'un bouton poussoir pour déclencher le signal de synchro. Ce signal a été enregistré sur chacun des systèmes (MP150, WAVE et EVA2) assurant ainsi une post synchronisation de tous les signaux. Le système WAVE ne possédant pas d'entrée de synchro externe, nous avons dû mixer ce signal de synchronisation avec le signal acoustique. Cela a été réalisé à l'aide d'une table de mixage Mackie 402 VLZ4 mixant le signal de synchronisation émis par le boitier de synchronisation et le signal acoustique provenant du micro AKG.

- Une caméra ultra-rapide BASLER ACE mono-focale connectée par USB3 à un ordinateur et pilotée via le logiciel Pylon permettait d'acquérir des vidéos à une fréquence d'échantillonnage de 200Hz. La résolution spatiale était d'environ 300x200 pixels (fenêtre rectangulaire centrée sur les lèvres du sujet). La vidéo était synchronisée avec les autres signaux via un trigger « output » provenant du biopac. La luminosité était contrôlée grâce à l'utilisation d'un éclairage Néon sur ballast intégré (ParaBeam400 de la société Kino Flo) générant une lumière du jour (température de 5200°K). Ce système était équipé d'un variateur de lumière permettant de régler l'intensité lumineuse en fonction des sujets. Chaque sujet était équipé de lunettes de soleil ou de lunettes opaques, au choix, en fonction de leur tolérance à l'éclairage. Les lèvres des sujets ont été maquillées en bleu à l'aide d'un maquillage gras (de type « maquillage de clown ») afin d'utiliser une technique de chromakey pour l'extraction des paramètres labiaux (Lallouache 1991; Noiray et al. 2011).

- Une chaise à dos rigide (plaque de bois) ornée d'un casque de chantier permettant la stabilisation de la tête du sujet était utilisée au cours des sessions d'expérimentation pour contraindre les mouvements de la tête.

Figure 33 : placement de la sonde de Pio dans la bouche d'un sujet à l'aide de wedjets

Figure 34 : Placement des bobines EMA sur la langue d'un sujet

Pour la 1ère session d'enregistrement ciblant la production de consonnes occlusives bilabiales, les signaux suivants étaient acquis : signaux EMG ciblant les 5 muscles orofaciaux, vidéo ultra-rapide des lèvres, signal de Pio, signal EGG, signal acoustique calibré en intensité.
Pour la 2ème session d'enregistrement ciblant la production de consonnes occlusives palato-dorsales et vélaires, les signaux suivants étaient acquis : déplacement de la langue en 3D (EMA), signal de Pio, signal EGG, signal acoustique calibré en intensité.
Rappel : pour chacune des sessions d'enregistrement, un signal de trigger était acquis sur chaque carte d'acquisition, permettant en post-traitement la synchronisation de l'ensemble des signaux acquis.

1.4. Étiquetage des évènements acoustiques (sous Praat)

Chaque logatome ainsi que le bruit au relâchement de l'occlusion ont été étiquetés manuellement à l'aide du logiciel Praat (cf. Figure 35).
Les signaux acoustiques ont été normalisés en intensité pour réaliser l'étiquetage, en suivant les mêmes critères, quels que soient le mode de phonation et le niveau d'effort. L'ensemble des étapes d'étiquetage est donc résumé ci-dessous :

1) On annote les logatomes sur la 1ère ligne d'annotation pour l'ensemble des enregistrements (~30s par condition/mode/logatome)

2) On normalise les signaux acoustiques sur la fenêtre de chaque logatome par le maximum du signal redressé.

3) On annote le début du bruit de plosion en repérant sur le spectrogramme l'apparition d'une énergie haute-fréquence ou large-bande, puis en affinant cet instant par le premier passage par zéro montant du signal acoustique. La fin du bruit de plosion est repérée lorsqu'elle est observable, après le bruit de friction. Lorsque la fin du bruit de plosion n'est pas simplement détectable à l'œil, on étiquettera cet instant à l'instant de reprise de voisement pour la voyelle suivante.

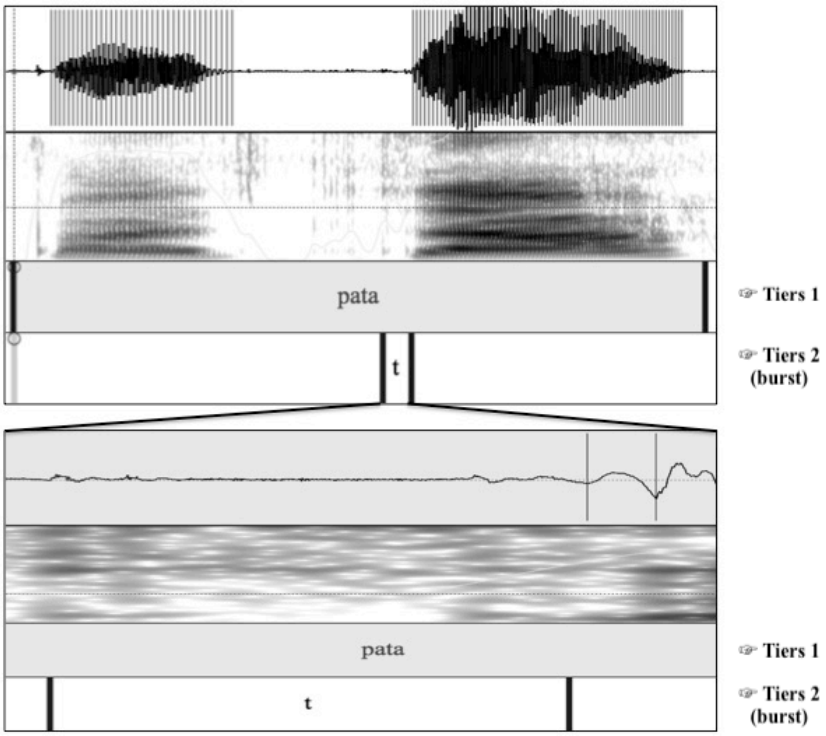


Figure 35 : étiquetage sous Praat du logatome (tier 1) et du bruit de plosion (tier 2 : le bruit de plosion est annoté selon la nature de la consonne, ici « t ») pour la répétition du logatome /pata/, en qualité de voix modale

1.5. Pré-traitement des signaux articulatoires et acoustiques

1.5.1. Étiquetage des évènements cinématiques de la production des labiales

Les mouvements de production des plosives labiales ont été segmentés en 4 phases, en suivant la procédure présentée dans le CHAPITRE 6 (i.e. « analyses des patrons EMG ») : une phase de fermeture des lèvres, une phase de compression, une phase de décompression avant décollement des lèvres, puis une phase d'ouverture labiale amenant à la production de la voyelle suivante.

1.5.2. Pré-traitement des signaux EMG

Le prétraitement des signaux EMG (filtrage, seuillage, normalisation) a été réalisé de manière classique, selon les techniques courantes en analyse électromyographique (cf. CHAPITRE 2). On se réfèrera à ce chapitre pour ce qui concerne le traitement des signaux EMG.

1.5.3. Pré-traitement des données EMA.

La bobine de référence, composée de 3 axes directionnels et positionnée sur le nez des sujets, permet de tenir compte des mouvements de la tête et d'exprimer les coordonnées de chaque bobine dans un repère fixe.

A la fin de chaque session d'enregistrement, une acquisition du plan occlusal (ou biteplane en anglais) était réalisée : 3 des bobines EMA étaient collées sur une plaque rectangulaire rigide

en plexiglass, une sur l'avant de la plaque au niveau des incisives et collée dans le plan médiosagital et deux à l'arrière au niveau du dos de la langue, de part et d'autre du plan médiosagital de manière à former un triangle isocèle. La plaque était ensuite insérée dans la bouche du sujet et il lui était demandé de la mordre. L'axe modélisé par le plan occlusal et la direction antérieure-postérieure de la cavité buccale a été considéré comme l'axe X sur lequel sont projetées les données de position des 4 bobines EMA. L'origine du repère des données articulatoires est alors définie par la position de la bobine placée à l'avant de la plaque.

2. Descripteurs acoustiques et physiologiques

2.1. Les indices acoustiques

Le bruit de plosion est considéré 1- sur l'intégralité de l'intervalle de temps où il est observé, tel qu'il a été manuellement étiqueté, incluant donc le bruit de plosion et le bruit de friction ; et 2- uniquement sur les 5 premières millisecondes du bruit.
La durée du bruit de plosion étiqueté est également extraite.

On extrait l'évolution temporelle de l'intensité acoustique calibrée, du centre de gravité spectral, du Skewness et du Kurtosis (moments d'ordre 3 et 4). Les trois paramètres spectraux sont calculés à l'aide de fenêtres glissantes de 5 millisecondes, décalées toutes les 2 millisecondes, permettant une bonne résolution fréquentielle (Fréquence d'échantillonnage Fe = 20 kHz). Le spectre est calculé sur 512 points. Le paramètre d'intensité acoustique est quant à lui calculé à l'aide de fenêtres glissantes de 3 millisecondes, décalées tous les 1% de leur durée, permettant au contraire d'avoir une bonne résolution temporelle, et d'obtenir constamment 80% de recouvrement. Un exemple d'évolutions temporelles de ces 4 paramètres spectraux est présenté sur la Figure 36 (logatome /pata/, débit de production normal, qualité modale)

Pour chacun des 4 signaux temporels précédents, on calcule une moyenne (sur 1- l'intervalle, et sur 2- les 5 premières ms ; la moyenne nous informe sur l'ordre de grandeur de l'indice)

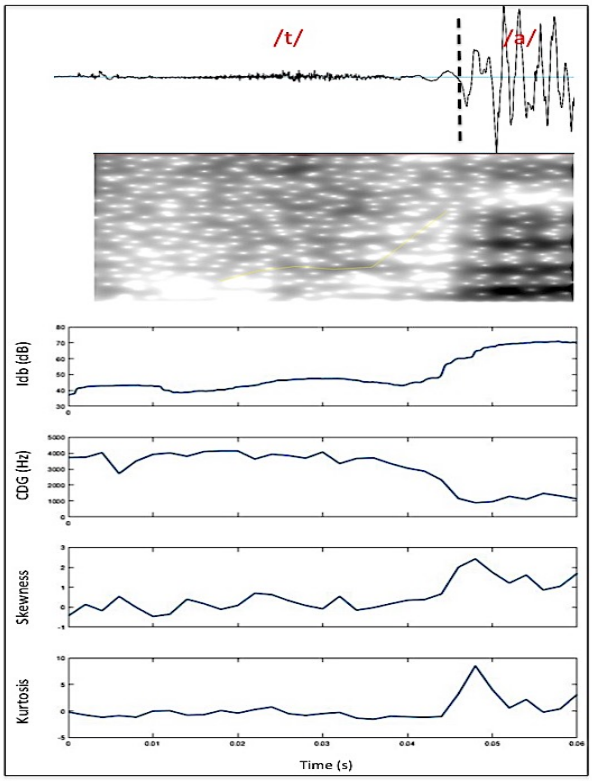


Figure 36 : focus sur le relâchement consonantique du /t/ d'un logatome /pata/ - dans l'ordre, de haut en bas, on observe 1- le signal acoustique temporel, 2- le spectrogramme, 3- l'évolution temporelle de l'intensité acoustique calibrée, 4- l'évolution temporelle du centre de gravité spectral, 5- l'évolution temporelle du Skewness, 6- l'évolution temporelle du Kurtosis

Les descripteurs acoustiques extraits sont résumés dans le Tableau 1. Dans l'ensemble, nous avons donc extrait 9 descripteurs acoustiques caractérisant de manière la plus fine possible le bruit consonantique

	Intensité acoustique	Centre de gravité spectral	Skewness	Kurtosis	Durée du bruit de relâchement (fenêtre étiquetée)
Moyenne	-sur la fenêtre étiquetée -sur les 5 premières ms	-sur la fenêtre étiquetée -sur les 5 premières ms	-sur la fenêtre étiquetée -sur les 5 premières ms	-sur la fenêtre étiquetée -sur les 5 premières ms	

Tableau 1: tableau récapitulatif des indices acoustiques extraits

2.2. Les descripteurs électromyographiques

En s'appuyant sur les études méthodologiques déjà réalisées auparavant, nous avons extrait l'énergie RMS moyenne des 5 muscles que nous avons ciblés : le Mentalis, le Digastrique, le Dépresseur de la Lèvre Inférieure, et les parties Inférieure et Supérieure de l'Orbicularis Oris. La méthode de décomposition et d'analyse des patrons d'activation des 5 muscles ciblés sera présentée en titre de « résultats » dans le CHAPITRE 6.

2.3. Les descripteurs aérodynamiques

Sur chaque intervalle d'occlusion consonantique, le maximum de Pio est mesuré.
Nous extrayons l'amplitude des 2 pics de la dérivée du signal de Pio encadrant le maximum de Pio : pic de dérivée positive représentant la vitesse avec laquelle la pression s'accumule dans la cavité orale au moment de l'occlusion, et pic de dérivée négative représentant la vitesse de décroissance de la pression intraorale au moment du l'ouverture de la constriction. On peut observer un exemple de Pio sur la Figure 37, toujours pour le logatome /pata/, débit de production normal, qualité modale, niveau d'effort 1. Le premier pic de Pio n'étant pas dans la fenêtre temporelle d'occlusion de la consonne /t/, il n'est pas considéré. On peut facilement y repérer les différents paramètres aérodynamiques énoncés ci-dessus.

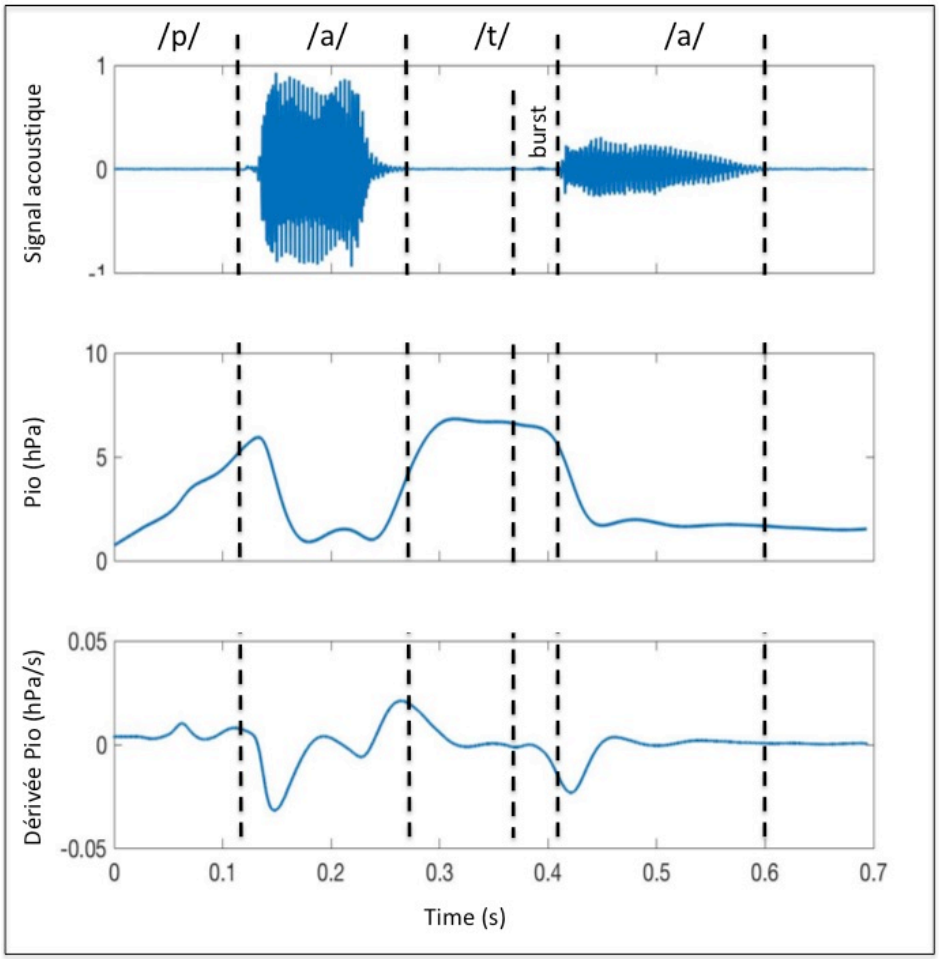


Figure 37 : Dans l'ordre, de haut en bas, on observe 1- le signal acoustique temporel, 2- le signal de Pio, 3- l'évolution temporelle de la dérivée du signal de Pio.

2.4. Les descripteurs cinématiques de l'articulation

Pour les paramètres articulatoires représentant le déplacement des lèvres (cf. Figure 38), nous extrayons le minimum de distance inter-labiale (distance entre le point le plus haut du vermillon et le point le plus bas de la lèvre inférieure, durant l'occlusion), la vitesse de fermeture des lèvres au début de l'occlusion et la vitesse d'ouverture labiale au relâchement

de l'occlusion. Le minimum de distance inter-labiale informe sur le degré maximum de compression labiale.

Pour les paramètres articulatoires représentant le déplacement de la langue, nous mesurons tout d'abord la vitesse tangentielle de la langue (calculée selon les directions X - avant/arrière - et Y - axe de l'élévation de la langue). Le maximum de la valeur absolue de la vitesse tangentielle (moyennée sur les 4 bobines) est calculé à deux endroits : avant l'occlusion (i.e. vitesse d'élévation de la langue, vers le lieu d'articulation) et après l'occlusion (i.e. vitesse de relâchement ou d'abaissement de la langue, du lieu d'articulation vers la position linguale de la voyelle suivante).
Nous avons cherché le lieu d'articulation à l'aide des formes de langue interpolées (cf. Figure 39) : étant donné la différence des formes de langues selon que la consonne est apicale ou vélaire. Il semble difficile - voire impossible - de proposer une méthode générale (ne dépendant pas du lieu d'articulation) pour quantifier la distance entre le contact langue-palais et l'incisive. La Figure 39 présente selon le lieu d'articulation la variabilité de forme de langue que l'on peut observer au cours d'une même occlusion. Ce phénomène est dû à la co-activation. Nous avons choisi l'instant où l'abscisse de la bobine apex est minimum pour les consonnes apicales (/t/, /d/) et l'instant où l'ordonnée de la bobine dorsum est maximum pour les consonnes vélaires (/k/, /g/). L'origine du repère est transformée en dernier lieu, et devient l'extrémité de l'incisive supérieure (visible sur la Figure 39). Les distances Xapex et Ydorsum, dans le nouveau repère, sont les deux descripteurs du lieu d'articulation que nous nous proposons d'utiliser par la suite.

2.5. Les indices temporels

Certaines durées peuvent également être considérées comme des paramètres de contrôle du mouvement de parole : on peut par exemple tenir plus ou moins longtemps une occlusion.
Nous avons choisi d'extraire (cf. Figure 40) la durée de l'occlusion (d1 :de l'instant de contact inter-articulateur à l'instant de relâchement de l'occlusion).

N'ayant pas l'information de l'instant de début d'occlusion pour les consonnes linguales, nous proposons une technique basée sur l'intensité acoustique permettant d'estimer l'instant suivant la voyelle et précédant l'occlusion où l'intensité acoustique atteint la valeur de l'intensité acoustique au cours de l'occlusion (moyenne sur les 100 échantillons précédant le relâchement de l'occlusion) majoré de 10% de la différence entre l'intensité maximale au cours de la voyelle précédente et l'intensité au cours de l'occlusion (cf. Figure 40) .

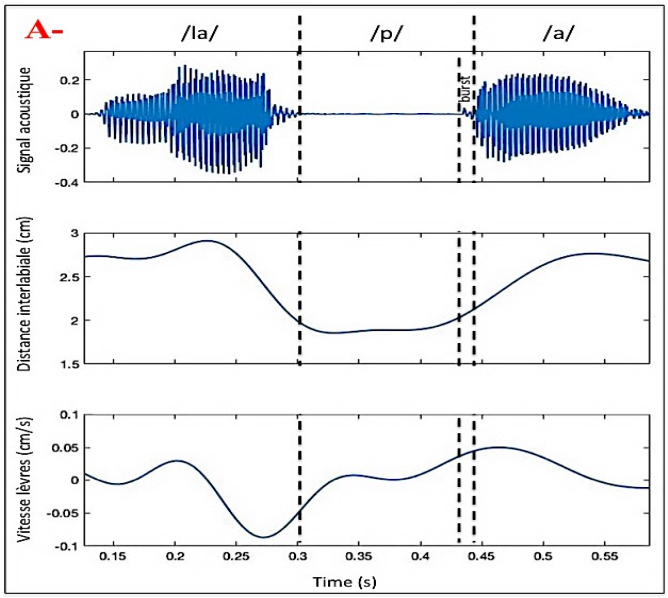


Figure 38 : signaux cinématiques décrivant le mouvement des lèvres (distance interlabiale et vitesses des lèvres)

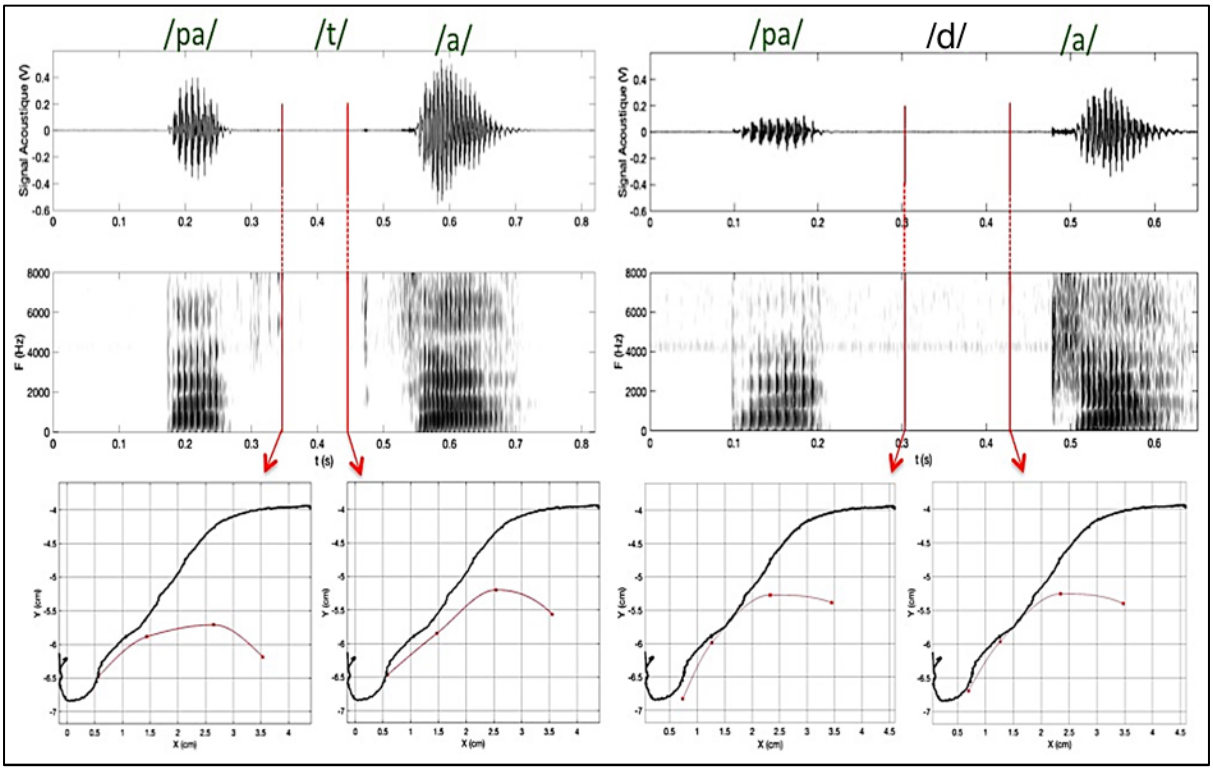


Figure 39 : Sujet 07 : exemples de formes de langue à deux instants de la production d'un /ta/ (graphes de gauche) et d'un /da/ (graphes de droite)

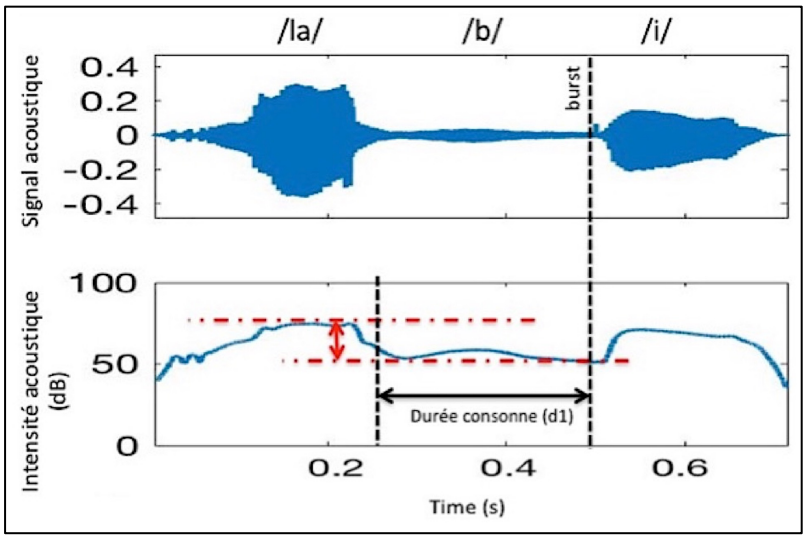


Figure 40 : illustration de la technique de détermination de l'instant de début d'occlusion, et extraction du paramètre de durée d'occlusion

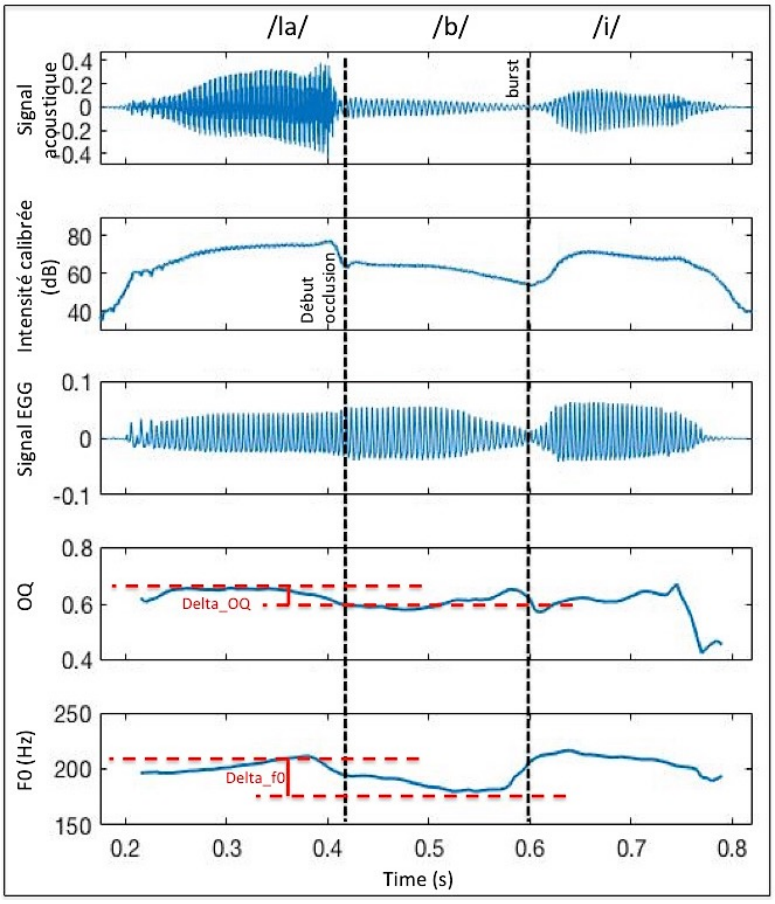


Figure 41 : extraction des paramètres laryngés : ΔOQ et Δf0 ; dans le cas d'une plosive voisée

2.6. Les descripteurs laryngés

Les paramètres laryngés classiques, Quotient Ouvert (OQ), et fréquence fondamentale (f0) ne sont pas définis au cours de la phase d'occlusion d'une consonne sourde.
Nous choisissons ici de repérer l'instant de début d'occlusion (voir paragraphe précédent) pour calculer dans le cas des plosives voisées la variation des paramètres OQ et f0 (ΔOQ et Δf0) entre la voyelle précédant l'occlusion et la phase d'occlusion elle-même (cf. Figure 41).
Nous avons également sélectionné la première valeur définie du Quotient Ouvert après l'instant de relâchement consonantique : c'est la valeur du Quotient Ouvert au moment de la reprise de voisement pour les consonnes occlusives sourdes (OQ_reprise).

3. Méthodes statistiques

3.1. Schéma global des analyses

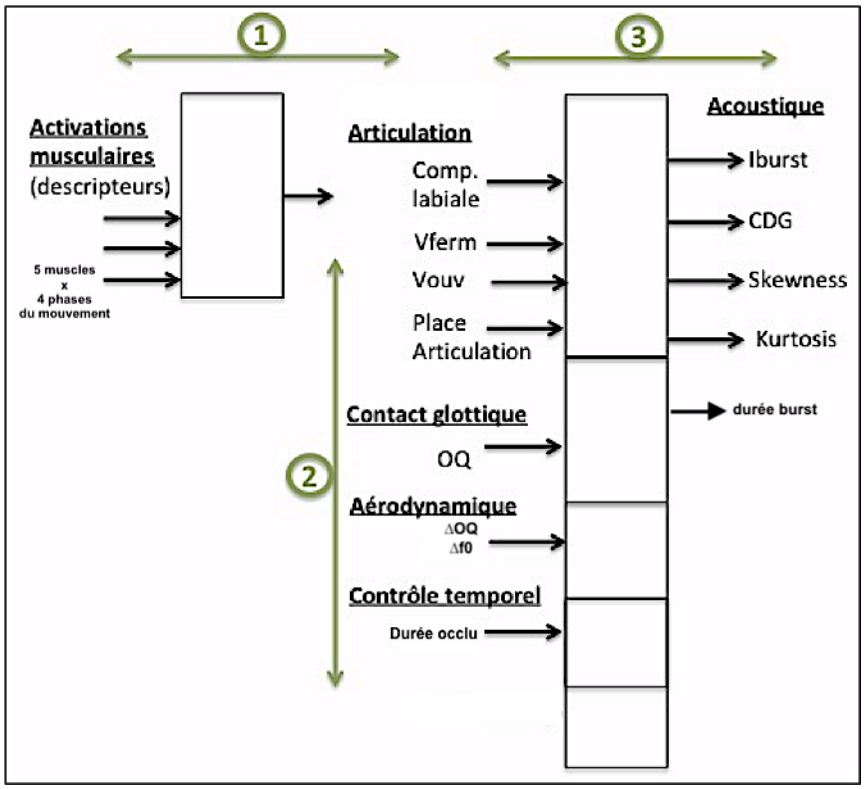


Figure 42 : schéma des analyses statistiques nécessaires à l'étude des questions fondamentales posées dans l'introduction de ce manuscrit

Les tableaux de données utilisés pour les statistiques descriptives (et provenant des mesures précédemment explicitées) subiront une transformation « zscore » (centrage + normalisation) pour tenir compte dans la suite des analyses des différences anatomiques et individuelles des sujets.

Les analyses statistiques que nous avons conduites dans mes travaux de thèse ont pour objectif de répondre aux questions soulevées dans l'introduction de ce manuscrit. Pour rappel, il s'agit en premier lieu de décrire, de caractériser et de modéliser (modélisation

fonctionnelle) la manière dont se coordonnent les gestes respiratoires, laryngés et articulatoires pour contrôler la variation des indices acoustiques du bruit de plosion des consonnes occlusives du français.

Nous souhaitons également étudier ici 1- le contrôle musculaire sous-jacent des gestes labiaux de production des occlusives labiales (étape statistique [1]), et 2- la manière dont les paramètres de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion co-varient (étape statistique [2]). Il sera également intéressant de distinguer les relations de contrôle moteur communes à l'ensemble des participants et celles qui dépendent de stratégies individuelles.

Étant donné le grand nombre de paramètres de contrôle et d'indices acoustiques, et le changement structurel supposé des relations, il est difficile d'envisager ici d'utiliser des modèles linéaires mixtes à tous les niveaux du schéma, pourtant classiques dans ce type de modélisation statistique. Chacune des étapes sera menée de manière isolée, et selon une méthodologie spécifique.

3.2. Statistiques descriptives et étude des relations entre paramètres de contrôle

Des matrices de corrélations de Spearman sont extraites pour l'ensemble des paramètres de contrôle (colonne centrale de la Figure 42 étape statistique [2]) : temporels, physiologiques, aérodynamiques, laryngés, et articulatoires. Les Rhos de Spearman sont extraits pour chaque corrélation, ils informent sur le lien de dépendance, sur la co-variation et sur la redondance deux-à-deux des paramètres.
Pour chaque relation dont le coefficient Rho de Spearman est supérieur à 0.5, les deux paramètres de contrôle sont considérés comme redondants. On choisira alors un seul des deux paramètres pour l'entrée du modèle statistique [3].

Pour réaliser cette étape de simplification du modèle statistique [3], nous avons tout d'abord centré les valeurs des paramètres de contrôle par sujet, consonne (p, b, t, d, k, g) et mode de production (modal ou chuchoté) : par combinaison consonne-mode, une moyenne de chaque paramètre a été calculée puis soustraite à l'ensemble des valeurs des paramètres de la classe.

3.3. Classification Ascendante Hiérarchique : regroupement de sujets.

Des comportements très différents sont observés d'un sujet à un autre, d'une relation entre paramètres à une autre. Fort de cette observation, nous nous proposons de réaliser préalablement une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).
La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), évoquée dans les livres de Cornillon et al, et de Tuffery et al (Cornillon et al, 2012 ; Tuffery, 2010), est une méthode qui a pour objectif de regrouper les sujets dans des groupes les plus homogènes possibles à partir des relations de contrôle d'une variable. Elle est composée de 2 grandes étapes qui sont : le regroupement successif des individus et le choix du nombre de groupes.
L'algorithme de regroupement successif commence par l'étape initiale où chacun des sujets forme un groupe pour atteindre l'étape finale où tous les sujets ne forment plus qu'un groupe. A chaque étape intermédiaire, les deux groupes les plus proches (selon une distance et un

indice d'agrégation bien définis) sont fusionnés pour ne former plus qu'un. Les regroupements successifs sont visibles sur le dendrogramme (arbre de classification).
Il faut alors choisir le nombre de groupes et « couper » l'arbre de classification. Ce choix s'appuie sur la perte d'homogénéité obtenue entre deux regroupements successifs lors de l'algorithme. Si en passant d'une situation à k groupes à une situation à k-1 groupes on perd trop d'homogénéité (matérialisé par un « saut » important entre deux barres successives sur la figure gain d'inertie du dendrogramme), on choisit alors de rester à une situation avec k groupes.
La classification ascendante hiérarchique a été réalisée à l'aide des fonctions agnes et HCPC des packages cluster et FactoMineR du logiciel R

Dans nos analyses, nous avons utilisé l'algorithme CAH pour regrouper les sujets par groupes homogènes en termes de stratégies de contrôle des indices acoustiques.

3.4. Partitionnement récursif

La technique de partition récursive développée par Zeileis et al (Zeileis, Hothorn, et Hornik 2008) a été utilisée pour modéliser les relations entre indices acoustiques du bruit de plosion et les différents paramètres de contrôle. Cette stratégie statistique a pour objectif de mettre en évidence les effets de différentes conditions et de différentes variables explicatives sur les variations de variables de sortie, nommées variables à expliquer. Elle tient compte des changements structurels entre les paramètres d'entrée et de sortie du modèle, et est très facilement applicable, même dans une situation multiparamétrique complexe. De plus, le package « party » du logiciel R dans lequel est implémenté l'algorithme de partitionnement récursif propose un outil de représentation graphique logique et parlant (type « arbre de décision »).

Plusieurs catégories de variables sont définies pour cette étape statistique :
- Les variables catégorielles de partitionnement : sujets (12 niveaux), groupe de sujet (n niveaux, valeur de n dépendant de la classification ascendante hiérarchique précédente), genre (2 niveaux), lieu d'articulation (3 niveaux : labial, lingual, et sons intermédiaires), contexte vocalique (2 niveaux : /a/ et /i/), voisement (2 niveaux : voisée VS non-voisée), mode (2 niveaux : chuchoté VS modal), débit (2 niveaux : normal VS rapide), et effort (8 niveaux : 5 pour les productions modales et 3 pour les productions chuchotées)
- Les variables explicatives continues, i.e. les variables d'entrée du modèle : il s'agit de variables continues correspondants aux paramètres de contrôle présentés dans ce chapitre (tous les paramètres non-acoustiques)
- Les variables continues à expliquer, i.e. les variables de sorties du modèle : il s'agit de variables continues correspondants aux indices acoustiques du bruit de plosion présentés également dans ce chapitre (9 indices acoustiques « candidats »).

Pour chacune des variables à expliquer, nous allons suivre les étapes de l'algorithme de partitionnement récursif. La première consiste à ajuster le modèle avec toutes les observations. On dispose alors de coefficients de régression expliquant la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives.
La deuxième étape consiste à voir si la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives, caractérisée par les coefficients de régression, reste stable, ou si au contraire la

segmentation des observations en tenant compte des modalités d'une variable entraine des coefficients de régression significativement différents.
La variable catégorielle gardée à cette étape est celle pour laquelle la p-value associée aux tests de fluctuations est à la fois la plus petite et inférieure à 0.05. Si aucune des p-values n'est inférieure à 0.05, la procédure s'arrête. Pour tenir compte de la multiplicité des tests, les p-values sont ajustées en utilisant la méthode de Bonferroni.
Une fois la variable de partitionnement retenue, on effectue une recherche exhaustive pour trouver la meilleure séparation en deux groupes de ses modalités. Pour chaque séparation, on calcule la valeur d'une fonction de coût (la somme au carré des résidus).
Pour terminer, on segmente le nœud en deux nœuds fils en retenant le découpage de la variable en deux groupes qui minimise la fonction de coût. On recommence la procédure de façon indépendante pour les deux nœuds fils.
Pour chaque nœud final, on analysera alors les coefficients de régression (ordonnée à l'origine, pentes), estimés à l'aide de la méthode des moindres carrées, modélisant la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives.

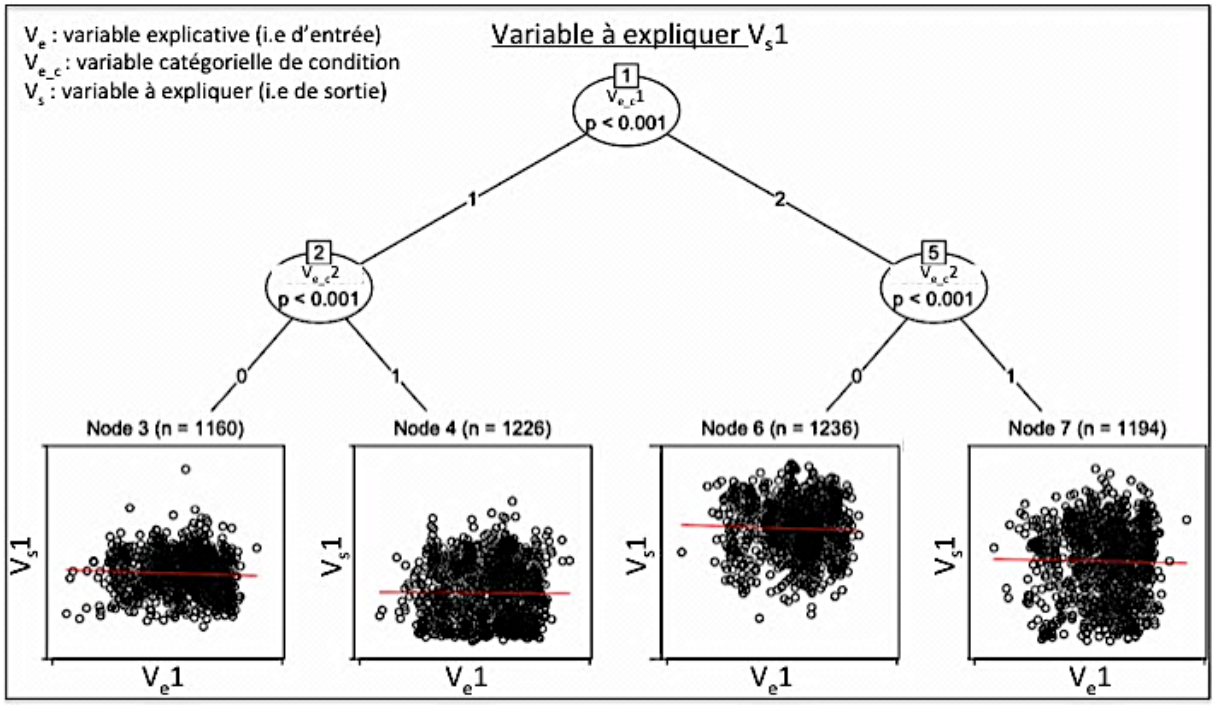


Figure 43 : illustration de l'algorithme de partition récursive fournie par le package « party » (1 variable à expliquer V_s1, 1 variable explicative V_e1, et deux variables catégorielles de conditions $V_{e_c}1$ et $V_{e_c}2$)

La représentation graphique de la partition récursive (Figure 43) présente l'ensemble des nœuds et les nuages de points des relations entre les variables explicatives et la variable à expliquer. Dans l'exemple ci-dessus, la variable conditionnelle $V_{e_c}1$ est la première à partitionner l'espace des relations, créant deux nouveaux ensembles de régression eux-mêmes instables. La deuxième variable discrète de condition $V_{e_c}2$ est capable dans un second temps de réduire l'instabilité des relations pour chacun des nœuds 2 et 5. Cette deuxième étape donne naissance à 4 nœuds, pour lesquels les relations sont stables. On peut extraire les coefficients de régressions pour chacune des 4 relations (tracés rouges), que l'on peut observer sur la ligne de graphique de la Figure 43.

4. Synthèse

Le corpus expérimental de ma thèse se compose de productions d'occlusives, selon des conditions variées de locution (débit rapide, niveaux d'effort articulatoire, mode, etc). Le but de cet ensemble de tâches est de générer de la variabilité, autant sur les indices acoustiques du bruit de plosion que sur les paramètres physiologiques, aérodynamiques, laryngés et articulatoires.

Divers paramètres permettent d'explorer les différentes contributions à la variation des indices acoustiques du bruit de plosion. Le Tableau 2 récapitule l'ensemble des paramètres mesurés pour chaque segment consonantique.

Les méthodes statistiques également présentée dans ce chapitre décrivent caractérisent, et modélisent la coordination des gestes aérodynamiques, laryngés, articulatoires contrôlant la variation des indices acoustiques du bruit de plosion.

	p	t	k	b	d	g
durée occlusion	x	x	x	x	x	x
Pio	x	x		x	x	
ΔOQ				x	x	x
Δf0				x	x	x
Compression	x			x		
Vouv_levre	x			x		
Vferm_levre	x			x		
Vouv_langue		x	x		x	x
Vferm_langue		x	x		x	x
Place articulation		x	x		x	x

Tableau 2 : synthèse des descripteurs mesurés pour les 6 consonnes étudiées

Partie 3

Résultats

CHAPITRE 4

Observation des données

1. Observations en parole modale, débit normal
2. Variations de production
3. Relations entre les différents descripteurs de contrôle de la production des occlusives
4. Variabilité interindividuelle
5. Bilan

Ce premier chapitre de résultats a pour vocation principale de décrire et de qualifier les données acquises au cours de ma thèse, au regard des différents résultats de la littérature (synthétisés dans le CHAPITRE 1). Il s'agira de s'intéresser aux ordres de grandeurs et aux distributions des variables mesurées pour chaque sujet, selon les différentes consonnes étudiées, [p, b, t, d, k, g], dans 2 contextes vocaliques /a/ et /i/, ainsi que lors de la production de consonnes « hybrides » générées par une tâche d'imitation, en différenciant les données selon le mode de phonation, le débit et l'effort articulatoire de production.
Ce chapitre a également pour objectif, en vue de l'établissement d'un modèle fonctionnel de la production des occlusives (objet du CHAPITRE 5), de simplifier l'ensemble des variables physiques mesurées autres que les caractéristiques du bruit de plosion, pour sélectionner les variables d'entrée du modèle fonctionnel, ainsi que l'ensemble des descripteurs acoustiques du bruit de plosion, pour sélectionner les variables de sortie.

La section 1 sera consacrée à des statistiques descriptives pour chaque catégorie phonétique. Nous déciderons qu'un descripteur acoustique est pertinent seulement s'il varie suffisamment entre les différentes catégories. Il sera alors retenu comme une des variables de sortie du modèle fonctionnel. Nous verrons que seulement 5 variables de sortie seront ainsi sélectionnées. L'observation pour chaque catégorie des distributions des variables physiques autre qu'acoustiques, sera limitée aux variables pour lesquelles il existe suffisamment de mesures dans la littérature. Il s'agira ainsi, pour toutes les consonnes du maximum de pression intra-orale et de la durée d'occlusion, pour les consonnes bilabiales du degré de compression labiale et de la vitesse d'ouverture des lèvres, et pour les consonnes palatales des distances Xapex, Ydorsum et de la vitesse tangentielle d'abaissement de la langue après le relâchement.
Les sections 2 et 3 auront pour but d'étudier les effets des facteurs mode, débit et effort sur les 5 descripteurs acoustiques retenus pour le modèle fonctionnel, ainsi que sur la sélection des variables physiques autres que les caractéristiques du bruit de plosion.
La section 4 traitera de la sélection des paramètres d'entrée du modèle, par analyse des corrélations inter-variables, et en considérant l'ensemble des variables aérodynamiques, laryngées, articulatoires, cinématiques et temporelles mesurées (14 variables).
Enfin, la section 5 décrira la variabilité inter-individuelle, affectant tout autant les variables mesurées prises séparément que la plupart des relations entre ces variables.

Les résultats des sections 1, 2, et 3 ont été obtenus sur les données brutes. En revanche, ces données ont été « z-scorées » (i.e. centrées et normalisées par l'écart-type) par sujet pour les sections 4 et 5, ainsi que pour la suite des analyses statistiques et de l'établissement du modèle fonctionnel (cf. CHAPITRE 5).

Il est important de souligner que dans cette première partie je présenterai un ensemble de résultats descriptifs. Aucune ANOVA n'a été réalisée, et l'objectif est uniquement de décrire et de représenter les données. L'idée générale est de vérifier que nos données ne présentent aucune incohérence (en termes d'ordre de grandeur des variables et paramètres, en termes de sens de relation inter-variables, etc.).
De manière générale, il est probable que plusieurs des distributions présentées dans cette partie de chapitre soient statistiquement non distinctes. Les observations que je fais ici sont donc à considérer comme purement visuelles et descriptives.

1. Observations en parole modale, débit normal

Nous considérons dans cette section 12 combinaisons phonétiques standards, sur la base du lieu d'articulation, du trait de voisement et du contexte vocalique et une catégorie spécifique à cette expérience composée des sons intermédiaires réalisés par le processus d'imitation des sons de synthèse hybrides entre /ata/ et /aka/. C'est donc au total 13 catégories que nous considérons : /lapa/, /lapi/, /laba/, /labi/, /pata/, /pati/, /pada/, /padi/, /paka/, /paki/, /paga/, /pagi/ + [7 mélanges de /ata/ et /aka/].
Tout mode de production (modal vs chuchoté), effort (1 à 5, ou 1 à 3) et débit (normal vs rapide) confondus, nous observerons dans ce paragraphe l'effet de la catégorie phonétique sur les distributions des variables, autant celles décrivant le bruit de plosion (variables acoustiques - potentielles sorties du modèle) ou celles décrivant le geste d'occlusion consonantique (variables physiologiques - potentielles entrées du modèle).

1.1. Descripteurs acoustiques du bruit de plosion

La Figure 44 présente les distributions des moyennes (calculées sur toute la durée du bruit de plosion pour la colonne de gauche, et sur les 5ms de plosion suivant le relâchement pour la colonne de droite) des indices acoustiques Intensité (Iburst), Centre de Gravité Spectral (CDG), Skewness et Kurtosis, pour chacune des 13 catégories phonétiques, tous sujets, modes, débits et efforts confondus.
La Figure 45 présente de la même manière les distributions des durées totales des bruits de plosion.

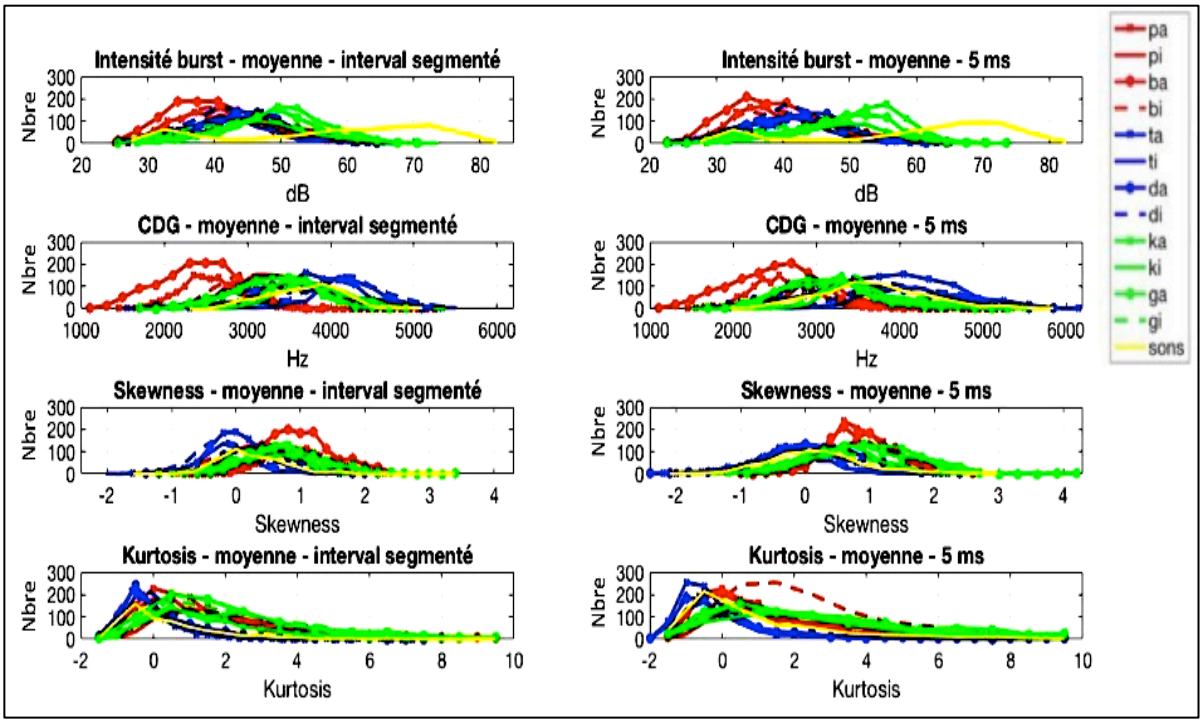


Figure 44 : distributions des indices acoustiques Iburst, CDG, Skewness et Kurtosis (i.e. distributions des moyennes des indices calculées sur l'ensemble de la durée du bruit de plosion pour la colonne de gauche, et sur les 5 premières ms suivant le relâchement de la consonne pour la colonne de droite), et selon la catégorie phonétique (couleur/style), tout sujet/mode/débit/effort confondus.

Les observations suivantes sont conformes aux connaissances décrites dans la littérature :
- Les valeurs des intensités acoustiques des bruits de plosion pour les consonnes bilabiales sont plus faibles que celles des consonnes apicales, elles-mêmes plus faibles que celles des consonnes vélaires.
- Les valeurs des intensités acoustiques sont comprises entre 25 et 70 dB (référence). Les valeurs faibles des intensités proviennent des répétitions en production chuchotée (cf. section 2 de ce chapitre). On note aussi une sorte de distribution bi-modale pour les répétitions de sons intermédiaires, ce qui tend à indiquer que les stratégies d'imitation génèrent effectivement de la variabilité sur l'intensité acoustique du bruit de plosion.
- Les valeurs de CDG sont comprises entre 3kHz et 6kHz pour les consonnes apico-alvéolaires, tandis qu'elles sont plutôt de l'ordre de 2kHz/3kHz pour les consonnes bilabiales et vélaires (Figure 44).
- Les valeurs du Skewness sont plus faibles pour les consonnes apicales (comprises entre -1 et 1) et elles sont plus élevées pour les deux autres catégories de lieu d'articulation (entre 0 et 3) (Figure 44).
- En moyenne, les durées des bruits de plosion des consonnes bilabiales sont sensiblement plus courtes que celles des consonnes linguales (apico-alvéolaires et vélaires) (Figure 45). Les durées les plus élevées (> 100ms) proviennent la plupart du temps de production très affriquées.

Il est également important de noter les résultats généraux ci-dessous :
- Les valeurs de Kurtosis ne permettent pas de distinguer les catégories phonétiques, même en termes de lieu d'articulation (consistant avec les résultats de Acher et al, 2014).
- La production des sons intermédiaires montre des CDGs dont les valeurs caractérisent la production des consonnes vélaires, et par des valeurs de Skewness plutôt proches de celles des consonnes apicales.

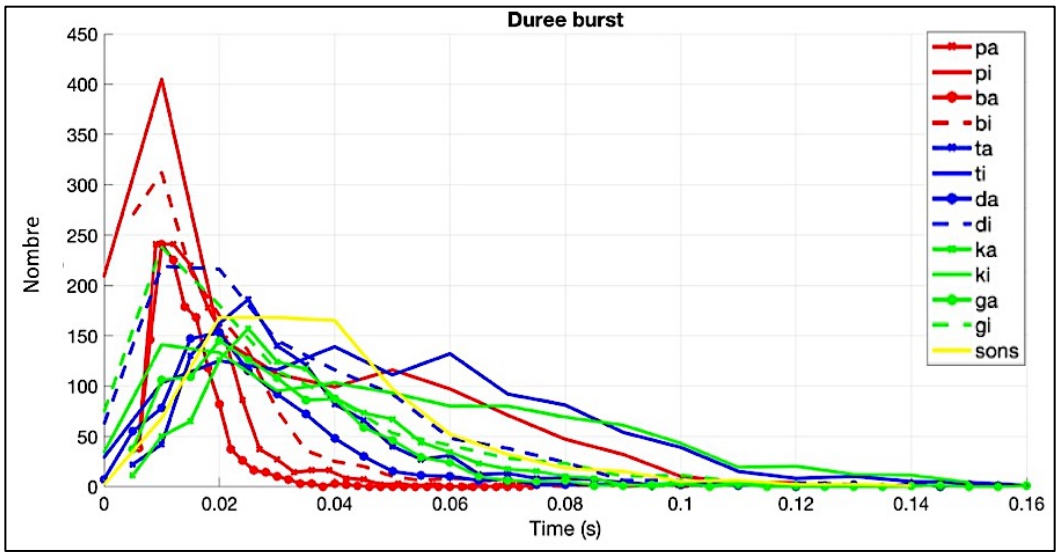


Figure 45 : distribution des durées des bruit de plosions, selon les 13 catégories phonétiques (moyennes, tout sujet, mode, débit et effort confondus)

En observant les distributions de la Figure 44, on voit que les paramètres Intensité acoustique, Centre de Gravité Spectral, Skewness et Kurtosis semblent permettre plus distinctement de distinguer les catégories phonétiques (lieu d'articulation notamment, voir CHAPITRE 1) quand ils sont calculés sur les 5 premières millisecondes du bruit (incluant la plosion et le début de

la friction) que quand ils sont calculés sur l'ensemble de la durée du bruit (les phases de frictions pouvant alors fortement influencer la description acoustique du bruit de plosion des occlusives).

1.2. Descripteurs physiologiques

Pour chacune des variables autres que les caractéristiques du bruit de plosion (maximum de pression intra-orale, durée d'occlusion, degré de compression labiale et vitesse d'ouverture des lèvres pour les consonnes bilabiales, distances Xapex, Ydorsum et vitesse tangentielle d'abaissement de la langue post-tenue pour les consonnes palatales), les distributions seront tracées uniquement pour une production modale. Ce choix d'analyse descriptive est fait dans le but de simplifier la compréhension et la vérification des données.

1.2.1. Descripteurs aérodynamiques

Nous avons d'abord observé l'ensemble des signaux de Pio pour chaque sujet et chaque enregistrement. Nous nous attendons à observer un profil asymétrique de Pio pour les logatomes de type /la-C-V/ (C = {p, b}, V = {a, i}), la pression augmentant jusqu'au relâchement de la plosive labiale, et un profil à double pic pour les logatomes de type /pa-C-V/ (C = {t, d, k, g}, V = {a, i}). Dans le second cas, nous vérifions l'allure du deuxième pic de Pio correspondant à la pression intraorale de production de la consonne linguale. Le capillaire en plastique permettant de mesurer la pression intra-orale se bouchait parfois à cause de la salive des sujets, de telle sorte que la mesure de la pression Pio était faussée. Nous ne considérerons pas dans la suite de l'étude les profils de Pio qui ne correspondent pas à nos attentes, parce que le pic de pression sur la plosive d'intérêt n'est pas discernable. Pour les consonnes vélaires, l'extrémité du capillaire n'atteint que rarement la cavité derrière le lieu d'occlusion, et ce à cause de la gêne que ressentent les sujets pour un placement aussi postérieur : dans la plupart des cas, nous ne trouvons pas le profil attendu, de telle sorte que nous ne considérerons la Pio pour les consonnes vélaires.
Les Figure 46 et Figure 47 représentent les distributions des trois mesures aérodynamiques pour les productions consonantiques : le maximum de pression intraorale (maximumPio), et les amplitudes des pics de dérivée (positif et négatif) de la Pio. Ces figures représentent les paramètres pour tous les sujets, débits et efforts confondus, selon la catégorisation phonétique.
Sur la Figure 46, il semblerait que le maximum de pression intra-orale des consonnes alvéolaires (/t/, en contexte /a/ et /i/) est supérieur à ceux des consonnes labiales et alvéolaires. Ceci est conforme aux résultats décrits dans la littérature (i.e. plus la cavité derrière le lieu d'occlusion est petite et plus la pression intra-orale est élevée) (cf. CHAPITRE 2). Les pressions observables dans le cas des consonnes /d/ ne sont pas supérieures à celles observables dans le cas des labiales, ce qui est étonnant.

Sur la Figure 47, on observe que les distributions des pics positifs de dérivée de la Pio sont sensiblement similaires d'une catégorie phonétique à une autre : le profil d'augmentation de la Pio dans la cavité d'occlusion ne dépend pas de la cible phonétique. En revanche, les valeurs des vitesses de relâchement de la pression au moment de l'ouverture de la constriction sont plus élevées pour les labiales que pour les palato-dorsales.

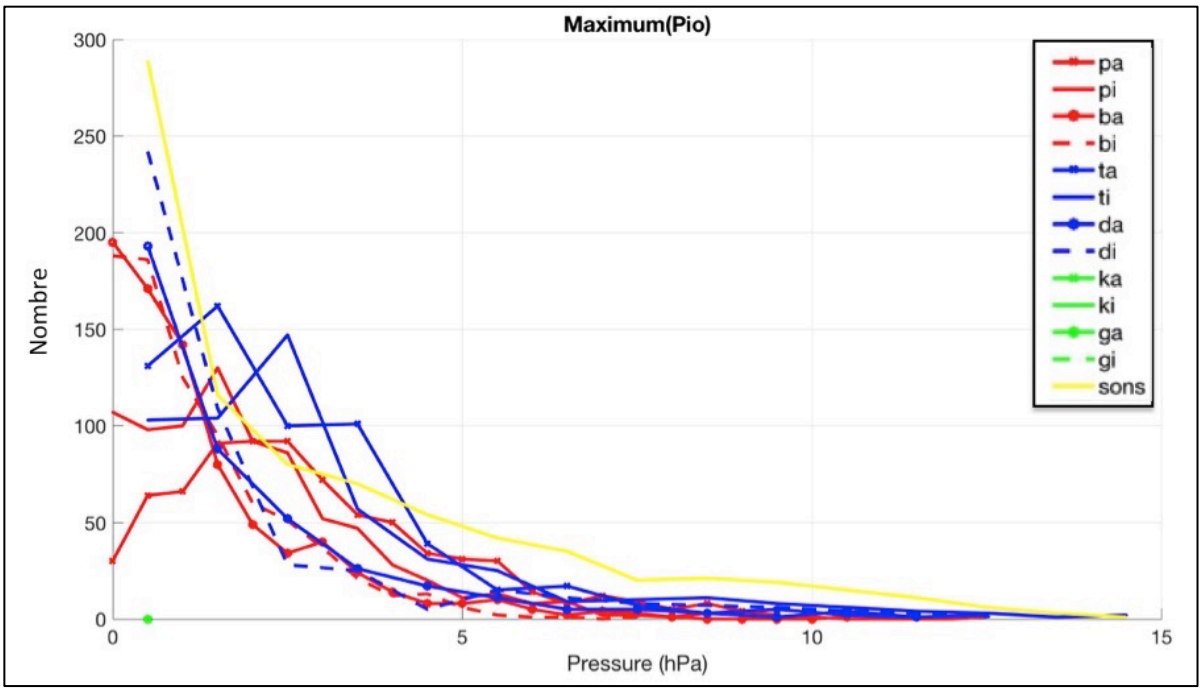


Figure 46 : distribution des valeurs de Pio, selon les 13 catégories phonétiques et en qualité de production modale (tous sujets, débits et efforts confondus)

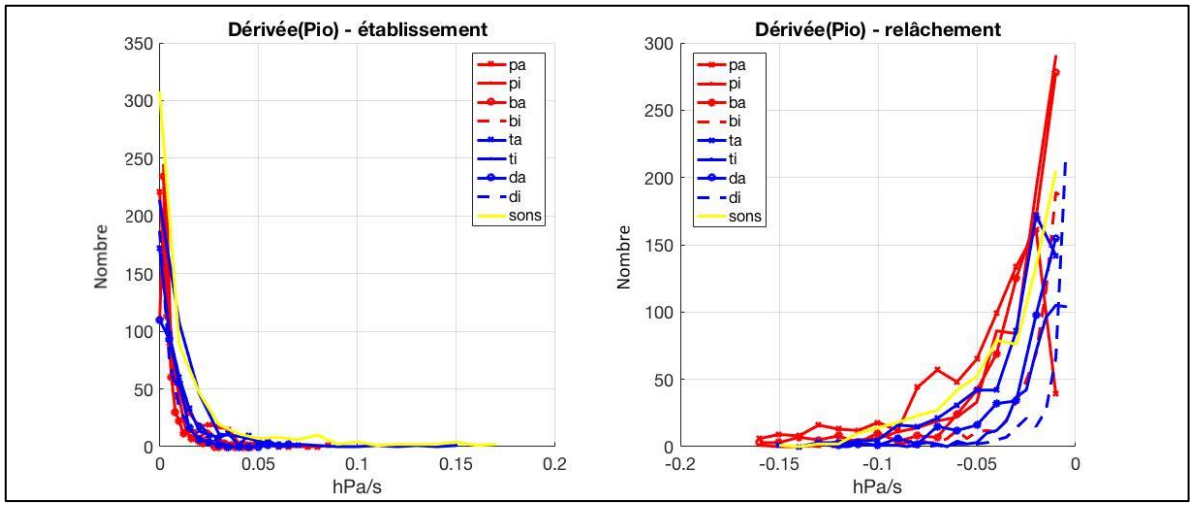


Figure 47 : distribution des valeurs de pics de dérivée de Pio, avant et après le maximum de Pio, selon les 13 catégories phonétiques et en qualité de production modale (tout sujet, débit et effort confondus)

1.2.2. Descripteurs articulatoires

1.2.2.1. Descripteurs des mouvements linguaux

Pour l'ensemble des productions des consonnes palatales (/t/, /d/, /k/, /g/), nous mesurons grâce à la technique EMA 6 descripteurs du mouvement de la langue (cf. CHAPITRE 3) : les coordonnées des bobines situées sur l'Apex et le Dos de la langue (i.e. Xapex, Yapex, Xdorsum, et Ydorsum) à l'instant où le lieu d'articulation est le plus représentatif de la catégorie consonantique, et les maximas des vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue (précédant et suivant la phase de tenue de l'occlusion). On présente ici les distributions

des descripteurs linguaux selon les 3 catégories de lieu d'articulation (apicale, vélaire, et sons intermédiaires).

La Figure 48 présente les distributions des valeurs des coordonnées des capteurs Apex et Dorsum pour les différentes catégories phonétiques. Ces distributions représentent la forme de la langue au moment où elle est la plus proche de celle de la consonne cible, après que nous nous soyons efforcés de réduire l'influence de la co-articulation (plus ou moins forte, en fonction des sujets, cf. section 5 de ce chapitre). Sur cette figure, on observe les points suivants :

- Les distributions des paramètres Yapex, Xdorsum et Ydorsum sont différentes selon que les consonnes sont apicales ou vélaires. Ces différentes distributions montrent que la langue est plus haute (Ydorsum_apicale<Ydorsum_vélaire) et plus courbée (Yapex_apicale > Yapex_vélaire) dans le cas des vélaires que dans le cas des apicales. La langue est donc plus plate dans le cas des apicales (Xapex_apicale ~ Xapex_vélaire et Xdorsum_apicale > Xdorsum_vélaire).
- La coordonnée X du capteur collé sur l'apex de la langue ne semble pas informer sur la catégorie consonantique, puisque les deux distributions (tracées en vert et en bleu) sont confondues.
- Les 4 distributions tracées en jaune (positions des bobines Apex et Dorsum 20ms avant le bruit de plosion pour les répétitions des sons interméidiaires) montrent un écart-type plus important que les courbes bleues et les vertes. Ceci confirme que la tâche a généré de la variabilité dans la place d'articulation et dans le positionnement de la langue. On note également une tendance bimodale des distributions tracées en jaune qui représentent les deux catégories consonantiques entre lesquels les sons hybrides évoluent (/t/ versus /k/).

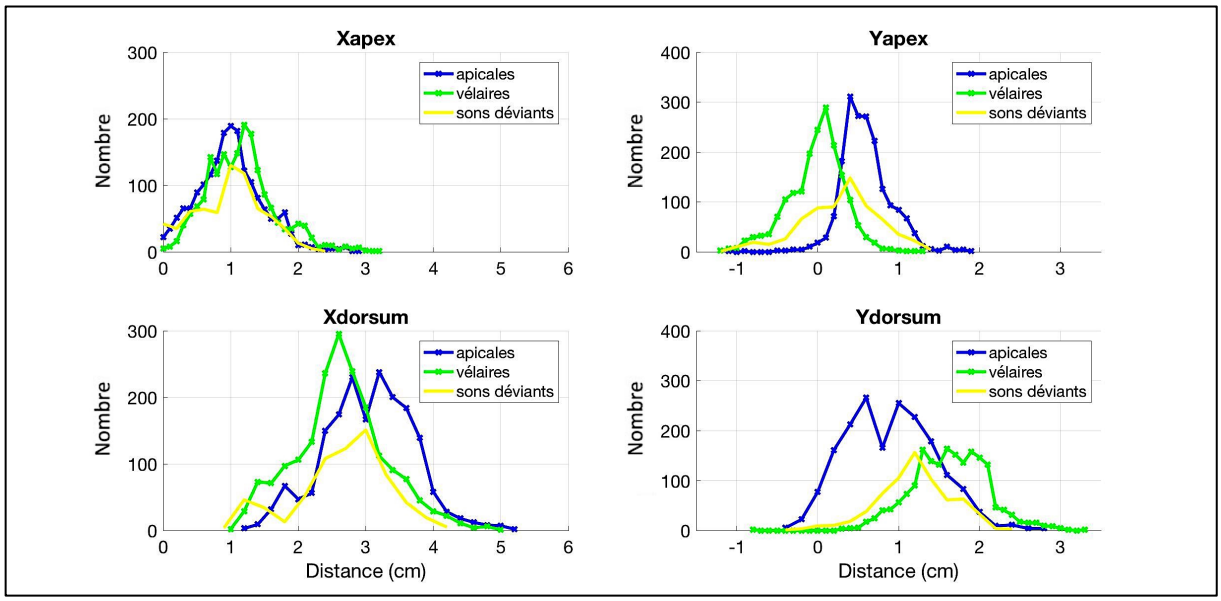


Figure 48 : distribution des valeurs des coordonnées des bobines Apex et Dorsum, pour les productions consonantiques apicales, vélaires, et interpolées. Les distributions sont tracées ici pour tous les sujets, les débits, les efforts confondus, en production modale.

La Figure 49 présente les distributions des valeurs des maximas des pics de vitesse tangentielle (mouvements d'élévation et d'abaissement de la langue) pour les différentes catégories phonétiques. Sur la Figure 49, on observe les points suivants :

- Globalement, l'ordre de grandeur des vitesses d'élévation de la langue est plus grand que celui des vitesses d'abaissement consécutif à la tenue. Pour les contextes vocaliques /i/, les 4 distributions des vitesses d'abaissement linguales sont peu étendues.
- Pour les consonnes vélaires et apicales il n'y a pas d'effet du lieu d'articulation de la consonne sur la distribution des maximas des pics de vitesse, autant au niveau de l'élévation que de l'abaissement de la langue.
- La vitesse d'abaissement de la langue consécutif à la tenue semble être en moyenne plus élevée pour les sons intermédiaires que pour les consonnes vélaires et apicales. De plus, pour les deux lieux d'articulation, il semble y avoir une nette différence de distribution de la vitesse d'abaissement de la langue d'un contexte vocalique à un autre. Cette observation est conforme avec le phénomène de co-articulation, qui peut modifier la trajectoire de la langue entre l'instant de relâchement de l'occlusion et la position correspondant à la production de la voyelle.

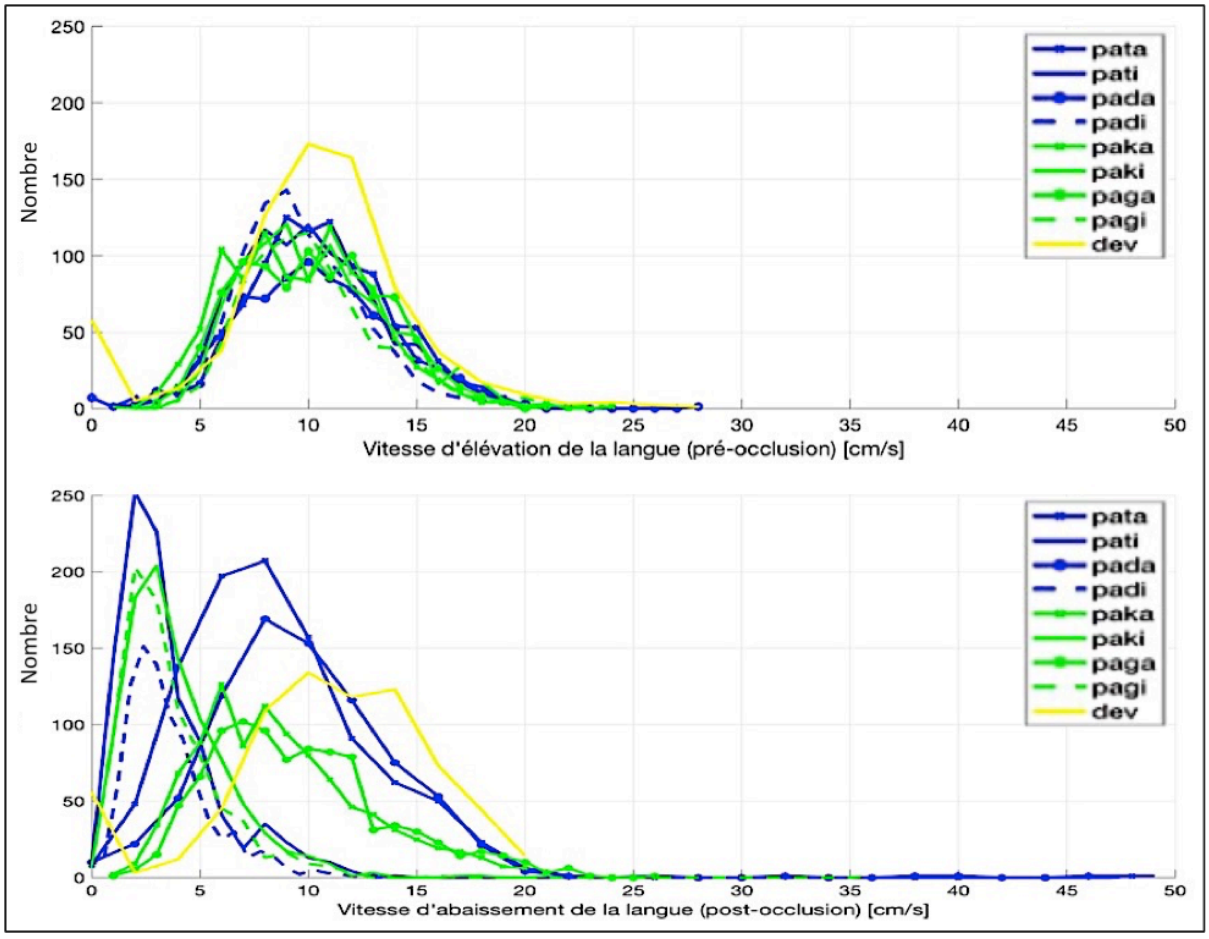


Figure 49 : distribution des valeurs des pics de vitesse tangentielle des mouvements d'élévation et d'abaissement de la langue, pour les productions consonantiques apicales, vélaires, et interpolées. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale.

1.2.2.2. Descripteurs des mouvement labiaux

Pour l'ensemble des productions des consonnes bilabiales (/p/, /b/), nous mesurons grâce à la technique du « Lip-tracking » 3 descripteurs de l'évolution temporelle de la géométrie labiale (cf. CHAPITRE 3) : le degré d'écrasement labial maximum (i.e. le minimum de la distance inter-labiale), et les maximas des vitesses de fermeture et d'ouverture des lèvres

(précédant et suivant la phase de tenue). Les Figure 50 et Figure 51 représentent les distributions de ces trois descripteurs labiaux pour les différentes catégories phonétiques concernées : /pa/, /pi/, /ba/ et /bi/. Les distributions sont tracées pour les répétitions modales des logatomes, pour tous sujets, débits et efforts confondus.

Sur la Figure 50, nous observons des répartitions similaires d'un phonème à l'autre pour les valeurs de compression inter-labiale. L'écart-type est grand, et apporte la preuve qu'à l'aide des contraintes de débit et d'effort nous avons réussi à générer de la variabilité dans les productions, visible ici au niveau articulatoire. Nous étudierons plus en détails dans la suite du chapitre l'effet du débit et de l'effort sur la variabilité des variables physiques (cf. section 3).
Lorsque les lèvres sont au repos, la distance inter-labiale appelée « degré de compression interlabiale » varie entre 1 et 3 centimètres, selon l'anatomie du sujet. Les ordres de grandeurs des valeurs visibles sur la figure sont donc tout à fait conformes à ceux que l'on attendait.

Les distributions des vitesses d'ouverture et des fermetures des lèvres (cf. Figure 51) sont globalement assez similaires d'une catégorie phonétique à l'autre. Les distributions des vitesses de fermeture pour le logatome /labi/ et celles de la vitesse d'ouverture pour le logatome /laba/ sont légèrement plus hautes que celles observées pour les autres cibles (plus de données dans ces catégories).

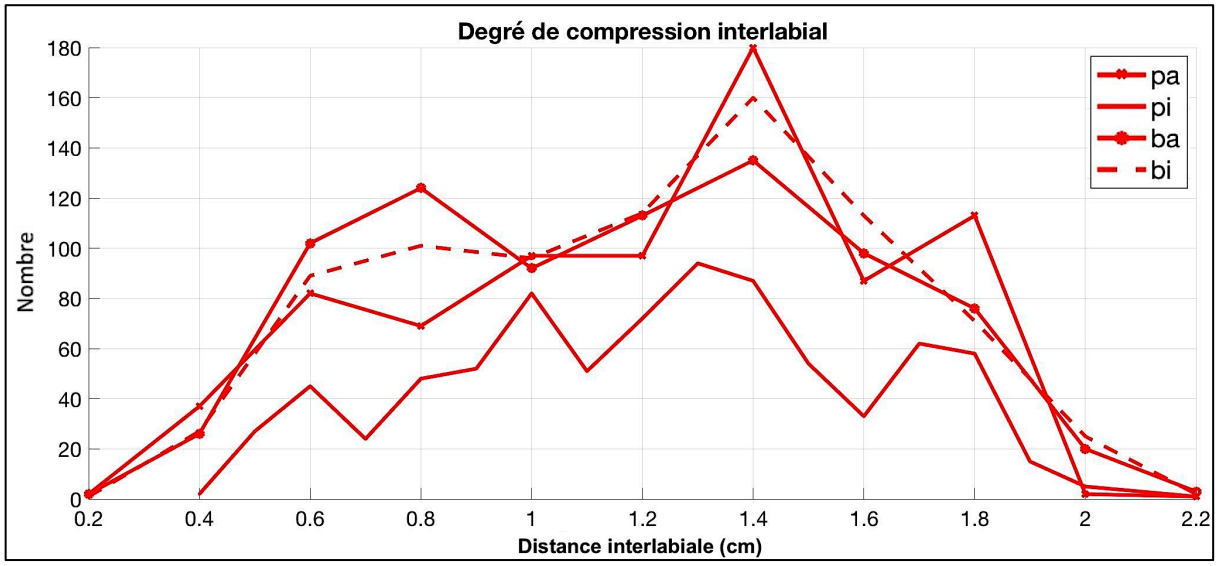


Figure 50 : distribution des valeurs du maximum de degré de compression interlabiale pour les logatomes /lapa/, /lapi/, /laba/, /labi/. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale.

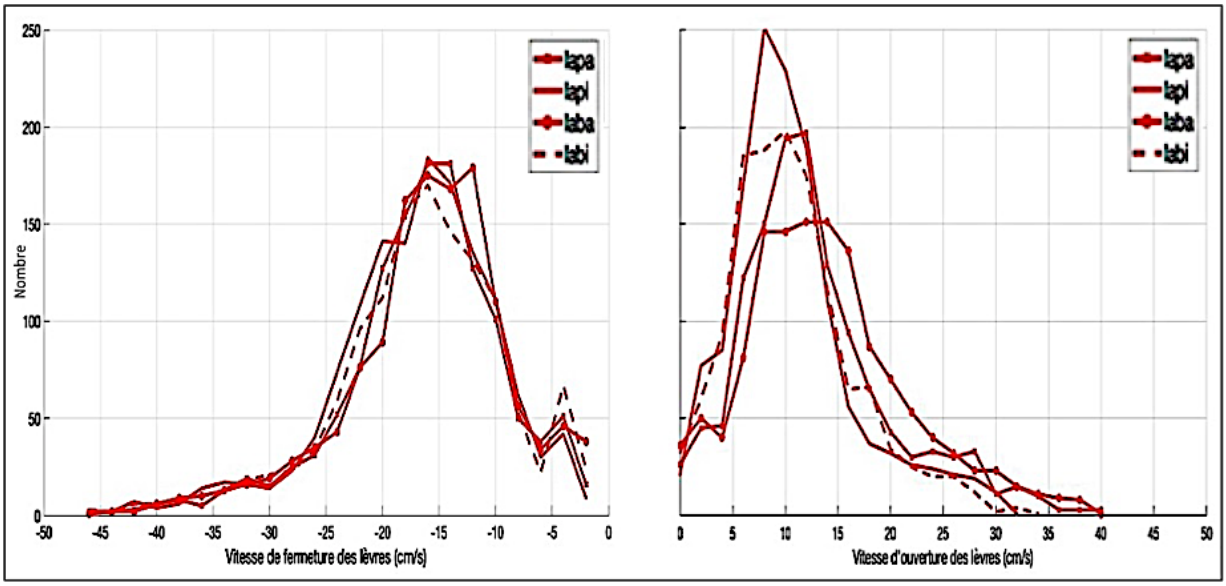


Figure 51 : distribution des valeurs des maximas des vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres pour les logatomes /lapa/, /lapi/, /laba/, /labi/. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale.

1.2.2.3. Descripteurs temporels

On observe sur la Figure 52 que la tenue d'occlusion consonantique est en moyenne plus longue pour les consonnes bilabiales et les répétitions interpolées que pour les consonnes apicales et vélaires. Elles semblent en revanche être similaire pour les apicales et les vélaires. Ces résultats sont conformes à la littérature. Pour les sons intermédiaires, nous faisons l'hypothèse que les tenues consonantiques plus longues sont dues à une adaptation en temps-réel des sujets pour positionner la langue de manière optimale et tacher de respecter la déviance du son entendu.

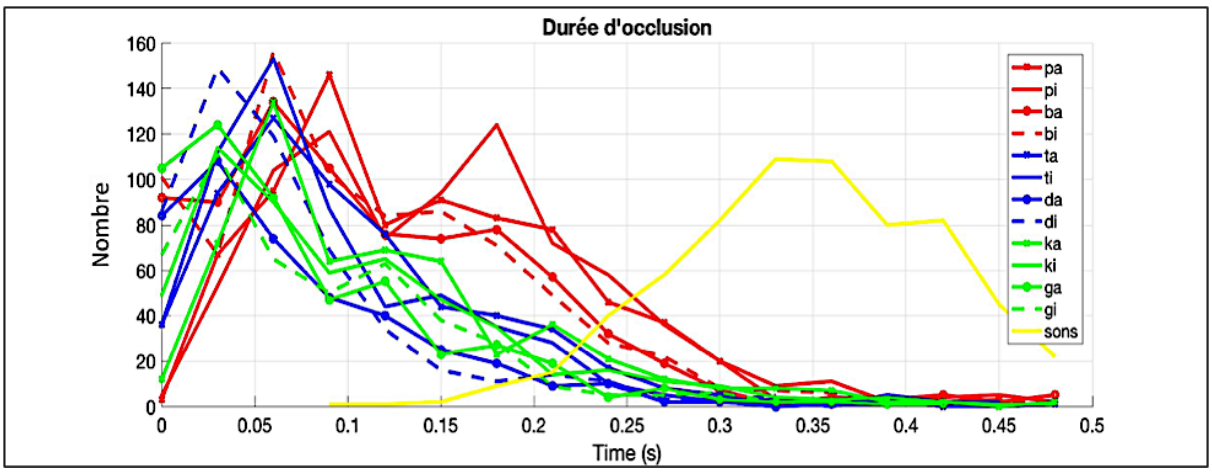


Figure 52 : distribution des valeurs des durées de tenue de l'occlusion, pour les 13 catégories phonétiques. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale

2. Variations de production

2.1. Effet du mode de phonation

Dans le corpus, chaque sujet réalisait deux types de production : modale et chuchotée. Nous nous proposons dans ce paragraphe d'observer et de qualifier l'effet de la variable catégorielle « mode ».
La Figure 53 présente les distributions de 6 descripteurs (Intensité du Bruit de plosion, CDG du Bruit de plosion, durée d'occlusion et durée du bruit de plosion, maximum de Pio, et degré de compression interlabiale) pour les deux logatomes /lapa/ et /laba/, en mode modal (en traits pleins) et en mode chuchoté (en tirets). On observe plusieurs résultats qualitatifs intéressants :

- Les intensités des bruits de plosion sont plus faibles pour les productions chuchotées que pour les productions modales dans le cas du /ba/, mais pas du /pa/.
- Les durées des bruits de plosion tendent à être moins longues pour les productions chuchotées que pour les productions modales, dans le cas du /pa/ cette fois-ci, mais non du /ba/.
- Pour les consonnes sourdes (/p/ dans l'exemple de la Figure 53), les distributions des maximas de Pio sont différentes d'un mode à un autre : les maximas de Pio sont plus faibles pour les sourdes chuchotées que pour les sourdes modales. En revanche, pour les consonnes sonores (/b/ dans l'exemple de la Figure 53), les distributions des maximas de Pio ne sont pas différentes d'un mode à un autre. Le maximum de Pio semble être un paramètre qui tend à varier entre les catégories phonétiques.

Il est également crucial de noter, dans notre base de données, d'autres différences importantes des deux modes de production : 1- la tâche d'augmentation d'effort articulatoire de production était légèrement différente d'un mode à l'autre (3 niveaux auto-évalués pour le mode chuchoté, versus 5 niveaux pour le mode modal). ; 2- les descripteurs du contrôle laryngés ne sont pas définis dans le cas des productions en qualité chuchotée, alors qu'ils le sont en qualité de production modale ; 3- il n'y a pas de tâche de répétition de sons intermédiaires en qualité de production chuchotée.

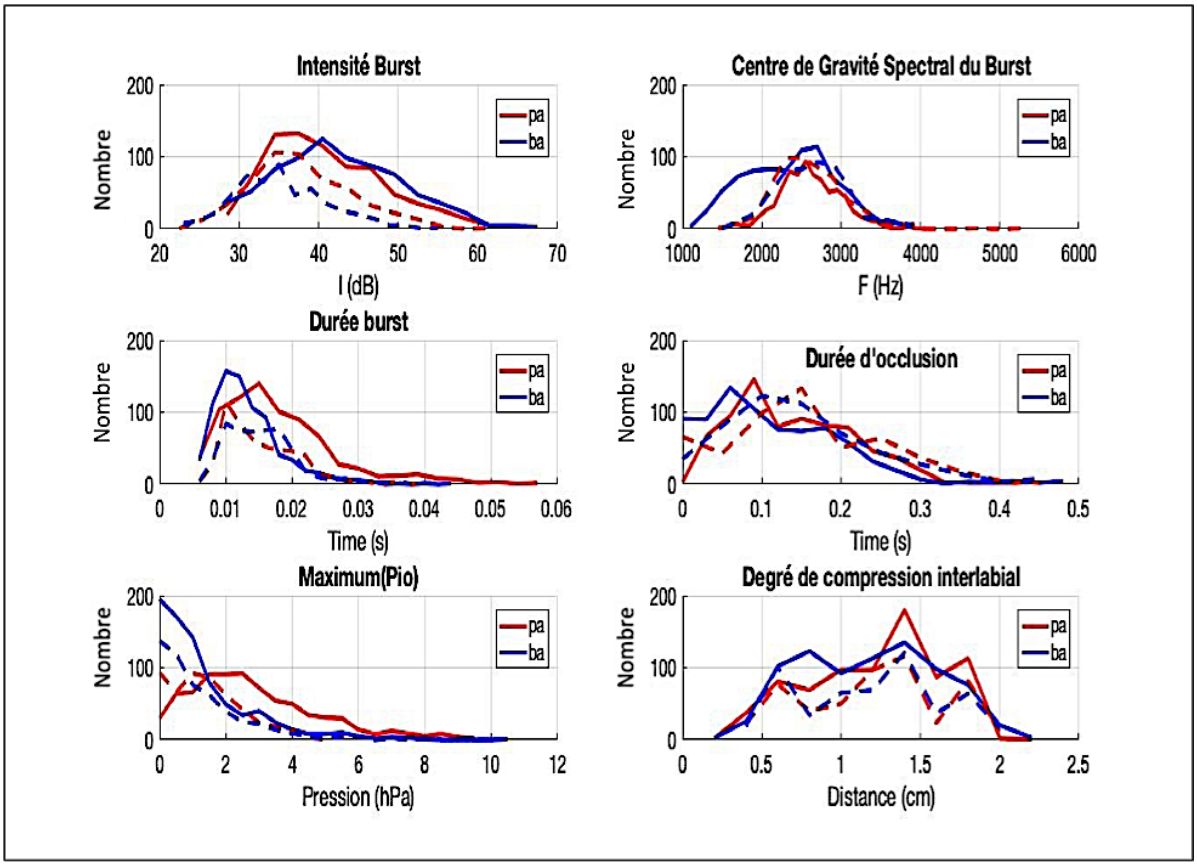


Figure 53 : effet du mode de production sur les distributions des valeurs de 6 descripteurs de la production des logatomes /lapa/ et /laba/ (De haut en bas, et de gauche à droite : Intensité du Bruit de plosion, CDG du Bruit de plosion, durée d'occlusion et durée du bruit de plosion, maximum de Pio, et degré de compression interlabial). En traits pleins les productions modales, et en tirets les productions en qualité chuchotée. Les distributions ci-contre sont tracées pour tous sujets, débits et effort confondus.

2.2. Effets de l'effort et du débit

Dans notre base de données, les productions consonantiques sont réalisées selon : 2 débits de parole (normal *versus* rapide), et selon des niveaux d'effort articulatoire auto-évalués (pas de contrôle quantitatif). En situation de débit de parole rapide, aucune augmentation d'effort n'est demandée au sujet. Pour la tâche de parole à débit normal, on demande aux sujets d'augmenter l'effort articulatoire de production selon 3 ou 5 niveaux auto-évalués, respectivement pour la parole chuchotée et la parole modale). Un niveau d'effort 1 en production modale n'est évidemment pas le même pour chaque sujet, il en est de même pour de l'augmentation de l'effort qui ne se fait pas sur une échelle linéaire. Les deux paramètres effort et débit ont été choisis pour générer de la variabilité dans les stratégies de production de parole et générer ainsi une large variation des variables étudiées. Deux questions sont étudiées prioritairement :

1- les catégories effort et débit étendent-elles correctement le domaine de variation des valeurs des descripteurs acoustiques, aérodynamiques et articulatoires ?
2- quel est l'effet de l'effort et du débit sur les relations entre les variables ?

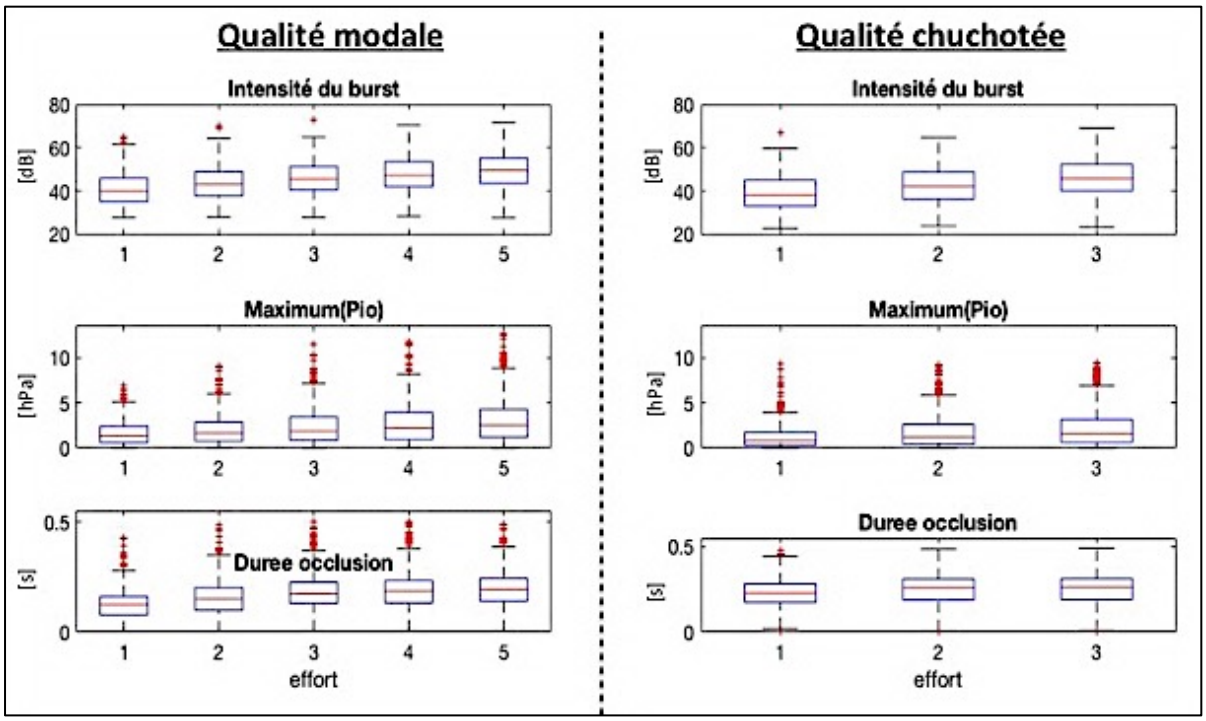


Figure 54 : boxplots montrant l'effet de la condition effort sur le domaine de variation des valeurs des variables Intensité du bruit de plosion, Maximum de Pio, et durée d'occlusion (de haut en bas). Ici, on confond tous les sujets et les logatomes. A gauche, les effets des 5 niveaux d'effort auto-évalués en qualité de production modale, et à droite ceux des 3 niveaux d'effort auto-évalués en qualité de production chuchotée. Les points rouges représentent les outliers, et les traits horizontaux les écarts-types.

La Figure 54 montre les moyennes et les écart-types de trois variables, l'Intensité du bruit de plosion, le Maximum (Pio) et la Durée d'occlusion, selon les différents niveaux d'effort (en abscisse) et les deux modes de production (colonne de gauche pour le mode modal, et colonne de droite pour le mode chuchoté).
On remarque que l'augmentation de l'effort, autant sur 3 niveaux en parole chuchotée que sur 5 en parole modale, entraine une augmentation de la moyenne et de l'écart-type de chaque descripteur. Le mode de production ne semble pas influencer cette tendance.

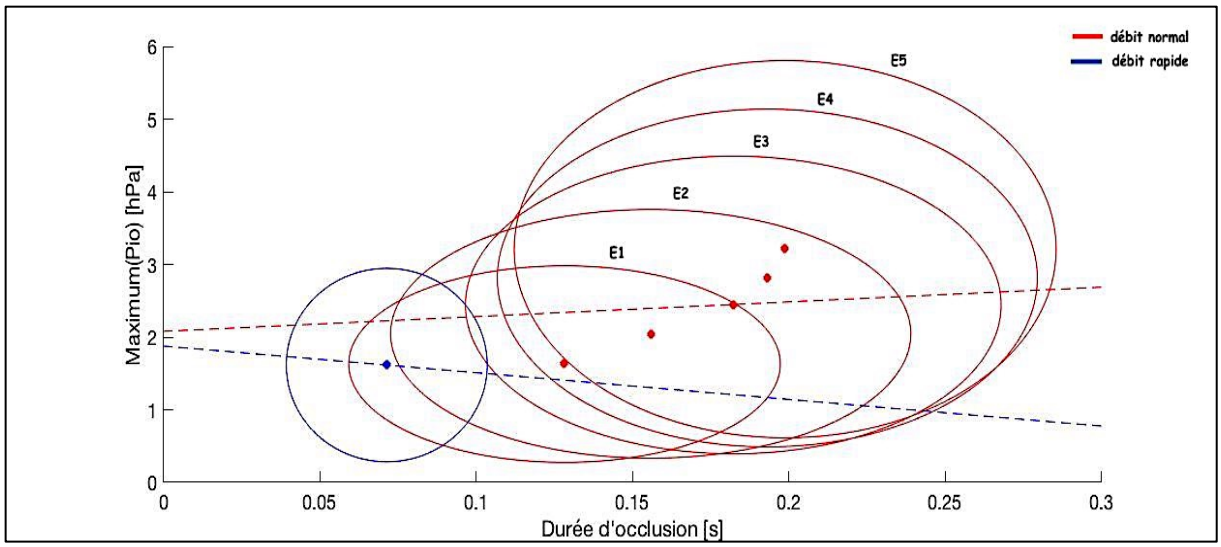


Figure 55 : Distribution des variables maximum(Pio) et durée d'occlusion, en qualité de production modale, pour les différents niveaux d'effort en débit de parole normal, à l'aide d'ellipse de dispersion (ellipses rouges : 1 ellipse par effort, noté de E1 à E5) et pour la condition débit rapide (en bleu : pas d'effort, 1 seule ellipse).

Sur la Figure 55, on s'intéresse à la distribution des variables max(Pio) et durée d'occlusion. Chaque ellipse à 2 sigmas représente le nuage de points des couples de valeur max(Pio)-durée d'occlusion, pour une catégorie donnée. En rouge, les ellipses rouges correspondent au débit de parole normal et aux différents niveaux d'effort (E1 pour effort 1, à E5 pour effort 5). En bleu, il s'agit de l'ellipse correspondant au débit de parole rapide. Les traits en pointillés représentent, pour chaque débit (rouge versus bleu), les droites de régression linéaire qui approximent les relations entre les deux paramètres. La droite en pointillé rouge est calculée sur l'ensemble des niveaux efforts. On note sur la Figure 55 que les moyennes et écart-types que de chaque ellipse rouge confirment les observations de la Figure 54 : la variable catégorielle effort semble étendre le domaine de variation des variables aérodynamiques et temporelles mesurées dans la tenue.

On réalise le même type de représentation que celui de la Figure 55 sur la Figure 56, cette fois-ci pour les couples de variables : degré de compression interlabiale – vitesse d'ouverture des lèvres (uniquement pour les consonnes bilabiales, Figure 56-A), Xapex – Vitesse du mouvement d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes apicales, Figure 56-B), et Ydorsum – Vitesse du mouvement d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes vélaires, Figure 56-C). Les résultats ci-dessous, extraits de l'analyse de la Figure 56, sont similaires à ceux qui sont donnés par la Figure 55.
La Figure 56 confirme que la variable effort augmente le domaine de variation des variables articulatoires et cinématiques.

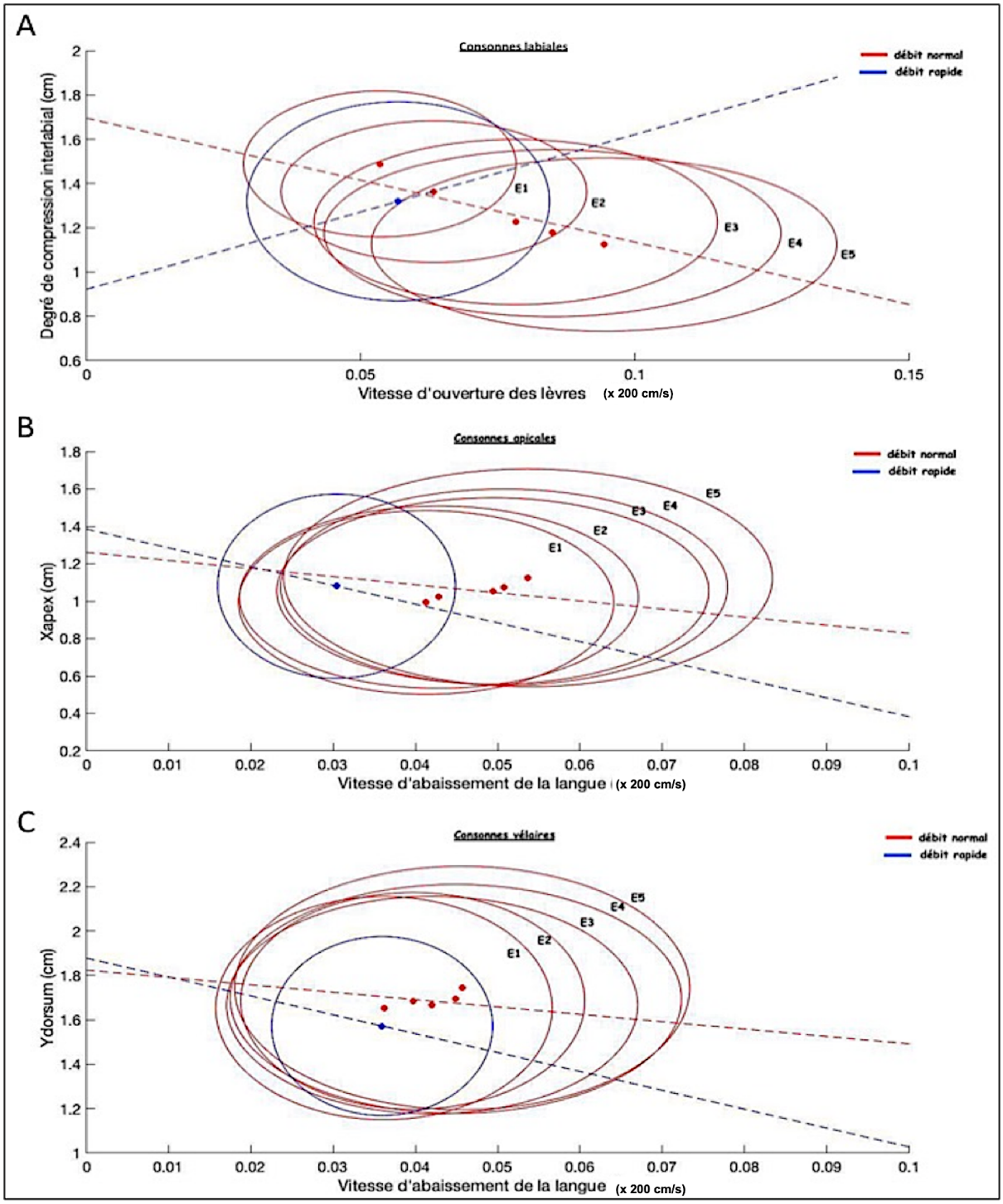


Figure 56 : distributions des paramètres A : degré de compression interlabiale – vitesse d'ouverture des lèvres (uniquement pour les consonnes bilabiales) ; B : Xapex – Vitesse d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes apicales) ; et C - Ydorsum – Vitesse d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes vélaires). , en qualité de production modale, selon les différents niveaux d'effort en débit de parole normal (ellipses rouges : 1 ellipse par effort, noté de 1 à 5) ou selon la condition débit rapide (en bleu : pas d'effort, 1 seule ellipse)

La Figure 57 propose un exemple de partitionnement des relations Maximum(Pio) <-> Durée d'occlusion selon le niveau d'effort, en qualité de production modal et en débit de parole normal, pour les sujets S3 et S7 : l'effort n'influence pas les relations linéaires rouges (i.e. pas de nœud lié à l'effort et divisant l'espace des relations Pio<->Durée en diminuant l'instabilité).

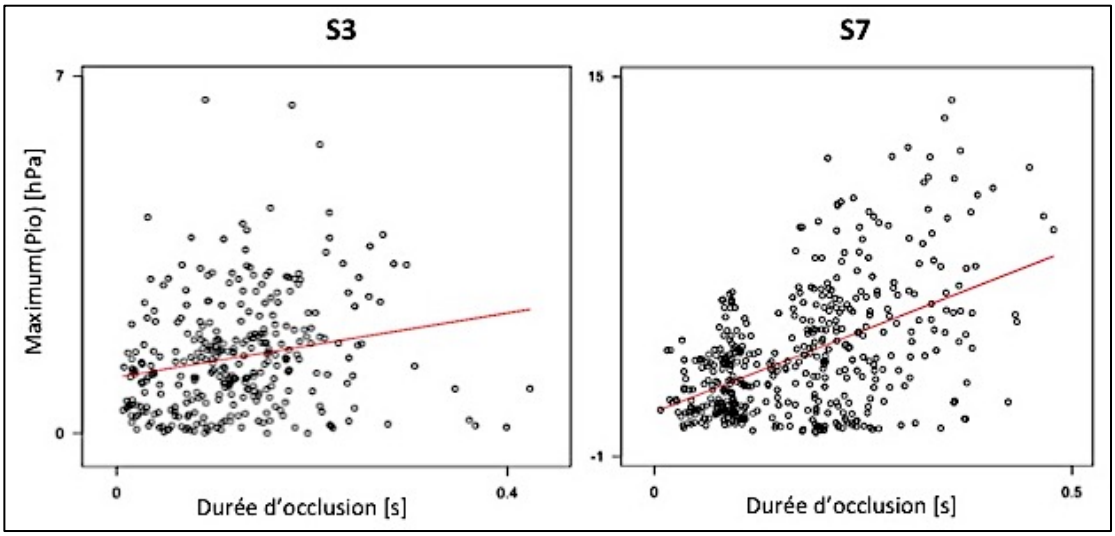


Figure 57 : exemple de relations liant les paramètres Maximum(Pio) et Durée d'occlusion, pour les sujets 3 et 7: ces relations extraites d'un partitionnement récursif sont valables quel que soit le niveau d'effort articulatoire.

Le Tableau 3 recense les coefficients de pente de régression linéaire pour les 4 relations inter-variables traitées dans cette section, et ce pour les 12 sujets. La présence d'une unique valeur dans une cellule du tableau indique, en plus de la nature de la relation, que la variable effort ne partitionne pas l'espace des relations.

MODAL				
Pentes	**maximum(Pio) <-> durée d'occlusion**	**Deg.Comp <-> Vit. Ouv. Lèvres**	**Xapex <-> Vit. Abais. Langue**	**Ydorsum <-> Vit. Abais. Langue**
S1	3.061928	8.517501	4.245355	-5.321009
S2	1.392067	-2.37675	NaN	NaN
S3	2.138173	-0.3835464	-5.365066	-4.898161
S4	3.139799	3.825039	-5.090711	10.71443
S5	2.725889	-0.2098234	0.9613064	0.4618339
S6	4.972978	-5.008537	-11.78666	-11.53114
S7	13.72517	-12.39088	-7.666832	-2.555825
S8	2.474501	0.9272027	-5.005199	-7.604972
S9	4.525055	-3.22251	-3.239576	-4.616913
S10	-1.531222	-6.99095	-1.596989	0.123436
S11	1.601919	-7.550688	-5.944519	-0.9519816
S12	4.164767	-8.413968	9.033386	-14.63403

Tableau 3 : Coefficients de régression linéaire, pour chaque sujet (en ligne), des relations Maximum(Pio) <-> durée d'occlusion, Deg.Comp <-> Vit. Ouv. Lèvres (pour les labiales), Xapex (pour les apicales) et Ydorsum (pour les vélaires) <-> Vit. Abais. Langue (en colonne). L'effort ne partitionne pas les relations : 1 unique coef. de régression linéaire par cellule du tableau.

On peut résumer tous ces résultats sur l'effet de l'effort et du débit à l'aide des deux bilans suivants :

1- L'effort articulatoire n'a pas d'effet sur les relations entre les variables, autres que celles qui caractérisent le bruit de plosion, décrivant la production des occlusives, mais il étend le domaine de variation de ces variables. De plus, l'effort est une variable sujet-dépendante.

Nous ne l'incluons donc pas comme un facteur catégoriel dans l'analyse statistique de nos données.

2- À l'inverse, le débit a une influence importante sur les relations entre les variables, mais a un effet limité (surtout comparé à celui de l'effort) sur leurs domaines de variation. Le débit, à la manière du mode de production (cf. section 2), sera donc intégré dans notre analyse statistique comme un facteur catégoriel.

3. Relations entre les différents descripteurs de contrôle de la production des occlusives

Dans cette section, nous considérons l'ensemble des variables, autres que celles qui caractérisent le bruit de plosion, caractérisant la production des occlusives, et qui sont de potentiels paramètres d'entrée dans le modèle fonctionnel que nous aborderons dans le CHAPITRE 5 :

- Variables articulatoires et cinématiques :
  - Degré de compression labial et vitesse de fermeture et d'ouverture des lèvres, pour les consonnes bilabiales
  - Valeurs de Xapex et Ydorsum (coordonnées en X et en Y des bobines Apex et Dorsum) et vitesse tangentielle lors des mouvements d'élévation et d'abaissement de la langue, pour les consonnes palatales.
- Descripteurs aérodynamiques (Maximum de Pio, maximas des pics de dérivée positive et négative de la Pio)
- Descripteurs laryngés (OQ et f0, définis pour les consonnes voisées, ainsi que OQ_reprise, défini pour l'ensemble des consonnes à l'instant de reprise du voisement post-consonantique).

Un premier tableau d'inter-corrélations est construit pour le mode de production modal et le débit de parole normal sur la base des 14 variables du Tableau 4. Sur la base d'un tel tableau d'inter-corrélations (quel que soit le mode et le débit), nous avons procédé à une sélection des variables qui peuvent jouer le rôle de variable d'entrée (et donc de paramètre de contrôle des caractéristiques du bruit de plosion) dans le modèle fonctionnel : deux variables qui corrèlent très fortement l'un avec l'autre (Rho de Spearman >0.5) seront considérées comme apportant des informations redondantes, et on fera le choix de conserver une seule d'entre elles.
Dans le Tableau 4, un résultat principal est à noter ici : Le maximum de pression intra-orale corrèle fortement avec les deux maxima de la dérivée de la Pio (correspondant aux vitesses d'établissement et de relâchement de la pression dans la cavité occlusale) : réciproquement Rho de Spearman =0.53 et Rho de Spearman =0.79. Parmi les 3 variables, nous sélectionnerons ici le maximum de pression intra-orale.

Le Tableau 4 synthétise les corrélations significatives que l'on relève pour chaque type de production (modal et chuchoté, débit normal et débit rapide). Pour chaque combinaison mode/débit, les variables qui apportent des informations redondantes sont affichées (cf. partie de droite du Tableau 4). On ne les considérera pas, selon le cas, en tant que paramètres

d'entrée du modèle dans l'étude inter-catégorielle et intra-catégorielle des stratégies de contrôle des variables acoustiques caractérisant le bruit de plosion (cf. CHAPITRE 5).

Corrélations élévées				Descripteurs redondants (i.e "éliminés")			
		MODE				MODE	
		modal	chuchoté			modal	chuchoté
Débit	normal	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.54] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.83]	• Vit. Ferm. Lèvres <-> Vit. Ouv. Lèvres [R2 = -0.54] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.6] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.77]	Débit	normal	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-	Vit. Ferm. Lèvres Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-
	rapide	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.58] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.77]	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.59] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.73] • Vit. Elev. Langue <-> Delta_OQ [R2 = -0.57]		rapide	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)- Vit. Abais. Langue

Tableau 4 : Synthèse du processus de sélection d'entrée du modèle fonctionnel global de la production des occlusives (pour les 4 combinaisons mode/débit).

Coefficients de corrélation - qualité modale - débit normal

	Deg. Comp	Vit. Ferm. Lèvres	Vit. Ouv. Lèvres	Maximum(Pio)	Derivée(Pio)+	Derivée(Pio)-	Xapex	Ydorsum	Vit. Elev. Langue	Vit. Ouv. Langue	Delta_OQ	OQ_reprise	Delta_f0	duree_occlusion
Deg. Comp		0.24604648	-0.470257189	-0.201860455	0.019170019	0.219153310	NA	NA	NA	NA	0.08806303	-0.101492848	0.123290936	-0.448331543
Vit. Ferm. Lèvres	0.24604648		-0.487189215	-0.166057679	-0.041051239	0.201467840	NA	NA	NA	NA	0.09136172	0.017015022	-0.075374435	-0.150592066
Vit. Ouv. Lèvres	-0.47025719	-0.48718921		0.161224041	-0.031792272	-0.199583808	NA	NA	NA	NA	-0.05851025	-0.008591285	-0.006946423	0.371910247
Maximum(Pio)	-0.20186045	-0.16605768	0.161224041		0.530884145	-0.788564244	-0.044569178	-0.13489158	0.21932143	0.17148120	-0.01818475	-0.006764342	0.057052577	0.129876503
Derivée(Pio)+	0.01917002	-0.04105124	-0.031792272	0.530884145		-0.287922864	-0.022646049	0.09950394	0.11590305	0.09033189	-0.09058203	-0.009499745	0.007589711	-0.049452443
Derivée(Pio)-	0.21915331	0.20146784	-0.199583808	-0.788564244	-0.287922864		-0.007227617	0.15193851	-0.17312584	-0.17457597	-0.02272501	0.009355461	-0.055253333	-0.144676491
Xapex	NA	NA	NA	-0.044569178	-0.022646049	-0.007227617		0.08358719	-0.06148401	-0.03538162	0.06775263	-0.071095595	-0.141648238	-0.017871206
Ydorsum	NA	NA	NA	-0.134891584	0.099503945	0.151938511	0.083587195		0.19175804	0.14834100	-0.02538903	-0.085206372	-0.022231554	0.101595533
Vit. Elev. Langue	NA	NA	NA	0.219321429	0.115903055	-0.173125841	-0.061484012	0.19175804		0.41734913	-0.02264552	-0.044767403	0.072523330	0.114506549
Vit. Ouv. Langue	NA	NA	NA	0.171481200	0.090331895	-0.174575969	-0.035381625	0.14834100	0.41734913		0.01102840	-0.031374226	0.030768855	0.127340785
Delta_OQ	0.08806303	0.09136172	-0.058510254	-0.018184748	-0.090582032	-0.022725005	0.067752627	-0.02538903	-0.02264552	0.01102840		-0.228914559	-0.163225240	-0.007931640
OQ_reprise	-0.10149285	0.01701502	-0.008591285	-0.006764342	-0.009499745	0.009355461	-0.071095595	-0.08520637	-0.04476740	-0.03137423	-0.22891456		0.072058207	0.006636566
Delta_f0	0.12329094	-0.07537443	-0.006946423	0.057052577	0.007589711	-0.055253333	-0.141648238	-0.02223155	0.07252333	0.03076885	-0.16322524	0.072058207		-0.144215350
duree_occlusion	-0.44833154	-0.15059207	0.371910247	0.129876503	-0.049452443	-0.144676491	-0.017871206	0.10159553	0.11450655	0.12734079	-0.00793164	0.006636566	-0.144215350	

Tableau 5 : tableau des coefficients de corrélation entre variables (potentielles variables d'entrée du modèle fonctionnel), pour la qualité de production modale et le débit de parole normal.

4. Variabilité interindividuelle

La dernière section de ce chapitre a pour vocation de décrire et de caractériser la variabilité inter-individuelle de nos données. Les douze sujets dont nous avons enregistré les productions consonantiques, de par leurs anatomies très variables (lèvres, conduit vocal, langue, etc), ont des domaines d'observation des données plus ou moins différents. Les domaines de variation peuvent être très différents d'une variable à une autre, et d'un sujet à un autre. Les 12 sujets

semblent également contrôler les variables acoustiques caractérisant le bruit de plosion différemment les uns des autres. Les résultats ci-dessous ont pour ambition de présenter cette variabilité inter-individuelle.

La Figure 58 présente les formes de langues des sujets 3 et 5 (spline sur les 4 bobines) pour les répétitions syllabiques /ti/ (en rouge) et /gi/ (en bleu). L'instant d'observation de la langue est ici 10 ms avant le relâchement de l'occlusion : on est donc censé être en plein dans la phase d'occlusion. Le sujet 5 réalise des positions de langue qui correspondent bien, selon la littérature, à la production de /t/ (langue assez « plate », apex relevé pour créer l'occlusion au niveau des alvéoles) et à la production de /g/ (langue plutôt « inclinée » dans sa partie antérieurs, dos de la langue haut et en contact avec l'arrière du palais dur). En revanche, les positions de langue du sujet 3 pour les productions apicales ne ressemblent pas à ce que l'on observe chez le sujet 5 : le sujet 3 co-articule beaucoup. Lorsque l'on remonte dans le temps, échantillon par échantillon, on voit que la langue a une configuration plus proche du /t/ au début de l'occlusion pour ce sujet-ci. Au cours de l'occlusion, rapidement, le sujet co-articule pour préparer la production du /i/ : la langue est très tôt en position vocalique /i/ au cours même de l'occlusion.

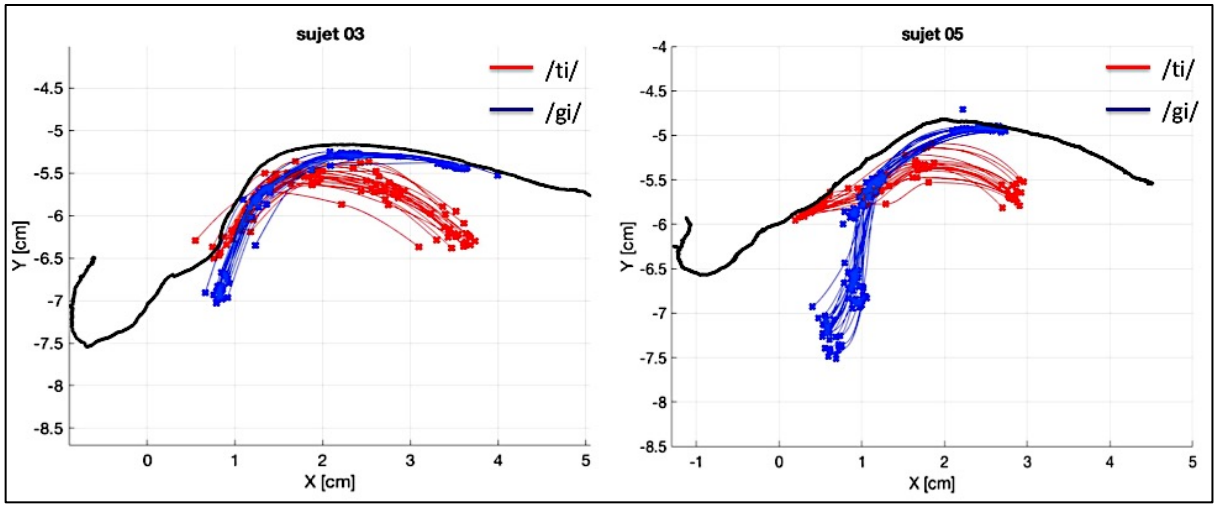


Figure 58 : formes de langue 10 ms avant le début du bruit de plosion, pour les sujets 03 (à gauche) et 05 (à droite), pour les répétitions d'occlusion d'un /ti/ (tracés en rouge) et pour celles d'un /gi/ (en bleu)

Pour illustrer la variabilité individuelle au niveau du contrôle lingual, la présente les relations qui lient Xapex et Yapex, ainsi que Xdorsum et Ydorsum, pour les sujets 1, 3, 4, 5, 6 et 7. Comme expliqué dans le CHAPITRE 3, les descripteurs de l'articulation linguale sont les coordonnées des bobines Apex et Dorsum de la langue extraites à l'instant où le sujet co-articule le moins, c'est-à-dire l'instant où l'Apex est le plus avant pour les apicales, et celui où le dos de la langue est le plus haut pour les vélaires. On note deux résultats principaux sur la Figure 59:

- Certains sujets élèvent l'apex (Yapex ↑) lorsqu'ils avancent la langue (Xapex ↓), c'est le cas du sujet 3 par exemple, alors que les autres abaissent l'apex (Yapex ↓).
- Certains sujets abaissent le dos (Ydorsum ↓) lorsqu'ils reculent la langue (Xdorsum ↑), c'est le cas des sujets 5 et 6 par exemple, alors que les autres élèvent (plus ou moins) le dos de la langue (Ydorsum ↑).

Ces différences inter-individuelles sont potentiellement liées aux variations dans la forme des palais des sujets, et dans l'anatomie linguale, ainsi qu'aux phénomènes de co-articulation qui affectent le lieu d'articulation de manière plus ou moins marquée selon les sujets)..

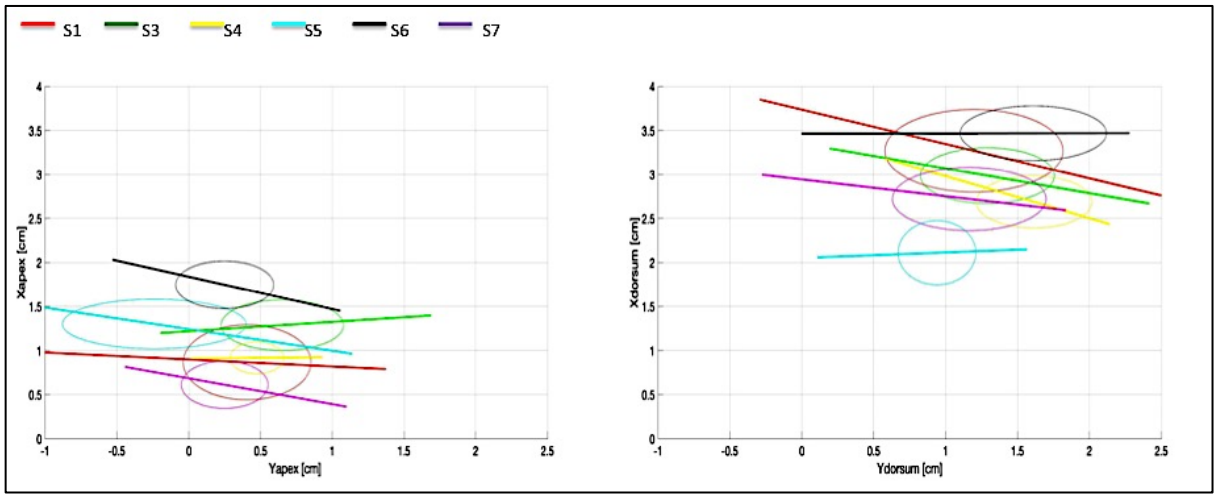


Figure 59 : relations entre Xapex et Yapex (à gauche), et entre Xdorsum et Ydorsum (à droite), pour les sujets S1, S3, S4, S5, S6 et S7 (les ellipses représentent les moyennes et écart-type des nuages de points, les droites représententune approximation linéaire (régression) de ces relations.)

La Figure 60 a un objectif double : 1- présenter, pour un échantillon de sujets, les domaines de variation intra-individuels d'un certain nombre de variables caractérisant le bruit de plosion et de potentielles variables de contrôle de ces caractéristiques (Iburst, durée du bruit de plosion, maximum(Pio), degré de compression labial, vitesse d'ouverture des lèvres et vitesse d'abaissement de la langue, et durée d'occlusion) ; et 2- montrer que la variabilité inter-individuelle influence également fortement les relations entre ces deux types de variables (i.e. pentes de régression linéaire sur les graphes).
Sur la figure, les ordonnées des graphes de la colonne de gauche représentent l'Intensité du bruit de plosion [dB], tandis que les ordonnées des graphes de la colonne de droite la Durée du bruit de plosion [s]. Les abscisses, par ligne, et dans l'ordre de haut en bas, représentent les variables Max (Pio) [hPa], degré de compression labial [cm], vitesse d'ouverture des lèvres [cm/s], durée d'occlusion [s], et vitesse tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue [cm/s]. Chaque couleur concerne un sujet différent. Par couleur (donc par sujet), il y a une ellipse et une droite de régression linéaire : L'ellipse représente le domaine d'observation (moyenne et écart-type) des deux variables mis en relation, et la droite représente la nature de la relation liant les deux variables.
On peut synthétiser ces résultats assez simplement :

- Les domaines de variation des données dépendent fortement du sujet : il n'y a aucun graphe sur lequel deux ellipses de couleurs différentes se superposent. Et aucune ellipse n'est complètement incluse dans une autre.
- Pour un même couple de variables (donc pour 1 graphe donné), les pentes de régression linéaire sont très variables d'un sujet à un autre. Si on prend l'exemple du premier graphe, représentant la relation entre l'Intensité du bruit de plosion et la variable aérodynamique max (Pio) : la pente du sujet 1 (en rouge) est positive, mais proche de 0. La pente du sujet 2 (en bleu) est positive, mais forte. La pente du sujet 5 (en cyan) est négative et relativement forte.

Le résultat principal de cette section n'est pas nouveau : il est bien connu qu'il y a une grande variabilité inter-individuelle dans les données physiologiques et acoustiques de la parole, et dans les stratégies de contrôle. L'objectif de la section ci-contre est de montrer que dans une base de données aussi complète que celle que nous avons acquise au cours de mes travaux de thèse la variabilité inter-individuelle est à prendre en compte dans toute analyse, qualitative ou statistique, dont le but serait d'inférer une compréhension fonctionnelle générale des processus de contrôle de la production des consonnes occlusives.

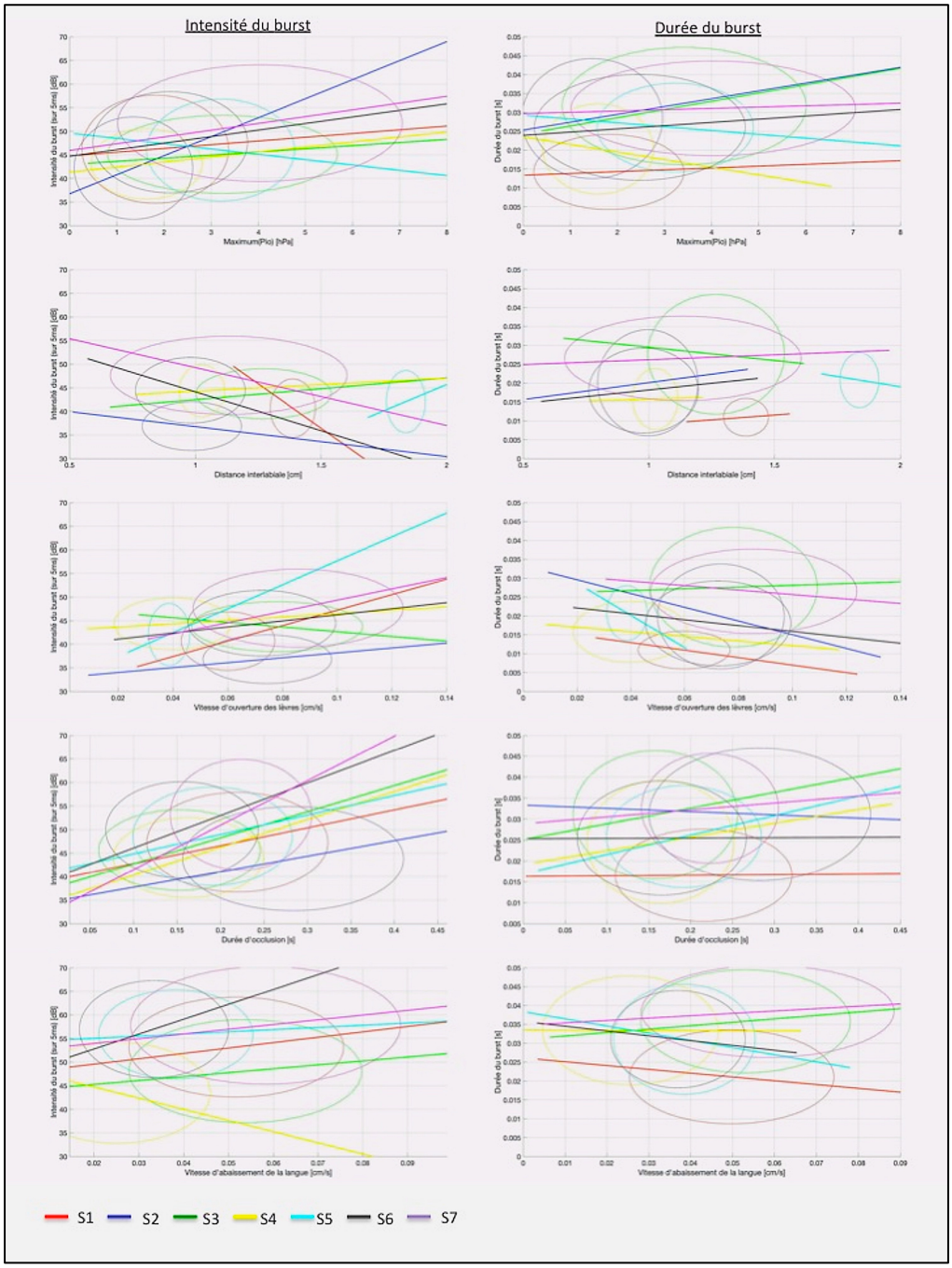


Figure 60 : relations, pour les sujets 1 à 7, entre les deux indices acoustiques caractérisant le bruit de plosion, Iburst (colonne de gauche) et Durée du bruit de plosion (colonne de droite) et les 5 variables Max (Pio), distance interlabiale, Vit. d'ouverture des lèvres, Vit. Tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue et durée d'occlusion. Une ligne par variable. Les ellipses représentent les moyennes et écart-type des nuages de points, les droites représentent les approximations linéaires de ces relations.

5. Bilan

Le bilan de cette partie descriptive de l'analyse des données est crucial pour la suite de l'analyse, et la création d'un modèle fonctionnel. Il comporte plusieurs points

1) L'observation inter-catégorielle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion permet de sélectionner 5 variables pertinentes : l'intensité du bruit de plosion sur les 5 premières millisecondes du bruit, le centre de gravité spectral du bruit de plosion sur les 5 premières millisecondes du bruit, le skewness et le kurtosis également sur les 5 premières millisecondes du bruit, ainsi que la durée du bruit de plosion. Ces 5 variables discriminent correctement l'ensemble des lieux d'articulation consonantique.

2) L'observation des effets du mode et du débit sur les relations entre les variables mesurées nous amène à dissocier ces conditions, et à les traiter séparément, dans le reste de l'analyse : il y aura donc une analyse fonctionnelle pour chaque combinaison débit/mode. En revanche, nous travaillerons à étendre la modélisation fonctionnelle élaborée pour la qualité modale à débit normal à la qualité de production chuchotée et au débit rapide, tout en mettant en évidence les particularités liées à chaque condition.

3) La variable effort étend le domaine d'observation des données, mais n'influence pas significativement les relations entre les variables articulatoires, laryngées et aérodynamiques et les caractéristiques acoustiques du bruit. Nous ne l'inclurons pas en tant que facteur explicatif catégoriel dans la suite de l'analyse (i.e toutes les données sont regroupées sans référence à l'effort).

4) La forte variabilité inter-individuelle nous amène naturellement à proposer dans la 1ère partie du CHAPITRE 5, sur la base de l'observation des comportements individuels, des regroupements entre sujets, en veillant à ce qu'ils soient plus homogènes possible en termes de relations entre les variables articulatoires, laryngées et aérodynamiques et les caractéristiques acoustiques du bruit de plosion.

CHAPITRE 5

Covariation des descripteurs acoustiques et physiologiques de la production des consonnes occlusives

1. Classification des stratégies inter-individuelles

2. Modélisation fonctionnelle du contrôle de la production des occlusives

3. Bilan et ouverture à l'interprétation des relations entre les paramètres d'entrée du modèle et les caractéristiques du bruit de plosion

1. Classification des stratégies inter-individuelles

L'observation, dans le précédent chapitre, de comportements individuels très différenciés, nous amènent à ne pas considérer dans la suite de l'étude statistique le sujet comme un simple facteur aléatoire Nous nous proposons de réaliser des regroupements de sujets, homogènes en termes de stratégies de contrôle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion. Nous utiliserons la technique de Classification Ascendante Hiérarchique (algorithme CAH, présenté dans le chapitre 3 de ce manuscrit). La première partie de ce chapitre a pour vocation de présenter les différents regroupements de sujets (variables selon la caractéristique acoustique du bruit de plosion, le mode de production et le débit de parole considérés). Ensuite, la deuxième partie exploitera pour chaque cas les regroupements réalisés afin de généraliser des relations fonctionnelles de contrôle de la production des occlusives.

1.1. Distinction de groupes d'individus par Classification Ascendante Hiérarchique

Pour chaque situation (combinaison débit/mode), on a un jeu de N variables articulatoires, laryngées et aérodynamiques dont l'analyse ci-dessus a permis de montrer qu'ils ne sont pas redondants (cf. partie A, section 4). Quelle que soit la situation, il y a toujours 5 variables acoustiques caractérisant le bruit de plosion, dont on souhaite étudier la dépendance vis-à-vis des variables aérodynamiques, laryngées et articulatoires que nous avons retenues (cf. partie A, sections 1 et 6). Dans ce contexte, nous qualifierons désormais les variables acoustiques du bruit de plosion de « variables de sortie » (du modèle fonctionnel à venir) et les variables articulatoires, laryngées et aérodynamiques de « paramètres d'entrée » (du modèle fonctionnel à venir). On considère que la nature de la relation liant un couple [paramètre d'entrée, variable de sortie] peut être fortement impactée par la consonne pour lequel on l'étudie. Il y a sept consonnes distinctes dans notre base de données : /p/, /b/, /t/, /d/, /k/, /g/ et le segment de « sons intermédiaires ».

Ainsi, dans une situation donnée (combinaison débit/mode) et pour une variable de sortie donnée, nous pouvons extraire (N*7)*12 coefficients Rhos de Spearman, caractérisant les relations entre les paramètres d'entrée (N) et la variable de sortie, pour chaque sujet (12 sujets) et pour chaque consonne (7).
Les coefficients de corrélation (Rho de Spearman) ainsi calculés sont rassemblés dans des tableaux de 12 lignes (pour chaque sujet) et de N*7 colonnes, qui permettent à l'aide de l'algorithme de Classification Ascendante Hiérarchique de regrouper les sujets. Chaque regroupement de sujet est homogène en termes de lien entre les paramètres d'entrée et la variable de sortie.

La section 2 de cette partie détaille les résultats de notre analyse de type CAH dans le cas des productions modales et d'un débit de parole normal. La section 3 synthétisera l'ensemble des regroupements de sujets pour les autres conditions de parole.

1.2. Parole modale et débit normal

En parole modale et en débit normal, les paramètres d'entrée sont les 12 suivants (cf. Tableau 5 du CHAPITRE 4) :
- Max (Pio) pour les variables aérodynamiques. Cette variable n'est pas définie pour les consonnes vélaires (cf. section 1 du CHAPITRE 4).
- Vitesses d'ouverture, de fermeture des lèvres et degré de compression labial pour les variables articulatoires mesurées sur la trajectoire des lèvres. Ces variables ne sont pas définies pour les consonnes palatales.
- Xapex, Ydorsum, vitesses tangentielles des mouvements d'élévation et d'abaissement de la langue, pour les variables articulatoires mesurées sur les mouvements de la langue. Ces variables ne sont pas définies pour les consonnes labiales.
- ΔOQ, Δf0 et OQ_reprise pour les variables laryngées. Les deux variables ΔOQ et Δf0 ne sont pas définies pour les consonnes sourdes.
- Durée d'occlusion, en tant que variable temporelle mesurée sur le mouvement d'occlusion consonantique.

Dans chaque tableau présentant les coefficients Rhos de Spearman (5 tableaux, car 5 variables de sorties), lorsqu'un paramètre d'entrée n'est pas défini pour une consonne on élimine la colonne correspondante.
Les 5 tableaux des coefficients Rhos de Spearman pour le cas des productions modales et du débit de parole normale sont composés de 12 lignes (12 sujets).

1.2.1. Regroupement des sujets selon les relations liant les paramètres d'entrée et l'indice acoustique Intensité du bruit de plosion sur les 5 premières ms du bruit

Sur la Figure 61, on peut voir le dendogramme présentant les regroupements successifs des sujets selon les relations liant l'indice intensité du bruit de plosion aux paramètres d'entrée. Le passage de 3 groupes à 2 groupes induit une perte d'homogénéité trop importante (« saut » important entre deux barres de l'histogramme du gain d'inertie, en haut à droite de la figure, cf. CHAPITRE 3 pour plus de détails). On décidera donc de rester à 3 groupes.
Le regroupement met en lumière, par exemple, le caractère similaire des sujets S4, S6 et S10 en termes de relations entre les paramètres d'entrée et l'indice intensité du bruit de plosion : ces 3 sujets se différencient des autres par au moins une différence significative dans les relations entre les paramètres d'entrée et l'intensité du bruit de plosion.
Pour l'indice intensité du bruit de plosion (sur 5ms), on pourra considérer trois groupes de sujets. La variable conditionnelle groupe est introduite. Elle prend 3 niveaux : G1, pour groupe 1, à G3, pour groupe 3.
- Le groupe G1_I_bruit de plosion est composé des sujets 4, 6 et 10.
- Le groupe G2_I_bruit de plosion est composé des sujets 7 et 12.
- Le groupe G3_I_bruit de plosion est composé des sujets 1, 2, 3, 5, 8, 9, 11 (majorité des sujets).

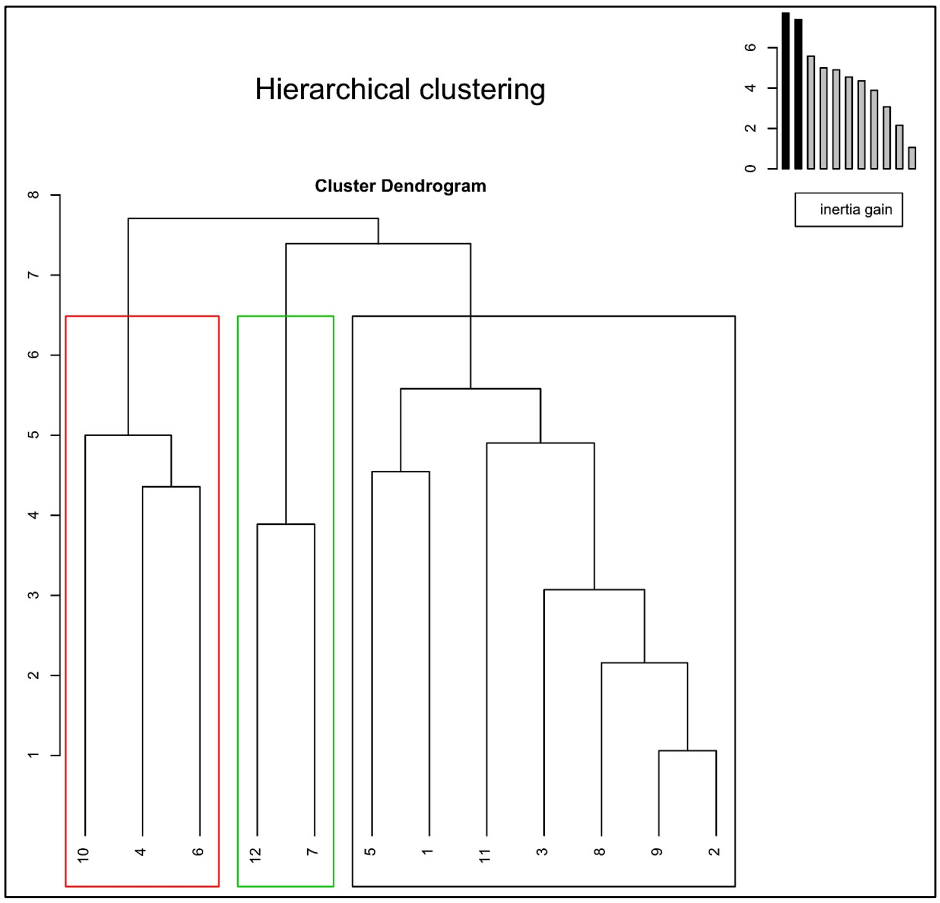


Figure 61: Dendogramme, issu de l'algorithme CAH, présentant les regroupements de sujets pour les relations entre les paramètres d'entrée et l'intensité du bruit de plosion (5ms). L'histogramme du gain d'inertie (en haut à droite) permet de sélectionner la rupture d'homogénéité au sein de chacun des regroupements et donc de stopper le processus de regroupements successifs.

1.2.2. Regroupements de sujets selon les relations entre les paramètres d'entrée et les variables de sortie.

De la même manière que précédemment, on réalise des regroupements de sujets homogènes en termes de relations entre les paramètres d'entrée et les autres variables de sortie. Les dendogrammes correspondants sont visibles sur la Figure 62. Les regroupements sont synthétisés dans le Tableau 6 (par exemple, pour le contrôle de la variable CDG, on voit que seulement deux regroupements sont possibles : les sujets 3 et 7 composent le 1er groupe, et tous les autres sujets appartiennent au groupe 2) :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Intensité Burst	3	3	3	1	3	1	2	3	3	1	3	2
CDG	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
Skewness	1	6	3	6	5	2	3	4	4	5	5	4
Kurtosis	3	4	1	1	2	1	1	4	1	1	4	4
Durée Burst	3	3	2	2	3	3	3	1	3	3	3	2

Tableau 6 : Synthèse des regroupements de sujets pour le contrôle des 5 indices acoustiques (Iburst, CDG, Skewness, Kurtosis, et Durée$_{Burst}$Les chiffres du tableau correspondent au numéro du groupe auquel chaque sujet (1ère ligne) est affecté pour chacune des variables de sortie (1ère colonne). Parole modale, débit normal.

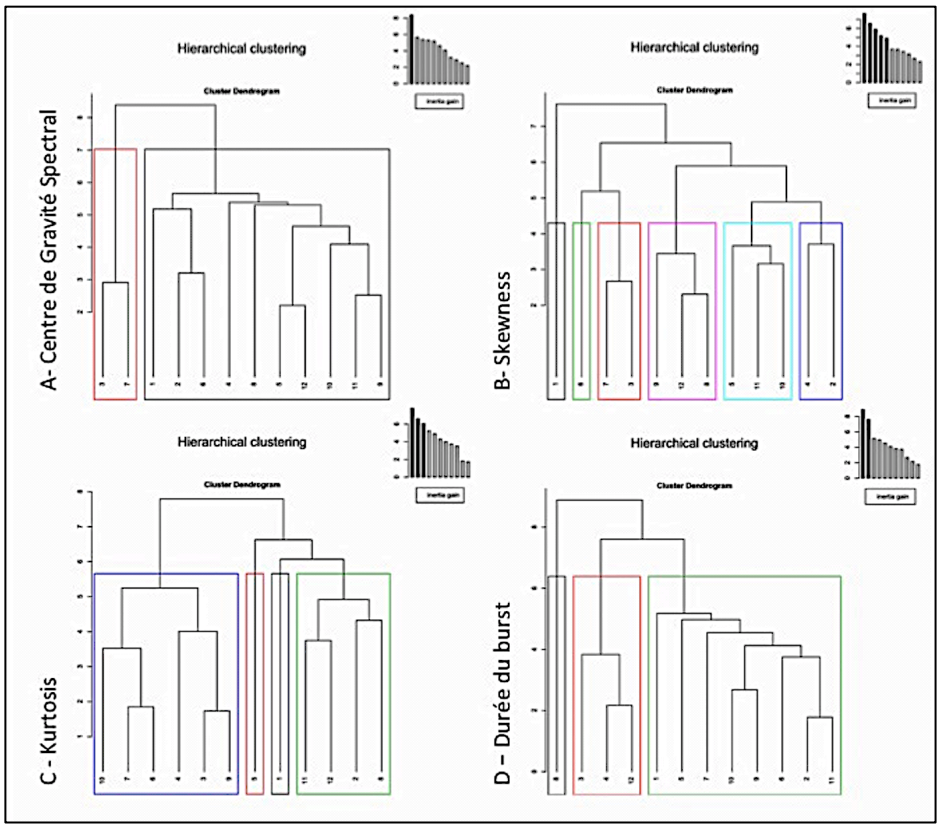


Figure 62 : Dendogrammes présentant les regroupements de sujet pour les relations contrôlant A- le centre de gravité spectral (5ms), B – le skewness (5ms), C- le kurtosis (5ms), et D- la durée du bruit de plosion. Les histogrammes des gains d'inertie (en haut à droite de chaque dendogramme) permettent de sélectionner les ruptures d'homogénéité des regroupements successifs.

Bien que la variabilité inter-individuelle des relations entre les paramètres d'entrée et les indices acoustiques soit toujours grande (cf. section 5 du CHAPITRE 4), il est tout de même rassurant d'observer dans le Tableau 4 que plusieurs regroupements sont transversaux, d'une variable contrôlée à une autre :
Les sujets S1, S2, S5, S9 et S11 sont regroupés pour les variables de sortie Iburst, CDG et durée du bruit de plosion, mais :

- Pour le Skewness, seuls les sujets S5 et S11 appartiennent encore au même groupe.
- Pour le Kurtosis, seuls les sujets S2 et S11 appartiennent encore au même groupe.
- Les sujets S4, S6 et S10 sont regroupés pour les variables de sortie Iburst, du CDG et du Kurtosis, mais :
    - Pour la durée du bruit de plosion, seuls les sujets S6 et S10 appartiennent encore au même groupe.
    - Les sujets S3 et S7 sont regroupés, ainsi que les sujets S8 et S12, pour le CDG, le Skewness et le Kurtosis.
- Les sujets S8 et S12 sont associés avec des sujets chaque fois différents pour chacune des variables de sortie.

Pour la situation de parole modale en débit normal, 5 variables conditionnelles « groupe » ont été introduites à l'issue de cette étape de classification (1 pour chaque variable acoustique de sortie).

1.3. Synthèse des regroupements de sujet pour les toutes les conditions de paroles

Bien que l'on puisse noter pour une même variable acoustique que certains groupements de sujets sont similaires entre conditions (en qualité modale pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion : S6<->S10 autant pour le débit rapide que pour le débit normal ; en qualité chuchotée pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion : S1<->S7<->S9 autant pour le débit rapide que pour le débit classique ; etc), il est difficile – voire impossible - de généraliser un groupement quelconque à l'ensemble des stratégies de contrôle des indices acoustiques et à l'ensemble des conditions de production de parole.

			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
MODAL	Débit normal	Intensité Burst	3	3	3	1	3	1	2	3	3	1	3	2
		CDG	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
		Skewness	1	6	3	6	5	2	3	4	4	5	5	4
		Kurtosis	3	4	1	1	2	1	1	4	1	1	4	4
		Durée Burst	3	3	2	2	3	3	3	1	3	3	3	2
	Débit rapide	Intensité Burst	2	1	1	2	3	1	2	3	4	1	1	4
		CDG	2	4	1	2	2	2	2	4	4	3	2	1
		Skewness	1	1	3	1	4	2	4	1	3	4	2	2
		Kurtosis	3	3	4	4	3	3	4	1	2	4	2	2
		Durée Burst	4	4	3	4	4	2	2	2	4	4	4	1
CHUCHOTÉ	Débit normal	Intensité Burst	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2
		CDG	4	4	1	4	4	1	1	2	1	4	1	3
		Skewness	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	4	5
		Kurtosis	3	3	2	2	3	2	1	1	3	1	3	1
		Durée Burst	1	1	1	1	1	1	2	3	2	1	2	4
	Débit rapide	Intensité Burst	2	1	3	5	1	1	2	4	2	3	1	4
		CDG	2	1	1	4	2	3	1	3	5	1	1	1
		Skewness	2	1	1	4	3	3	1	1	1	2	1	1
		Kurtosis	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
		Durée Burst	1	6	3	4	6	5	5	2	6	4	6	5

Tableau 7: tableau récapitulatif des regroupements de sujets, par variables de sortie (acoustique) et par configuration de production de parole (combinaison débit/mode). Deux sujets qui se comportent de la même manière pour contrôler un indice dans une condition de parole donnée peuvent, au contraire, ne pas du tout se comporter de la même manière pour contrôler le même indice mais dans une autre condition de production de parole.

Ces résultats de regroupement de sujets permettent d'introduire dans la suite une variable conditionnelle groupe pour l'étude du contrôle de chaque indice acoustique (et ce pour chaque condition). L'effet très fort du sujet est ainsi pris en compte pour la suite de la modélisation fonctionnelle des relations de contrôle des indices acoustiques.

1.4. Bilan

L'étape de classification des sujets, présentée dans cette première partie et basée sur l'utilisation de l'algorithme CAH (cf. CHAPITRE 3), permet à l'aide des coefficients Rho de Spearman caractérisant les relations entre chaque variable de sortie et chaque paramètre d'entrée de proposer un regroupement de sujets, par variable de sortie et par condition de production de parole (débit/mode).

2. Modélisation fonctionnelle du contrôle des bruits de plosion

Cette partie des résultats de ma thèse a pour vocation de décrire et de formaliser des relations fonctionnelles, décrivant les mécanismes de contrôle (aérodynamique, laryngé, articulatoire) des indices acoustiques caractérisant le bruit de plosion des consonnes occlusives du français. Fort des résultats présentés ci-dessus dans le reste du chapitre, dans la suite nous réaliserons une synthèse fonctionnelle par condition de parole (combinaison qualité de production / débit de parole).

Cette analyse repose sur l'étape finale de la méthodologie statistique présentée dans le CHAPITRE 3 mettant en pratique l'algorithme de partitionnement récursif. On trouvera en ANNEXE (ANNEXES 1 à 4) l'ensemble des tableaux de résultats issus de ces partitionnements et sur lesquels s'appuie cette partie C.
Dans l'ANNEXE 1, on trouvera également un exemple type de lecture d'une partition récursive quelconque, sur laquelle se base l'ensemble des résultats décris dans cette 2ème partie. Il est donc très important de lire le paragraphe 1 de l'ANNEXE 1 afin de comprendre la démarche globale d'analyse statistique.

Dans l'analyse, et dans l'optique d'observer des tendances générales de contrôle, nous avons considéré qu'une relation est « pertinente » lorsque la relation en question est significativement non nulle (utilisation d'un seuil, basé sur l'observation des nuages de points qui décrivent les liens entre paramètres et variables du modèle : $|pentes| > 0.1$) et de même signe quelque soit la variable conditionnelle et le groupe de sujet. On dira également que le paramètre dont il est question « contrôle significativement » l'indice acoustique (i.e. variable de sortie du modèle). Le mot « contrôle » ici est un peu inexact, car le contrôle réel est certainement beaucoup plus complexe et multiparamétrique. Nous l'employons ici pour souligner qu'une variable varie de manière significative lorsque le niveau d'un paramètre est augmenté ou diminué.
Le seuil subjectif est imposé aux pentes des relations dans le souhait de distinguer les relations effectives des bruits (liés à la variabilité des données).

2.1. Contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion, en parole modale et débit normal

L'ANNEXE 1 énumère et présente les tableaux de relations significatives traduisant le lien entre les variables d'entrée du modèle et les caractéristiques du bruit de plosion, qui sont synthétisées ci-dessous.

2.1.1. Contrôle de l'intensité du bruit de plosion

2.1.1.1. Pertinence des paramètres de contrôle

La première question que l'on se pose est : quels sont les paramètres qui « contrôlent » significativement l'intensité du bruit de plosion ?
Les 6 paramètres suivants montrent une corrélation forte, et avec une relation systématiquement du même signe (i.e. quel que soit le groupe de sujet). Ils semblent pertinents.

- quel que soit le lieu d'articulation :
  - Le maximum de pression intra-orale
  - La durée d'occlusion
- pour les consonnes labiales :
  - Le degré de compression labiale
  - Les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres
- pour les consonnes palatales :
  - La vitesse tangentielle du mouvement d'élévation de la langue (pré-occlusion)

Les paramètres laryngés (ΔOQ et Δf0, définis pour les consonnes voisées), ainsi que les paramètres linguaux position de l'apex et du dos de langue, et vitesse tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue (post-occlusion) ne montrent pas de forte corrélation et/ou montrent une relation de signe variable selon les conditions et les groupes de sujets. De là, ils ne semblent pas pertinents dans le contrôle de l'intensité du bruit de plosion (non discutés dans les paragraphes 2.1.1.2 et 2.1.1.3 ci-dessous).

La pertinence des relations liant pression intra-orale et vitesse d'ouverture des lèvres à l'intensité du bruit de plosion est conforme aux connaissances générales sur le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion (cf. CHAPITRE 1).
De plus, dans nos résultats, il s'avère que la durée d'occlusion, le degré de compression et la vitesse de fermeture des lèvres (pour les labiales), sont également pertinents pour la variation de l'intensité du bruit de plosion. Cette influence peut être indirectement liée à l'effet significatif de la pression intra-orale et de la vitesse d'ouverture des lèvres. On pourra discuter cette hypothèse dans la discussion (CHAPITRE 7).
Pour les consonnes linguales, on observe une forte corrélation de l'intensité acoustique du bruit de plosion avec la vitesse d'élévation de la langue, mais pas systématiquement avec la vitesse d'abaissement (i.e. vitesse de relâchement de la langue après l'occlusion). Ce résultat, plus surprenant que ceux présentés ci-dessus, sera discuté dans le CHAPITRE 7.

2.1.1.2. Influence du voisement, de la place d'articulation et du contexte vocalique sur les relations observées

On étudie l'influence des variables conditionnelles sur les relations au niveau de la variabilité des pentes desdites relations (sans remise en cause de la tendance).
De manière générale, lorsque certaines relations sont influencées par une variable conditionnelle donnée, je ne mentionnerais que les cas où l'influence est systématique. Dans l'autre cas, aucune stratégie spécifiques ne sera étudiée en détails dans ces travaux de thèse.

Influence du contexte vocalique
Les relations entre les paramètres suivants et l'intensité du bruit de plosion ne sont pas (ou très peu) influencées par le contexte vocalique :
- Les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres (pour les consonnes labiales)
- Le degré de compression des lèvres (pour les consonnes labiales)
- La durée d'occlusion

-

Les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et l'intensité du bruit de plosion sont influencées systématiquement (ou de manière très reproductible) par le contexte vocalique (pour les consonnes linguales) : la corrélation Vit.Elev.Langue<->Iburst est en moyenne plus élevée pour les contextes /i/ que pour les contextes /a/ ($p<0.001$).

Les relations entre le maximum de pression intra-orale et l'intensité du bruit de plosion sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les autres conditions et groupes de sujets.

Influence du lieu d'articulation (pour les paramètres communs aux consonnes labiales et linguales)

Les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et l'intensité du bruit de plosion ne sont pas influencées par le lieu d'articulation.

Les relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion sont influencées de manière systématique (i.e. influence très reproductible) par le lieu d'articulation de la consonne ($p<0.001$) : les corrélations sont plus élevées pour les consonnes labiales et vélaires que pour les consonnes apicales.

De la même manière que ci-dessus pour l'influence du contexte vocalique, les relations entre le maximum de pression intra-orale et l'intensité du bruit de plosion sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les autres conditions et groupes de sujets.

Influence du voisement

Le voisement n'a pas (ou très peu) d'influence significative sur les relations liant les 6 paramètres pertinents pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion.

Bilan de l'effet des facteurs expérimentaux sur les relations

L'absence d'effet du voisement sur l'ensemble des relations de contrôle de l'intensité acoustique du bruit de plosion n'est pas surprenante (les ordres de grandeurs de l'intensité et des paramètres d'entrées sont différents selon le voisement, mais pas les stratégies de variation de l'intensité). Tout comme l'est également l'absence d'effet du lieu d'articulation (pour les linguales) et du contexte vocalique sur les relations entre paramètres cinématiques de vitesse des articulateurs et intensité du bruit de plosion (Kuhn 1975).

En revanche, les effets du contexte vocalique sur les relations de contrôle de l'intensité par la vitesse d'élévation de la langue et du lieu d'articulation sur les relations de contrôle de l'intensité par la durée d'occlusion ne sont pas attendus. Ces différents effets, tout comme ceux, variables, du contexte vocalique et du lieu d'articulation sur les relations entre pression intra-orale et intensité du bruit de plosion, seront discutés dans le CHAPITRE 7, à la lumière de nos hypothèses sur le contrôle lingual et labial de la production des occlusives.

2.1.1.3. Stratégies globales et variabilité inter-individuelle

Pour le contrôle des labiales

Labiales	G1	G2	G3
Pression intra-orale	+++	+	++
Durée d'occlusion	++	++	+
Degré de compression labiale	+++	++	+
Vitesse de fermeture labiale	++	+++	+
Vitesse d'ouverture labiale	+++	+++	+

Tableau 8 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst).

On observe dans le Tableau 8 une importante différence entre les groupes G3 et G1-G2 : pour un même niveau de recrutement des paramètres d'entrée (i.e. intervention similaire des paramètres de contrôle), le groupe G3 (environ la moitié des sujets) semble atteindre un moindre résultat acoustique que les groupes G1 et G2 (environ la moitié des sujets). Ce résultat fait penser que le groupe G3 présente plus de « sensibilité » que les groupes G1 et G2 pour le contrôle articulatoire et aérodynamique de l'intensité du bruit de plosion.
De plus, on observe différentes stratégies entre les 3 groupes :
- G1 joue sur tous les paramètres (Pio, degré de compression, vitesses articulatoires).
- G2 joue moins sur la Pio mais plus sur les vitesses articulatoires.
- G3 joue principalement sur la Pio et peu sur les autres paramètres.

Pour le contrôle des apicales et des vélaires

Apicales	G1	G2	G3
Pression intra-orale	++	++	++
Durée d'occlusion	++	++	+
Vitesse d'élévation langue	+++	+	+

Vélaires	G1	G2	G3
Pression intra-orale			
Durée d'occlusion	++	++	+
Vitesse d'élévation langue	+++	+	+

Tableau 9 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour contrôler la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst).

Sur le Tableau 9, on observe différentes stratégies entre les 3 groupes :
- G1 joue sur tous les paramètres (Pio, durée d'occlusion, vitesse articulatoire).
- G2 joue sur la Pio et la durée d'occlusion mais peu sur la vitesse articulatoire.
- G3 joue principalement sur la Pio et moins sur les autres paramètres.

2.1.2. Contrôle du centre de gravité spectral du bruit de plosion (CDG)

Aucun paramètre de contrôle ne montre une corrélation forte et/ou une relation systématiquement de même signe avec le centre de gravité spectral du bruit de plosion pour l'ensemble des conditions expérimentales et l'ensemble des groupes de sujets : aucun paramètre ne semble « contrôler » de manière pertinente le centre de gravité spectral du bruit de plosion.
Il peut être surprenant de ne pas trouver d'influence pertinente des paramètres d'articulation linguale sur le centre de gravité spectral du bruit de plosion. Le contrôle du CDG, théoriquement lié de manière forte au contrôle du moment spectral d'ordre 3 (Skewness), sera discuté avec attention dans le CHAPITRE 7.

2.1.3. Contrôle du Skewness du spectre du bruit de plosion

2.1.3.1. Pour les consonnes labiales

Aucun paramètre ne montre une corrélation forte et/ou une relation systématiquement de même signe avec le Skewness pour l'ensemble des conditions expérimentales et l'ensemble

des groupes de sujets. De là, dans le cas des consonnes labiales, aucun paramètre ne semble pertinent pour expliquer les variations du Skewness du spectre du bruit de plosion.

2.1.3.2. Pour les consonnes linguales

La position de l'apex de la langue (coordonnée Xapex) montre une forte corrélation, systématiquement de même signe, avec le Skewness du bruit de plosion. Cette relation de contrôle n'est ni influencée par les conditions expérimentales ni par le groupe de sujets. Comme on peut le constater sur les tableaux de résultats de l'ANNEXE 1.3, de manière systématique reculer la langue d'un millimètre au moment de l'occlusion entraine une augmentation du Skewness du bruit de plosion d'environ 0.05 (moyenne du Skewness : 0.6 et écart-type : 0.8).

L'absence de relation de contrôle pertinente du Skewness pour les consonnes labiales est conforme aux connaissances sur les descripteurs spectraux du bruit de plosion. De la même manière, il est conforme aux connaissances générales sur la relation forte entre la position de l'apex de la langue et le Skewness pour les consonnes linguales : plus la langue est antérieure et plus le Skewness est faible, donc le spectre est aigu (référence).

2.1.4. Contrôle du Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Les résultats de l'analyse des paramètres pertinents pour le contrôle du Kurtosis du spectre du bruit de plosion sont similaires à ceux que nous avons décrits ci-dessus pour le contrôle du Skewness.

2.1.4.1. Pour les consonnes labiales

Aucun paramètre ne montre une corrélation forte et/ou une relation systématiquement de même signe avec le Kurtosis pour l'ensemble des conditions expérimentales et l'ensemble des groupes de sujets. Dans le cas des labiales, aucun paramètre ne semble pertinent pour expliquer les variations du Kurtosis.

2.1.4.2. Pour les consonnes linguales

La vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) montre une forte corrélation, systématiquement de même signe (-), avec le Kurtosis du bruit de plosion.

Les relations entre la vitesse linguale et le Kurtosis sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les groupes de sujets :
- Pour les groupes de sujets 1 et 2 (i.e. moitié des sujets), il n'y a pas d'effet du contexte vocalique sur les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Kurtosis du bruit de plosion.
- Pour les groupes de sujets 3 et 4 (i.e. moitié des sujets), il y a un effet systématique du contexte vocalique sur les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Kurtosis du bruit de plosion : pentes/a/ < pentes/i/.

Il n'y a pas d'influence du lieu d'articulation et du voisement sur ces relations pertinentes de contrôle entre la vitesse d'élévation de langue et le Kurtosis du bruit de plosion.

2.1.5. Contrôle de la durée du bruit de plosion

2.1.5.1. Pertinence des paramètres de contrôle

Les trois paramètres suivants montrent une corrélation forte et une relation systématiquement négative avec l'indice acoustique temporel de durée du bruit de plosion. Ils semblent donc pertinents pour le contrôle de la durée du bruit de plosion.
- Quel que soit le lieu d'articulation : Durée d'occlusion (relation négative)
- Pour les labiales : Vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres (relation négative)

Les paramètres qui ne montrent pas de forte corrélation et/ou une relation de signe variable selon les conditions et groupes de sujets ne semblent pas pertinents, et ils ne seront pas discutés dans les paragraphes suivants 1.5.2 et 1.5.3). Il s'agit des paramètres :
- Pression intra-orale
- Degré de compression labiale (pour les consonnes labiales)
- Position de l'apex et du dos de la langue
- Vitesses d'élévation et d'abaissement de la langue

La pertinence de la vitesse d'ouverture labiale dans le contrôle de la durée du bruit de plosion est conforme aux connaissances sur le contrôle moteur des indices acoustiques du bruit de plosion (référence).
On aurait pu s'attendre également à un effet significatif de la vitesse d'abaissement de la langue et de la position du dos de la langue sur la variation de la durée du bruit de plosion. On mesure dans ce cas précis la position du dos de la langue en Y (et non en X), ce qui ne permet peut-être pas d'observer cet effet.
De manière systématique, augmenter la durée d'occlusion fait diminuer la durée du bruit de plosion. Ce point sera discuté dans le CHAPITRE 7.

2.1.5.2. Influence des facteurs expérimentaux sur les relations observées

Influence du contexte vocalique
Les relations entre les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion ne sont pas (ou très peu) influencées par le contexte vocalique.
Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les autres conditions et groupes de sujets.

Influence du lieu d'articulation
Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion sont influencées par le lieu d'articulation de manière variable selon les autres conditions et groupes de sujets.

Influence du voisement
Les relations entre les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion ne sont pas (ou très peu) influencées par le voisement.
Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion sont influencées par le voisement de manière variable selon les autres conditions et groupes de sujets.

2.1.5.3. Stratégies globales et variabilité inter-individuelle

Pour le contrôle des labiales :

Labiales	G1	G2	G3
Durée d'occlusion	++	++	++
Vitesse de fermeture labiale	+	+++	+++
Vitesse d'ouverture labiale	+	+++	+++

Tableau 10 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de la durée du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter $Durée_{Bruit\ de\ plosion}$, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter $Durée_{Bruit\ de\ plosion}$).

On observe sur le Tableau 10 seulement deux comportements différents :

- Le groupe G1 (composé d'un seul sujet) joue principalement sur la durée d'occlusion.
- Les groupes G2 et G3 (11 sujets sur 12) jouent principalement sur les vitesses articulatoires.

-

Pour le contrôle des apicales et des vélaires :

Uniquement un paramètre est pertinent, il s'agit de la durée d'occlusion, dont les relations avec la durée du bruit de plosion ne montrent pas de différences significatives entre les trois groupes.

2.2. Influence de l'augmentation du débit de parole sur le contrôle des bruits de plosion

L'ANNEXE 2 présente les tableaux de relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques acoustiques du bruit de plosion qui sont synthétisées ci-dessous pour la qualité de production modale et en débit de parole rapide.

2.2.1. Pertinence des paramètres de contrôle

2.2.1.1. Contrôle de l'intensité du bruit de plosion en parole rapide

Le seul paramètre qui demeure pertinent pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en débit rapide (qualité de parole modale) est la vitesse d'ouverture des lèvres (pour les consonnes labiales) : la relation entre la vitesse et l'intensité du bruit de plosion est systématiquement positive et forte pour l'ensemble des conditions d'expérience et des groupes de sujet.
Les 5 autres paramètres qui étaient pertinents pour le contrôle de l'intensité en débit normal (durée d'occlusion et pression intra-orale pour l'ensemble des lieux d'articulation, vitesse de fermeture des lèvres et degré de compression labiale pour les consonnes labiales, vitesse tangentielle du mouvement d'élévation de la langue pour les consonnes palatales) ne le sont plus en débit rapide : ils ne montrent pas de forte corrélation et/ou montrent une relation de signe variable selon les conditions et les groupes de sujets (on ne les étudiera pas dans les sections 2.2 et 2.3 suivantes).

Il n'est pas surprenant de ne pas conserver la pertinence du degré de compression labiale et de la vitesse de fermeture des lèvres (pour les labiales), la vitesse tangentielle du mouvement d'élévation de la langue (pour les linguales), ainsi que la pression intra-orale, dans le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en débit de parole rapide : le mouvement devient rapide, et d'ailleurs régulièrement « dégradé», ce qui peut entrainer une « détérioration » de la mesure de certains paramètres, comme la pression intra-orale et le degré de compression labiale. Les vitesses de fermeture des lèvres et d'élévation de la langue sont fortement impactées par la vitesse qui rend les mouvements moins amples.

2.2.1.2. Contrôle du centre de gravité spectral du bruit de plosion en parole rapide

Comme dans le cas de la parole à débit normal, il ne semble y avoir aucun paramètre pertinent dans le contrôle du centre de gravité spectral du bruit de plosion.

2.2.1.3. Contrôle du Skewness du spectre du bruit de plosion en parole rapide

Le paramètre de position de l'apex de la langue, pertinent dans le cas de la production des consonnes linguales à débit normal pour le contrôle du Skewness du bruit de plosion, ne semble plus pertinent dans le cas de la parole modale à débit rapide.

2.2.1.4. Contrôle du Kurtosis du spectre du bruit de plosion en parole rapide

Le paramètre de vitesse d'élévation de la langue, pertinent dans le cas de la production des consonnes linguales à débit normal pour le contrôle du Kurtosis du bruit de plosion, ne semble plus pertinent dans le cas de la parole modale à débit rapide.

2.2.1.5. Contrôle de la durée du bruit de plosion en parole rapide

Le paramètre de durée d'occlusion demeure très pertinent pour le contrôle de la durée du bruit de plosion, en parole modale à débit rapide.
Le paramètre vitesse tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue apparaît en débit rapide comme pertinent également pour le contrôle de la durée du bruit de plosion : il montre une relation systématiquement forte et de même signe quelle que soit la condition d'expérience et le groupe de sujet.
Les deux paramètres associés à la vitesse des lèvres, pertinents pour le contrôle de la durée du bruit de plosion pour la production modale à débit normal des consonnes labiales, ne le sont plus en débit rapide (on ne les traitera pas dans les sections 2.2.2 et 2.2.3 ci-dessous).

Les deux premiers résultats ci-dessus sont parlants et conformes à ce que l'on pouvait attendre ici en termes de contrôle (Kessinger et Blumstein 1998).

2.2.2. Effet du voisement, de la place d'articulation et du contexte vocalique

Les relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion sont très peu influencées par le contexte vocalique, et pas du tout par le voisement.

Les relations entre la vitesse tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue (post-occlusion) et la durée du bruit de plosion sont très peu influencées par le contexte vocalique, mais l'est de manière systématique par le voisement : pentes sourdes > pentes voisées ($p < 0.001$).

Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les autres conditions.
Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion ne sont pas (ou très peu) influencées par le lieu d'articulation.
Les relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion sont influencées par le voisement de manière variable selon les autres conditions.

2.2.3. Stratégies globales et individuelles de contrôle des indices acoustiques en débit rapide

Comme dans le cas modal, les comportements des sujets diffèrent en termes de « sensibilité » de contrôle de l'intensité : pour un même niveau de recrutement des paramètres d'entrée (i.e. même vitesse d'ouverture labiale), les sujets des groupes G3 et G4 (4 sujets sur 12) semblent atteindre un moindre résultat acoustique que les sujets des groupes G1 et G2 (majorité des sujets).

Labiales	G1	G2	G3	G4
Vitesse d'ouverture des lèvres	++	++	+	+

Tableau 11 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst).

Il n'y a aucune influence de groupe de sujets sur l'intensité des relations de contrôle liant les paramètres durée d'occlusion et vitesse d'abaissement de la langue (consonnes linguales) à la durée du bruit de plosion.

2.2.4. Bilan global sur le contrôle des indices en parole rapide

L'augmentation du débit de parole entraine une diminution significative du domaine individuel de variation des paramètres de contrôle et des variables acoustiques de sortie. De plus, l'augmentation du débit a un effet très variable, d'un individu à un autre, sur l'ensemble des relations de contrôle des indices acoustiques.
Il est donc cohérent d'observer moins de relations pertinentes décrivant le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en débit rapide qu'en débit normal.

2.3. Influence du chuchotement sur le contrôle des bruits de plosion

Les ANNEXES 3 et 4 énumèrent et présentent les tableaux de relations entre les paramètres d'entrée du modèle et les caractéristiques acoustiques du bruit de plosion sont synthétisées ci-dessous pour la qualité de production chuchotée, respectivement pour le débit de parole normal et rapide.

2.3.1. Contrôle de l'intensité du bruit de plosion en parole chuchotée

2.3.1.1. Pertinence des paramètres de contrôle

Est-ce que les paramètres pertinents pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en qualité de production modale le demeurent en qualité de production chuchotée ?
Les 4 paramètres suivants montrent une corrélation forte, et avec une relation systématiquement du même signe, avec l'intensité du bruit de plosion. Ils semblent pertinents.

- Quel que soit le lieu d'articulation :
    - Le maximum de pression intra-orale (l'intensité des relations, i.e. valeur des pentes, est beaucoup plus forte que pour le cas modal : $relations_{Pio<->I}$(modal) << $relations_{Pio<->I}$(chuchotée).
- Pour les consonnes labiales :
    - Le degré de compression labiale
    - La vitesse d'ouverture des lèvres
- Pour les consonnes palatales :
    - La vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion)

Le paramètre de durée d'occlusion, ainsi que le paramètre labial de vitesse de fermeture des lèvres ne montrent pas de forte corrélation et/ou montrent une relation de signe variable selon les conditions et les groupes de sujets. De là, ils ne semblent pas pertinents dans le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en qualité de parole chuchotée (non discutés dans les paragraphes 2.3.1.2 et 2.3.1.3 ci-dessous).

La pertinence des relations liant pression intra-orale et vitesse d'ouverture des lèvres à l'intensité du bruit de plosion est conforme aux connaissances générales sur le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion (cf. CHAPITRE 1).
De plus, le degré de compression labiale (comme dans le cas modal) est également pertinent pour la variation de l'intensité du bruit de plosion. Cette influence s'explique moins facilement par la physique, mais elle peut être indirectement liée à l'effet significatif de la pression intra-orale et de la vitesse d'ouverture des lèvres.
Pour les consonnes linguales, on observe une forte corrélation de l'intensité acoustique du bruit de plosion avec la vitesse d'élévation de la langue, mais pas systématiquement avec la vitesse d'abaissement (i.e. vitesse de relâchement de la langue après l'occlusion). Ce résultat est plus surprenant que ceux présentés ci-dessus.

2.3.1.2. Influence du voisement, de la place d'articulation et du contexte vocalique sur les relations observées

Influence du contexte vocalique

Les relations entre les paramètres suivants et l'intensité du bruit de plosion ne sont pas (ou très peu) influencées par le contexte vocalique :

- le maximum de pression intra-orale
- la vitesse d'élévation de la langue (pour les linguales)

Les relations entre le degré de compression labiale, la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion sont influencées par le contexte vocalique de manière variable selon les autres conditions et les groupes de sujets.

Influence du lieu d'articulation (pour les paramètres communs aux consonnes labiales et linguales)

Les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et l'intensité du bruit de plosion ne sont pas influencées par le lieu d'articulation.

Les relations entre le maximum de pression intra-orale et l'intensité du bruit de plosion sont influencées de manière systématique (i.e. influence très reproductible et très forte) par le lieu d'articulation de la consonne ($p<0.001$) : les corrélations sont plus élevées pour les consonnes labiales que pour les consonnes apicales.

Influence du voisement

Le voisement n'a pas (ou très peu) d'influence sur les relations liant les 6 paramètres pertinents pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion et l'intensité.

2.3.1.3. Stratégies globales et variabilité inter-individuelle

Pour le contrôle des labiales

Labiales	G1	G2	G3
Pression intra-orale	+++	+++	+++
Degré de compression labiale	+	++	++
Vitesse d'ouverture labiale	+	+	+

Tableau 12 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst).

On observe dans le Tableau 12 une différence entre les groupes G1 et G2-G3 : pour un même niveau « d'effort » articulatoire (i.e. intervention similaire du paramètre de compression labiale), le groupe G1 semble atteindre un moindre résultat acoustique que les groupes G2 et G3. Ce résultat fait penser que le groupe G1 présente plus d'«inefficacité » que les groupes G2 et G3 pour le contrôle articulatoire de l'intensité du bruit de plosion.

Pour les trois groupes, on observe une stratégie globale commune : ils jouent tous principalement sur la pression Pio pour contrôler l'intensité du bruit de plosion en parole chuchotée.

Pour le contrôle des apicales et des vélaires

Apicales	G1	G2	G3
Pression intra-orale	+	+	+
Vitesse d'élévation langue	+	+	+

Vélaires	G1	G2	G3
Pression intra-orale			
Vitesse d'élévation langue	+	+	+

Tableau 13 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l'indice d'intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst).

Pour les trois groupes, et pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion dans le cas des consonnes linguales en parole chuchotée, on observe une stratégie globale commune : les groupes de sujets jouent tous simultanément, et de manière équilibrée, sur les 2 paramètres de contrôle (pression intra-orale et vitesse d'élévation de la langue).

2.3.2. Contrôle du Centre de Gravité Spectral du bruit de plosion en parole chuchotée

2.3.2.1. Pertinence des paramètres de contrôle

Pour les consonnes labiales

Comme pour la parole modale, aucun paramètre ne montre une corrélation forte et/ou une relation systématiquement de même signe avec le CDG pour l'ensemble des conditions expérimentales et l'ensemble des groupes de sujets : dans le cas des consonnes labiales, aucun paramètre ne semble pertinent pour expliquer les variations du CDG spectral du bruit de plosion.

Pour les consonnes linguales

A la différence du cas de la parole modale, cette fois-ci, la vitesse d'abaissement de la langue montre une forte corrélation, systématiquement de même signe, avec le CDG du bruit de plosion en parole chuchotée.

Cette relation de contrôle est influencée par les facteurs expérimentaux (voisement, contexte vocalique, lieu d'articulation) de manière variable en fonction des groupes de sujets.

2.3.2.2. Stratégies globales et variabilité inter-individuelle

Apicales	G1	G2	G3	G4
Vitesse d'abaissement langue	+++	+	+	+++

Vélaires	G1	G2	G3	G4
Vitesse d'abaissement langue	++	+	+	++

Tableau 14 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation du CDG du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter CDG, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter CDG).

Pour un même niveau « d'effort » articulatoire (i.e. intervention similaire de la vitesse d'abaissement de la langue), les groupes G2 et G3 semblent atteindre un moindre résultat acoustique que les groupes G1 et G4. Ce résultat fait penser que les groupes G2 et G3 plus d'« inefficacité » que les groupes G1 et G4 pour le contrôle cinématique du CDG.

2.3.3. Contrôle du Skewness du bruit de plosion en parole chuchotée

Pour les consonnes labiales
La vitesse d'ouverture des lèvres montre une forte corrélation, systématiquement de même signe, avec le Skewness du bruit de plosion.
Cette relation de contrôle n'est ni influencée par les conditions expérimentales ni par le groupe de sujets.
Comme on peut le constater sur les tableaux de résultats de l'ANNEXE 3.3, augmenter d'1cm/s la vitesse d'ouverture des lèvres en parole chuchotée et à débit normal entraine systématique une augmentation de 0.03 unités du Skewness du bruit de plosion (moyenne du Skewness : 0.6 et écart-type : 0.8).

Pour les consonnes linguales
La position de l'apex de la langue (coordonnée Xapex) ne montre plus de forte corrélation, systématiquement de même signe, avec le Skewness du bruit de plosion (alors que c'était le cas en parole modale).

2.3.4. Contrôle du Kurtosis du bruit de plosion en parole chuchotée

Pour les consonnes labiales
La vitesse d'ouverture des lèvres montre une forte corrélation, systématiquement de même signe, avec le Kurtosis du bruit de plosion.
Cette relation de contrôle n'est ni influencée par les conditions expérimentales ni par le groupe de sujets.
Comme on peut le constater sur les tableaux de résultats de l'ANNEXE 3.4, augmenter d'1cm/s la vitesse d'ouverture des lèvres en parole chuchotée et à débit normal entraine systématique une augmentation de 0.2 unités le Kurtosis du bruit de plosion (moyenne du Kurtosis: 1.7 et écart-type : 2.8).

Pour les consonnes linguales
La vitesse d'abaissement de la langue montre une forte corrélation, systématiquement de même signe (-), avec le Kurtosis du bruit de plosion.
Cette relation de contrôle n'est ni influencée par les conditions expérimentales ni par le groupe de sujets.
Comme on peut le constater sur les tableaux de résultats de l'ANNEXE 3.4, augmenter d'1cm/s la vitesse d'ouverture des lèvres en parole chuchotée et à débit normal entraine systématique une augmentation de 0.3 unités le Kurtosis du bruit de plosion (moyenne du Kurtosis: 1.7 et écart-type : 2.8).

2.3.5. Contrôle de la durée du Bruit de plosion en parole chuchotée

Pour rappel, en parole modale :
- La durée d'occlusion est pertinente pour contrôler la durée du bruit de plosion (pour l'ensemble des consonnes)
- Les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres sont pertinentes pour contrôler la durée du bruit de plosion (dans le cas des consonnes bilabiales).

En parole chuchotée, il semble que le paramètre durée d'occlusion ne soit plus un paramètre « pertinent » pour le contrôle de la durée du bruit de plosion (la relation change de signe et devient faible pour certaines catégories phonétiques).
De la même manière, les deux paramètres labiaux de vitesse ne sont également plus pertinents pour l'explication des variations de la durée du bruit de plosion.

En revanche, il apparaît pour les consonnes linguales que les deux paramètres suivants montrent une corrélation forte et systématiquement de même signe avec la durée du bruit de plosion :
- Vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion)
- Vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion)

Les relations entre la vitesse d'élévation de la langue et la durée du bruit de plosion sont peu influencées par le voisement, mais le sont systématiquement par le contexte vocalique ($relations_{/a/} < relations_{/i/}$).
Les relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion sont peu influencées par le voisement, et ne le sont pas du tout par le contexte vocalique.
Le lieu d'articulation n'influence pas ces relations de contrôle.

L'ensemble des groupes de sujets se comporte de la même manière pour le contrôle de la durée du bruit de plosion en voix chuchotée : ils jouent de manière équilibrée entre les deux vitesses de déplacement de la langue.

2.3.6. Effet de l'augmentation du débit de parole sur le contrôle des indices du bruit de plosion en parole chuchotée

Aucun paramètre ne semble pertinent pour le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en débit de parole rapide et en production chuchotée.

2.3.7. Bilan sur le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole chuchotée

On peut observer dans la section 2.3 de ce chapitre que les stratégies de contrôle valables en production modale se transforment et se modifient lorsque l'on passe en production chuchotée. Les relations de contrôle aérodynamiques et cinématiques semblent alors pré-dominantes.

3. Bilan et ouverture à l'interprétation des relations entre descripteurs physiologiques et caractéristiques acoustiques des bruits de plosion

Pour faire un bilan simple de ce chapitre, je tâcherai de synthétiser en quelques lignes les résultats cruciaux de mes travaux de thèse sur le contrôle des indices acoustiques caractérisant les bruits de plosion du français.

Les résultats descriptifs de ce chapitre ont permis de décrire et de caractériser les effets des variables conditionnelles sur l'ensemble des paramètres et variables acoustiques de notre étude (effets du mode, du débit, du voisement, du lieu d'articulation, du contexte vocalique et du sujet). Ces résultats confirment que nos données ont été acquises avec rigueur, que les analyses sont correctes, et que les ordres de grandeur coïncident avec ceux observés dans les études antérieures. Ils mettent en perspective une forte variabilité inter-individuelle, dont il faut tenir compte dans les modélisations statistiques.

L'utilisation de l'algorithme de Classification Ascendante Hiérarchique permet d'introduire une variable conditionnelle groupe, remplaçant avec pertinence celle qui aurait pu être nommée « sujet » (définie classiquement comme variable aléatoire). La variable conditionnelle groupe permet dans chaque analyse de tenir compte de la variabilité inter-individuelle tout en gardant la possibilité d'extraire des relations générales, dont les tendances sont communes à l'ensemble des sujets (la plupart du temps différentes d'un sujet à un autre par l'intensité de la relation, et non par le sens de la relation).

Nos résultats statistiques mettent ensuite en évidence la présence de relations de contrôle pertinentes. Ces relations sont conformes aux connaissances sur le contrôle des indices acoustiques. Le Tableau 15 de synthèse résume les paramètres physiologiques dont la variation est significativement corrélée avec celle des 5 descripteurs acoustiques du bruit considérés.

- Pour une production de consonnes occlusives en parole modale et à débit normal, à l'exception du CDG, on observe des relations de contrôle pertinentes des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion. Les caractérisations fonctionnelles que nous proposons sont robustes à la variabilité inter-individuelle, décrivent les influences des variables expérimentales, et permettent d'analyser des comportements spécifiques mettant plus ou moins en avant l'utilisation de certain levier de contrôle.
- Le passage en qualité de production chuchotée modifie les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion, en mettant l'accent sur l'utilisation de paramètres cinématiques au détriment des paramètres aérodynamiques, articulatoires et temporels.
- L'augmentation du débit de parole a pour effet de « dégrader » les relations pertinentes pour le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion : la plupart des paramètres perdent avec le débit leur efficacité de contrôle.

Un certain nombre de résultat décrits dans la 2ème partie de ce chapitre sont néanmoins surprenants et discutables, au regard des connaissances que résume l'état de l'art du CHAPITRE 1. Les résultats fonctionnels de ce chapitre seront donc discutés dans le CHAPITRE 7.

		Iburst	Durée	CDG	Skewness	Kurtosis
Qualité modale	débit 1 (normal)	Pio Durée Occlu Comp Lab Vouv lab Vferm lab Vferm ling	Durée Occlu Vouv lab Vferm lab	Ø	Xapex	Vferm ling
	débit 2 (rapide)	Vouv lab	Vouv ling	Ø	Ø	Ø
Qualité chuchotée	débit 1 (normal)	Pio Comp Lab Vouv lab Vferm ling	Vferm ling Vouv ling	Vouv ling	Vouv lab	Vouv lab Vouv ling
	débit 2 (rapide)	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø

Tableau 15 : Paramètres physiologiques dont la variation est significativement corrélée avec celle des 5 descripteurs acoustiques du bruit de plosion considérés

CHAPITRE 6

Contrôle musculaire des mouvements labiaux de production des occlusives labiales

1. Décomposition des mouvements de parole et description des patrons temporels d'activation musculaire

3. Résultats sur le contrôle musculaire des gestes d'ouvertures, fermetures et compression des lèvres

4. Discussion : contrôle musculaire des gestes de production des occlusives labiales

5. Conclusion

La modélisation fonctionnelle (1) proposée dans le CHAPITRE 3 a pour vocation de décrire la relation entre la variation des activités musculaires péri-orales et la variation des descripteurs articulatoires du mouvement des lèvres au cours de la production des occlusives bilabiales.
On souhaite déterminer quels sont les muscles qui contrôlent le degré de compression, et les vitesses de fermeture et d'ouverture, des lèvres au cours de la production des occlusives bilabiales.

La base de données de ma thèse inclut les signaux électromyographiques de 5 muscles péri-oraux (muscles digastrique, mentalis, dépresseur de la lèvre inférieure, orbicularis oris supérieur et inférieur) et les mouvements des lèvres (via l'acquisition de la vidéo à haute fréquence d'échantillonnage).
A l'aide de la méthodologie statistique, également présentée dans le CHAPITRE 3, nous nous proposons d'étudier le contrôle musculaire du mouvement des lèvres lors de la production d'occlusives bilabiales.

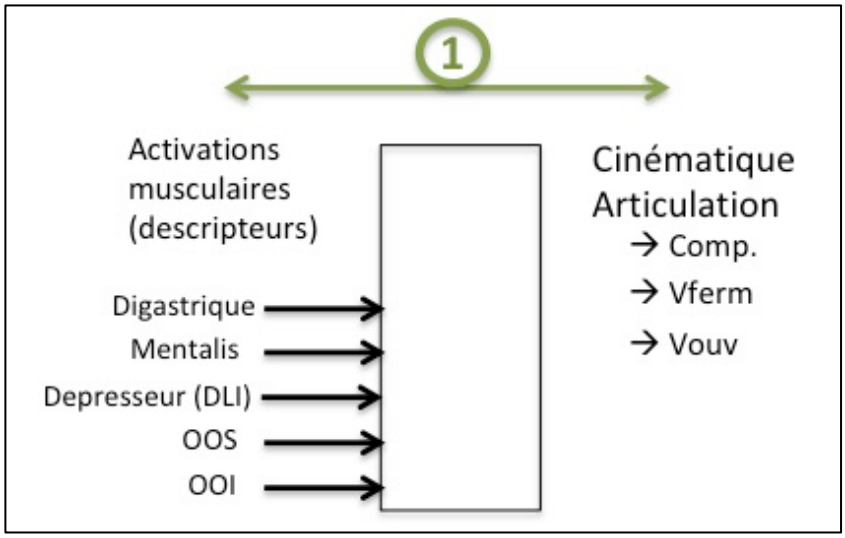


Figure 63 : schéma de modélisation fonctionnelle du contrôle physiologique des mouvements de production des consonnes occlusives labiales (extrait du CHAPITRE 5).

Ce chapitre comportera tout d'abord une description de la méthode d'extraction des patrons temporels d'activations musculaires orofaciaux et une présentation des différents profils de ces patrons. Une méthodologie d'étude de ces patrons est développée au cours d'une étude pilote sur 4 sujets (Cattelain et al., 2018) puis appliquée à notre base de données.

1. Décomposition des mouvements de parole et description des patrons temporels d'activation musculaire

Le post-traitement des signaux EMGs est classique (cf. CHAPITRE 2) : filtrage passe-haut (fc = 20 Hz), seuillage (soustraction de la baseline).

1.1. Décomposition temporelle fine des mouvements en parole

McClean et Tasko (2003) décomposent le mouvement de production de la plosive labiale en deux phases (fermeture de la mandibule, puis ouverture) à l'aide des minima et maxima des vitesses tangentielles.
Dans ces travaux de thèse, nous nous proposons de décomposer plus finement le mouvement de production labiale en tenant compte des phases de contact. Or, il s'avère que lorsque les lèvres sont en contact il se passe plusieurs choses d'un point de vue des forces statiques mises en jeu et de l'écrasement des tissus.
Le mouvement de production des plosives labiales sera donc divisé en 4 phases : la phase de fermeture labiale – P1, la phase de compression labiale – P2 (de l'instant de contact à l'instant de maximum de compression), la phase de décompression labiale – P3 (de l'instant du maximum de compression à l'instant de décollement des lèvres), et enfin la phase d'ouverture labiale et mandibulaire – P4 (cf. Figure 64).
Les instants de contact (b) et de décollement (c) sont repérés automatiquement à l'aide du paramètre de distance interlabiale interne (cf. CHAPITRE 6). Les instants de début et fin de geste de production (a : début de P1, d : fin de P4) sont repérés automatiquement avec Matlab en cherchant des points d'inflexion dans le signal de déplacement labial, ou le cas échéant des points de rebroussement aux deux extrémités des phases P2 et P3.

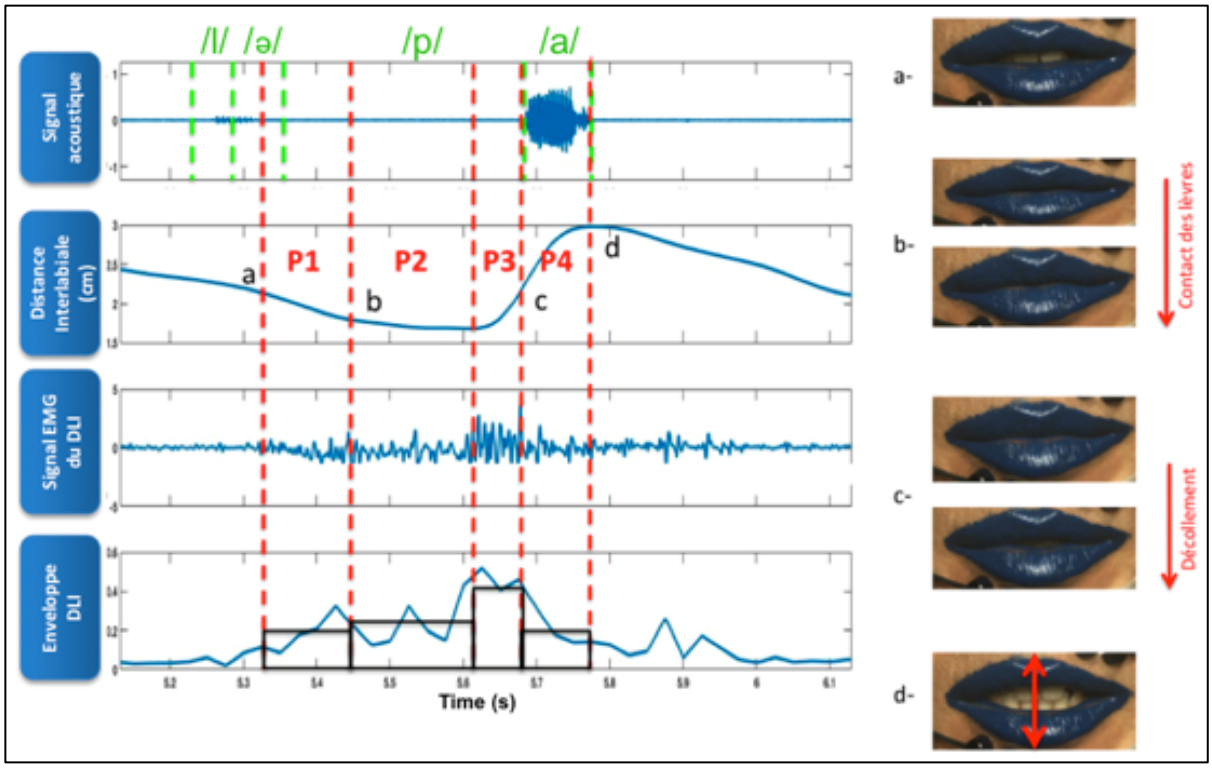


Figure 64 : décomposition du geste de production du logatome /ləpa/, basée sur l'analyse des pics de vitesse des lèvres et des phases de contact et de décollement labiales

L'activité EMG de chaque muscle est calculée au cours de chacune des phases du mouvement. Les mesures d'activités sont similaires à des mesures d'énergies RMS (cf. CHAPITRE 2), il s'agit ici de la somme des échantillons de l'enveloppe du signal EMG du muscle en question au cours de la phase en question, pondérée par la durée de la phase (cf. signal enveloppe du muscle DLI, sur la Figure 64 – les rectangles noirs correspondent aux 4 valeurs d'activité calculées pour ce mouvement de production du logatome /ləpa/).

1.2. Description globale des patrons d'activation musculaire orofaciaux des 5 muscles étudiés

La Figure 65 présente les patrons d'activation des 5 muscles orofaciaux (DIG, MENT, DLI, OOS et OOI) au cours des différentes phases du mouvement de production des plosives labiales (tous sujets, catégories phonétiques, mode, débit de parole et effort confondus). Pour chaque phase du mouvement (en abscisse) et pour chaque muscle (en couleur), c'est ici la moyenne globale des activités EMGs que l'on observe.

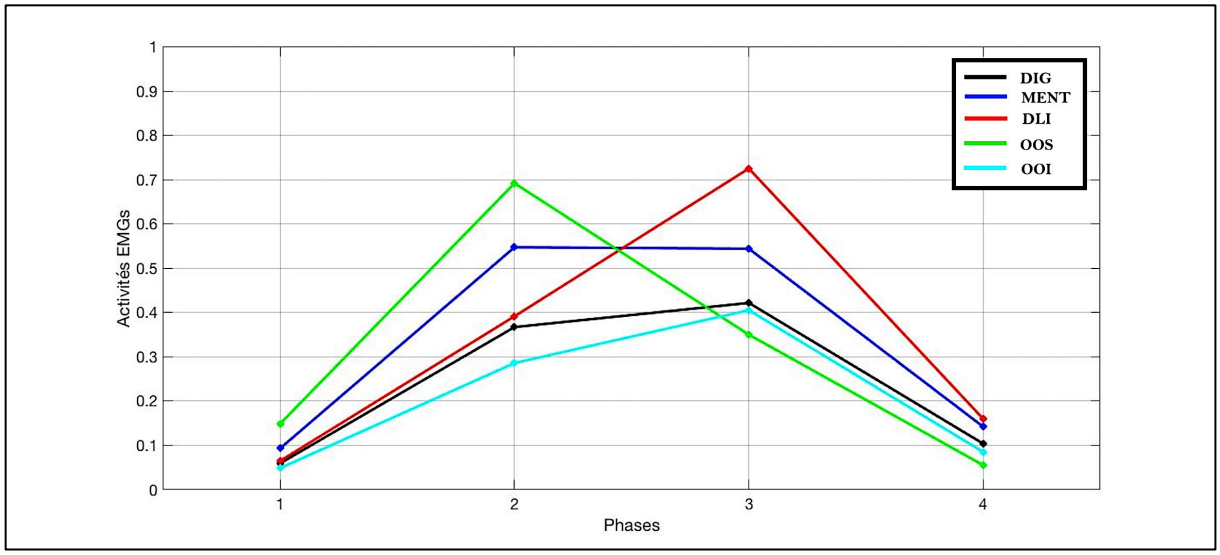


Figure 65 : Patrons temporels globaux d'activation musculaire des 5 muscles orofaciaux au cours de la production des plosives labiales (i.e. activités de chacun des 5 muscles orofaciaux au cours des différentes phases - P1 à P4 - du mouvement de plosion labiale)

Sur ces patrons très globaux, on peut observer les résultats suivants :

- Le muscle digastrique (DIG) est principalement recruté dans les phases P2 et P3 du mouvement (compression et décompression). Cette distribution de l'activité du muscle digastrique est surprenante, elle fait penser au fait que le digastrique joue un rôle stabilisateur de la compression et de la décompression au cours des phases P2 et P3.
- Le muscle mentalis (MENT) est également principalement recruté dans les phases P2 et P3, avec des activités plus élevées en moyenne que celles du muscle DIG. Il est agoniste au mouvement de compression dans la phase P2, et antagoniste au mouvement de décompression dans la phase P3.
- Le muscle Dépresseur (DLI) présente un pic d'activité au cours de la phase P3 (élevé en amplitude), phase dans laquelle il est agoniste au mouvement de décompression (i.e. abaissement de la lèvre inférieure).
- Le muscle Orbicularis Oris Supérieur (OOS) présente un pic d'activité au cours de la phase P2 (élevé amplitude), phase dans laquelle il est agoniste au mouvement de compression interlabiale.
- Le muscle Orbicularis Oris Inférieur (OOI) présente un pic d'activité au cours de la phase P3, phase dans laquelle il est agoniste au mouvement de décompression (i.e. abaissement de la lèvre inférieure). En moyenne, les activités du muscle OOI sont plus faibles que les activités des autres muscles.

Les écart-types ne sont pas représentés sur la Figure 65 par soucis de lisibilité. En revanche, ils ont été observés : l'écart-type de chaque activité musculaire dans chaque phase est élevé. Pour tous les sujets on retrouve une tendance similaire des profils de patron d'activation musculaire pour les muscles OOS (pic en phase P2), DLI (pic en phase P3), DIG et OOI. En revanche, pour le muscle MENT, la moitié des sujets présentent des patrons où le mentalis est recruté de manière majeure en phase P2, et l'autre moitié pour lesquels le mentalis est recruté de manière majeure en phase P3 (avec deux sujets pour lesquels les activités du mentalis sont très faibles, quelle que soit la phase du mouvement). Lorsque l'on moyenne les patrons des 12 sujets, on observe une activation du mentalis comparable entre les deux phases P2 et P3.

1.3. Influence du mode de production et du débit de parole sur les patrons d'activation musculaire orofaciaux

1.3.1. Influence du mode de production

La Figure 66 présente les patrons temporels d'activation des 5 muscles orofaciaux, selon le mode de phonation. Comme pour la figure précédente, on observe ici les activités EMGs moyennes pour chaque muscle dans chaque phase du mouvement (tout sujets et débit de parole confondus). Il y a une couleur pour chaque muscle, et deux modalités (pointillés pour les productions chuchotées, et traits pleins pour les productions modales).
On note sur la Figure 66 que pour 4 des 5 muscles orofaciaux (tous exceptés le Mentalis) les profils des patrons sont semblables d'un mode à un autre. Le patron d'activation du muscle Mentalis en mode chuchoté montre un pic d'activité en phase P2 (qui n'est pas visible en production modale).
Les productions chuchotées requièrent une activité musculaire plus importante que les productions modales.

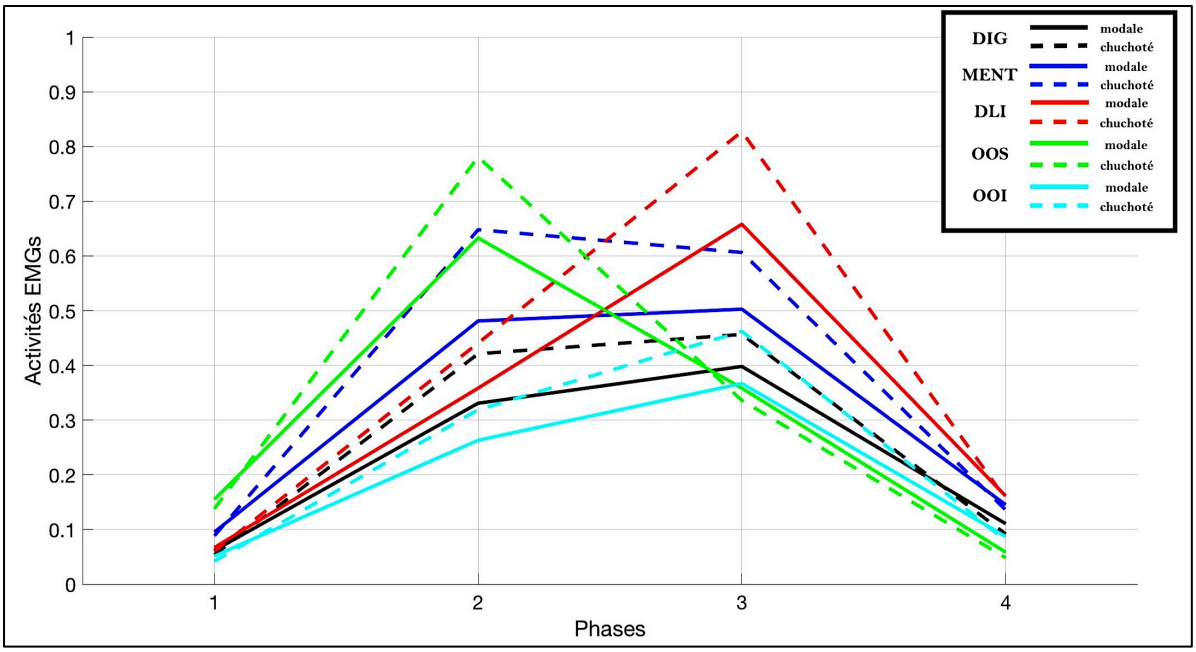


Figure 66 : effet du mode de production sur les patrons temporels d'activation musculaire (en pointillés les patrons qui correspondent aux productions chuchotées, et en traits pleins ceux qui correspondent aux productions modales). Une couleur par muscle. Tous sujets et débits de parole confondus.

1.3.2. Influence du débit de parole

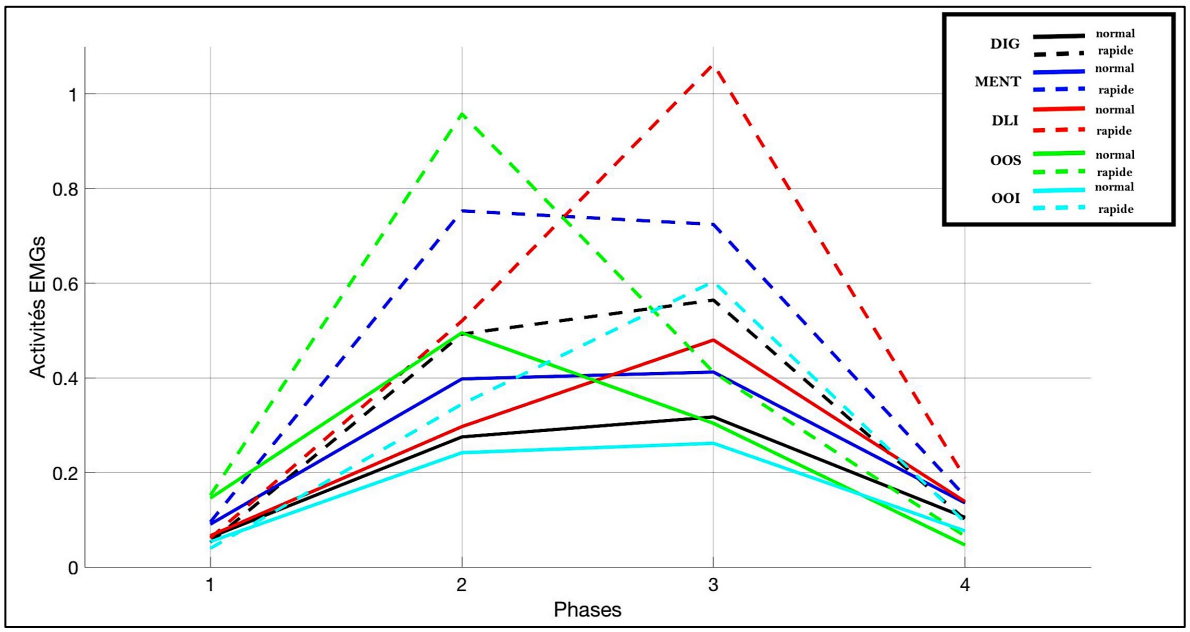


Figure 67 : effet du débit de parole sur les patrons temporels d'activation musculaire (en pointillés les patrons qui correspondent aux productions en parole rapide, et en traits pleins ceux qui correspondent aux productions normales). Une couleur par muscle. Tous sujets et modes de production confondus.

De la même manière que pour le mode de production, la Figure 67 montre que le débit de parole influence l'amplitude des activités musculaires des 5 muscles péri-oraux, mais pas le profil des patrons d'activation.
Les activités musculaires sont globalement plus importantes pour les productions en débit rapide.

1.4. Influence du contexte vocalique sur les patrons d'activation musculaire orofaciaux

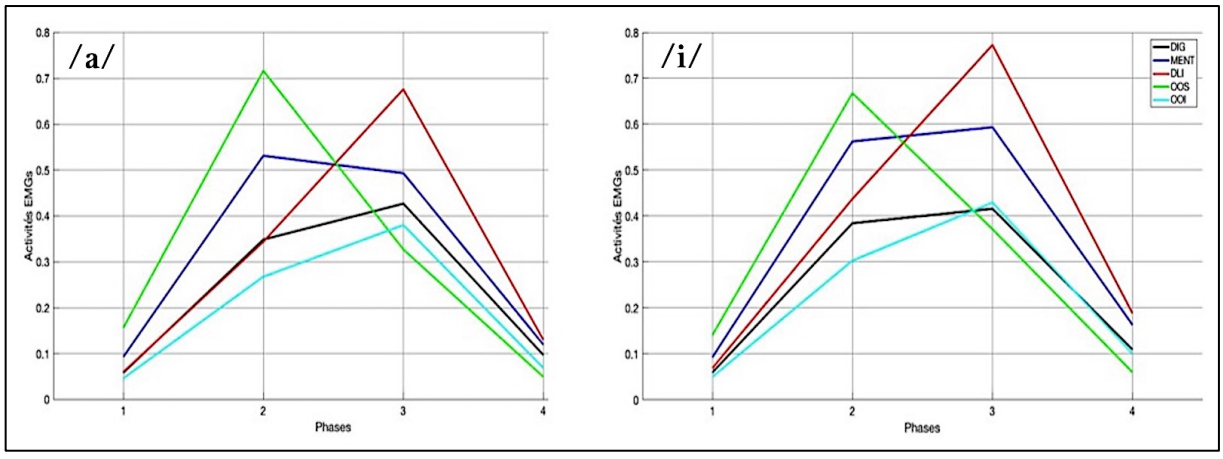


Figure 68 : effet du contexte vocalique de production des occlusives labiales sur les patrons temporels d'activation musculaire (à gauche les patrons qui correspondent aux productions en contexte /a/, et à droite ceux qui correspondent au contexte /i/). Une couleur par muscle. Tous sujets, modes et débits de parole confondus.

La Figure 68 représente les activités musculaires moyennes (calculées sur toutes les consonnes labiales et tous les locuteurs) des 5 muscles d'intérêt, selon que la voyelle suivant la consonne est un /a / ou un /i/.
On note d'abord une importante similitude dans l'évolution de ces activités pour chacune des deux voyelles et pour l'ensemble des muscles. Pour les voyelles /i/ et /a/ (non labiales) les muscles présentant les activités les plus fortes sont les muscles « dilatateurs » DLI et MENT et le muscle « constricteurs » OOS. En plus de la similitude des patrons, les amplitudes des activités musculaires sont similaires d'un contexte vocalique à un autre.

1.5. Bilan sur les patrons temporels d'activation musculaire orofaciaux

L'activité EMG de tous les muscles varie principalement entre les phases P2 et P3, qui, rappelons-le, correspondent à la phase d'occlusion labiale au cours de laquelle les lèvres, en contact, sont sensiblement immobiles (i.e. à vitesse quasi nulle). Cette observation montre l'intérêt de décomposer temporellement de manière précise et fine le geste de production des occlusives pour l'étude du contrôle physiologique des descripteurs du mouvement.

L'analyse globale de la variation de l'activité des 5 muscles de la phase P1 à la phase P4 suggère que les muscles OOS (actif de manière dominante en phase P2) et MENT (actif en phase P2 et P3) jouent un rôle majeur dans la compression labiale, alors que les muscles DIG, DLI et OOI qui ont une activité croissante jusqu'en phase P3 (avec un pic d'activité en phase P3) jouent un rôle majeur dans les gestes de décompression et de réouverture. Ces observations sont cohérentes avec les connaissances générales sur le rôle fonctionnel de ces différents muscles (cf. CHAPITRE 2).

En revanche, l'activité forte du muscle MENT en phase P3 est surprenante. Ce muscle est plutôt considéré comme un élévateur de la lèvre inférieure. Deux explications peuvent être envisagées : La première serait que le signal EMG acquis sur l'électrode du MENT soit en fait contaminé par les potentiels d'action des muscles abaisseurs adjacents, en particulier le DLI (phénomène de diaphonie). La seconde serait qu'il existe un mécanisme de co-cfactivation des muscles élévateurs et abaisseurs de la lèvre pour garantir une meilleure stabilité du geste d'ouverture, dont on sait qu'il est crucial pour la production des plosives. Cette hypothèse serait cohérente avec le concept de « synergie » entre muscles antagonistes proposé par Latash (2007), observé de manière quasi-systématique dans les mouvements du bras, et qui permettrait de stabiliser les mouvements.
Cette diaphonie ou co-activation est également observée dans des études antérieures, comme celle de Schumann et al (2010) par exemple.

2. Résultats sur le contrôle musculaire des gestes d'ouvertures, fermetures et compression des lèvres

L'analyse statistique des données électromyographiques de la base de données s'inspire de la démarche déjà adoptée dans le CHAPITRE 5 pour étudier le contrôle aérodynamique, laryngé et articulatoire, des bruits de plosion.

Les entrées du modèle sont au nombre de 20 (activités de 5 muscles, dans chacune des 4 phases du mouvement). Les sorties sont au nombre de 3 : degré de compression labial, vitesse de fermeture et vitesse d'ouverture des lèvres.
L'ensemble des données ont subi une transformation « zscore » (normalisation + centrage), selon le sujet et la syllabe (4 niveaux : /pa/, /pi/, /ba/, /bi/).
Le mode de production et le débit de parole ont pour but de faire varier le domaine d'observation des valeurs des activités EMGs, et ne seront pas considérés comme des variables conditionnelles de notre analyse statistique. Pour le contrôle de chaque descripteur cinématique (DegComp, Vouv et Vferm), une classification ascendante hiérarchique sera réalisée, permettant d'introduire une variable conditionnelle groupe.
Ensuite, l'analyse par partitionnement récursif sera menée.

2.1. Distinction de groupes d'individus par Classification Ascendante Hiérarchique

Nous nous proposons ici d'appliquer l'algorithme CAH pour regrouper les sujets présentant des relations comparables entre les activités musculaires (5 muscles, 4 phases du mouvement) et les descripteurs du mouvement des lèvres. Les relations sont quantifiées pour chaque sujet à l'aide de coefficients Rhos de Spearman.
Ainsi, le Tableau 16 synthétise les groupes de sujets adoptant des stratégies comparables de contrôle musculaire orofacial au cours de la production des occlusives labiales. Par exemple, pour le contrôle du degré de compression, les sujets 4, 5 et 6 forment un premier groupe (en jaune), les sujets 7, 10 et 12 un deuxième groupe (en orange) et enfin les autres sujets forment un troisième groupe.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Degré. Comp	3	3	3	1	1	1	2	3	3	2	3	2
Vit. Fermeture	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1
Vit. Ouverture	1	1	2	3	3	3	1	1	2	1	2	1

Tableau 16 : synthèse de regroupement de sujets, pour le contrôle de chaque variable cinématique (en ligne).

2.2. Contrôle du degré de compression interlabiale

Pour étudier de manière statistique le contrôle musculaire du degré de compression labiale, nous réalisons les 20 partitionnements mono-paramétriques et récursifs suivant :

DegComp ~ MUSCLE_Pi | contexte + voisement + groupe
avec MUSCLE ∈ {DIG, MENT, DLI, OOS, OOI} et Pi ∈ {P1, P2, P3, P4}

Chacune des partitions récursives peut être composée d'un ou plusieurs nœuds (séparations statistiquement significatives de deux ensembles de relation MUSCLE_Pi <-> DegComp dûes à l'effet d'une des variables conditionnelles : contexte, voisement, ou groupe). La Figure 69 propose un exemple de partition récursive, pour étudier l'influence de l'activité du muscle OOS en phase P1 sur la variation du degré de compression labiale (DegComp). Les relations entre les activités du muscle OOS en phase P1 et le degré de compression labiale sont

significativement différente selon le groupe considéré ($p < 0.001$). Voici les coefficients de régression linéaire (intercepts, et pentes) pour les 3 nœuds que l'on voit sur la Figure 69:

	(Intercept)	OOS_P1
2	7.475677e-09	-0.23637979
4	-1.199534e-03	0.06217532
5	1.821281e-03	0.27201287

Ici, il faut lire que selon le groupe de sujets considéré, augmenter d'une unité l'activité du muscle OOS en phase P1 entraine une diminution (de 0.24 unités) la distance interlabiale (donc une augmentation du degré de compression) pour le groupe 2 (nœud 2) mais une diminution du degré de compression pour les groupes 1 et 3 (nœud 4 et 5) (comprise entre 0.06 et 0.27 unités de distance interlabiale).

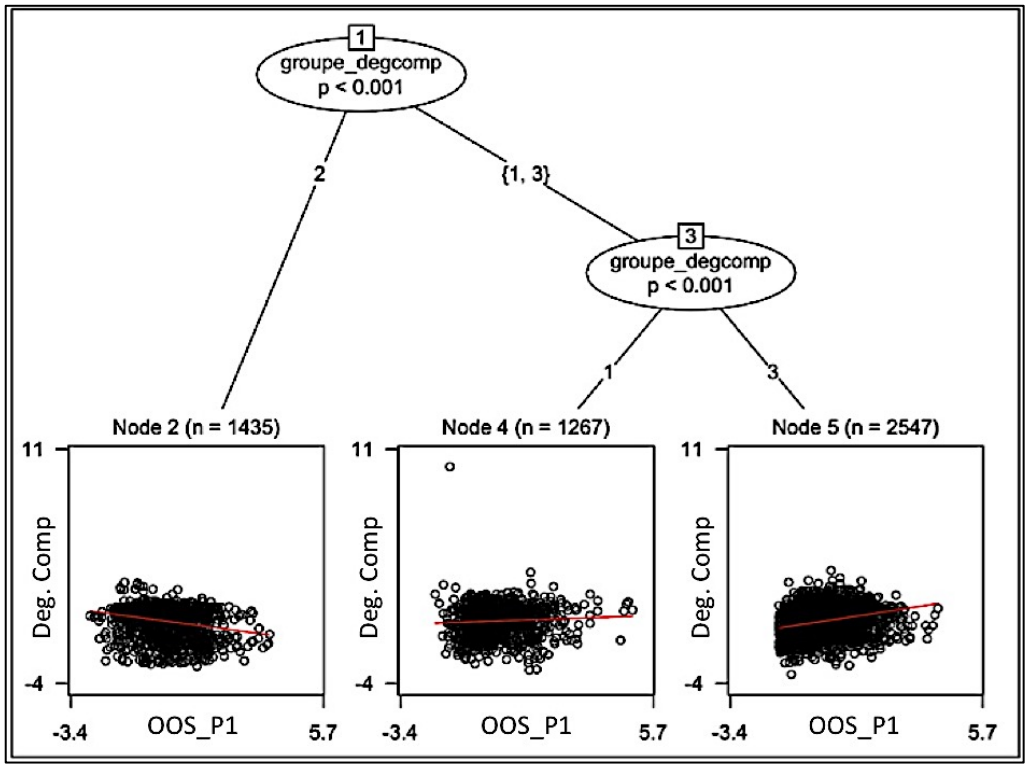


Figure 69 : exemple de partitionnement récursif : Deg.Comp ~ OOS_P1 | contexte + voisement + groupe

Nous allons rechercher les activités musculaires qui présentent des relations avec le degré de compression de signe constant au sein de chaque groupe de sujets, quels que soient la consonne labiale et le contexte vocalique. Une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → DegComp ↓ n unité, pour le groupe j signifie que le $muscle_i$ participe activement au geste de compression, tandis qu'une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → DegComp ↑ n unité, pour le groupe j signifie que le $muscle_i$ s'oppose à la compression. Dans les deux cas, il s'agit d'une relation de contrôle du degré de compression propre au groupe de sujets j.

Un coefficient de corrélation de Pearson (R^2) est associé à chaque régression linéaire obtenue par partitionnement récursif. Les relations qui ne permettent pas d'expliquer au moins 10% de la variance sont considérées comme peu significatives.

Le Tableau 17 synthétise les pentes de régression linéaire des relations entre le degré de compression labiale et l'activité de 5 muscles dans les 4 phases du mouvement, par groupe de

sujets. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation (R^2) est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleu les relations dont le coefficient de corrélation (R^2) est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation (R^2) est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets. On considèrera pour les cases noires que le muscle dans la phase du mouvement en question ne contribue pas de manière significative à la variation du degré de compression.

	P1					P2					P3					P4				
	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI
G1	↓0.05	↑0.14		↓0.06	↓0.07	↑0.01	↑0.2	↑0.13		↑0.17	↑0.24	↑0.31		↑0.07					↓0.06	
G2	↑0.56	↓0.1	↓0.4	↑0.24	↑0.36	↑0.5	↑0.46	↑0.46	↑0.44	↑0.49	↑0.5	↑0.45	↑0.43	↑0.49	↑0.42	↑0.3	↑0.26	↑0.32	↑0.25	
G3	↓0.05	↑0.26		↓0.27	↓0.07									↑0.35		↓0.16		↓0.15	↓0.06	↓0.19

Tableau 17 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et le degré de compression. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets

Ces résultats peuvent se lire de la manière suivante :

- Une augmentation (d'1 unité) l'activité du muscle OOS en phase P2 est associée à une augmentation du degré de compression (de 0.44 unités), quel que soit le groupe de sujets : plus le muscle OOS est recruté au cours de la phase de compression (P2), et plus la compression est importante.
    - Pour les groupes de sujets G2 et G3 (environ ¾ des sujets, cf. section 2.1), augmenter d'1 unité les activités de chacun des autres muscles (DIG, MENT, DLI, et OOI) en phase P2 entraine une augmentation du degré de compression de 0.45 unités en moyenne. Pour ces sujets, le fait que l'ensemble des muscles péri-oraux (agonistes et antagonistes au mouvement de compression) participe simultanément au contrôle du degré de compression labiale fait penser que les muscles sont co-activés dans la phase P2 pour stabiliser l'atteinte de la cible articulatoire. Il est surprenant que l'on puisse dire que l'activité des muscles DLI et OOI (qui sont des abaisseurs de la lèvre) contrôle le degré de compression labiale au cours de la phase de compression.
- Une augmentation (d'1 unité) les activités des muscles MENT, DLI et OOI en phase P3 est associée à une augmentation du degré de compression (d'environ 0.4 unités), quel que soit le groupe de sujets. Plus la compression a été forte, et plus les activités du muscles DLI sont grandes au cours de la phase de décompression (les muscles abaisseurs sont agonistes de la décompression). Nous pourrons discuter dans la section 3 du CHAPITRE 7 la corrélation

forte observée de façon plus surprenante entre les activités des muscles MENT et OOI en phase P3 et le degré de compression.
    - Pour les sujets des groupes G2 et G3, augmenter d'1 unité les activités de chacun des autres muscles en phase P3 (DIG, OOS) entraine une augmentation du degré de compression de 0.35 unités en moyenne.
- Aucune des activités des muscles en phase P1 et P4 n'est systématiquement significative.

Synthèse : le geste de compression des lèvres semble contrôlé chez tous les sujets par le recrutement du muscle OOS en phase 2, associé à une activité significative des muscles MENT, DLI, et OOI en phase 3 corrélée au degré de compression.
Pour les sujets des groupes G2 et G3, cette stratégie générale s'accompagne en plus d'une activité des autres muscles (DIG, MENT, DLI et OOI) en P2, et des muscles DIG, MENT et OOS en P3.

2.3. Contrôle de la vitesse de fermeture labiale

Pour étudier de manière statistique le contrôle musculaire de la vitesse de fermeture des lèvres, nous réalisons les 20 partitionnements récursifs suivants :

Vit.Fermeture ~ MUSCLE_Pi | contexte + voisement + groupe
avec MUSCLE ∈ {DIG, MENT, DLI, OOS, OOI} et Pi ∈ {P1, P2, P3, P4}

Exactement comme pour le cas du degré de compression ci-dessus, nous allons rechercher les activités musculaires qui présentent des corrélations de signe constant au sein de chaque groupe de sujets, quels que soient la consonne labiale et le contexte vocalique. Une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → VitFermeture ↓ n unité, pour le groupe j signifie que le muscle$_i$ participe activement au mouvement de fermeture des lèvres, tandis qu'une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → VitFermeture ↑ n unité, pour le groupe j signifie que le muscle$_i$ s'oppose à la fermeture.
Le Tableau 18 synthétise les pentes de régression linéaire des relations de contrôle de la vitesse de fermeture, par groupe de sujets.

	P1					P2					P3					P4				
	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI
G1	↑0.43	↑0.37	↑0.3	↑0.46	↑0.35	↑0.008	↑0.005	↓0.02	↓0.02	↑0.04	↑0.11	↑0.06	↑0.06	↑0.1	↑0.05	↑0.27	↑0.19	↑0.22	↑0.18	↑0.27
G2	↑0.16	↑0.15	↑0.14	↑0.05	↑0.18		↓0.14		↓0.32	↓0.08	↓0.27	↓0.29	↓0.27	↓0.07	↓0.28	↓0.05	↓0.05	↓0.05		↓0.08

Tableau 18 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et la vitesse de fermeture labiale. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets

Ces résultats peuvent se lire de la manière suivante :
- Pour le groupe G1 (3/4 des sujets) :
    - Une augmentation d'1 unité de l'activité des muscles DIG, MENT, OOS et OOI en phase P1 est associée à une augmentation de la vitesse de fermeture des lèvres de 0.4 unité, en moyenne. Les muscles concernés sont bien les muscles « fermeurs/compresseurs » des lèvres.
    - Augmenter les activités de ces muscles en phase P2, P3, ou P4, ou l'activité du muscle DLI en phase P1, n'a pas d'effet significatif sur la vitesse de fermeture des lèvres.
- Pour le groupe G2 (1/4 des sujets) :
    - La relation significative entre l'OOS en phase P2 et la vitesse de fermeture des lèvres : pour ¼ des sujets, il semble que le pic de vitesse intervienne à l'instant où les lèvres entrent en contact, ce qui expliquerait pourquoi plus le muscle OOS est relâché et plus la vitesse de fermeture peut être élevée.

2.4. Contrôle de la vitesse d'ouverture labiale

Pour étudier de manière statistique le contrôle fonctionnel physiologique de la vitesse d'ouverture des lèvres, nous réalisons les 20 partitionnements récursifs suivant :

Vit.Ouverture ~ MUSCLE_Pi | contexte + voisement + groupe
avec MUSCLE ∈ {DIG, MENT, DLI, OOS, OOI} et Pi ∈ {P1, P2, P3, P4}

Exactement comme pour les deux études ci-dessus, nous allons rechercher les activités musculaires qui présentent des corrélations de signe constant au sein de chaque groupe de sujets, le contexte vocalique et la consonne labiale. Une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → VitOuverture ↓ n unité, pour le groupe j signifie que le muscle$_i$ participe activement au geste d'ouverture des lèvres, tandis qu'une relation MUSCLE(i) ↑ 1unité → VitOuverture ↑ n unité, pour le groupe j signifie que le muscle$_i$ s'oppose à l'ouverture.
Le Tableau 19 synthétise les pentes de régression linéaire des relations de contrôle de la vitesse d'ouverture, par groupe de sujets.

	P1					P2					P3					P4				
	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI	DIG	MENT	DLI	OOS	OOI
G1	↑0.4	↑0.21	↑0.34	↑0.29	↑0.25	↑0.25	↑0.28	↑0.2	↑0.2	↑0.25	↑0.28	↑0.28	↑0.28	↑0.28	↑0.18	↑0.34	↑0.3	↑0.35	↑0.25	↑0.3
G2	↑0.09	↓0.1	→0	↓0.18	→0	↑0.07	↑0.03	↑0.03	↓0.02	↓0.02	↑0.16					↑0.1				
G3	↑0.4	↑0.21	↑0.21	↑0.29	↑0.25	↓0.16	↓0.2	↓0.2	↓0.26	↓0.2	↓0.2	↓0.2	↓0.2	↓0.05	↓0.27	↑0.34	↑0.3	↑0.35	↑0.25	↑0.42

Tableau 19 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et la vitesse d'ouverture labiale. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets

Ces résultats peuvent se lire de la manière suivante :
- Pour les groupes G1 et G3 (3/4 des sujets) :
    - Une augmentation d'1 unité de l'activité des muscles DIG, MENT, DLI et OOI en phase P4 est associée à une augmentation de la vitesse d'ouverture des lèvres de 0.3 unité, en moyenne. Les muscles qui contribuent à la variation de la vitesse d'ouverture des lèvres sont aussi bien les muscles « dilatateurs », comme le digastrique et le dépresseur de la lèvre inférieure, que les muscles « constricteurs », comme le mentalis et l'orbicularis oris inférieur.
    - Augmenter l'activité du muscle DIG en phase P1 semble avoir un effet significatif sur la vitesse d'ouverture des lèvres.
    - Augmenter les autres activités musculaires (i.e. toutes les activités dans les phases P2 et P3, les activités des muscles MENT, DLI, OOS et OOI en phase P1, et l'activité du muscle OOS en phase P4) n'a pas d'effet significatif sur la vitesse d'ouverture des lèvres.

3. Discussion : contrôle musculaire des gestes de production des occlusives labiales

En observant les résultats ci-dessus dans leur ensemble, on peut tout d'abord souligner le fait que chaque descripteur cinématique montre une corrélation maximale avec les activités musculaires dans une phase distincte du mouvement de production de l'occlusive labiale : le degré de compression dans les phases P2 et P3 qui sont justement celles où l'écrasement des lèvres a lieu, la vitesse de fermeture dans la phase P1 où les lèvres se ferment et la vitesse d'ouverture dans la phase P4 où les lèvres se ré-ouvrent simultanément au relâchement de la pression intra-orale. Cette observation globale soutient déjà l'intérêt de la décomposition en 4 phases du mouvement d'occlusion labiale proposée dans ces travaux.

Dans ces résultats, nous avons fixé un seuil arbitraire pour définir la significativité des pentes de régression linéaire (seuil : 0.1). Ce seuil, conservateur en absolu, est cohérent avec celui utilisé pour les deux chapitres précédents, mais est bien évidemment discutable, il a été choisi en observant les nuages de points et dans un souhait de distinguer les relations de l'ordre du bruit (lié à la variabilité des données) de celles plus effectives.

Le degré de compression est systématiquement contrôlé par les activités des muscles OOS en phase P2, DLI et OOI en phase P3. Le muscle OOS est un « constricteur », et le muscle DLI un « dilatateur », leur contribution dans le contrôle du degré de compression labiale respectivement dans la phase P2 (phase de compression) et P3 (décompression) est conformes aux connaissances générales sur leur rôle et leur fonctionnalité.
Si l'on raisonne en termes de fonctionnalité musculaire, il n'est pas étonnant d'observer que les muscles MENT et OOI contribuent en phase P2 au degré de compression labiale, de la même manière que le muscle DIG en phase P3 peut participer au relâchement de la tension musculaire péri-orale.
Pour la phase P2 du mouvement, les relations de contrôle qui sont les moins attendues sont les relations fortes (uniquement pour les groupes de sujets G2 et G3, i.e. ¾ des sujets) entre les activités des muscles DIG et DLI et le degré de compression. Pour la phase P3, les relations non attendues sont les relations entre les activités des muscles MENT et OOI avec le degré de

compression (pour tous les sujets) et les relations entre l'activité du muscle OOS et du degré de compression (pour ¾ des sujets).
Ces résultats vont dans le sens des observations réalisées par Schuman et al (2010) (cf. CHAPITRE 2). En effet, Schuman et al observent également des activités fortes du muscle DLI associées à la compression des lèvres (Figure 70), dont l'amplitude est d'ailleurs du même ordre de grandeur que les activités du muscle OOS. Plus intéressant encore, ils observent également en phase de décompression labiale (i.e. abaissement de la lèvre inférieure pour une mandibule immobile) que les muscles MENT et OOI sont très fortement recrutés, les amplitudes de leurs activités sont similaires à celles observées sur le muscle DLI (Figure 71). Schuman et al interprètent ces observations en terme de coactivation musculaire, en accord avec la notion de synergie défendue par Latash (Latash et al., 2007), dont le but est de stabiliser les tissus mous au cours d'un mouvement cinétique. Deux autres hypothèses non proposées par Schuman et al pourraient également expliquer certains de ces phénomènes :
- L'anticipation motrice : le muscle DLI commencerait à être recruté avant le mouvement de dépression labiale (au cours de la phase P2), par anticipation.
- La contamination d'un couple d'électrodes par l'activité musculaire d'un autre muscle adjacent : La densité de l'anatomie orofaciale pourrait tout à fait induire de tels phénomènes de diaphonie.
-

Pour étudier ces trois hypothèses, nous pouvons nous attarder sur certains coefficients d'inter-corrélations des activités musculaires qui nous questionnent.
- Les activités des muscles DIG et DLI corrèlent très fortement avec l'activité du muscle OOS en phase P2 (respectivement $Rho_{Spearman} = 0.87$ et $Rho_{Spearman} = 0.86$).
- L'activité du muscle DLI en phase P2 est fortement corrélée avec son activité en phase P3 ($Rho_{Spearman} = 0.61$), ce qui n'est pas surprenant mais qui ne permet pas de réfuter l'hypothèse de l'anticipation motrice.
- Les activités des muscles MENT et OOI corrèlent très fortement avec l'activité du muscle DLI en phase P3 (respectivement $Rho_{Spearman} = 0.94$ et $Rho_{Spearman} = 0.93$).

Ajoutée aux corrélations ci-dessus, l'observation des patrons temporels d'activation musculaire du muscle DLI (cf. Figure 65) va également dans le sens de l'hypothèse de l'anticipation motrice : l'activité du DLI augmente progressivement (en phase P2) pour atteindre un maximum en phase P3 où son activité corrèle le plus fortement avec le degré de compression labiale. En revanche, ces différents arguments ne peuvent pas écarter la possibilité qu'un phénomène de coactivation musculaire (pour stabiliser le mouvement de compression en phase P2) ou de contamination musculaire (l'activité du muscle MENT en phase P2 contamine les électrodes voisines ciblant le muscle DLI).

Concernant le contrôle physiologique de la vitesse de fermeture des lèvres, il semble y avoir deux stratégies distinctes :
- Les ¾ des sujets (groupe G1) recrutent de manière significative les muscles « constricteurs » DIG/MENT/OOS/OOI pour gérer la variation de la vitesse de fermeture labiale permettant aux lèvres d'entrer en contact. Ces sujets se comportent d'une manière tout à fait attendue.

Le ¼ des sujets restant (groupe G2) ne montre aucune corrélation forte entre leurs activités musculaires en P1 et la vitesse des lèvres en phase de fermeture labiale (P1), mais une relation forte et dont le coefficient de corrélation de Pearson est plus grand que 0.1 entre l'activité du muscle OOS en phase P2 et la vitesse de fermeture. Cette relation est dans un sens étonnant :

plus le muscle OOS est relâché en phase P2 et plus la vitesse de fermeture est importante. L'hypothèse que nous faisons pour expliquer cette particularité individuelle motrice est que le pic de vitesse de fermeture des lèvres arrive tardivement, une fois que les lèvres sont en contact. Ainsi, plus l'OOS sera contracté pour gérer le geste de compression et plus le maximum de vitesse de fermeture des lèvres sera faible.

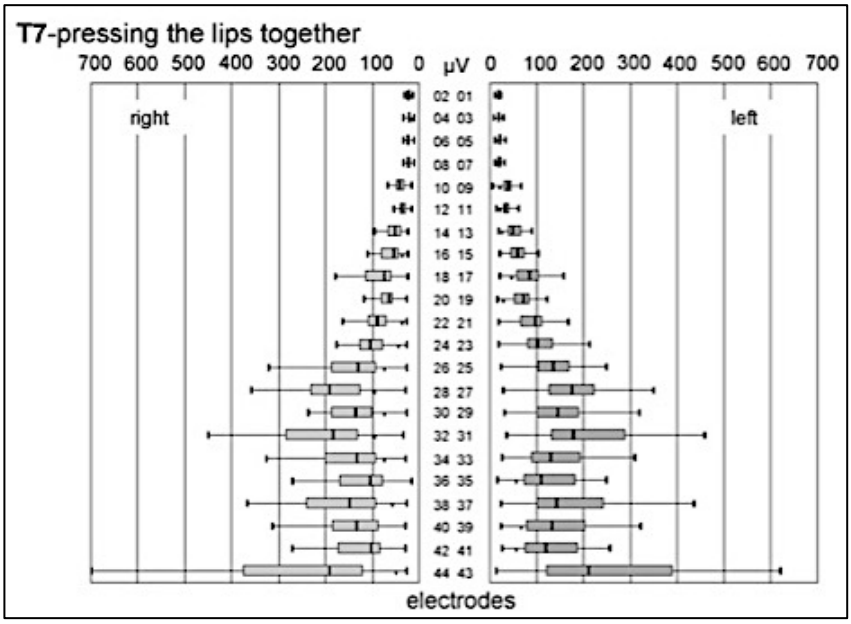


Figure 70 : recrutements musculaires péri-oraux obtenus par Schuman et al (2010) pour la compression labiale. Electrodes 25, 26, 27, 28 : OOS (droit et gauche). Electrodes 29, 30, 31, 32 : OOI. Electrodes 33, 34, 39, 40 : MENT. Electrodes 35, 36, 41, 42 : DLI.

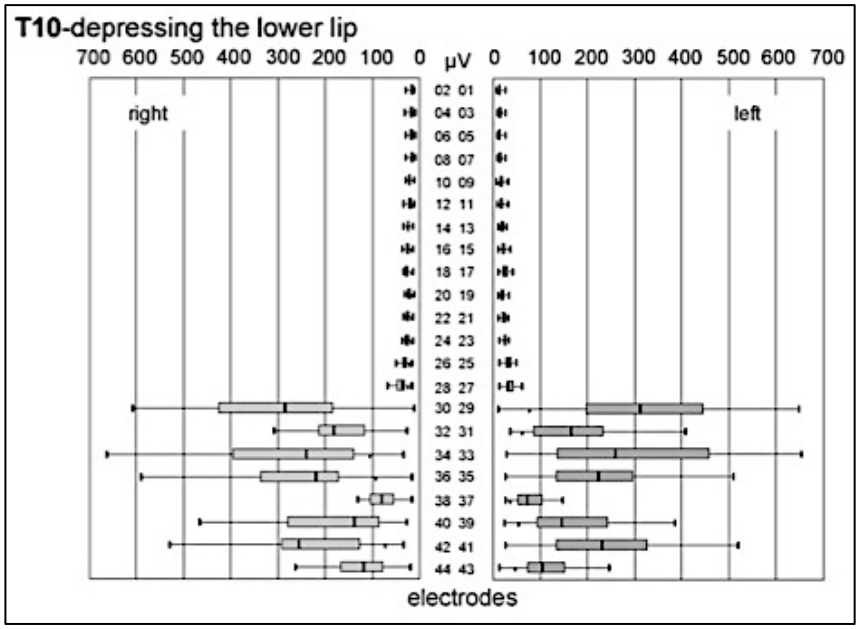


Figure 71 : recrutements musculaires péri-oraux obtenus par Schuman et al (2010) pour l'abaissement de la lèvre inférieure. Electrodes 25, 26, 27, 28 : OOS (droit et gauche). Electrodes 29, 30, 31, 32 : OOI. Electrodes 33, 34, 39, 40 : MENT. Electrodes 35, 36, 41, 42 : DLI.

Enfin, pour le contrôle musculaire de la vitesse d'ouverture des lèvres, comme pour la vitesse de fermeture ci-dessus, il semble y avoir deux stratégies :

- Le groupe G2 (composé d'un quart des sujets) ne montre aucune relation pertinente entre les descripteurs EMGs et la vitesse d'ouverture des lèvres. Pour ces sujets, l'ouverture des lèvres pourrait être un geste « balistique » relativement passif musculairement provenant d'une accumulation d'énergie dans le geste de compression et d'une accumulation de pression derrière l'occlusion labiale. Les paramètres aérodynamiques sont à ce moment là les meilleurs candidats pour expliquer de manière significative les variations de la vitesse d'ouverture.
- Les ¾ des sujets (groupe G1 et G3) utilisent 4 muscles en phase P4 du mouvement de production des occlusives labiales (DIG, MENT, DLI et OOI), et le muscle DIG en phase P1, pour contrôler la vitesse d'ouverture des lèvres. L'action significative des muscles DIG et DLI en phase P4 n'est pas surprenante : celle du DIG va dans le sens d'un mouvement non seulement labial mais aussi mandibulaire (la mandibule s'ouvre également lorsque l'occlusion labiale est relâchée) et celle du DLI dans celui d'un mouvement d'ouverture labiale classique. Les relations surprenantes observées entre les activités des muscles OOI et MENT en phase P4 et la vitesse d'ouverture labiale peuvent s'expliquer également selon les 2 hypothèses défendues un peu plus haut (coactivation et/ou contamination). En effet, les activités des muscles MENT et OOI en phase P4 corrèlent très fortement avec les activités des muscles DLI et DIG en phase P4 (RhoSpearman > 0.8). Les relations fortes qui sont observées entre l'activité du muscle DIG en phase P1 et la vitesse d'ouverture des lèvres peuvent s'expliquer par l'hypothèse de la cible virtuelle, proposée par Brunner et al (2011) et détaillée dans le CHAPITRE 5: plus l'activité du DIG est forte pour fermer la mandibule (et donc les lèvres), plus la cible virtuelle est haute (on imagine une absence de contact labial qui permet à la trajectoire des lèvres de se poursuivre), et donc plus la vitesse d'ouverture est importante.

4. Conclusion

En généralisant les résultats présentés dans l'article de Cattelain et al (2018) (ANNEXE 6), les données physiologiques, articulatoires et cinématiques acquises simultanément dans mes travaux de thèse ont permis de :

1- Décrire temporellement l'activation musculaire de chaque muscle péri-oral (Digastrique, Mentalis, Dépresseur de la Lèvre Inférieure, Orbicularis Oris Inférieur et Supérieur) au cours de la production d'un mouvement de parole, ici de production des consonnes occlusives du français.

2- Montrer l'intérêt d'une analyse temporelle plus détaillée de l'activité musculaire lors des consonnes occlusives.

3- Identifier des descripteurs musculaires corrélés de manière reproductible au degré de compression labiale. Ces descripteurs sont reproductibles d'un segment de parole à un autre et d'un locuteur à un autre. Il s'agit de l'activité du muscle OOS en phase P2 et l'activité du muscle DLI en phase P3.

Partie 4

Discussion et Conclusion

CHAPITRE 7

Discussion générale

1. Couplage entre les vitesses de fermeture et d'ouverture des occlusions
2. Le contrôle de la durée du bruit de plosion.
3. Peut-on contrôler indépendamment le Centre de Gravité Spectral et le Skewness du bruit de plosion ?
4. Le Kurtosis : un indice acoustique complexe, et difficilement interprétable.
5. Absence d'effet des paramètres laryngés
6. Le chuchotement : modification des relations de contrôle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion
7. Quel est l'effet de l'augmentation du débit de parole sur les relations physio-acoustiques ?
8. Notion d'efficacité et d'effort dans la production des consonnes occlusives
9. Bilan global et ouvertures scientifiques

Quelle que soit la situation de communication, un locuteur a pour objectif que son interlocuteur perçoive correctement l'ensemble des indices audibles et visibles qui lui permettront d'identifier et de discriminer les sons de parole produits et de comprendre l'énoncé. Le contrôle de ces indices est multi-paramétrique. Nous nous attacherons à comprendre et à discuter dans ce chapitre l'ensemble des relations que nous avons observés entre paramètres physiologiques et descripteurs acoustiques des bruits de plosion.

Ce chapitre propose de discuter différents grands axes du contrôle multi-paramétrique des indices acoustiques des bruits de plosion : le contrôle cinématique, le contrôle temporel, le contrôle des domaines spectraux. Dans un second temps, nous discuterons les effets des variables conditionnelles mode et débit sur l'ensemble des mécanismes de contrôle observés, ainsi que les effets individuels.
Enfin, nous terminerons cette discussion par des ouvertures scientifiques et limites permettant d'approfondir dans l'avenir les résultats présentés dans ce manuscrit de thèse.

1. Couplage entre les vitesses articulatoires de fermeture et d'ouverture

Plusieurs études ont montré que les vitesses des articulateurs linguaux et labiaux au moment du relâchement des occlusions consonantiques jouent un rôle majeur dans le contrôle des caractéristiques acoustiques des bruits (Stevens et al. 1999; Pelorson et al. 1997). Dans notre étude, nous nous attendions donc à observer en parole modale et en débit normal un effet fort des vitesses d'ouverture des lèvres et d'abaissement de la langue après l'occlusion sur le contrôle des indices du bruit de plosion, et notamment de l'intensité acoustique et de la durée du bruit de plosion. Nos résultats vont dans ce sens, mais peuvent être discutés avec intérêt car ils soulèvent des questions sous-jacentes de stratégies motrices.

Pour les consonnes labiales, nos résultats montrent que l'intensité acoustique du bruit de plosion et la durée du bruit de plosion sont étroitement reliées à la vitesse d'ouverture des lèvres (sections 2.1.1 et 2.1.5 du CHAPITRE 5, et ANNEXES 1.1 et 1.5) : plus la vitesse d'ouverture des lèvres est grande, plus l'intensité acoustique du bruit de plosion est élevée, et plus la durée du bruit de plosion est courte. Ces relations cinématiques-acoustiques ne sont pas influencées par les variables conditionnelles voisement et contexte vocalique, ce qui va dans le sens d'un contrôle.
En revanche, pour les consonnes linguales (/t/, /d/, /k/, /g/) :
- L'intensité du bruit de plosion est fortement reliée à la vitesse d'élévation de la langue (précédant l'occlusion), mais pas à la vitesse d'abaissement de la langue (cf. section 2.1.1 du CHAPITRE 5).
- La durée du bruit de plosion n'est pas reliée significativement aux vitesses de déplacement lingual (cf. section 2.1.5. du CHAPITRE 5)

On peut tout d'abord noter que le domaine de variation des vitesses d'abaissement lingual est très différent de celui des vitesses d'élévation (cf. Figure 49 dans le CHAPITRE 4) : il dépend beaucoup du contexte vocalique. Tandis que les distributions des vitesses d'élévation pré-tenue sont semblables d'une catégorie phonétique à une autre, les distributions des vitesses

d'abaissement post-tenue sont nettement moins variables et plus faibles pour les productions consonantiques linguales en contexte /i/ qu'en contexte /a/. En contexte /a/, les vitesses d'abaissement de la langue varient entre 0 et 25 cm/s (ce qui est similaire aux vitesses d'élévation de la langue), alors qu'en contexte /i/ elles ne varient que de 0 à 10 cm/s. Ce phénomène lié au contexte /i/ peut se comprendre au regard des phénomènes de coarticulation : pour produire un /i/ la langue doit être plus élevée que pour produire un /a/, ce qui induirait un déplacement plus rapide de l'articulateur lorsque la cible vocalique est plus loin du palais (cas du /a/) que lorsqu'elle est sensiblement proche (cas du /i/). De plus, la mesure de la vitesse tangentielle est réalisée sur l'ensemble des 4 bobines en moyennant les vitesses de chaque bobine, les positions des bobines sont plutôt antérieures que postérieures (contraintes de placement), ce qui peut aller dans le sens d'une mesure de la vitesse sensiblement faussées pour des mouvements de langue vers l'arrière de la cavité buccale (comme les mouvements de langue d'une occlusion apicale à la production d'un /i/). L'effet fort du contexte vocalique (et notamment du contexte /i/) sur la vitesse d'abaissement de la langue post-occlusion nous amène à penser qu'il n'est pas surprenant de ne pas observer dans nos résultats de relations pertinentes de contrôle entre la vitesse linguale post-occlusion et les indices acoustiques du bruit de plosion : le contexte vocalique masque les effets de cette vitesse.

Il reste néanmoins à proposer une hypothèse pouvant expliquer la présence d'un effet fort de la vitesse d'élévation linguale (pré-occlusion) dans le contrôle de l'intensité acoustique du bruit. Nous proposons de discuter le paradigme proposé par Fuchs et al (Fuchs et al., 2001), et défendu par Brunner et al (Brunner et al., 2011), selon lequel les vitesses d'élévation et d'abaissement de la langue sont couplées par le cadre d'une cible commune. L'idée serait que les deux vitesses de l'articulateur lingual (pré et post-occlusion) sont très corrélées par une liaison de cause à conséquence, et liées par une cible virtuelle dont la « hauteur » varie en fonction du lieu et de l'effort d'articulation (hyper- versus hypo- articulation, débit de parole). Cette hypothèse défend la possibilité que les paramètres cinématiques contribuant au contrôle moteur du contact langue-palais dans la production des consonnes linguales puissent être complétement expliqués par un unique paramètre de contrôle, qui est la position de la cible palatale. Les études antérieures sur cette hypothèse de « cible virtuelle palatale » (Fuchs et al., 2001 ; Brunner et al., 2011) s'intéressent principalement au profil de vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) et montrent que son asymétrie est liée au lieu d'articulation, et donc à la position de la cible sur palais.
La section 3 du CHAPITRE 4 met en évidence dans les analyses de mes travaux de thèse une absence de corrélation forte entre les deux vitesses linguales, ce qui peut être expliqué (comme ci-dessus) par l'effet de la voyelle /i/ sur les distributions des vitesses. Au vu des artefacts de mesure sur la vitesse d'abaissement de la langue post-occlusion liés au contexte vocalique, l'hypothèse de la cible expliquerait pourquoi les vitesses d'élévation de la langue pré-tenue peuvent être pertinentes dans le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion : la vitesse d'élévation de la langue, non contaminée par le contexte vocalique, serait une « image » de la vitesse d'abaissement linguale, entre autres cruciale pour la modélisation fonctionnelle du contrôle moteur du bruit de plosion.

Pour que nos résultats s'insèrent dans le cadre de l'hypothèse de la cible, il faut vérifier que l'effet de la vitesse d'abaissement de la langue est sensiblement cohérent avec l'effet de la

vitesse d'élévation de la langue, bien que forcément moins marqué pour la vitesse d'abaissement post-occlusion.

Pour les 4 cas (i.e. 4 paragraphes ci-dessous) où la vitesse d'élévation de la langue est un paramètre cinématique pertinent pour le contrôle d'un indice acoustique du bruit (parmi ces 4 situations, une seule présente également des relations pertinentes avec la vitesse d'abaissement de la langue), on regarde si les relations liant la vitesse post-occlusion aux variations de l'indice acoustique, au moins en contexte /a/, sont cohérentes avec l'hypothèse de cible (i.e. en terme d'ordre de grandeur et de signe, ce qui signifie que l'augmentation des deux vitesses a le même effet sur l'indice acoustique de sortie) :

- Le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en parole modale et débit normal :
  Pour les productions /pati/, /padi/, /paka/, /paga/, la vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion) s'avère pertinente pour le contrôle de l'intensité du bruit de plosion, les relations sont du même ordre de grandeur et du même signe que celles liant la vitesse d'élévation linguale à l'intensité (ANNEXE 1.1, tableaux 10 et 11).
- Le contrôle du Kurtosis du bruit de plosion en parole modale et débit normal :
  Pour les groupes de sujets G2 et G4, qui montrent des relations fortes de contrôle entre la vitesse d'abaissement de la langue et le Kurtosis du bruit de plosion, les relations pour cette vitesse sont complètement cohérentes avec les relations de contrôle « pertinentes » entre la vitesse d'élévation de la langue et le Kurtosis (cf. ANNEXE 1.4, tableaux 43 et 44) : relations du même signe, de pentes semblables en ordre de grandeur, et influencées de la même manière par les variables conditionnelles.
- Le contrôle de l'intensité du bruit de plosion en parole chuchotée et débit normal :
  Pour le contexte vocalique /a/, les relations de contrôle des vitesses d'élévation et d'abaissement de la langue sont du même ordre de grandeur, et de signe similaire (cf. ANNEXE 3.1, tableaux 10 et 11). Ce n'est pas le cas ici pour les relations en contexte /i/.
- Le contrôle de la durée du bruit de plosion en parole chuchotée et débit normal :
  Pour les deux contextes vocaliques, les relations de contrôle des vitesses d'élévation et d'abaissement de la langue sont du même ordre de grandeur, et de signe similaire (cf. ANNEXE 3.5, tableaux 54 et 55).

Étant donné les limites de notre mesure de la vitesse d'abaissement de la langue (post-tenue) et nos résultats sur le contrôle des intensités et des durées des bruits consonantiques, nos résultats pourraient s'expliquer par le paradigme de la cible palatale virtuelle. Le bilan serait donc double :

- Nos travaux iraient dans le sens de l'hypothèse de Fuchs et al (2001) et de Brunner et al (2011), ce qui pourrait laisser penser que nos données puissent être une piste d'approfondissement de leur paradigme.
- Cette hypothèse pourrait expliquer pourquoi la vitesse d'abaissement de la langue, contrairement aux connaissances générales sur le contrôle moteur de la variation des indices acoustiques des bruit de plosions, n'apparaît pas comme pertinent dans le contrôle de leur intensité acoustique et de leur durée.

2. Contrôle de la durée du bruit de plosion.

La durée du bruit de plosion est systématiquement corrélée à la durée de l'occlusion : en parole modale, quel que soit le débit, augmenter la durée de l'occlusion entraine une diminution significative de la durée du bruit de plosion.

Le premier aspect que nous pouvons critiquer dans ces résultats est l'aspect fortement dépendant de ces deux indices. En effet, durée d'occlusion et durée du bruit de plosion ont une « frontière commune » : l'instant du début du bruit. Il est donc possible de se demander si la pertinence de ces relations de contrôle tient réellement du contrôle moteur ou plutôt d'artefacts d'étiquetage des instants qui permettent le calcul des durées.

La cible virtuelle (cf. section 1 de ce chapitre) aide à expliquer le lien de contrôle mis en exergue par nos résultats entre les durées d'occlusion et durées du bruit de plosion : plus la durée de l'occlusion augmente et plus la hauteur de la cible augmente (i.e. la langue monterait plus haut si le palais n'était pas un obstacle, par exemple), et donc plus on relâche vite l'occlusion, ce qui entraine une diminution de la durée du bruit de plosion.

Dans ce sens, il serait cohérent que les vitesses des articulateurs aient un effet fort sur la durée du bruit de plosion (vitesse d'ouverture des lèvres pour les labiales, et vitesse d'élévation ou d'abaissement de la langue pour les linguales) : c'est le cas pour les labiales, mais pas pour les linguales, ce qui s'explique à nouveau par l'imprécision de la mesure de vitesse moyennée sur l'ensemble des 4 bobines.

3. Peut-on contrôler indépendamment le Centre de Gravité Spectral et le Skewness du bruit de plosion ?

Les indices de centre de gravité spectral et de Skewness du bruit de plosion informent tous les deux sur la quantité de basses et de hautes fréquences dans le spectre du bruit. Il est logique d'observer des effets de contrôle moteur contraire d'une variable acoustique à une autre : un paramètre qui fait augmenter systématiquement le CDG du bruit de plosion pourrait peut-être en pratique faire diminuer le Skewness. Le centre de gravité spectral transcrit une information de poids fréquentiel (le CDG est une médiane), alors que le Skewness est une mesure plus fine de l'asymétrie spectrale (Forrest et al., 1988).

Pour les consonnes labiales en parole modale, dont les spectres sont relativement plats, il ne ressort pas de nos résultats des relation pertinentes de contrôle du Centre de Gravité Spectral et du Skewness, ce qui est tout à fait conforme aux connaissances sur les caractérisations spectrales des bruits de plosion bilabiales.

En revanche, pour les consonnes linguales en parole modale, il est intéressant d'observer que le Skewness est contrôlé de manière forte et systématique par la position en X de la bobine collée sur l'apex de la langue. Cette relation, invariante selon les catégories phonétiques et les groupes de sujets, va dans le sens de l'effet antériorisation-postériorisation : plus le lieu

d'articulation est antérieur et plus le Skewness est petit. A contrario, évidemment, plus le lieu d'articulation est postérieur et plus le Skewness est élevé (cf. Tableau 30 de l'ANNEXE 1).
Le Skewness étant une mesure spectrale plus fine que le CDG, il est plutôt rassurant d'observer une relation forte de contrôle moteur au niveau du Skewness et non du CDG plutôt que l'inverse. Néanmoins, il est légitime de se demander pourquoi aucun paramètre cinématique et articulatoire des déplacements de la langue ne contrôle significativement le CDG du bruit de plosion. Le Tableau 19 de l'ANNEXE 1 montre que la position en X de l'apex de la langue est pertinente (i.e. seuil de pente subjectif à 0.1) pour expliquer les variations du CDG uniquement dans le cas de la production des logatomes /pada/ et /paga/. Les relations de contrôle pour les deux logatomes sont de même nature : reculer la langue dans la cavité buccale entraine une diminution du centre de gravité spectral. Si l'on revient sur la valeur du seuil subjectif considéré dans mes travaux de thèse, consistant à ne pas considérer comme intéressante les relations dont les pentes sont en valeurs absolues plus petites que 0.1, on peut observer le Tableau 20:

<table>
<tr><td colspan="3">Xapex ↑0.1cm
(moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)</td><td>Tous les sujets</td></tr>
<tr><td colspan="3">Labiales</td><td>pas définie</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Apicales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td>↓ 72.4 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↓ ~15Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2">sourdes</td><td>↓ ~15Hz</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Vélaires</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td>↓ 72.4 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↓ ~15Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2">sourdes</td><td>↓ ~15Hz</td></tr>
</table>

Tableau 20 : ensemble des relations liant le CDG du bruit de plosion à la position en X de la bobine collée sur l'apex de la langue. Les relations pertinentes sont en noires, i.e. seuil de 0.1 sur les pentes zscore. Les relations en gris sont les relations dites « non pertinentes » dans ces travaux de thèse.

Bien que présentant des pentes peu élevées, les relations dans le cas de la production des consonnes sourdes et des consonnes voisées en contexte /i/ entre la position de l'apex de la langue et le CDG vont également dans le sens d'un effet antérieur-postérieur sur la distribution fréquentielle du spectre.
Le contexte vocalique n'influence pas la relation de contrôle liant la coordonnée Xapex au Skewness, mais pour les consonnes voisées elle influence les relations liant Xapex au CDG. La position linguale du /a/ étant antérieure à la position du /i/, il est totalement cohérent d'observer que la position en X de la langue influence plus le CDG dans le cas où un /a/ suit la consonne que dans le cas où il s'agira d'une voyelle /i/.

Ainsi, en parole modale, il semble que le paramètre de contrôle qui explique le mieux la variation des deux indices fréquentiels CDG et Skewness du bruit soit la position de l'apex de la langue sur l'axe antérieur-postérieur. Cette relation globale appuie la possibilité de décrire les consonnes occlusives par leur fréquence : basses fréquences versus hautes fréquences.

4. Le Kurtosis : un indice acoustique complexe, et difficilement interprétable.

Le moment spectral d'ordre 4 du bruit, également nommé Kurtosis, est un indice qui décrit le caractère pointu/piqué, versus aplatie, d'un spectre. Théoriquement, en assimilant les spectres consonantiques à des sortes de gaussiennes, le Kurtosis du bruit de plosion doit être plus élevé pour les consonnes vélaires que pour les consonnes apicales (Forrest et al., 1988). En pratique, l'étude de DeCarlo (1997) montre qu'il est très difficile d'interpréter les Kurtosis en parole, et ce à cause des queues de distributions qui influencent beaucoup les relations entre la variable acoustique et la nature du pic spectral : plus la queue de la gaussienne est épaisse (i.e. plus il y a de fréquences extrêmes) et plus l'effet du Kurtosis s'inverse. De là, il semble logique de penser que l'écart-type des fréquences (élevé dans le cas des spectres des consonnes) dégrade l'interprétation du Kurtosis.
Dans mes résultats de thèse, nous mettons en évidence une relation de contrôle mono-paramétrique du Kurtosis en parole modale faisant intervenir la vitesse tangentielle de déplacement lingual.

5. Absence d'effet des paramètres laryngés

Dans mes travaux de thèse, aucune relation liant les variations des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion aux variations des paramètres laryngés ne ressort comme étant pertinente. On peut se questionner quant à la fiabilité et à la robustesse de notre mesure et envisager d'approfondir cette partie de l'étude ultérieurement.

6. Le chuchotement : modification des relations de contrôle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion

À la différence de la parole modale, en chuchoté les vitesses linguales ont un effet sur la durée du bruit de plosion (avec une influence systématique du contexte vocalique, influence qui est en adéquation avec la section 1 de ce chapitre - voir section 2.3.5 du CHAPITRE 5). Les relations entre la pression intra-orale et l'intensité du bruit de plosion sont plus fortes (i.e. pentes plus élevées) pour les productions chuchotées que pour les productions modales (section 2.3.1 du CHAPITRE 5,), ce qui va également dans le sens d'une compensation de l'absence de voisement (physiologique).

Dans leurs différents travaux sur la réalisation du trait de voisement en parole chuchotée, Meynadier et al (2013, 2016) montrent que les caractéristiques physiologique, aérodynamique, articulatoire, et la perception des consonnes occlusives chuchotées sont davantage impactées pour les occlusives voisées que non voisées (Meynadier and Gaydina, 2013 ; Meynadier and Dufour, 2016). De là, il serait attendu d'observer des relations de contrôle fortement différentes pour les consonnes voisées d'un mode à un autre. Dans nos

résultats, il n'y a pas d'effet plus marqué des paramètres de contrôle sur les indices acoustiques du bruit de plosion pour les consonnes voisées que pour les consonnes sourdes.
En particulier, deux résultats peuvent remettre en question nos mesures dans le cadre du chuchotement :
- Il apparaît en parole chuchotée des effets des vitesses de déplacement des lèvres sur les paramètres spectraux (CDG et Skewness, cf. sections 2.3.2 et 2.3.3 du CHAPITRE 5), ce qui n'est théoriquement pas possible du fait de la platitude du spectre des consonnes labiale. Ces relations ne peuvent s'expliquer que par le caractère plat du spectre lui-même, certainement « trop plat » en parole chuchotée. Des petites variations de contrôle peuvent s'avérer pertinentes alors qu'elles ne le sont pas du tout en parole modale.
- La durée d'occlusion n'est plus fortement liée en parole chuchotée à la durée et à l'intensité du bruit de plosion (cf. sections 2.3.1 et 2.3.5 du CHAPITRE 5). La détection de l'instant de début d'occlusion, basée sur l'intensité acoustique et présenté dans le chapitre 3, est forcément très sensible à une diminution du niveau globale d'intensité acoustique, ce qui est le cas en parole chuchotée. Il est donc logique de penser que la durée d'occlusion n'est plus un paramètre pertinent de contrôle en parole chuchotée.

7. Quel est l'effet de l'augmentation du débit de parole sur les relations physio-acoustiques ?

Dans la base de données, la tâche de production en débit de parole rapide n'inclue pas de variations d'effort articulatoire auto-évalué. La production rapide diminue le domaine de variation des paramètres aérodynamiques, articulatoires et cinématiques : les productions sont plus saccadées, la pression intra-orale reste faible, la compression reste incomplète, les vitesses augmentent de manière non-linéaires. La qualité des indices acoustiques est également dégradée : sur des trains de logatomes à débit rapide il n'y a parfois pas de bruit de plosion ou de transition formantique (ou dégradés). Il est donc cohérent que la plupart des relations de contrôle qui était pertinentes en débit normal ne le soient plus en débit rapide. Les relations de contrôle qui ne sont pas robustes à l'augmentation du débit font penser qu'il existe des stratégies sous-jacentes au contrôle mono-paramétrique mettant en jeu des combinaisons de paramètres agencés de manière à contrôler efficacement les indices spectraux et temporels des bruits de plosion.
Nous pouvons observer, pour aller dans le sens de l'hypothèse de la diminution des domaines de variation des paramètres, que les relations pertinentes de contrôle robustes à l'augmentation du débit de parole sont justement celles mettant en jeu les vitesses des articulateurs : relations systématiquement fortes entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion en parole modale, sans influence des variables conditionnelles, et relations systématiquement fortes entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (section 2.2 du CHAPITRE 5). Ces résultats vont également dans le sens des résultats de Sock and Löfqvist (1995) qui observaient que les paramètres cinématiques de la production des occlusives ne sont pas influencés par la variation du débit de parole.

8. Notion d'efficacité et d'effort dans la production des consonnes occlusives

Une des particularités intéressantes de notre étude est qu'elle permet d'explorer pour chaque indice acoustique l'existence de stratégies individuelles de contrôle, ou d'une stratégie globale commune à tous les sujets ?

Dans le cadre de stratégies générales, nous pouvons discuter de l'efficacité et de l'effort relatifs que chaque groupe de sujet va mettre en place pour contrôler les indices acoustiques, le but étant toujours que ces derniers soient perçus correctement, quelles que soient les conditions expérimentales (effort, débit, mode). Une perspective à mes travaux de thèse serait d'ailleurs de réaliser des tests perceptifs afin d'étudier le lien entre perception des indices et efficacité/effort requis.
En parole modale, pour les consonnes labiales, on peut par exemple dire (cf. sections 2.1.1.3 et 2.1.5.3 du CHAPITRE 5) que :
- Les sujets 1, 2, 3, 5, 9 et 11 jouent principalement sur la pression intra-orale pour contrôler l'augmentation de l'intensité acoustique du bruit de plosion et sur les vitesses des articulateurs pour contrôler la diminution de la durée du bruit de plosion.
- Les sujets 4, 6, et 10 jouent sur l'ensemble des paramètres (Pio, vitesses des articulateurs, degré de compression labiale) pour augmenter l'intensité du bruit de plosion et sur les vitesses des articulateurs pour contrôler la diminution de la durée du bruit de plosion.
- Le sujet 8 joue sur l'ensemble des paramètres (Pio, vitesses des articulateurs, degré de compression labiale) pour augmenter l'intensité du bruit de plosion et principalement sur la durée d'occlusion pour diminuer la durée du bruit de plosion.
- Les sujets 7 et 12 jouent principalement sur les vitesses articulatoires pour augmenter l'intensité du bruit de plosion et diminuer sa durée.

De la même manière, en parole modale, pour les consonnes linguales, on peut dire (cf. sections 2.1.1.3 et 2.1.5.3 du CHAPITRE 5) :
- L'ensemble des sujets joue de la même manière sur la durée d'occlusion pour diminuer la durée du bruit de plosion.
- Les sujets 4, 6, et 10 jouent sur tous les paramètres pour augmenter l'intensité acoustique du bruit de plosion.
- Les sujets 7 et 12 jouent principalement sur la pression intra-orale et la durée d'occlusion pour contrôler l'intensité du bruit de plosion
- Les sujets 1, 2, 3, 5, 8, 9, et 11 jouent principalement sur la pression intra-orale.

En s'aidant du Tableau 8 et du Tableau 10 dans le CHAPITRE 5, on peut avancer par exemple que pour obtenir une même intensité acoustique en prononçant un /lapa/, les sujets 4, 6, et 10 « fourniront » moins de pression intra-orale que les sujets 7 et 12. Ces deux derniers vont donc faire plus d'efforts respiratoires.
Certains sujets sont donc plus efficaces que d'autre pour contrôler de manière aérodynamique, articulatoire, et cinématique l'intensité et la durée des bruits de plosion. Une analyse comme celle proposée dans ces travaux de thèse permet donc de mettre en perspective ce type de caractéristiques motrices. Une description fine des différences d'efficacité dans le contrôle des indices acoustiques pourrait s'avérer cruciale dans une étude

sur les stratégies de contrôle fonctionnelles en parole pathologique (type bégaiement, parkinson) : l'hypothèse étant que pour obtenir un même résultat acoustique au niveau perceptif, une personne qui bégaie (par exemple) doit fournir un niveau d'effort plus élevé aux niveaux respiratoires, laryngés et articulatoires ainsi qu'au niveau de l'activité musculaire sous-jacentes à ces gestes de production (cf. CHAPITRE 6).

Une piste pour poursuivre cette analyse serait d'observer les tendances de contrôle homogènes au sein d'un même groupe de sujet, en raisonnant en multi-paramétrique dans les modélisations. On pourrait imaginer que deux groupes de sujets puissent utiliser de manière pertinente le même paramètre pour contrôler un indice acoustique, mais avec un poids différent. Ils utiliseraient alors d'autres paramètres pour compenser l'effet du premier et obtenir un résultat similaire en sortie. Cette étude plus complexe des mécanismes fins de contrôle serait intéressante pour affiner la modélisation fonctionnelle de la production des consonnes occlusives.

9. Bilan global et ouvertures scientifiques

Le point fort des résultats présentés dans ces travaux de thèse est qu'ils permettent de généraliser à un ensemble de locuteur des stratégies de contrôle des caractéristiques acoustiques des bruits de plosion. De plus, en répondant aux questions posées dans l'introduction de ce manuscrit et en s'appuyant sur les tableaux présentés en ANNEXE, nous sommes en mesure de quantifier les relations entre paramètres aérodynamiques, articulatoires et caractéristiques acoustiques des bruits de plosion.
La Figure 72 fait le bilan des relations que l'on observe dans nos résultats, en parole modale à débit normal (les autres modes de productions s'appuient sur ce modèle, avec les spécificités discutées plus haut dans ce chapitre). On peut commenter ce modèle générique de la manière suivante :

- Pour augmenter l'intensité acoustique du bruit, les locuteurs semblent jouer sur 5 paramètres de contrôle principaux : les paramètres de l'articulation labiale pour la production des consonnes occlusives labiales, la vitesse de déplacement de la langue pour les consonnes occlusives palatales et de manière générale la pression intra-orale et la durée de l'occlusion. La durée d'occlusion, coordonnée par l'ensemble des paramètres physiques, est la seule dont la relation avec l'intensité est influencée par le lieu d'articulation.
- Pour diminuer ou augmenter la durée du bruit, les locuteurs semblent pouvoir jouer sur 2 paramètres : sur la durée de l'occlusion, résultante d'une coordination de paramètres physiologiques, et pour les consonnes occlusives labiales sur la vitesse de déplacement des lèvres.
- Les paramètres physiologiques de notre base de données n'ont pas montré de corrélation significative avec le Kurtosis du bruit.
- Enfin, pour diminuer le centre de gravité spectral du bruit de plosion, ou augmenter son Skewness (i.e. rendre plus ou moins aigu le spectre du bruit), les locuteurs semblent jouer sur la position antérieure-postérieure de l'apex de la langue.

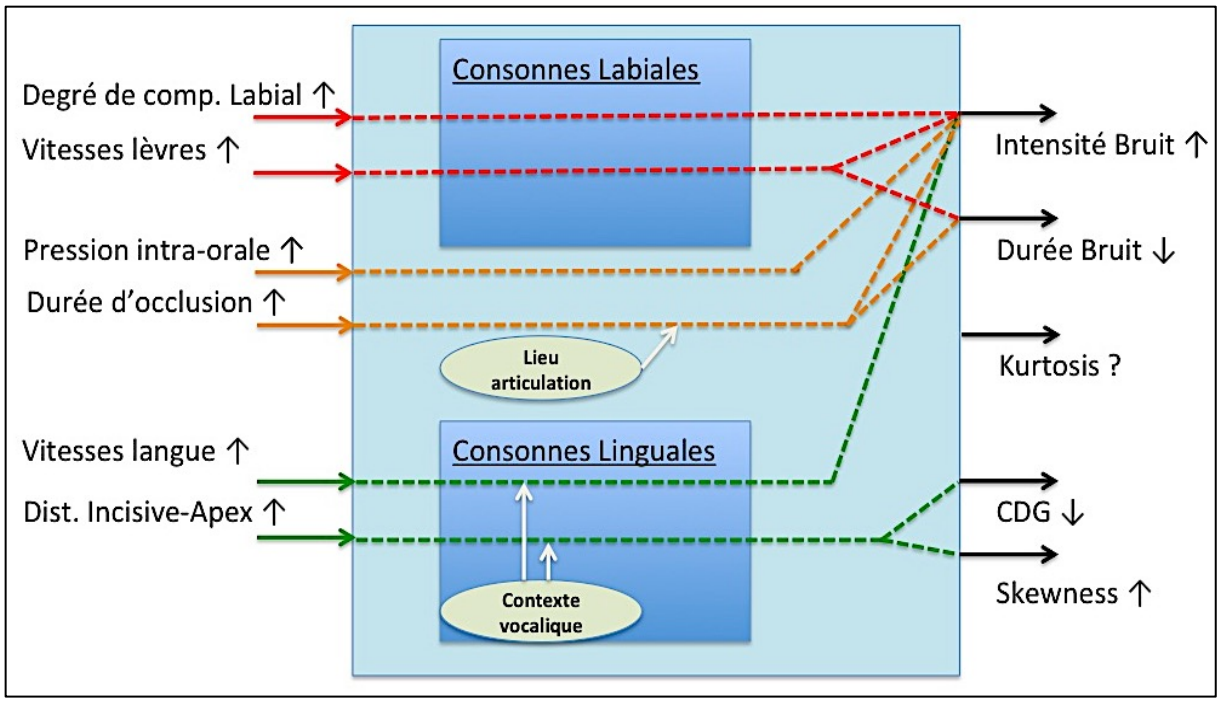


Figure 72 : Synthèse fonctionnelle et générale des relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion (parole modale, débit normal). Les flèches blanches représentent la présence d'influences des variables expérimentales sur les relations de contrôle.

Certaines ouvertures scientifiques et limites de notre travail peuvent être à considérer

- D'un point de vue méthodologique, certains aspects seraient importants à reconsidérer dans l'acquisition d'une base de données multi-paramétriques pour l'étude de la production des consonnes.
  - La notion d'effort articulatoire me semble importante, mais il sera pertinent de la contrôler davantage (à l'aide d'un feedback sur un des paramètres par exemple), dans l'idée de pouvoir l'inclure comme variable conditionnelle et expérimentale.
  - Il serait intéressant d'étiqueter, ou d'extraire automatiquement à l'aide de méthodes de machine learning, l'indice de Voice Onset Time (VOT, cf. CHAPITRE 1), et les transitions formantiques. Le VOT, très étudié par ailleurs, est un descripteur acoustique crucial et discriminant des consonnes occlusives du français. Ainsi, affiner nos connaissances sur son contrôle pourrait s'avérer pertinent dans une étude similaire à celle menée au cours de mes travaux de thèse.
  - Pour une plus grande précision dans la mesure de la vitesse tangentielle de la langue, il serait intéressant de calculer la vitesse à des points de chair de la langue différents selon le lieu d'articulation consonantique.
  - Un travail d'approfondissement pourrait être mené sur les descripteurs laryngés : ils devraient être mesurés sur la phase d'occlusion, et surtout ils seraient intéressants en lien avec le VOT.
- Les données de ma thèse, tout comme les résultats, forment une base de données complète qui peut être utilisée dans l'avenir pour étudier d'autres problématiques scientifiques sur le contrôle moteur de la production des consonnes occlusives du français.
- Les méthodologies d'acquisition de données et d'analyses de mes travaux de thèse peuvent être utilisées à nouveau pour étudier le contrôle dysfonctionnel dans le cas de la parole pathologique (type bégaiement, dysarthrie parkinsonienne, etc).

CONCLUSION GÉNÉRALE

1. Apports et principaux résultats de la thèse

1.1. Apports méthodologiques

Dans l'ensemble du travail réalisé au cours de cette thèse, l'accent a été mis sur l'instrumentation scientifique et l'acquisition de données (acoustiques et physiologiques). Ainsi, la première moitié de la thèse a été consacrée au développement et l'implémentation de différentes méthodes de mesure de l'effort articulatoire (cinématique du mouvement, force statique, activités musculaires). Nous avons en particulier exploré en détail les patrons d'activation de plusieurs muscles péri-oraux (Digastrique, Mentalis, Dépresseur de la Lèvre Inférieure, Orbicularis Oris Inférieur et Supérieur) lors de la production d'occlusives bilabiales et montré l'intérêt d'une analyse temporelle détaillée de ces activités musculaires.
Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons pu acquérir une base de données acoustiques et physiologiques (Mouvements labiaux, Pio, Contact glottique, activités musculaires orofaciales) de consonnes occlusives du français produites par 20 locuteurs adultes sans trouble de la parole, avec plusieurs niveaux d'effort vocal, plusieurs modes de phonation (chuchoté, modal), deux débits de parole, et plusieurs contextes vocaliques. Les productions de 12 d'entre eux ont été annotées et analysées au cours de ma thèse.
Un travail de fond a également été réalisé sur la méthodologie statistique. En effet, l'utilisation des techniques de partitionnement récursif n'est pas classique dans le domaine de la parole pour examiner la corrélation entre paramètres. Nous avons implémenté ces techniques au cours de l'analyse statistique de mes données de thèse, et montré leur intérêt dans le cadre de la modélisation fonctionnelle. Dans le cas d'études multi-paramétriques complexes, elles sont plus simples à implémenter et à utiliser que les méthodes classiques de modèles linéaires mixtes.

1.2. Apports théoriques

L'analyse de cette base de données a permis de confirmer certaines relations déjà établies par des études antérieures de la production de consonnes occlusives en parole conversationnelle (qualité modale, débit de parole moyen, effort vocal moyen) entre différents paramètres (aréodynamiques, glottiques, articulatoires):

- L'intensité acoustique du bruit de plosion et le maximum de Pression Intra-Orale pour l'ensemble des consonnes
- L'intensité acoustique du bruit de plosion et la vitesse d'ouverture des lèvres pour les consonnes labiales.
- Le Skewness du bruit de plosion et la position de l'apex de la langue (Xapex) pour les consonnes palatales.

- Le Kurtosis du bruit de plosion et la vitesse tangentielle d'élévation de la langue pour les consonnes palatales.
- La durée du bruit de plosion et les vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres pour les consonnes labiales.

D'autres relations (plus nouvelles, jamais explorées ou contraires à la littérature) ont été observées en parole normale (sur tous les locuteurs)

- entre différents paramètres (aréodynamiques, glottiques, articulatoires) :
  L'intensité acoustique du bruit de plosion et la durée d'occlusion, le degré de compression labiale et la vitesse de fermeture des lèvres pour les consonnes labiales, et la vitesse tangentielle du mouvement d'élévation de la langue pour les consonnes palatales.
- entre activités musculaires et descripteurs cinématiques :
  Nous avons pu dans ces travaux de thèse identifier des descripteurs musculaires corrélés de manière reproductible au degré de compression labiale. Ces descripteurs sont reproductibles d'un segment de parole à un autre et d'un locuteur à un autre. Il s'agit de l'activité du muscle OOS en phase P2 et l'activité du muscle DLI en phase P3.

Ces relations évoluent en fonction :

- de la qualité vocale : Le passage en qualité de production chuchotée modifie les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion, en mettant l'accent sur l'utilisation de paramètres cinématiques au détriment des paramètres aérodynamiques, articulatoires et temporels.
- du débit de parole : L'augmentation du débit de parole a pour effet de modifoer les relations pertinentes pour le contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion: la plupart des paramètres perdent avec le débit leur efficacité de contrôle.

Ces différents résultats apportent des éléments de réponse à nos questions initiales :
Quels paramètres physiologiques sont corrélés et ne peuvent que co-varier ? Lesquels peuvent être contrôlés et variés indépendamment ?
La section 4 du CHAPITRE 4 présente les paramètres physiologiques redondants et corrélés. Le Tableau 21 synthétise ces résultats.

Corrélations élévées				**Descripteurs redondants (i.e "éliminés")**			
		MODE				MODE	
		modal	chuchoté			modal	chuchoté
Débit	normal	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.54] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.83]	• Vit. Ferm. Lèvres <-> Vit. Ouv. Lèvres [R2 = -0.54] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.6] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.77]	Débit	normal	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-	Vit. Ferm. Lèvres Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-
	rapide	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.58] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.77]	• Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)+ [R2 = 0.59] • Max(Pio) <-> Dérivée(Pio)- [R2 = -0.73] • Vit. Elev. Langue <-> Delta_OQ [R2 = -0.57]		rapide	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)-	Dérivée(Pio)+ Dérivée(Pio)- Vit. Abais. Langue

Tableau 21: paramètres corrélés et/ou redondants (extrait du CHAPITRE 5)

Quelles relations entre descripteurs physiologiques et acoustiques sont universelles, lesquelles témoignent de stratégies individuelles ?
L'ensemble des relations principales décrites dans les résultats de ma thèse (et synthétisées ci-dessus) semblent « universelles », i.e. ne pas témoigner de stratégies individuelles. En revanche, les résultats complets présentés en ANNEXES permettent de mettre en lumière de nombreuses stratégies individuelles (non détaillées dans ce document).

Quel degré de variabilité acoustique et physiologique est observé au sein de chaque catégorie phonétique (/p/, /b/, /t/, /d/, /k/, g/), en fonction de l'effort vocal, du mode de phonation (modal, chuchoté), du débit de parole ?
Le CHAPITRE 4 présente l'influence de l'effort, du mode de phonation et du débit parole, selon la catégorie phonétique, sur les descripteurs acoustiques et physiologiques.
De manière purement synthétique, on pourra résumer ici :
- le débit de parole et le mode de phonation influence significativement les ordres de grandeurs et les domaines de variation des descripteurs, ainsi que les relations inter-descripteurs.
- l'effort articulatoire non-contrôlé ne semble influencer que le domaine de variation des descripteurs.

Enfin quels muscles orofaciaux contrôlent l'amplitude et la force des mouvements labiaux de production des occlusives bilabiales, avec quelle coordination temporelle?
De manière « universelle » (i.e. non-dépendant du groupe de sujet considéré), l'activité du muscle OOS en phase P2 et l'activité du muscle DLI en phase P3 contrôle le degré de compression labial, en amplitude.
Les muscles orofaciaux contrôlant les vitesses de fermeture et d'ouverture des lèvres dépendant des groupes de sujets (cf. détails des résultats dans le CHAPITRE 6).

2. Limites

Un certain nombre d'aspects méthodologiques de mes travaux de thèse apparaissent comme des limites évidentes de notre étude :
- L'effort articulatoire ressenti pourrait être contrôlé à l'aide d'un outil de « feedback » en temps-réel, permettant alors d'étudier statistiquement l'effet de l'effort sur l'ensemble des relations de contrôle des descripteurs acoustiques des bruits de plosion des consonnes occlusives.
- La mesure de la Pio pourrait être rigoureuse en étant faite par le conduit nasal, et serait alors fiable même pour les consonnes palatales et vélaires.
- Les vitesses articulatoires linguales pourraient être mesurées à l'apex et au dos de la langue, ce qui permettrait de rendre la mesure non-dépendante du lieu d'articulation.

3. Perspectives

Quelques perspectives sont à envisager pour poursuivre ces travaux scientifiques et préciser l'ensemble de nos résultats théoriques :

- Réaliser des ANOVAs pour valider ou invalider la significativité des résultats descriptifs détaillés dans le CHAPITRE 4.
- Extraire les indices de VOT et les transitions formantiques, et en étudier les relations de contrôle.
- Approfondir et préciser la mesure des paramètres laryngés, afin d'expliciter des relations de contrôle les mettant en jeu.
- Rendre accessible cette base de données physio-acoustiques à la communauté (notamment en terminant les annotations des sujets manquants et en mettant en forme la base de données).

Il est également envisagé d'écrire un article de revue présentant la base de données, les techniques d'acquisition et d'analyses statistiques développées, ainsi que les résultats principaux de ces travaux de thèse.

A la suite de ces travaux de thèse, une méthodologie robuste d'acquisition et de traitement de données peut être maintenant utilisée dans les autres études du projet StopNCo, notamment dans le but d'étudier le contrôle dysfonctionnel de la production des consonnes occlusives et de la coordination des gestes dans le cas de la parole pathologique (bégaiement, dysarthrie parkinsonienne, …) et le développement dudit contrôle chez l'enfant

Bibliographie

Abdelli-Beruh, N.B., 2004. The Stop Voicing Contrast in French Sentences: Contextual Sensitivity of Vowel Duration, Closure Duration, Voice Onset Time, Stop Release and Closure Voicing. Phonetica 61, 201–219. https://doi.org/10.1159/000084158

Abry, C., and Bo, L.-J. (1986). "Laws" for Lips, Speech Communication 5 (1986) 97-104

Acher, A., Perrier, P., Savariaux, C., and Fougeron, C. (2014). Speech production after glossectomy: methodological aspects. *Clinical linguistics & phonetics*, *28*(4), 241-256

Adrian, E.D., and Bronk, D.W. (1929). The discharge of impulses in motor nerve fibres: Part II. The frequency of discharge in reflex and voluntary contractions. The Journal of Physiology *67*, 9–151.

Alipour, F., Jaiswal, S., 2009. Glottal airflow resistance in excised pig, sheep, and cow larynges. J. Voice 23, 40–50.

Alipour, F., Scherer, R., Finnegan, E., 1997. Pressure-flow relationships during phonation as a function of adduction. NCVS Status Prog. Rep. 41.

Arkebauer, H.J., Hixon, T.J., Hardy, J.C., 1967. Peak intraoral air pressures during speech. J. Speech Lang. Hear. Res. 10, 196–208.

Barney, A., De Stefano, A., Henrich, N., 2007. The effect of glottal opening on the acoustic response of the vocal tract. Acta Acust. United Acust. 93, 1046–1056.

Beck, T.W., Housh, T.J., Cramer, J.T., and Weir, J.P. (2008). The effects of electrode placement and innervation zone location on the electromyographic amplitude and mean power frequency versus isometric torque relationships for the vastus lateralis muscle. Journal of Electromyography and Kinesiology *18*, 317–328.

Belasco, S., 1953. The influence of force of articulation of consonants on vowel duration. J. Acoust. Soc. Am. 25, 1015–1016.

Benoît, C., Lallouache, T., Mohamadi, T., and Abry, C. A set of French visemes for visual speech synthesis. 20.

Bhowmik, S., Jelfs, B., Arjunan, S.P., and Kumar, D.K. (2017). Outlier removal in facial surface electromyography through Hampel filtering technique. In 2017 IEEE Life Sciences Conference (LSC), (Sydney, Australia: IEEE), pp. 258–261.

C Blair, and Smith, A. (1986). EMG recording in human lip muscles : can single muscles be isolated ? *29*, 256–266.

Blanton, P.L., Biggs, N.L., and Perkins, R.C. (1970). Electromyographic Analysis of the Buccinator Muscle. Journal of Dental Research *49*, 389–394.

Boe, L.J., 1973. Etude acoustique de couplage larynx-conduit vocal. Rev. Acoust. 27, 235–244.

Brand, R., Isselhard, D., and Satin, E. (2013). Anatomy of orofacial structures : a comprehensive approach.

Brunner, J., Ghosh, S., Hoole, P., Matthies, M., Tiede, M., and Perkell, J. (2011). The influence of auditory acuity on acoustic variability and the use of motor equivalence during adaptation to a perturbation. Journal of Speech, Language, and Hearing Research.

Buchthal, F., Guld, C., and Rosenfalck, P. (1957). Multielectrode study of the territory of a motor unit. In Acta Physiologica Scandinavica, pp. 83–104.

Cacioppo, J.T., Petty, R.E., and Kim, H.S. Electromyographic Activity Over Facial Muscle Regions Can Differentiate the Valence and Intensity of Affective Reactions. 9.

Cacou, C., Greenfield, B.E., Hunt, N.P., and McGrouther, D.A. Patterns of coordinated lower facial musclefunction and their importance in facial reanimation. 7.

Campanini, I., Merlo, A., Degola, P., Merletti, R., Vezzosi, G., and Farina, D. (2007). Effect of electrode location on EMG signal envelope in leg muscles during gait. Journal of Electromyography and Kinesiology *17*, 515–526.

Cattaneo, L., and Pavesi, G. (2014). The facial motor system. Neuroscience & Biobehavioral Reviews *38*, 135–159.

Chen, F.R., 1980. Acoustic characteristics and intelligibility of clear and conversational speech at the segmental level (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Chodroff, E., Wilson, C., 2014. Burst spectrum as a cue for the stop voicing contrast in American English. J. Acoust. Soc. Am. 136, 2762–2772.

Choo, A.L. (2008). An electromyographic examination of lip asymmetry during speech and non-speech oral movements in adults who stutter.

Crystal, T.H., House, A.S., 1988. A note on the durations of fricatives in American English. J. Acoust. Soc. Am. 84, 1932–1935. https://doi.org/10.1121/1.397160

DeCarlo, L.T., n.d. On the Meaning and Use of Kurtosis 16.

Delattre, P., 1962. Some Factors of Vowel Duration and Their Cross-Linguistic Validity. J. Acoust. Soc. Am. 34, 1141–1143. https://doi.org/10.1121/1.1918268

Delattre, P.C., Liberman, A.M., Cooper, F.S., 1955. Acoustic Loci and Transitional Cues for Consonants 6.

Delebecque, L., Pelorson, X., Beautemps, D., Laval, X., 2014. Modélisation physique de la production de séquences voyelle-plosive-voyelle, in: 12eme Congres Français d'Acoustique (CFA 2014).

Duchenne, G.-B. (1862). Album de photographies pathologiques: complémentaire du livre intitulé De l'électrisation localisée (J.-B. Baillière et fils).

Ekman, P., and Friesen, W.V. (1976). Measuring facial movement. Environmental Psychology and Nonverbal Behavior *1*, 56–75.

Eskes, M., van Alphen, M.J.A., Balm, A.J.M., Smeele, L.E., Brandsma, D., and van der Heijden, F. (2017a). Predicting 3D lip shapes using facial surface EMG. PLOS ONE *12*, e0175025.

Eskes, M., van Alphen, M.J.A., Smeele, L.E., Brandsma, D., Balm, A.J.M., and van der Heijden, F. (2017b). Predicting 3D lip movement using facial sEMG: a first step towards estimating functional and aesthetic outcome of oral cancer surgery. Medical & Biological Engineering & Computing *55*, 573–583.

Eskes, M., Balm, A.J.M., van Alphen, M.J.A., Smeele, L.E., Stavness, I., and van der Heijden, F. (2018). Simulation of facial expressions using person-specific sEMG signals controlling a biomechanical face model. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery *13*, 47–59.

Fant, G., 1960. Acoustic Theory of Speech Production, Mouton, The Hague.

Farina, D., Fevotte, C., Doncarli, C., and Merletti, R. (2004). Blind Separation of Linear Instantaneous Mixtures of Nonstationary Surface Myoelectric Signals. IEEE Transactions on Biomedical Engineering *51*, 1555–1567.

Finsterer, J., Fuglsang-Frederiksen, A., and Mamoli, B. (1997). Needle EMG of the tongue: motor unit action potential versus peak ratio analysis in limb and bulbar onset amyotrophic lateral sclerosis. Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry *63*, 175–180.

Flynn, C., Stavness, I., Lloyd, J., and Fels, S. (2015). A finite element model of the face including an orthotropic skin model under *in vivo* tension. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering *18*, 571–582.

Folkins, J.W. (1978). Lower lip displacement during in-vivo stimulation of human labial muscles. Archives of Oral Biology *23*, 195–202.

Forrest, K., Weismer, G., Milenkovic, P., Dougall, R.N., 1988. Statistical analysis of word-initial voiceless obstruents: Preliminary data. J. Acoust. Soc. Am. 84, 115–123. https://doi.org/10.1121/1.396977

Fuchs, S., Perrier, P. and Mooshammer, C. (2001) The role of the palate in tongue kinematics: an experimental assessment in VC sequences from EPG and EMMA data., Proceedings of Eurospeech, pp. 1487-1490.

Fuchs, S., Pape, D., and Perrier, P. (2015). Individual differences in speech production and perception.

Fuhrimann, S., Schiipbach, A., Thuer, U., and Ingervall, B. Natural lip function in wind instrument players. 8.

Garnier, M., Bailly, L., Dohen, M., Welby, P., Lø evenbruck, H., 2006. An acoustic and articulatory study of Lombard speech: Global effects on the utterance, in: Ninth International Conference on Spoken Language Processing.

Garnier, M., Henrich, N., 2014. Speaking in noise: How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise? Comput. Speech Lang. 28, 580–597.

Garnier, M., Henrich, N., Dubois, D., 2010. Influence of sound immersion and communicative interaction on the Lombard effect. J. Speech Lang. Hear. Res. 53, 588–608.

Gay, T., and Hirose, H. (1973). Effect of Speaking Rate on Labial Consonant Production. Phonetica *27*, 44–56.

Girin, L. (2003). Pure audio McGurk effect. In AVSP 2003-International Conference on Audio-Visual Speech Processing.

Gomi, H., Honda, M., Ito, T., and Murano, E.Z. (2002). Compensatory articulation during bilabial fricative production by regulating muscle stiffness. Journal of Phonetics *30*, 261–279.

Grandchamp, X., 2009. Modélisation physique des écoulements turbulents appliquée aux voies aériennes supérieures chez l'humain (PhD Thesis). Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

Haggard, M.P., Summerfield, Q., Roberts, M., 1981. Psychoacoustical and cultural determinants of phoneme boundaries: Evidence from trading F_o cues in the voiced–voiceless distinction. Journal of Phonetics.

Hardcastle, W.J., 1973. Some generalizations on the tense-lax distinction in initial stops in Korean. J Phon. 1, 263–272.

Hjortsjö, C.-H. Man's face and mimic language. 115.

Hogrel, J.-Y., Duchêne, J., and Marini, J.-F. (1998). Variability of some SEMG parameter estimates with electrode location. Journal of Electromyography and Kinesiology *8*, 305–315.

Honda, K., Kurita, T., Kakita, Y., and Maeda, S. (1995). Physiology of the lips and modelingof lip gestures. Journal of Phonetics *23*, 243–254.

Hough, M.S., and Klich, R.J. (1987). Effects of word length on lip EMG activity in apraxia of speech. Clinical Aphasiology *17*, 271–276.

Hugon.M (1973). Exteroceptive reflexes to stimulation of the sural nerve in normal man. In Uman Reflexes, Pathophysiology of Motor Systems, Methodology of Human Reflexes, (Karger Publishers), pp. 713–729.

Hur, M.-S., Hu, K.-S., Kwak, H.-H., Lee, K.-S., and Kim, H.-J. (2011). Inferior Bundle (Fourth Band) of the Buccinator and the Incisivus Labii Inferioris Muscle: Journal of Craniofacial Surgery *22*, 289–292.

Imbrie, A.K.K., 2005. Acoustical study of the development of stop consonants in children (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Isley, C.L., and Basmajian, J.V. (1973). Electromyography of the human cheeks and lips. The Anatomical Record *176*, 143–147.

Ito, T., Murano, E.Z., and Gomi, H. (2004). Fast force-generation dynamics of human articulatory muscles. Journal of Applied Physiology *96*, 2318–2324.

Jensen, C., Vasseljen, O., and Westgaard, R.H. (1993). The influence of electrode position on bipolar surface electromyogram recordings of the upper trapezius muscle. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology *67*, 266–273.

Jovičić, S.T., Šarić, Z., 2008. Acoustic Analysis of Consonants in Whispered Speech. J. Voice 22, 263–274. https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2006.08.012

Kelly, E.M., Smith, A., and Goffman, L. (1995). Orofacial muscle activity of children who stutter: A preliminary study. Journal of Speech, Language, and Hearing Research *38*, 1025–1036.

Kessinger, R.H., Blumstein, S.E., 1998. Effects of speaking rate on voice-onset time and vowel production: Some implications for perception studies. J. Phon. 26, 117–128.

Kewley-Port, D., 1983. Time-varying features as correlates of place of articulation in stop consonants. J. Acoust. Soc. Am. 73, 322–335. https://doi.org/10.1121/1.388813

Kewley-Port, D., Luce, P.A., 1984. Time-varying features of initial stop consonants in auditory running spectra: A first report. Percept. Psychophys. 35, 353–360. https://doi.org/10.3758/BF03206339

Kirkham, S., 2011. The acoustics of coronal stops in British Asian English.

Kita, S., van Gijn, I., and van der Hulst, H. (1998). Movement phases in signs and co-speech gestures, and their transcription by human coders. In Gesture and Sign Language in Human-Computer Interaction, I. Wachsmuth, and M. Fröhlich, eds. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), pp. 23–35.

Klatt, D.H., 1976. Linguistic uses of segmental duration in English: Acoustic and perceptual evidence. J. Acoust. Soc. Am. 59, 1208. https://doi.org/10.1121/1.380986

Klatt, D.H., 1975. Voice Onset Time, Frication, and Aspiration in Word-Initial Consonant Clusters. Journal of Speech, Language, and Hearing Research 18, 686–706.

Koenig, L.L., Fuchs, S., Lucero, J.C., 2011. Effects of consonant manner and vowel height on intraoral pressure and articulatory contact at voicing offset and onset for voiceless obstruents. J. Acoust. Soc. Am. 129, 3233–3244. https://doi.org/10.1121/1.3561658

Koenig, L.L., Lucero, J.C., Perlman, E., 2008. Speech production variability in fricatives of children and adults: Results of functional data analysis. J. Acoust. Soc. Am. 124, 3158–3170. https://doi.org/10.1121/1.2981639

Krause, J.C., Braida, L.D., 2009. Evaluating the role of spectral and envelope characteristics in the intelligibility advantage of clear speech. J. Acoust. Soc. Am. 125, 3346–3357.

Krause, J.C., Braida, L.D., 2004. Acoustic properties of naturally produced clear speech at normal speaking rates. J. Acoust. Soc. Am. 115, 362–378.

Krause, J.C., Braida, L.D., 2002. Investigating alternative forms of clear speech: The effects of speaking rate and speaking mode on intelligibility. J. Acoust. Soc. Am. 112, 2165–2172.

Kuhn, G.M., 1975. On the front cavity resonance and its possible role in speech perception. J. Acoust. Soc. Am. 58, 428–433.

Laeufer, C., 1996. The acquisition of a complex phonological contrast: Voice timing patterns of English initial stops by native French speakers. Phonetica 53, 86–110.

Laeufer, C., 1992. Patterns of voicing-conditioned vowel duration in French and English. Journal of Phonetics 20, 411–440.

Lallouache, M.T. 1991. « Un poste" visage-parole" couleur: acquisition et traitement automatique des contours des lèvres ». Grenoble INPG.

Lapatki, B.., Stegeman, D.., and Jonas, I.. (2003). A surface EMG electrode for the simultaneous observation of multiple facial muscles. Journal of Neuroscience Methods *123*, 117–128.

Lapatki, B.G., Oostenveld, R., Van Dijk, J.P., Jonas, I.E., Zwarts, M.J., and Stegeman, D.F. (2006). Topographical Characteristics of Motor Units of the Lower Facial Musculature Revealed by Means of High-Density Surface EMG. Journal of Neurophysiology *95*, 342–354.

Lapatki, B.G., Oostenveld, R., Van Dijk, J.P., Jonas, I.E., Zwarts, M.J., and Stegeman, D.F. (2010). Optimal placement of bipolar surface EMG electrodes in the face based on single motor unit analysis. Psychophysiology *47*, 299–314.

Latash, M.L., Scholz, J.P., and Schöner, G. (2007). Toward a New Theory of Motor Synergies. Motor Control *11*, 276–308.

Leanderson, R., Öhman, S., and Persson, A. (1967). Electromyographic Studies of Facial Muscle Co-Ordination During Speech. Acta Oto-Laryngologica *63*, 307–310.

Leanderson, R., Meyerson, B.A., and Persson, A. (1972). Lip Muscle Function in Parkinsonian Dysarthria. Acta Oto-Laryngologica *74*, 350–357.

Leijnse, J.N.A.L., Campbell-Kyureghyan, N.H., Spektor, D., and Quesada, P.M. (2008). Assessment of Individual Finger Muscle Activity in the Extensor Digitorum Communis by Surface EMG. Journal of Neurophysiology *100*, 3225–3235.

Leouffre, M. (2006). Extraction de sources d'électromyogrammes et évaluation des tensions musculaires.

Liberman, A.M., Delattre, P.C., Cooper, F.S., 1958. Some cues for the distinction between voiced and voiceless stops in initial position. Language and Speech 1, 153–167.

Liberman, A.M., Delattre, P.C., Cooper, F.S., Gerstman, L.J., 1954. The role of consonant-vowel transitions in the perception of the stop and nasal consonants. Psychol. Monogr. Gen. Appl. 68, 1.

Lisker, L., 1975. Is it VOT or a first-formant transition detector? J. Acoust. Soc. Am. 57, 1547–1551. https://doi.org/10.1121/1.380602

Lisker, L., Abramson, A.., 1967. Some Effects of Context on Voice Onset Time In English Stops.

Lisker, L., Abramson, A.., 1964. A cross-Language Study of Voicing in Initial Stops : Acoustical Measurements.

Lofqvist, A., Gracco, V.L., 1997. Lip and jaw kinematics in bilabial stop consonant production. J. Speech Lang. Hear. Res. 40, 877–893.

Lubker, J.F., Parris, P.J., 1970. Simultaneous measurements of intraoral pressure, force of labial contact, and labial electromyographic activity during production of the stop consonant cognates/p/and/b. J. Acoust. Soc. Am. 47, 625–633.

Luce, P.A., Charles-Luce, J., 1985. Contextual effects on vowel duration, closure duration, and the consonant/vowel ratio in speech production. J. Acoust. Soc. Am. 78, 1949–1957. https://doi.org/10.1121/1.392651

Lucero, J.C., and Munhall, K.G. (1999). A model of facial biomechanics for speech production. The Journal of the Acoustical Society of America *106*, 2834–2842.

Maddieson, I., 1997. Combining frication and glottal constriction: Two solutions to a dilemma (PhD Thesis). ASA.

Malécot, A., 2017. Contribution à l'étude de la force d'articulation en français. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Malécot, A., 1969. The effect of syllabic rate and loudness on the force of articulation of American stops and fricatives. Phonetica 19, 205–216.

Malécot, A., 1968. The force of articulation of American stops and fricatives as a function of position. Phonetica 18, 95–102.

Malécot, A., 1955. An experimental study of force of articulation. Stud. Linguist. 9, 35–44.

MALÉCOT, A., PEEBLES, K., 1965. An optical device for recording glottal adduction-abduction during normal speech. STUF-Lang. Typology Univers. 18, 543–548.

Malécot, A., Richman, M., 1974. A labiographic study of bilabial stops in English and French. Stud. Linguist. 28, 100–108.

Martin, R. (1928). Lehrbuch der Anthropologie.

McClean, M.D., and Clay, J.L. (1995). Activation of Lip Motor Units With Variations in Speech Rate and Phonetic Structure. Journal of Speech Language and Hearing Research *38*, 772.

McClean, M.D., Tasko, S.M., 2003. Association of Orofacial Muscle Activity and Movement During Changes in Speech Rate and Intensity. J. Speech Lang. Hear. Res. 46, 1387. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2003/108)

McClean, M., Goldsmith, H., and Cerf, A. (1984). Lower-Lip EMG and Displacement During Bilabial Disfluencies in Adult Stutterers. Journal of Speech Language and Hearing Research *27*, 342.

McClean, M.D., Tasko, S.M., and Runyan, C.M. (2004). Orofacial Movements Associated With Fluent Speech in Persons Who Stutter. Journal of Speech Language and Hearing Research *47*, 294.

McComas, A.J. (1998). Oro-facial muscles: internal structure, function and ageing. Gerodontology *15*, 3–14.

Meltzner, G.S., Sroka, J., Heaton, J.T., Gilmore, L.D., Colby, G., Roy, S., Chen, N., and Luca, C.J.D. Speech Recognition for Vocalized and Subvocal Modes of Production Using Surface EMG Signals from the Neck and Face. 4.

Merletti.R, Parker.P (2004). Electromyography : Physiology, Engineering, and Noninvasive Applications.

Meynadier, Y., 2015. Bases phonétiques du trait de voisement en français à la lumière des résistances aérodynamiques en voix chuchotée.

Meynadier, Y., Dufour, S., 2016. Accès lexical et reconnaissance du voisement en voix chuchotée, in: XXXIèmes Journées d'Etude Sur La Parole. pp. 19–27.

Meynadier, Y., Gaydina, Y., 2013. Aerodynamic and durational cues of phonological voicing in whisper, in: Interspeech. pp. 335–339.

Mezzarane, R.A., and Kohn, A.F. (2009). A method to estimate EMG crosstalk between two muscles based on the silent period following an H-reflex. Medical Engineering & Physics *31*, 1331–1336.

Mijović, B., De Vos, M., Gligorijević, I., Taelman, J., and Van Huffel, S. (2010). Source Separation From Single-Channel Recordings by Combining Empirical-Mode Decomposition and Independent Component Analysis. IEEE Transactions on Biomedical Engineering *57*, 2188–2196.

Moon, S.-J., Lindblom, B., 1989. Formant undershoot in clear and citation-form speech: A second progress report. STL-QPSR 30, 121–123.

Nazari, M.A. Biomechanical Face Modeling: Control of Orofacial Gestures for Speech Production. 171.

Nazari, M.A., Perrier, P., Chabanas, M., and Payan, Y. (2011). Shaping by Stiffening: A Modeling Study for Lips. Motor Control *15*, 141–168.

Negro, F., Muceli, S., Castronovo, A.M., Holobar, A., and Farina, D. (2016). Multi-channel intramuscular and surface EMG decomposition by convolutive blind source separation. Journal of Neural Engineering *13*, 026027.

Noiray, Aude, Marie-Agnès Cathiard, Lucie Ménard, et Christian Abry. 2011. « Test of the Movement Expansion Model: Anticipatory Vowel Lip Protrusion and Constriction in French and English Speakers ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (1): 340-49. https://doi.org/10.1121/1.3518452.

O'dwyer, N.J., and Quinn, P.T. (1981). Procedures for verification of electrode placement in EMG studies of orofacial and mandibular muscles. *24*, 273–288.

Ohala, J.J., 2011. Accommodation to the aerodynamic voicing constraint and its phonological relevance, in: Proceedings of the 17th International Congress of Phonetic Sciences. pp. 64–67.

Ohde, R.N., 1984. Fundamental frequency as an acoustic correlate of stop consonant voicing. J. Acoust. Soc. Am. 75, 224–230. https://doi.org/10.1121/1.390399

Osfar, M.J., 2011. Articulation of whispered alveolar consonants.

Pelorson, Xavier, G.C.J. Hofmans, M. Ranucci, et R.C.M. Bosch. 1997. « On the Fluid Mechanics of Bilabial Plosives ». *Speech Communication* 22 (2-3): 155-72. https://doi.org/10.1016/S0167-6393(97)00015-0.

Pessa, J.E., Zadoo, V.P., Adrian, J.E., Yuan, C.H., Aydelotte, J., and Garza, J.R. (1998). Variability of the midfacial muscles: analysis of 50 hemifacial cadaver dissections. *6*, 1888–1893.

Phinyomark, A., Nuidod, A., Phukpattaranont, P., and Limsakul, C. (2012). Feature Extraction and Reduction of Wavelet Transform Coefficients for EMG Pattern Classification. Electronics and Electrical Engineering *122*.

Picheny, M.A., Durlach, N.I., Braida, L.D., 1989. Speaking clearly for the hard of hearing III: An attempt to determine the contribution of speaking rate to differences in intelligibility between clear and conversational speech. J. Speech Lang. Hear. Res. 32, 600–603.

Picheny, M.A., Durlach, N.I., Braida, L.D., 1986. Speaking clearly for the hard of hearing II: Acoustic characteristics of clear and conversational speech. J. Speech Lang. Hear. Res. 29, 434–446.

Pothirat, T., Chatpun, S., Phukpattaranont, P., and Vongjandaeng, D. (2013). The optimal electromyography feature for oral muscle movements. In The 6th 2013 Biomedical Engineering International Conference, pp. 1–5.

Raphael, L.J., 1972. Preceding Vowel Duration as a Cue to the Perception of the Voicing Characteristic of Word-Final Consonants in American English. J. Acoust. Soc. Am. 51, 1296–1303. https://doi.org/10.1121/1.1912974

Raphael, L.J. (1975). The physiological control of durational differences between vowels preceding voiced and voiceless consonants in English. Journal of Phonetics *3*, 25–33.

Reaz, M.B.I., Hussain, M.S., and Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. Biological Procedures Online *8*, 11–35.

Robieux, C., Legou, T., Meynadier, Y., Meunier, C., 2016. Effort produit et ressenti selon le voisement en français, in: XXXIè Journées d'Étude Sur La Parole. pp. 256–264.

Roeleveld, K., Stegeman, D.F., Falck, B., and Stålberg, E.V. (1997). Motor unit size estimation: confrontation of surface EMG with macro EMG. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control *105*, 181–188.

Roy, S.H., De Luca, C.J., and Schneider, J. (1986). Effects of electrode location on myoelectric conduction velocity and median frequency estimates. Journal of Applied Physiology *61*, 1510–1517.

Ruark, J.L., and Moore, C.A. (1997). Coordination of Lip Muscle Activity by 2-Year-Old Children During Speech and Nonspeech Tasks. Journal of Speech Language and Hearing Research *40*, 1373.

Santos, C.M., and Vitti, M. Effect of denture quality on perioral muscle activity during speech. 5.

Schieppati, M., Di Francesco, G., and Nardone, A. (1989). Patterns of activity of perioral facial muscles during mastication in man. Experimental Brain Research *77*, 103–112.

Schultz, T., and Wand, M. (2010). Modeling coarticulation in EMG-based continuous speech recognition. Speech Communication *52*, 341–353.

Schumann, N.P., Bongers, K., Guntinas-Lichius, O., and Scholle, H.C. (2010). Facial muscle activation patterns in healthy male humans: A multi-channel surface EMG study. Journal of Neuroscience Methods *187*, 120–128.

Serniclaes, W., D'Alimonte, G., Alegria, J., 1984. Production and perception of French stops by moderately deaf subjects. Speech Commun. 3, 185–198. https://doi.org/10.1016/0167-6393(84)90014-1

Shadle, C.H., 1997. The handbook of phonetic sciences, J.Laver. ed.

Slis, I.H. (1970). Articulatory measurements on voiced, voiceless and nasal consonants. Phonetica *21*, 193–210.

Smith, A. (1992). The Control of Orofacial Movements in Speech. Critical Reviews in Oral Biology & Medicine *3*, 233–267.

Sock, R., Löfgvist, A., 1995. Some timing constraints in the productionof bilabial stops. J. Phon. 23, 129–138.

Solé, M.-J., 2007. Controlled and mechanical properties in speech. Exp. Approaches Phonol. 302–321.

Standring, S. (2005). Gray's Anatomy : the anatomical basis of clinical practice.

Stavness, I., Nazari, M.A., Perrier, P., Demolin, D., and Payan, Y. (2013). A Biomechanical Modeling Study of the Effects of the Orbicularis Oris Muscle and Jaw Posture on Lip Shape. Journal of Speech Language and Hearing Research *56*, 878.

Stepp, C.E. (2012). Surface Electromyography for Speech and Swallowing Systems: Measurement, Analysis, and Interpretation. Journal of Speech Language and Hearing Research *55*, 1232.

Stevens, K.N., Blumstein, S.E., 1978. Invariant cues for place of articulation in stop consonants. J. Acoust. Soc. Am. 64, 1358–1368. https://doi.org/10.1121/1.382102

Stevens, K.N., House, A.S., 1963. Perturbation of vowel articulations by consonantal context: An acoustical study. J. Speech Hear. Res.

Stevens, K.N., Klatt, D.H., 1974. Role of formant transitions in the voiced-voiceless distinction for stops. J. Acoust. Soc. Am. 55, 653–659. https://doi.org/10.1121/1.1914578

Stevens, K.N., Manuel, S.Y., Matthies, M., 1999. Revisiting place of articulation measures for stop consonants: Implications for models of consonant production, in: Proceedings of the International Congress of Phonetic Sciences. pp. 1117–1120.

Suen, C.Y., Beddoes, M.P., 1974. The Silent Interval of Stop Consonants. Language and Speech.

Sussman, H.M., MacNeilage, P.F., Hanson, R.J., 1973. Labial and mandibular dynamics during the production of bilabial consonants: Preliminary observations. Journal of Speech, Language, and Hearing Research 16, 397–420.

Takada, K., Yashiro, K., Sorihashi, Y., Morimoto, T., and Sakuda, M. (1996). Tongue, Jaw, and Lip Muscle Activity and Jaw Movement during Experimental Chewing Efforts in Man. Journal of Dental Research *75*, 1598–1606.

Tatham, M.A.A., and Morton, K. (1969). Some Electromyography Data Towards a Model of Speech Production. Language and Speech *12*, 39–53.

Teston, Bernard. 2007. *L'étude instrumentale des gestes dans la production de la parole: Importance de l'aérophonométrie.* Solal.

Tomiyama, N., Ichida, T., and Yamaguchi, K. (2004). Electromyographic Activity of Lower Lip Muscles When Chewing with the Lips in Contact and Apart. Angle Orthodontist *74*, 6.

Troubetzkoy, N.S., 1939. Grundzüge der Phonologie, Prague: Travaux du Cercle Linguistique de Prague. Trad. Fr. Par J Cantineau 1947 Principe Phonol. Paris Klincksieck.

Van Boxtel, A. (2010). Facial EMG as a tool for inferring affective states. 5.

Van Lieshout, P.H., Peters, H.F., Starkweather, C.W., and Hulstijn, W. (1993). Physiological differences between stutterers and nonstutterers in perceptually fluent speech: EMG amplitude and duration. Journal of Speech, Language, and Hearing Research *36*, 55–63.

Vinti, M., Couillandre, A., Hausselle, J., Bayle, N., Primerano, A., Merlo, A., Hutin, E., and Gracies, J.-M. (2013). Influence of effort intensity and gastrocnemius stretch on co-contraction and torque production in the healthy and paretic ankle. Clinical Neurophysiology *124*, 528–535.

Volk, G.F., Wystub, N., Pohlmann, M., Finkensieper, M., Chalmers, H.J., and Guntinas-Lichius, O. (2013). Quantitative ultrasonography of facial muscles: Sonography of the Facial Muscles. Muscle & Nerve *47*, 878–883.

Vrana, S.R. Startle reflex response during sensory modality specific disgust, anger, and neutral imagery. 9.

Wand, M., Schulte, C., Janke, M., and Schultz, T. Array-based Electromyographic Silent Speech Interface. 8.

Winter, D.A., Fuglevand, A.J., and Archer, S.E. (1994). Crosstalk in surface electromyography: Theoretical and practical estimates. Journal of Electromyography and Kinesiology *4*, 15–26.

Wohlert, A.B., and Goffman, L. (1994). Human Perioral Muscle Activation Patterns. Journal of Speech Language and Hearing Research *37*, 1032.

Wohlert, A.B., Hammen, V.L., 2000. Lip muscle activity related to speech rate and loudness. J. Speech Lang. Hear. Res. 43, 1229–1239.

Wohlert, A.B., and Smith, A. (2002). Developmental change in variability of lip muscle activity during speech. Journal of Speech, Language, and Hearing Research *45*, 1077–1087.

Yupapin, P., Hamedi, Salleh, Tan, Ismail, Ali, Dee-Uam, and Pavaganun (2011). Human facial neural activities and gesture recognition for machine-interfacing applications. International Journal of Nanomedicine 3461.

Zeileis, Achim, Torsten Hothorn, et Kurt Hornik. 2008. « Model-based recursive partitioning ». *Journal of Computational and Graphical Statistics* 17 (2): 492–514.

Zhang, Y., and Ji, Q. (2005). Active and dynamic information fusion for facial expression understanding from image sequences. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence *27*, 699–714.

Table des figures

Figure 1 : Évènements acoustiques, articulatoires et aérodynamiques correspondant à la production du logatome /apa/. 6

Figure 2 : Consonnes occlusives du français ; à gauche les différents lieux d'articulation correspondant à ces consonnes ; à droite, une organisation de ces consonnes par lieu d'articulation et trait de voisement. (R.Mannell, 2001) 7

Figure 3 : Ordre de grandeur du VOT (millisecondes), en fonction de la catégorie consonantique (Serniclaes, 1984). 8

Figure 4 : Différences entre consonne occlusive voisée et non-voisée en termes de VOT et de transitions formantiques 9

Figure 5 : Transitions formantiques du formant F2 perçues (en ordonnées des graphes) par une cohorte de 132 sujets (en abscisses), pour les consonnes [p b t d k g] et pour les 7 contextes vocaliques [i e ε **ð** o u] (Liberman, 1954) 9

Figure 6 : caractéristiques spectrales des bruits de plosion pour les syllabes /ba/, /da/ et /ga/ (Stevens and Blumstein, 1978) 11

Figure 7 : illustration du skewness et du kurtosis d'une courbe de type gaussienne (d'après wikipédia, et DeCarlo, 1997) 11

Figure 8 : représentations 3D des moments spectraux d'ordre 1, 3, et 4, en fonction de la consonne occlusive produite (de /p/ en haut à /k/ en bas) – (d'après Forrest, 1988). 12

Figure 9: Planche anatomique du visage (réf : http://corpshumain.ca) 19

Figure 10 : détails des orientations fibreuses des muscles du pourtour des lèvres (Hjortsjö, 1970). 8 : muscle nasalis ; 10 : muscle élévateur de la lèvre supérieure; 11 : zygomatique mineur ; 12 : zygomatique majeur ; 13 : élévateur de l'angle de la bouche ; 14 : risorius ; 15 : dépresseur de l'angle de la bouche ; 16 : dépresseur de la lèvre inférieure ; 17 : Mentalis ; 18/19 : muscles incisives des lèvres supérieure et inférieure ; 20/21 : partie inférieure et partie supérieure du muscle Buccinateur ; 22/23 : Orbicularis Oris, respectivement partie périphérique et partie marginale. 20

Figure 11 : illustration des parties marginale et périphérique du muscle Orbicularis Oris (Honda et al., 1995) 22

Figure 12 : illustration du positionnement du muscle digastrique (réf : wikipédia) 22

Figure 13 : Ensemble de 23 mouvements de base permis par la stimulation des muscles orofaciaux isolés (Victor's face, from Hjorstjö 1969) 24

Figure 14 : 18 unités d'action faciale définies par Ekman et al (1976) 24

Figure 15 : illustration des 18 FAUs décrites par Ekman (1976) (Zhang and Ji., 2005) 25

Figure 16 : Le nerf facial et ses différentes branches innervant les muscles orofaciaux (Nazari, 2011 ; Marieb and Hoehn, 2007) 26

Figure 17 : différentes formes de lèvres, témoins de l'effet de la variabilité inter-individuelle sur l'anatomie orofaciale (Martin, 1928) 27

Figure 18 : gestes orofaciaux de base (Schuman et al, 2010) 28

Figure 19 : tableau des valeurs les plus basses des activités EMG (valeurs en μV) de Schuman et al (2010) pour chacun des gestes orofaciaux de base. Les valeurs sont obtenues sur 27 sujets adultes en bonne santé. Les amplitudes EMG > 70 μV sont en gras. Les 3 amplitudes EMG les plus élevées par muscle sont soulignées. La valeur maximum observée sur chaque muscle est accompagnée d'un astérisque. 29

Figure 20 : patrons d'activation musculaire des muscles OOp, OOm, LLSAN, DAO, RIS, ZYG, MENT, BUC, DLI et LAO par Eskes et al (2018) (activités normalisées par tâche, par muscle et par sujets), étudiés pour 4 gestes de

base (A- protrusion labiale, B- plissement du nez, C- abaissement des commissures des lèvres et D- sourire volontaire) 30

Figure 21 : 24 expressions faciales d'émotions (Hjortsjö, 1969) 31

Figure 22 : Muscles orofaciaux recrutés pour la production des expressions faciales émotionnelles de base (Van Boxtel et al, 2010; inspiré de Ekman et Friesen., 1976) 32

Figure 23: A- paramètres articulatoires labiaux mesurés sur la vue de face, B- variations des paramètres A (écartement, en ordonnée) et B (apertire en abscisse) selon la catégorie phonétique (Abry et Boe., 1986). 33

Figure 24: Activités musculaires des parties périphériques et marginales de l'Orbicularis Oris Inférieur au cours de la production de logatomes /sVsV/ (Honda et al., 1995) 34

Figure 25 : valeurs moyennes des activités EMGs (en μV) des muscles péri-oraux (OOSm, OOSp, OOI, LAO, BUC, DAO) pour la production de logatomes incluant les consonnes labiales /p, b, m/ chez 1 sujet (Gay et Hirose, 1973). Chaque case est composée de la valeur moyenne de l'activité pour le débit modéré de production du logatome (valeur gauche) et de la valeur moyenne pour le débit rapide (valeur droite). Pour les muscles dont l'activité moyenne est forte, entre parenthèses sont indiquées des valeurs ponctuelles, propres au sujet. 35

Figure 26: patrons d'activation des muscles AT (Temporalis Antérieur), DG (Digastrique), OI (Orbicularis Oris Inférieur) et GG (Génioglossus) au cours du mouvement de mastication (Takada et al., 1996). Le signal VER correspond au mouvement de la mandibule, les parties du signal correspondent donc à la partie mastication. 36

Figure 27 : schéma récapitulatif du processus d'innervation musculaire (ref : http://www.e-s-c.fr/ ; Merletti, 2004) 38

Figure 28: électrodes EMGs de surface (A- à haute-densité ; B- couple d'électrodes en configuration bipolaire) – (réf image A : Lapatki, 2010) 40

Figure 29: résultats du Crosstalk Ratio pour les muscles OOS, OOI, DLI, MENT, DAO et LLS (Lapatki et al, 2003) 42

Figure 30 : exemple de signal EMGs de surface, a- brut, acquis à Fe = 20kHz sur la carte d'acquisition BIOPAC MP160 ; et b- l'enveloppe redressée du signal filtré 43

Figure 31 : 25 descripteurs EMG (Phinyomark et al., 2012) 45

Figure 32 : Synthèse du corpus expérimental 52

Figure 33 : placement de la sonde de Pio dans la bouche d'un sujet à l'aide de wedjets 54

Figure 34 : Placement des bobines EMA sur la langue d'un sujet 55

Figure 35 : étiquetage sous Praat du logatome (tier 1) et du bruit de plosion (tier 2 : le bruit de plosion est annoté selon la nature de la consonne, ici « t ») pour la répétition du logatome /pata/, en qualité de voix modale 56

Figure 36 : focus sur le relâchement consonantique du /t/ d'un logatome /pata/ - dans l'ordre, de haut en bas, on observe 1- le signal acoustique temporel, 2- le spectrogramme, 3- l'évolution temporelle de l'intensité acoustique calibrée, 4- l'évolution temporelle du centre de gravité spectral, 5- l'évolution temporelle du Skewness, 6- l'évolution temporelle du Kurtosis 58

Figure 37 : Dans l'ordre, de haut en bas, on observe 1- le signal acoustique temporel, 2- le signal de Pio, 3- l'évolution temporelle de la dérivée du signal de Pio. 59

Figure 38 : signaux cinématiques décrivant le mouvement des lèvres (distance interlabiale et vitesses des lèvres) 61

Figure 39 : Sujet 07 : exemples de formes de langue à deux instants de la production d'un /ta/ (graphes de gauche) et d'un /da/ (graphes de droite) 61

Figure 40 : illustration de la technique de détermination de l'instant de début d'occlusion, et extraction du paramètre de durée d'occlusion 62

Figure 41 : extraction des paramètres laryngés : ?OQ et ?f0 ; dans le cas d'une plosive voisée 62

Figure 42 : schéma des analyses statistiques nécessaires à l'étude des questions fondamentales posées dans l'introduction de ce manuscrit 63

Figure 43 : illustration de l'algorithme de partition récursive fournie par le package « party » (1 variable à expliquer Vs1, 1 variable explicative Ve1, et deux variables catégorielles de conditions Ve_c1 et Ve_c2) 66

Figure 44 : distributions des indices acoustiques Iburst, CDG, Skewness et Kurtosis (i.e. distributions des moyennes des indices calculées sur l'ensemble de la durée du bruit de plosion pour la colonne de gauche, et sur les 5 premières ms suivant le relâchement de la consonne pour la colonne de droite), et selon la catégorie phonétique (couleur/style), tout sujet/mode/débit/effort confondus. 73

Figure 45 : distribution des durées des bruit de plosions, selon les 13 catégories phonétiques (moyennes, tout sujet, mode, débit et effort confondus) 74

Figure 46 : distribution des valeurs de Pio, selon les 13 catégories phonétiques et en qualité de production modale (tous sujets, débits et efforts confondus) 76

Figure 47 : distribution des valeurs de pics de dérivée de Pio, avant et après le maximum de Pio, selon les 13 catégories phonétiques et en qualité de production modale (tout sujet, débit et effort confondus) 76

Figure 48 : distribution des valeurs des coordonnées des bobines Apex et Dorsum, pour les productions consonantiques apicales, vélaires, et interpolées. Les distributions sont tracées ici pour tous les sujets, les débits, les efforts confondus, en production modale. 77

Figure 49 : distribution des valeurs des pics de vitesse tangentielle des mouvements d'élévation et d'abaissement de la langue, pour les productions consonantiques apicales, vélaires, et interpolées. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale. 78

Figure 50 : distribution des valeurs du maximum de degré de compression interlabiale pour les logatomes /lapa/, /lapi/, /laba/, /labi/. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale. 79

Figure 51 : distribution des valeurs des maximas des vitesses d'ouverture et de fermeture des lèvres pour les logatomes /lapa/, /lapi/, /laba/, /labi/. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale. 80

Figure 52 : distribution des valeurs des durées de tenue de l'occlusion, pour les 13 catégories phonétiques. Les distributions sont tracées ici pour tous sujets, débits, efforts confondus, en production modale 80

Figure 53 : effet du mode de production sur les distributions des valeurs de 6 descripteurs de la production des logatomes /lapa/ et /laba/ (De haut en bas, et de gauche à droite : Intensité du Bruit de plosion, CDG du Bruit de plosion, durée d'occlusion et durée du bruit de plosion, maximum de Pio, et degré de compression interlabial). En traits pleins les productions modales, et en tirets les productions en qualité chuchotée. Les distributions ci-contre sont tracées pour tous sujets, débits et effort confondus. 82

Figure 54 : boxplots montrant l'effet de la condition effort sur le domaine de variation des valeurs des variables Intensité du bruit de plosion, Maximum de Pio, et durée d'occlusion (de haut en bas). Ici, on confond tous les sujets et les logatomes. A gauche, les effets des 5 niveaux d'effort auto-évalués en qualité de production modale, et à droite ceux des 3 niveaux d'effort auto-évalués en qualité de production chuchotée. Les points rouges représentent les outliers, et les traits horizontaux les écarts-types. 83

Figure 55 : Distribution des variables maximum(Pio) et durée d'occlusion, en qualité de production modale, pour les différents niveaux d'effort en débit de parole normal, à l'aide d'ellipse de dispersion (ellipses rouges : 1 ellipse par effort, noté de E1 à E5) et pour la condition débit rapide (en bleu : pas d'effort, 1 seule ellipse). 84

Figure 56 : distributions des paramètres A : degré de compression interlabiale – vitesse d'ouverture des lèvres (uniquement pour les consonnes bilabiales) ; B : Xapex – Vitesse d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes apicales) ; et C - Ydorsum – Vitesse d'abaissement de la langue (uniquement pour les consonnes vélaires). , en qualité de production modale, selon les différents niveaux d'effort en débit de parole normal (ellipses rouges : 1 ellipse par effort, noté de 1 à 5) ou selon la condition débit rapide (en bleu : pas d'effort, 1 seule ellipse) 85

Figure 57 : exemple de relations liant les paramètres Maximum(Pio) et Durée d'occlusion, pour les sujets 3 et 7: ces relations extraites d'un partitionnement récursif sont valables quel que soit le niveau d'effort articulatoire. 86

Figure 58 : formes de langue 10 ms avant le début du bruit de plosion, pour les sujets 03 (à gauche) et 05 (à droite), pour les répétitions d'occlusion d'un /ti/ (tracés en rouge) et pour celles d'un /gi/ (en bleu) 89

Figure 59 : relations entre Xapex et Yapex (à gauche), et entre Xdorsum et Ydorsum (à droite), pour les sujets S1, S3, S4, S5, S6 et S7 (les ellipses représentent les moyennes et écart-type des nuages de points, les droites représententune approximation linéaire (régression) de ces relations.) 90

Figure 60 : relations, pour les sujets 1 à 7, entre les deux indices acoustiques caractérisant le bruit de plosion, Iburst (colonne de gauche) et Durée du bruit de plosion (colonne de droite) et les 5 variables Max (Pio), distance interlabiale, Vit. d'ouverture des lèvres, Vit. Tangentielle du mouvement d'abaissement de la langue et durée d'occlusion. Une ligne par variable. Les ellipses représentent les moyennes et écart-type des nuages de points, les droites représentent les approximations linéaires de ces relations. 91

Figure 61: Dendogramme, issu de l'algorithme CAH, présentant les regroupements de sujets pour les relations entre les paramètres d'entrée et l'intensité du bruit de plosion (5ms). L'histogramme du gain d'inertie (en haut à droite) permet de sélectionner la rupture d'homogénéité au sein de chacun des regroupements et donc de stopper le processus de regroupements successifs. 96

Figure 62 : Dendogrammes présentant les regroupements de sujet pour les relations contrôlant A- le centre de gravité spectral (5ms), B – le skewness (5ms), C- le kurtosis (5ms), et D- la durée du bruit de plosion. Les histogrammes des gains d'inertie (en haut à droite de chaque dendogramme) permettent de sélectionner les ruptures d'homogénéité des regroupements successifs. 97

Figure 63 : schéma de modélisation fonctionnelle du contrôle physiologique des mouvements de production des consonnes occlusives labiales (extrait du chapitre 6). 117

Figure 64 : décomposition du geste de production du logatome /ləpa/, basée sur l'analyse des pics de vitesse des lèvres et des phases de contact et de décollement labiales 118

Figure 65 : Patrons temporels globaux d'activation musculaire des 5 muscles orofaciaux au cours de la production des plosives labiales (i.e. activités de chacun des 5 muscles orofaciaux au cours des différentes phases - P1 à P4 - du mouvement de plosion labiale) 119

Figure 66 : effet du mode de production sur les patrons temporels d'activation musculaire (en pointillés les patrons qui correspondent aux productions chuchotées, et en traits pleins ceux qui correspondent aux productions modales). Une couleur par muscle. Tous sujets et débits de parole confondus. 120

Figure 67 : effet du débit de parole sur les patrons temporels d'activation musculaire (en pointillés les patrons qui correspondent aux productions en parole rapide, et en traits pleins ceux qui correspondent aux productions normales). Une couleur par muscle. Tous sujets et modes de production confondus. 121

Figure 68 : effet du contexte vocalique de production des occlusives labiales sur les patrons temporels d'activation musculaire (à gauche les patrons qui correspondent aux productions en contexte /a/, et à droite ceux qui correspondent au contexte /i/). Une couleur par muscle. Tous sujets, modes et débits de parole confondus. 121

Figure 69 : exemple de partitionnement récursif : Deg.Comp ~ OOS_P1 | contexte + voisement + groupe 124

Figure 70 : recrutements musculaires péri-oraux obtenus par Schuman et al (2010) pour la compression labiale. Electrodes 25, 26, 27, 28 : OOS (droit et gauche). Electrodes 29, 30, 31, 32 : OOI. Electrodes 33, 34, 39, 40 : MENT. Electrodes 35, 36, 41, 42 : DLI. 130

Figure 71 : recrutements musculaires péri-oraux obtenus par Schuman et al (2010) pour l'abaissement de la lèvre inférieure. Electrodes 25, 26, 27, 28 : OOS (droit et gauche). Electrodes 29, 30, 31, 32 : OOI. Electrodes 33, 34, 39, 40 : MENT. Electrodes 35, 36, 41, 42 : DLI. 130

Figure 72 : Synthèse fonctionnelle et générale des relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion (parole modale, débit normal). Les flèches blanches représentent la présence d'influences des variables expérimentales sur les relations de contrôle. 145

Liste des tableaux

Tableau 1: tableau récapitulatif des indices acoustiques extraits 58

Tableau 2 : synthèse des descripteurs mesurés pour les 6 consonnes étudiées 67

Tableau 3 : Coefficients de régression linéaire, pour chaque sujet (en ligne), des relations Maximum(Pio) <-> durée d'occlusion, Deg.Comp <-> Vit. Ouv. Lèvres (pour les labiales), Xapex (pour les apicales) et Ydorsum (pour les vélaires) <-> Vit. Abais. Langue (en colonne). L'effort ne partitionne pas les relations : 1 unique coef. de régression linéaire par cellule du tableau. 86

Tableau 4 : Synthèse du processus de sélection d'entrée du modèle fonctionnel global de la production des occlusives (pour les 4 combinaisons mode/débit). 88

Tableau 5 : tableau des coefficients de corrélation entre variables (potentielles variables d'entrée du modèle fonctionnel), pour la qualité de production modale et le débit de parole normal. 88

Tableau 6 : Synthèse des regroupements de sujets pour le contrôle des 5 indices acoustiques (Iburst, CDG, Skewness, Kurtosis, et DuréeBurstLes chiffres du tableau correspondent au numéro du groupe auquel chaque sujet (1ère ligne) est affecté pour chacune des variables de sortie (1ère colonne). Parole modale, débit normal. 96

Tableau 7: tableau récapitulatif des regroupements de sujets, par variables de sortie (acoustique) et par configuration de production de parole (combinaison débit/mode). 98

Tableau 8 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst). 101

Tableau 9 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour contrôler la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst). 102

Tableau 10 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de la durée du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter DuréeBruit de plosion, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter DuréeBruit de plosion). 105

Tableau 11 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst). 108

Tableau 12 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l''intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes labiales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst). 110

Tableau 13 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation de l'indice d'intensité du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter Iburst, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter Iburst). 111

Tableau 14 : Différences, selon les groupes de sujets, d'utilisation des paramètres de contrôle pertinents pour manager la variation du CDG du bruit de plosion dans le cas de la production des consonnes linguales en parole chuchotée (de + à +++ lorsque le groupe Gi augmente le paramètre pour augmenter CDG, de – à --- lorsque le groupe Gi diminue le paramètre pour augmenter CDG). 111

Tableau 15 : Paramètres physiologiques dont la variation est significativement corrélée avec celle des 5 descripteurs acoustiques du bruit de plosion considérés 115

Tableau 16 : synthèse de regroupement de sujets, pour le contrôle de chaque variable cinématique (en ligne). 123

Tableau 17 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et le degré de compression. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets 125

Tableau 18 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et la vitesse de fermeture labiale. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets 126

Tableau 19 : synthèse des pentes des relations entre les activités des muscles péri-oraux dans chacune des phases du mouvement et la vitesse d'ouverture labiale. En rouge, les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe positif (i.e. quand on augmente l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En bleue les relations dont le coefficient de corrélation est strictement supérieur à 0.1 et qui sont de signe négatif (i.e. quand on relâche l'activité du muscle on augmente le degré de compression). En gris, les relations dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0.1 : la flèche indique tout de même le sens de la relation. Les cases en noires correspondent à des stratégies différentes selon le contexte et le voisement au sein d'un même groupe de sujets 127

Tableau 20 : ensemble des relations liant le CDG du bruit de plosion à la position en X de la bobine collée sur l'apex de la langue. Les relations pertinentes sont en noires, i.e. seuil de 0.1 sur les pentes zscore. Les relations en gris sont les relations dites « non pertinentes » dans ces travaux de thèse. 140

Tableau 21: paramètres corrélés et/ou redondants (extrait du CHAPITRE 5) 148

ANNEXES

Thèse CATTELAIN Thibault

TABLE DES MATIÈRES

ANNEXE 1 : RÉSULTATS PAROLE MODALE ET DÉBIT NORMAL 2
ANNEXE 2 : RÉSULTATS PAROLE MODALE ET DÉBIT RAPIDE 34
ANNEXE 3 : RÉSULTATS PAROLE CHUCHOTÉE ET DÉBIT NORMAL 61
ANNEXE 4 : RÉSULTATS PAROLE CHUCHOTÉE ET DÉBIT RAPIDE 86
ANNEXE 5 : CALCUL DES RELATIONS EN UNITÉS STANDARDS 113
ANNEXE 6 : ARTICLE CATTELAIN ET AL (2018) 115

ANNEXE 1 :

Cette annexe présente l'ensemble des tableaux de résultats qui décrivent les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole modale et en débit de parole normal.

De plus, cette annexe décrit la méthode d'obtention des tableaux de résultats (en s'appuyant sur deux exemples de relation de contrôle mono-paramétrique, ci-dessous).

Dans l'ensemble des tableaux, les cases noires correspondent aux relations dont les |pentes| sont strictement inférieures à 0.1. Ce seuil subjectif apposé aux valeurs des pentes a été déterminé en observant des droites de régression, et ce dans une volonté de distinguer les relations réelles de contrôle des pentes qui tiennent d'un bruit lié à la variabilité des nuages de points.

1 - Contrôle de l'indice acoustique « intensité du bruit de plosion »

Étant donné les domaines de définition plutôt variables des descripteurs de contrôle, nous nous proposons de raisonner en mono-paramétrique pour établir les relations fonctionnelles de contrôle de l'intensité du bruit de plosion. Nous réalisons donc les 12 partitionnements récursifs suivants (un par paramètre de contrôle) :

Ibruit de plosion(5ms) ~ Maximum(Pio) | lieu + voisement + contexte +groupe
Ibruit de plosion(5ms) ~ Durée d'occlusion| lieu + voisement + contexte +groupe
....
Ibruit de plosion(5ms) ~ Vit.abais.langue | lieu + voisement + contexte +groupe

Relations entre Maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion

La Figure 1 ci-dessous montre la partition récursive qui correspond au modèle : $I_{\text{bruit de plosion_5ms}}$ ~ Maximum(Pio) | lieu + voisement + contexte + groupe.

Il faut lire le partitionnement de la manière suivante :

- La variable conditionnelle lieu d'articulation (ici, 1 : « labiale » et 2 : « apicales ») a un effet significatif sur les relations entre le maximum de pression intra-orale et l'intensité du bruit de plosion ($p<0.001$).
    - Pour chaque lieu d'articulation, la variable conditionnelle contexte vocalique (1 : /a/, 2 : /i/) a ensuite un effet significatif sur les relations maximum(Pio) <-> $I_{\text{bruit de plosion_5ms}}$ ($p<0.001$).
        - Pour les consonnes apicales en contexte /a/, les relations ne sont plus suffisamment variables autour d'une relation moyenne (représentée par la droite rouge sur le nœud 10) pour qu'il y ait à nouveau une séparation préalable.

- Pour les consonnes apicales en contexte /i/, les relations ne sont plus suffisamment variables autour d'une relation moyenne (représentée par la droite rouge sur le nœud 11) pour qu'il y ait à nouveau une séparation préalable.
- Pour les consonnes labiales, en contexte /a/ et en contexte /i/, la variable conditionnelle groupe (3 groupes ici, donc 3 niveaux) a un effet significatif sur les relations maximum(Pio) <-> $I_{\text{bruit de plosion_5ms}}$ ($p<0.001$ pour /i/ et $p = 0.029$ pour /a/).
    - Pour les consonnes labiales en contexte /a/, les groupes de sujets 1 et 2 se distinguent du groupe 3 par des relations d'intensité différentes (nœuds 4 et nœud 5).
    - Idem pour les consonnes labiales en contexte /i/ : cette fois-ci les groupes de sujets 2 et 3 se distinguent du groupe 1 par des relations d'intensité différentes (nœuds 7 et nœud 8).

L'ensemble des coefficients caractérisant les relations (intercepts et pentes) est obtenu grâce à l'algorithme de partitionnement récursifs :

	(Intercept)	maxPio (pentes)
4	0.3385724	0.44555584
5	0.4677664	0.36304343
7	0.1318298	0.33880191
8	0.4260671	0.15872650
10	0.1502287	0.06836061
11	0.4335476	0.30113302

Les données ayant subie une transformation « zscore », nous nous proposons d'utiliser le procédé mathématique présenté dans l'ANNEXE 5 pour revenir à des données en unité standard. Ici, par exemple, on peut conclure de la partition récursive (Figure 1) que dans le cas des consonnes apicales, et pour l'ensemble des sujets, augmenter d'1 hPa la pression intra-orale entraine une augmentation de 0.3 unités d'intensité du bruit de plosion en contexte /i/ et 0.07 en contexte /a/, équivalent réciproquement à 1,45 et 0.36 dB (selon le calcul présenté en ANNEXE 5).

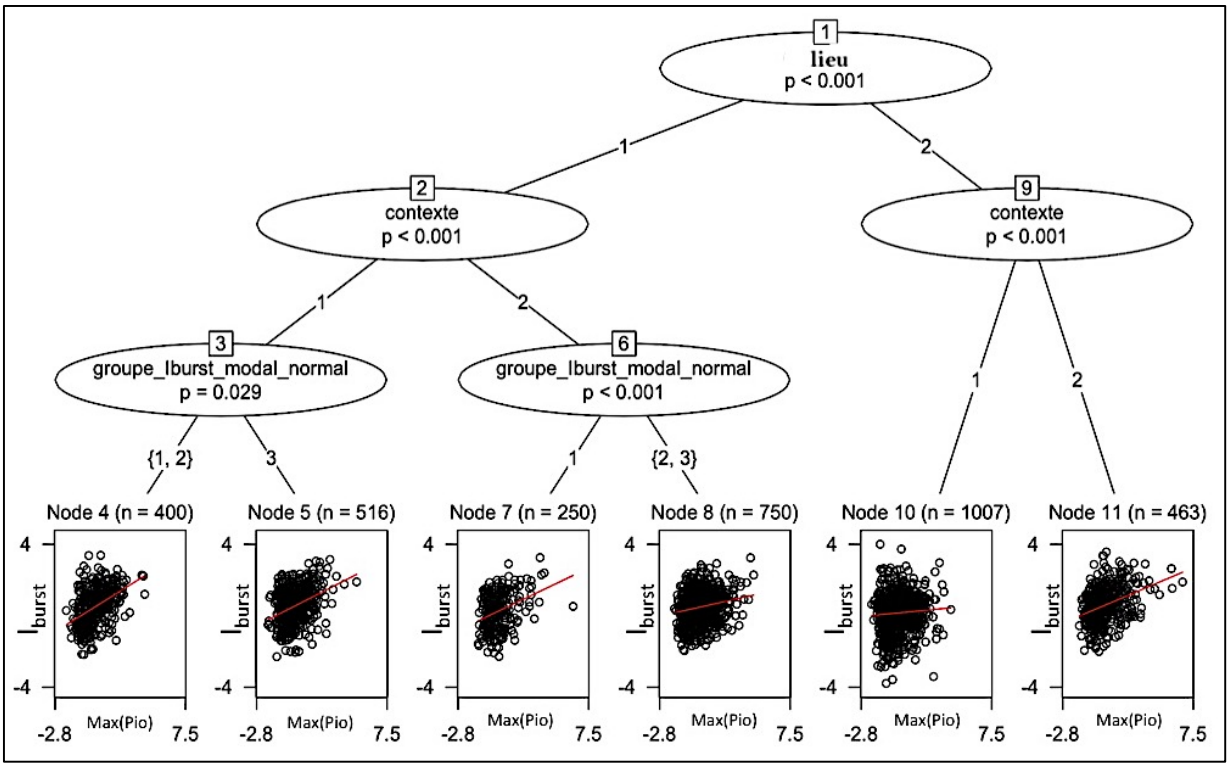


Figure 1 : modèle Ibruit de plosion(5ms) ~ Maximum(Pio) | lieu + voisement + contexte +groupe (débit de parole normal/qualité de production modale)

Les relations que l'on peut considérer comme possédant du « poids » dans le contrôle de l'indice acoustique (ici Intensité du Bruit de plosion) sont les relations dont la pente est en valeur absolue plus grande que 0.1. Ci-dessus, on observe facilement que la Pio contrôle de manière forte l'intensité du bruit de plosion en contexte /i/ pour les apicales, mais pas en contexte /a/.

On se propose de synthétiser l'ensemble des informations fonctionnelles de la figure ci-dessus dans le Tableau 1.

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8 hPa, std = 2.5 hPa)			**Tout les sujets**		
			groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**
Labiales	**voisées**	**/a/**	↑ 2.98 dB	↑ 1.59 dB	↑ 1.93 dB
		/i/	↑ 1.37 dB	↑ 0.57 dB	↑ 0.64 dB
	sourdes	**/a/**	↑ 2.98 dB	↑ 1.59 dB	↑ 1.93 dB
		/i/	↑ 1.37 dB	↑ 0.57 dB	↑ 0.64 dB
Apicales	**voisées**	**/a/**	↑ 0.36 dB		
		/i/	↑ 1.45 dB		
	sourdes	**/a/**	↑ 0.36 dB		

		/i/	↑ 1.45 dB
Vélaires	**voisées**	**/a/**	pas de valeurs de Pio
		/i/	
	sourdes	**/a/**	
		/i/	

Tableau 1 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

En condition de production modale et en débit normal, la moyenne de la pression intra-orale est de 2,8 hPa et l'écart-type de 2.5 hPa.

En qualité de production modale et en débit de parole normal, augmenter la pression intra-oral d'1hPa (i.e écart-type*0.5) entraine une augmentation forte de l'intensité acoustique du bruit de plosion, comprise entre 0.36 et 2.98 dB (selon les individus, contexte, consonnes).

En moyenne, augmenter la pression intra-orale d'1hPa entraine une augmentation de 2 dB pour les consonnes labiales en contexte /a/ et de 1 dB pour les consonnes labiales en contexte /i/ (toutes choses étant par ailleurs égales).

De la même manière, augmenter la pression intra-orale d'1hPa entraine une augmentation de 0.36 dB pour les consonnes apicales en contexte /a/ et de 1.45 dB pour les consonnes apicales en contexte /i/ (toutes choses étant par ailleurs égales).

L'ensemble des différences fines inter-catégorielles dans les intensités des relations pourra être discuté dans un chapitre consacré à l'interprétation et à la discussion de ces résultats (chapitre 5).

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et l'intensité du bruit de plosion

La Figure 2 ci-dessous montre la partition récursive qui correspond au modèle : $I_{\text{bruit de plosion_5ms}} \sim$ OQ_reprise | lieu + voisement + contexte +groupe.

On observe que les intensités des relations linéaires qui lient le descripteur laryngé OQ_reprise à l'intensité du bruit de plosion sont assez faibles (|pentes|~ 0.1). De plus, pour OQ_reprise, elles sont parfois positives et parfois négatives. Il semble donc que OQ_reprise ne soit pas un excellent paramètre de contrôle de l'intensité du bruit de plosion. En ne conservant dans la synthèse que les relations pour lesquelles |pentes|> 0.1, on obtient le Tableau 2. Les cases noires du tableau correspondent aux relations dont les |pentes|< 0.1.

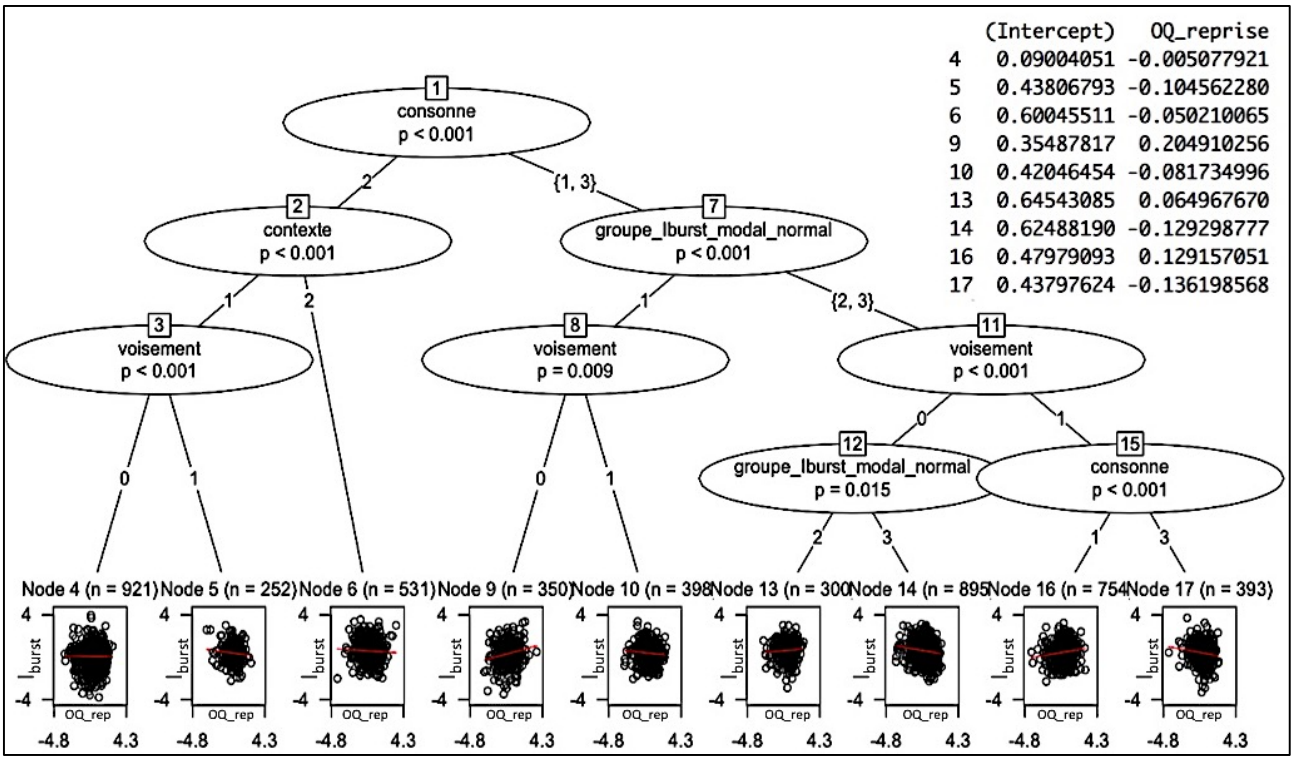


Figure 2 : modèle lburuit de plosion(5ms) ~ OQ_reprise | lieu + voisement + contexte +groupe (débit de parole normal/qualité de production modale)

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	voisées	/a/		↑ 0.216 dB	↑0.14 dB
		/i/			
	sourdes	/a/	↑ 0.15 dB		↓0.054 dB
		/i/			
Apicales	voisées	/a/			
		/i/			
	sourdes	/a/			
		/i/			
Vélaires	voisées	/a/		↓0.19 dB	↓0.13 dB
		/i/			
	sourdes	/a/	↑ 0.15 dB		↓0.054 dB
		/i/			

Tableau 2 : synthèse des relations entre OQ_reprise et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

En condition de production modale et en débit normal, la moyenne du Quotient Ouvert à la reprise de voisement est de 0.51, son écart-type est de 0.1.

En qualité de production modale et en débit de parole normal, augmenter le Quotient Ouvert à la reprise de voisement de 0.01 (i.e d'un dixième d'écart-type) n'a que peu d'effet sur l'intensité acoustique du bruit de plosion (i.e augmentation ou diminution de moins de 0.2 dB en moyenne).

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et l'intensité du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets
all	

Tableau 3 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 181ms , std =100 ms)		Tout les sujets		
		groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	voisées	↑ 0.65 dB		↑ 0.43 dB
	sourdes	↑ 1 dB		
Apicales	/a/	↑ 0.65 dB		↑ 0.23 dB
	/i/			↑ 0.43 dB
Vélaires		↑ 0.8 dB		↑ 0.43 dB

Tableau 4 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le degré de compression labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.28 cm , std =0.38cm)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	↑ 1.1 dB	↑ 1 dB	↑ 0.8 dB
Apicales	pas définie		
Vélaires			

Tableau 5 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 18cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	↑ 0.24 dB	↑ 0.39 dB	↑ 0.17 dB
Apicales	pas définie		
Vélaires			

Tableau 6 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les

plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 15cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	↑ 0.38 dB	↑ 0.36 dB	↑ 0.26 dB
Apicales	pas définie		
Vélaires			

Tableau 7 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)		Tout les sujets		
		groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales		pas défini		
Apicales	/a/			
	/i/	↑ 0.4 dB		
Vélaires	/a/	↑ 0.74 dB		
	/i/	↑ 0.4 dB		

Tableau 8 : synthèse des relations entre l'abscisse Xapex de la bobine de l'apex de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.22 cm , std =3.82 cm)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales			pas défini		
Apicales	/a/				
	/i/		↑ 0.35 dB		
Vélaires	voisées				
	sourdes	/a/	↓0.74 dB		
		/i/			

Tableau 9 : synthèse des relations entre l'ordonnée Ydorsum de la bobine du dos de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 12cm/s, std =4cm/s)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales			pas défini		
Apicales	/a/		↑ 0.35 dB		
	/i/		↑ 0.7 dB	↑ 0.35 dB	
Vélaires	voisées	/a/	↑ 0.34 dB		
		/i/	↑ 0.7 dB	↑ 0.35 dB	
	sourdes	/a/	↑ 0.49 dB		
		/i/	↑ 0.7 dB	↑ 0.35 dB	

Tableau 10 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 9.4 cm/s, std =6.4cm/s)		Tout les sujets		
		groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales		pas défini		
Apicales	**/a/**			
	/i/	↑ 0.75 dB		
Vélaires	**/a/**	↑ 1.15 dB		
	/i/			

Tableau 11 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

2 - Contrôle de l'indice acoustique « centre de gravité spectral du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="2">Maximum(Pio) ↑1hPa
(moy = 2.8, std = 2.5)</th><th colspan="2">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Labiales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td rowspan="3">↑ 37 Hz</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td>↓ 38.4 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="2" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Apicales</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Vélaires</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td colspan="2" rowspan="3">pas de valeurs de Pio</td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

Tableau 12 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2

Tableau 13 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2

Tableau 14 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 181ms , std =100 ms)			Tout les sujets	
			groupe G1	groupe G2
Labiales	voisées	/a/	↑ 21.8 Hz	↓ 12.4 Hz
		/i/		↓ 2.4 Hz
	sourdes			↓ 5.1 Hz
Apicales	voisées	/a/	↓ 23.6 Hz	↓ 14.4 Hz
		/i/		↓ 11.7 Hz
	sourdes			↓ 5.1 Hz
Vélaires	voisées	/a/	↑ 21.8 Hz	↓ 14.4 Hz
		/i/		↓ 11.7 Hz
	sourdes			↓ 5.1 Hz

Tableau 15 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le degré de compression labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.28 cm , std =0.38cm)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2
Labiales	↑ 17 Hz	↓ 33.2 Hz

Tableau 16 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles

en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 18cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2
Labiales	↑ 7.5 Hz	↓ 12 Hz

Tableau 17 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 15cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2
Labiales	↑ 3.6Hz	↓ 13.3 Hz

Tableau 18 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)			Tout les sujets
Labiales			pas définie
Apicales	voisées	/a/	↓ 72.4 Hz

		/i/	
	sourdes		
Vélaires	voisées	/a/	↓ 72.4 Hz
		/i/	
	sourdes		

Tableau 19 : synthèse des relations entre Xapex et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.22 cm , std =3.82 cm)	**Tout les sujets**

Tableau 20 : synthèse des relations entre Ydorsum et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal).

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 12cm/s, std =4cm/s)			**Tout les sujets**
Labiales			pas défini
Apicales	**voisées**		
	sourdes	**/a/**	↑ 100 Hz
		/i/	
Vélaires	**voisées**	**/a/**	
		/i/	↑ 33 Hz
	sourdes		

Tableau 21 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 9.4 cm/s, std =6.4cm/s)	**Tout les sujets**

Labiales			pas défini
Apicales	voisées	/a/	
		/i/	↓ 110 Hz
	sourdes	/a/	↑ 55 Hz
		/i/	
Vélaires	voisées	/a/	
		/i/	↓ 110 Hz
	sourdes	/a/	↑ 55 Hz
		/i/	

Tableau 22 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

3 - Contrôle de l'indice acoustique « Skewness » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)	Tout les sujets					
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe G5	groupe G6
Labiales		↓ 0.07				
Apicales						
Vélaires	pas de valeurs de Pio					

Tableau 23 : synthèse des relations entre Maximump(Pio) et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)	Tout les sujets

Tableau 24 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 25 : synthèse des relations entre Delta_OQ et Delta_f0 et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 181ms , std =100 ms)			Tout les sujets					
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe G5	groupe G6
Labiales	voisées	/a/	↑ 0.03			↑ 0.03		
		/i/						
	sourdes							
Apicales	voisées	/a/	↑ 0.03			↑ 0.03		
		/i/						
	sourdes							
Vélaires	voisées	/a/	↑ 0.03			↑ 0.03		
		/i/						
	sourdes							

Tableau 26 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.28 cm , std =0.38cm)	Tout les sujets					
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe G5	groupe G6
Labiales			↓ 0.024			

Apicales	pas définis
Vélaires	

Tableau 27 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 18cm/s , std =8cm/s)	**Tout les sujets**					
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**
Labiales			↓ 0.08			
Apicales	pas définis					
Vélaires						

Tableau 28 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 15cm/s , std =8cm/s)		**Tout les sujets**					
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**
Labiales	**/a/**	↑ 0.018			↑ 0.018		↑ 0.018
	/i/	↑ 0.016	↓ 0.015		↑ 0.016	↓ 0.015	↑ 0.016

Apicales	pas définis
Vélaires	

Tableau 29 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)	**Tout les sujets**					
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**
Labiales	pas définis					
Apicales	**↑ 0.04**					
Vélaires						

Tableau 30 : synthèse des relations entre la position Xapex et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)	**Tout les sujets**					
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**
Labiales	pas définis					

Apicales		↑ 0.034		↑ 0.034		
Vélaires						

Tableau 31 : synthèse des relations entre la position Ydorsum et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 12cm/s, std =4cm/s)		**Tout les sujets**					
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**
Labiales		pas définis					
Apicales	**/a/**	↓0.05		↓ 0.04	↓0.05		
	/i/	↑ 0.035					
Vélaires	**/a/**	↓0.05		↓ 0.04	↓0.05		
	/i/	↓ 0.03					

Tableau 32 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 9.4 cm/s, std =6.4cm/s)	**Tout les sujets**					
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe G5**	**groupe G6**

Labiales	pas définis			
/a/		↓ 0.04		↓ 0.04
/i/		↑ 0.03		↑ 0.03

Tableau 33 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

4 - Contrôle de l'indice acoustique « Kurtosis » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)			Tout les sujets
Labiales			
Apicales	voisées	/a/	↓ 0.15
		/i/	
	sourdes	/a/	↓ 0.15
		/i/	
Vélaires			pas de valeurs de Pio

Tableau 34 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise	Tout les sujets

Tableau 35 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 36 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 181ms , std =100 ms)		Tout les sujets
Labiales	/a/	↑0.05
	/i/	
Apicales	/a/	
	/i/	
Vélaires	/a/	
	/i/	

Tableau 37 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm	Tout les sujets

(moy = 1.28 cm , std =0.38cm)		G1	G2	G3	G4
Labiales	/a/			↑0.13	
	/i/				
Apicales		pas définis			
Vélaires					

Tableau 38 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres	Tout les sujets

Tableau 39 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 15cm/s , std =8cm/s)		Tout les sujets			
		G1	G2	G3	G4
Labiales	/a/	↑0.03			↑0.06
	/i/				
Apicales		pas définis			
Vélaires					

Tableau 40 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex	Tout les sujets

Tableau 41 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)	Tout les sujets			
	G1	G2	G3	G4
Labiales	pas définis			
palatales - /a/			↑0.07	
palatales - /i/			↓0.09	

Tableau 42 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 12cm/s, std =4cm/s)	Tout les sujets			
	G1	G2	G3	G4
Labiales	pas définis			
palatales - /a/	↓0.1		↓0.03	
palatales - /i/			↓0.12	

Tableau 43 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 9.4 cm/s, std =6.4cm/s)	Tout les sujets			
	G1	G2	G3	G4
Labiales	pas définis			
palatales - /a/		↓0.1		↓0.05
palatales - /i/				↓0.2

Tableau 44 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

5 - Contrôle de l'indice acoustique « durée du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et la durée du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	voisées	/a/	↑ 0.4 ms		
		/i/	↓ 0.7 ms	↑ 1.14 ms	↓ 0.7 ms
	sourdes	/a/			
		/i/		↑ 1.14 ms	
Apicales	voisées	/a/	↑ 0.4 ms		
		/i/	↓ 0.7 ms	↑ 1.14 ms	↓ 0.7 ms
	sourdes	/a/			
		/i/		↑ 1.14 ms	
Vélaires			pas de valeurs de Pio		

Tableau 45 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et la durée du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 46 : synthèse des relations entre OQ_reprise et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et la durée du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 47 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 181ms , std =100 ms)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	voisées	/a/	↓0.1 ms		
		/i/	↓0.4 ms		↓0.3 ms
	sourdes	/a/	↓0.6 ms		
		/i/	↓0.5 ms		
Apicales	voisées	/a/	↓0.1 ms		
		/i/	↓0.4 ms		↓0.3 ms
	sourdes	/a/	↓0.5 ms		
		/i/	↓0.5 ms		
Vélaires	voisées	/a/	↓0.1 ms		
		/i/	↓0.4 ms		↓0.3 ms
	sourdes	/a/	↓0.7 ms		
		/i/	↓0.5 ms		

Tableau 48: synthèse des relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm	Tout les sujets

Tableau 49 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 18cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	↓0.05 ms	↓0.22 ms	
Apicales	pas définie		
Vélaires			

Tableau 50 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 15cm/s , std =8cm/s)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	↓ 0.07 ms	↓0.8 ms	
Apicales	pas définie		
Vélaires			

Tableau 51 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

<table>
<tr><th colspan="2">Xapex ↑0.1cm
(moy = 1.04 cm , std =1.78 cm)</th><th colspan="3">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th colspan="2"></th><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th></tr>
<tr><td colspan="2">Labiales</td><td colspan="3">pas défini</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Apicales</td><td>/a/</td><td></td><td rowspan="4">↑ 1 ms</td><td></td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↓0.2ms</td><td>↓0.2ms</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vélaires</td><td>/a/</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↓0.2ms</td><td>↓0.2ms</td></tr>
</table>

Tableau 52 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

<table>
<tr><th colspan="3">Ydorsum ↑0.1cm
(moy = 1.22 cm , std =3.82 cm)</th><th colspan="3">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th colspan="3"></th><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th></tr>
<tr><td colspan="3">Labiales</td><td colspan="3">pas défini</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Apicales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td colspan="2">↑ 0.9ms</td><td></td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td colspan="2">↑ 0.9ms</td><td>↑ 0.4ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Vélaires</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td colspan="2">↑ 0.9ms</td><td></td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td colspan="2">↑ 0.9ms</td><td>↑ 0.4ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

Tableau 53 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 12cm/s, std =4cm/s)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales			pas défini		
Apicales	voisées	/a/			↑ 0.3ms
		/i/			
	sourdes	/a/			↓ 1.15ms
		/i/			
Vélaires	voisées	/a/			↑ 0.3ms
		/i/			
	sourdes	/a/			↓ 1.15ms
		/i/			

Tableau 54 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 9.4 cm/s, std =6.4cm/s)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales			pas défini		
Apicales	voisées	/a/			↑ 0.35ms
		/i/			
	sourdes	/a/			↓ 0.35ms
		/i/			
Vélaires	voisées	/a/			↑ 0.35ms
		/i/			
	sourdes	/a/			↓ 0.35ms
		/i/			

Tableau 55 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

ANNEXE 2 :

Cette annexe présente l'ensemble des tableaux de résultats qui décrivent les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole modale et en débit de parole rapide.

Dans l'ensemble des tableaux, les cases noires correspondent aux relations dont les |pentes| sont strictement inférieures à 0.1. Ce seuil subjectif apposé aux valeurs des pentes a été déterminé en observant des droites de régression, et ce dans une volonté de distinguer les relations réelles de contrôle des pentes qui tiennent d'un bruit lié aux écart-types des nuages de points.

1 - Contrôle de l'indice acoustique « intensité du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">Maximum(Pio) ↑1hPa
(moy = 1.67, std = 1.32)</th><th colspan="4">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th><th>groupe G4</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>voisées</td><td colspan="2">↑ 6.7 dB</td><td colspan="2" rowspan="2">↓1.5 dB</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td colspan="2">↑ 0.5 dB</td><td colspan="2">↑ 3.8 dB</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td><td colspan="4">pas de valeurs de Pio</td></tr>
</table>

Tableau 1 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et l'intensité du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.5, std =0.1)	Tout les sujets

Tableau 2 : synthèse des relations entre OQ_reprise et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et l'intensité du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets
all	

Tableau 3 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 64.6ms , std =31.6 ms)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
all	↑ 1.8 dB			↑ 1.8 dB

Tableau 4 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.32 cm , std =0.45cm)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales			↓ 1.9 dB	
Apicales	pas définie			
Vélaires				

Tableau 5 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 14 cm/s , std =6.4 cm/s)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		↑ 1.16dB		

	[redacted]	[redacted]
Apicales	pas définie	
Vélaires		

Tableau 6 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 11.2 cm/s , std =6cm/s)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	**voisées**	↑ 0.6 dB		↑ 0.29 dB	
	sourdes	↑ 0.5 dB			
Apicales		pas définie			
Vélaires					

Tableau 7 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole modale et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.08 cm , std =0.5 cm)	**Tout les sujets**			
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	pas défini			

Apicales	↓ 0.3 dB	↑ 0.8 dB	↓ 0.3 dB
Vélaires			

Tableau 8 : synthèse des relations entre l'abscisse Xapex de la bobine de l'apex de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.26 cm , std =0.6 cm)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales		pas défini			
Apicales				↓ 2.3 dB	
Vélaires	**/a/**				
	/i/	↓ 0.8 dB			↓ 0.8 dB

Tableau 9 : synthèse des relations entre l'ordonnée Ydorsum de la bobine du dos de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 11cm/s, std =3.2cm/s)	**Tout les sujets**			
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	pas défini			

palatales		↓ 0.55 dB	

Tableau 10 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6.6cm/s, std =3cm/s)	**Tout les sujets**			
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	pas défini			
Apicales	↓ 0.3 dB		↓ 0.3dB	↓ 0.3 dB
Vélaires				

Tableau 11 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

2 - Contrôle de l'indice acoustique « centre de gravité spectral du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.67, std = 1.32)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	voisées	↑291 Hz			
	sourdes	↓ 87 Hz			
Apicales	voisées	↑291 Hz			
	sourdes	↓ 87 Hz			
Vélaires		pas de valeurs de Pio			

Tableau 12 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2

Tableau 13 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2

Tableau 14 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 64.6ms , std =31.6 ms)			Tout les sujets			
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	voisées		↓ 56 Hz	↓ 64 Hz		↓ 56 Hz
	sourdes	/a/	↓ 138 Hz			
		/i/				
Apicales	voisées		↓ 56 Hz	↓ 64 Hz		↓ 56 Hz
	sourdes	/a/	↓ 138 Hz			
		/i/	↓ 50 Hz		↓ 50 Hz	
Vélaires	voisées		↓ 56 Hz	↓ 64 Hz		↓ 56 Hz
	sourdes	/a/	↓ 138 Hz			
		/i/	↓ 50 Hz		↓ 50 Hz	

Tableau 15 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le degré de compression labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.32 cm , std =0.45cm)	Tout les sujets

Tableau 16 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 14 cm/s , std =6.4 cm/s)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	**voisées**	↓36 Hz			
	sourdes				
Apicales		pas définie			
Vélaires					

Tableau 17 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 11.2 cm/s , std =6cm/s)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	**voisées**	↓25 Hz	↓75 Hz	↓25 Hz	
	sourdes	↑ 15 Hz		↑ 15 Hz	
Apicales		pas définie			
Vélaires					

Tableau 18 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.08 cm , std =0.5 cm)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales		pas défini			
palatales - voisées	**/a/**	↓ 124.2 Hz			
	/i/	↑31Hz			
palatales -sourdes	**/a/**	↓ 70.4 Hz			
	/i/				

Tableau 19 : synthèse des relations entre Xapex et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.26 cm , std =0.6 cm)	**Tout les sujets**

Tableau 20 : synthèse des relations entre Ydorsum et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm /s (moy = 11cm/s, std =3.2cm/s)	**Tout les sujets**			
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
Labiales	pas défini			

palatales - voisées	/a/	↑ 130 Hz
	/i/	
palatales -sourdes	/a/	↑ 46 Hz
	/i/	

Tableau 21 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6.6cm/s, std =3cm/s)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas défini			
palatales - voisées	/a/	↑ 225 Hz			
	/i/				
palatales -sourdes	/a/	↑ 50 Hz	↑ 100 Hz	↑ 50 Hz	↑ 100 Hz
	/i/				

Tableau 22 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

3 - Contrôle de l'indice acoustique « Skewness » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.67, std = 1.32)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales				↓ 0.2
Apicales				
Vélaires	pas de valeurs de Pio			

Tableau 23 : synthèse des relations entre Maximum(Pio) et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.5, std =0.1)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	**/a/**				
	/i/	↓ 0.01			↓ 0.01
Apicales	**/a/**				
	/i/	↓ 0.007			↑0.009

Vélaires	**/a/**			
	/i/	↓ 0.007		↑0.009

Tableau 24 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	**Tout les sujets**

Tableau 25 : synthèse des relations entre Delta_OQ et Delta_f0 et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 64.6ms , std =31.6 ms)	**Tout les sujets**			
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**
/a/	↑ 0.14			↑ 0.2
/i/				↓0.07

Tableau 26 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.32 cm , std =0.45cm)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		↑ 0.07		↓0.23
Apicales	pas définie			
Vélaires				

Tableau 27 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 28 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 11.2 cm/s , std =6cm/s)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		↑ 0.02		↓0.03
Apicales	pas définie			
Vélaires				

Tableau 29 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.08 cm , std =0.5 cm)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas défini			
Apicales	/a/	↑ 0.07		↑ 0.05	
	/i/				
Vélaires	/a/	↑ 0.07		↑ 0.05	
	/i/				

Tableau 30 : synthèse des relations entre la position Xapex et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.26 cm , std =0.6 cm)	Tout les sujets

Tableau 31 : synthèse des relations entre la position Ydorsum et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 11cm/s, std =3.2cm/s)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas défini			
Apicales	/a/	↓ 0.07			
	/i/				
Vélaires	/a/	↓ 0.07			
	/i/				

Tableau 32 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6.6cm/s, std =3cm/s)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas défini			
Apicales	/a/	↓ 0.06			↓ 0.11

	/i/		↓ 0.07	
Vélaires	/a/	↓ 0.06		↓ 0.11
	/i/		↓ 0.07	

Tableau 33 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

4 - Contrôle de l'indice acoustique « Kurtosis » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)	Tout les sujets

Tableau 34 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise	Tout les sujets

Tableau 35 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 36 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 64.6ms , std =31.6 ms)	Tout les sujets
Labiales	↑ 0.5
Apicales	
Vélaires	↑ 0.5

Tableau 37 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.32 cm , std =0.45cm)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	**voisées**	↓1.3		↑ 1	↓1.3
	sourdes	↓0.2			↓0.2
Apicales		pas définie			
Vélaires					

Tableau 38 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres	Tout les sujets

Tableau 39 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

<table>
<tr><td colspan="2">Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s
(moy = 11.2 cm/s , std =6cm/s)</td><td>Tout les sujets</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>voisées</td><td>↑ 0.21</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 40 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex	Tout les sujets

Tableau 41 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.26 cm , std =0.6 cm)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	pas défini			
Palatales	↓ 0.1		↑ 0.09	↓ 0.1

Tableau 42 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 43 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s	**Tout les sujets**

Tableau 44 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

5 - Contrôle de l'indice acoustique « durée du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et la durée du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.67, std = 1.32)			Tout les sujets			
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	voisées	/a/	↑ 4 ms			
		/i/	↑ 4.9 ms			
	sourdes	/a/	↑ 4 ms			
		/i/	↑ 6 ms			
Apicales	voisées	/a/	↑ 1.5 ms			
		/i/	↑ 4.9 ms			
	sourdes	/a/	↑ 1.5 ms			
		/i/	↑ 6 ms			
Vélaires			pas de valeurs de Pio			

Tableau 45 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et la durée du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 46 : synthèse des relations entre OQ_reprise et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et la durée du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 47 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy = 64.6ms , std =31.6 ms)			Tout les sujets			
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	voisées	/a/	↓2.2 ms			
		/i/	↓ 2.25 ms			
	sourdes	/a/	↓2.2 ms			
		/i/	↓ 4.1 ms			
Apicales	voisées	/a/	↓ 1.4 ms			
		/i/	↓ 1.7 ms			
	sourdes	/a/	↓ 6 ms			
		/i/	↓ 4.1 ms			
Vélaires	voisées	/a/	↓ 1.4 ms			
		/i/	↓ 1.7 ms			
	sourdes	/a/	↓ 6 ms			
		/i/	↓ 4.1 ms			

Tableau 48: synthèse des relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion (cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.32 cm , std =0.45cm)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	/a/	↑ 1.5 ms			↓0.9 ms
	/i/	↑ 3.5 ms			
Apicales		pas définie			

Vélaires	

Tableau 49 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s	**Tout les sujets**

Tableau 50 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 11.2 cm/s , std =6cm/s)			**Tout les sujets**
Labiales	**voisées**	**/a/**	↓ 0.3 ms
		/i/	
	sourdes	**/a/**	↓ 0.3 ms
		/i/	
Apicales			pas définie
Vélaires			

Tableau 51 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 1.08 cm , std =0.5 cm)		**Tout les sujets**
Labiales		pas défini
palatales - voisées	**/a/**	↓ 0.8 ms
	/i/	↑0.9ms
palatales - sourdes	**/a/**	↓ 0.7ms
	/i/	

Tableau 52 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.26 cm , std =0.6 cm)	**Tout les sujets**
Labiales	pas défini
palatales - voisées	
palatales - sourdes	↑0.8ms

Tableau 53 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 11cm/s, std =3.2cm/s)	**Tout les sujets**
Labiales	pas défini
palatales - voisées	
palatales - sourdes	↑1.15ms

Tableau 54 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6.6cm/s, std =3cm/s)		**Tout les sujets**
Labiales		pas défini
palatales - voisées	**/a/**	↑ 1 ms
	/i/	↑0.6ms
palatales - sourdes	**/a/**	↑1.7ms
	/i/	

Tableau 55 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole modale et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

ANNEXE 3 :

Cette annexe présente l'ensemble des tableaux de résultats qui décrivent les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole chuchotée et en débit de parole normal.

Dans l'ensemble des tableaux, les cases noires correspondent aux relations dont les |pentes| sont strictement inférieures à 0.1. Ce seuil subjectif apposé aux valeurs des pentes a été déterminé en observant des droites de régression, et ce dans une volonté de distinguer les relations réelles de contrôle des pentes qui tiennent d'un bruit lié aux écart-types des nuages de points.

1 - Contrôle de l'indice acoustique « intensité du bruit de plosion »

Relations entre le maximum de Pio et l'intensité du bruit de plosion

<table>
<tr><th colspan="2">Maximum(Pio) ↑1hPa
(moy = 2.23 hPa, std = 2 hPa)</th><th>Tout les sujets</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>voisées</td><td>↑ 11 dB</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td>↑ 12 dB</td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td>↑ 1 dB</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td><td>pas de valeurs de Pio</td></tr>
</table>

Tableau 1 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et l'intensité du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 2 : synthèse des relations entre OQ_reprise et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et l'intensité du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 3 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy =230ms , std =100 ms)		Tout les sujets
Labiales	/a/	
	/i/	↑ 0.16 dB
Apicales		↑ 0.3 dB
Vélaires		↑ 0.2 dB

Tableau 4 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le degré de compression labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Distance interlabiale ↓0.1cm
(moy = 1.31 cm , std =0.32cm)</td><td colspan="2">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td rowspan="2">↑ 0.5 dB</td><td>↑ 2.2 dB</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↑ 4.4 dB</td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td colspan="2" rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 5 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><td rowspan="2">Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s
(moy = 16cm/s , std =6cm/s)</td><td colspan="2">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td></tr>
<tr><td>Labiales</td><td></td><td>↑ 0.55 dB</td></tr>
<tr><td>Apicales</td><td colspan="2">pas définie</td></tr>
</table>

Vélaires	

Tableau 6 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 14cm/s , std =6cm/s)		**Tout les sujets**	
		groupe G1	**groupe G2**
Labiales	**/a/**	↑ 0.35 dB	↑ 0.75 dB
	/i/		↑ 1.25 dB
Apicales		pas définie	
Vélaires			

Tableau 7 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm	**Tout les sujets**

Tableau 8 : synthèse des relations entre l'abscisse Xapex de la bobine de l'apex de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.43 cm , std =0.58 cm)	**Tout les sujets**
Labiales	pas défini

Apicales	
Vélaires	↓ 1.3 dB

Tableau 9 : synthèse des relations entre l'ordonnée Ydorsum de la bobine du dos de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 10cm/s, std =3cm/s)	**Tout les sujets**
Labiales	pas défini
Palatales	↑ 0.37 dB

Tableau 10 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 7cm/s, std =4.8cm/s)	**Tout les sujets**
Labiales	pas défini

Apicales		↑ 0.36 dB
Vélaires	**/a/**	↑ 0.7 dB
	/i/	↓ 0.85 dB

Tableau 11 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

2 - Contrôle de l'indice acoustique « centre de gravité spectral du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.23 hPa, std = 2 hPa)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales	voisées	↑ 439 Hz		↑ 439 Hz	
	sourdes				
Apicales	voisées	↑ 439 Hz		↑ 439 Hz	
	sourdes				
Vélaires		pas de valeurs de Pio			

Tableau 12 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 13 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal).

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 14 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal).

Relations entre la durée d'occlusion et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Durée d'occlusion	Tout les sujets

Tableau 15 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le degré de compression labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.31 cm , std =0.32cm)	Tout les sujets			
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		↓66.4 Hz		
Apicales	pas définie			
Vélaires				

Tableau 16 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 17 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 18 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy =1.11 cm , std = 0.54cm)			Tout les sujets
Labiales			pas définie
Apicales	voisées		
	sourdes	/a/	↓ 63.2 Hz
		/i/	
Vélaires	voisées		
	sourdes	/a/	↓ 63.2 Hz
		/i/	

Tableau 19 : synthèse des relations entre Xapex et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Ydorsum ↑0.1cm
(moy = 1.43 cm , std =0.58 cm)</td><td colspan="4">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td><td>groupe G3</td><td>groupe G4</td></tr>
<tr><td colspan="2">Labiales</td><td colspan="4">pas définie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Apicales</td><td>voisées</td><td>↑ 39.4 Hz</td><td colspan="3">↑ 36.1 Hz</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="4">↑ 17.5 Hz</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vélaires</td><td>voisées</td><td>↑ 39.4 Hz</td><td colspan="3">↑ 36.1 Hz</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="4">↑ 36.1 Hz</td></tr>
</table>

Tableau 20 : synthèse des relations entre Ydorsum et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal).

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Vit. elev. langue ↑1cm/s
(moy = 10cm/s, std =3cm/s)</td><td colspan="4">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td><td>groupe G3</td><td>groupe G4</td></tr>
<tr><td colspan="2">Labiales</td><td colspan="4">pas définie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Apicales</td><td>voisées</td><td rowspan="3"></td><td colspan="3">↑ 32 Hz</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vélaires</td><td>voisées</td><td colspan="3">↑ 32 Hz</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="4">↑ 40 Hz</td></tr>
</table>

Tableau 21 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de

contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 7cm/s, std =4.8cm/s)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas définie			
Apicales	voisées	↑ 28.5 Hz	↑27.5Hz		↑ 28.5 Hz
	sourdes	↑ 53 Hz			↑ 53 Hz
Vélaires	voisées	↑ 28.5 Hz			↑ 28.5 Hz
	sourdes	↑36 Hz			↑36 Hz

Tableau 22 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

3 - Contrôle de l'indice acoustique « Skewness » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)	Tout les sujets

Tableau 23 : synthèse des relations entre Maximump(Pio) et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)	Tout les sujets

Tableau 24 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 25 : synthèse des relations entre Delta_OQ et Delta_f0 et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms	Tout les sujets

(moy = 181ms , std =100 ms)	

Tableau 26 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.28 cm , std =0.38cm)	**Tout les sujets**

Tableau 27 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s	**Tout les sujets**

Tableau 28 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 14cm/s , std =6cm/s)	**Tout les sujets**
labiales	↑ 0.015
Apicales	pas définis
Vélaires	

Tableau 29 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy =1.11 cm , std = 0.54cm)			Tout les sujets		
			groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales			pas définis		
Apicales	voisées	/a/		↑ 0.02	
		/i/	↓ 0.04	↑ 0.04	
	sourdes	/a/	↑ 0.07	↑ 0.02	
		/i/	↓ 0.04	↑ 0.04	
Vélaires	voisées	/a/		↑ 0.02	
		/i/	↓ 0.04	↑ 0.04	
	sourdes	/a/	↑ 0.07	↑ 0.02	
		/i/	↓ 0.04	↑ 0.04	

Tableau 30 : synthèse des relations entre la position Xapex et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.43 cm , std =0.58 cm)		Tout les sujets		
		groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales		pas définis		
Apicales				
Vélaires	/a/	↓ 0.3		
	/i/			

Tableau 31 : synthèse des relations entre la position Ydorsum et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 32 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm /s (moy = 7cm/s, std =4.8cm/s)	Tout les sujets		
	groupe G1	groupe G2	groupe G3
Labiales	pas définis		
/a/	↓ 0.04		↑0.07
/i/	↓0.025		

Tableau 33 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

4 - Contrôle de l'indice acoustique « Kurtosis » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)	Tout les sujets

Tableau 34 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise	Tout les sujets

Tableau 35 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 36 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Durée d'occlusion ↑10ms
(moy =230ms , std =100 ms)</td><td colspan="3">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td><td>groupe G3</td></tr>
<tr><td colspan="2">Labiales</td><td rowspan="3" colspan="2"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vélaires</td><td>/a/</td><td rowspan="2">↑0.03</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="2">↑0.05</td></tr>
</table>

Tableau 37 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><td rowspan="2">Distance interlabiale ↓0.1cm
(moy = 1.31 cm , std =0.32cm)</td><td colspan="3">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td><td>groupe G3</td></tr>
<tr><td>Labiales</td><td></td><td>↓0.77</td><td></td></tr>
<tr><td>Apicales</td><td colspan="3" rowspan="2">pas définis</td></tr>
<tr><td>Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 38 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres	Tout les sujets

Tableau 39 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 14cm/s , std =6cm/s)	Tout les sujets
Labiales	↑0.085
Apicales	pas définis
Vélaires	

Tableau 40 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex	Tout les sujets

Tableau 41 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.43 cm , std =0.58 cm)		Tout les sujets		
		G1	G2	G3
Labiales		pas définis		
Apicales				
Vélaires	/a/	↓1		
	/i/	↓0.2		

Tableau 42 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 10cm/s, std =3cm/s)	Tout les sujets		
	G1	G2	G3

Labiales	pas définis
palatales	↓0.18

Tableau 43 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 7cm/s, std =4.8cm/s)	**Tout les sujets**
Labiales	pas définis
palatales	↓0.15

Tableau 44 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

5 - Contrôle de l'indice acoustique « durée du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et la durée du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.23 hPa, std = 2 hPa)		Tout les sujets
Labiales	/a/	
	/i/	
Apicales	/a/	↑ 2.7 ms
	/i/	↑ 1.6 ms
Vélaires		pas de valeurs de Pio

Tableau 45 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et la durée du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 46 : synthèse des relations entre OQ_reprise et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et la durée du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 47 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy =230ms , std =100 ms)			Tout les sujets
Labiales			
Apicales	voisées	/a/	↓0.23 ms
		/i/	↓0.7 ms
	sourdes	/a/	↓0.23 ms
		/i/	↓0.26 ms
Vélaires	voisées	/a/	↑0.26 ms
		/i/	↓0.7 ms
	sourdes	/a/	↑0.26 ms
		/i/	↓0.26 ms

Tableau 48: synthèse des relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm	Tout les sujets

Tableau 49 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s
(moy = 16cm/s , std =6cm/s)</td><td colspan="3">Tout les sujets</td></tr>
<tr><td>groupe G1</td><td>groupe G2</td><td>groupe G3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td colspan="3">↓ 0.125 ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td colspan="3" rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 50 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

<table>
<tr><td colspan="2">Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s
(moy = 14cm/s , std =6cm/s)</td><td>Tout les sujets</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td>↓ 0.4 ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 51 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy =1.11 cm , std = 0.54cm)		**Tout les sujets**
Labiales		pas défini
palatales - voisées		
palatales - sourdes	**/a/**	↓0.6 ms
	/i/	

Tableau 52 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.43 cm , std =0.58 cm)		**Tout les sujets**			
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe 4**
Labiales		pas défini			
palatales - voisées	**/a/**		↑ 0.7ms		↑ 0.7ms
	/i/	↑ 0.8ms			
palatales - sourdes	**/a/**		↑ 0.7ms		↑ 0.7ms
	/i/	↓ 0.9ms			

Tableau 53 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 10cm/s, std =3cm/s)		Tout les sujets
Labiales		pas défini
palatales - voisées	**/a/**	↑ 0.3ms
	/i/	↑ 1.05ms
palatales - sourdes	**/a/**	↑ 0.7ms
	/i/	↑ 0.75ms

Tableau 54 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 7cm/s, std =4.8cm/s)	Tout les sujets
Labiales	pas défini
palatales - voisées	↑ 1ms
palatales - sourdes	↑ 0.75ms

Tableau 55 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit normal). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

ANNEXE 4 :

Cette annexe présente l'ensemble des tableaux de résultats qui décrivent les relations de contrôle des indices acoustiques du bruit de plosion en parole chuchotée et en débit de parole rapide.

Dans l'ensemble des tableaux, les cases noires correspondent aux relations dont les |pentes| sont strictement inférieures à 0.1. Ce seuil subjectif apposé aux valeurs des pentes a été déterminé en observant des droites de régression, et ce dans une volonté de distinguer les relations réelles de contrôle des pentes qui tiennent d'un bruit lié aux écart-types des nuages de points.

1 - Contrôle de l'indice acoustique « intensité du bruit de plosion »

Relations entre le maximum de Pio et l'intensité du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.34, std = 1.19)	**Tout les sujets**				
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales	↑ 3.65dB				↑ 3.65dB
Apicales	↑ 1.7 dB	↑ 10 dB		↑ 10 dB	↑ 1.7 dB
Vélaires	pas de valeurs de Pio				

Tableau 1 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et l'intensité du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 2 : synthèse des relations entre OQ_reprise et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et l'intensité du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 3 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.34, std = 1.19)	Tout les sujets				
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5
Labiales	↑ 3.65dB				↑ 3.65dB
Apicales	↑ 1.7 dB	↑ 10 dB		↑ 10 dB	↑ 1.7 dB
Vélaires	pas de valeurs de Pio				

Tableau 4 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et l'intensité du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre le degré de compression labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">Distance interlabiale ↓0.1cm
(moy = 1.25 cm , std =0.5cm)</th><th colspan="5">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th><th>groupe G4</th><th>groupe 5</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>voisées</td><td>↑3.4dB</td><td></td><td>↑3.4dB</td><td></td><td>↑3.4dB</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td colspan="5" rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 5 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s
(moy = 13cm/s , std =6.8cm/s)</th><th colspan="5">Tout les sujets</th></tr>
<tr><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th><th>groupe G4</th><th>groupe 5</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>voisées</td><td>↓0.3dB</td><td rowspan="2">↑ 0.21 dB</td><td>↓0.3dB</td><td rowspan="2">↑ 0.21 dB</td><td>↓0.3dB</td></tr>
<tr><td>sourdes</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td colspan="5">pas définie</td></tr>
</table>

Vélaires	

Tableau 6 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 10.6cm/s , std =5.2 cm/s)		**Tout les sujets**				
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales	**/a/**		↑ 0.27 dB		↑ 0.27 dB	
	/i/	↓0.32dB		↓0.32dB		↓0.32 dB
Apicales		pas définie				
Vélaires						

Tableau 7 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes bilabiales (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 0.9 cm , std =0.44 cm)	**Tout les sujets**				
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales	pas défini				

palatales	↑ 0.64 dB	

Tableau 8 : synthèse des relations entre l'abscisse Xapex de la bobine de l'apex de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Ydorsum ↑0.1cm	**Tout les sujets**

Tableau 9 : synthèse des relations entre l'ordonnée Ydorsum de la bobine du dos de la langue et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et l'intensité du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 9.6cm/s, std =3cm/s)	**Tout les sujets**

Tableau 10 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue (pré-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6cm/s, std =3.2cm/s)	**Tout les sujets**				
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales	pas défini				
Apicales		↑ 0.6dB			
Vélaires		↓ 0.32 dB			

Tableau 11 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue (post-occlusion) et l'intensité du bruit de plosion pour les consonnes linguales (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

2 - Contrôle de l'indice acoustique « centre de gravité spectral du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.34, std = 1.19)	Tout les sujets

Tableau 12 : synthèse des relations entre maximum(Pio) et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 13 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 14 : synthèse des relations entre Delta_OQ, Delta_f0 et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le centre de gravité spectral du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy =128ms , std = 53 ms)			Tout les sujets
Labiales	voisées	/a/	
		/i/	

	sourdes	/a/	↓30 Hz
		/i/	
Apicales	voisées	/a/	↓90 Hz
		/i/	↓47 Hz
	sourdes	/a/	↓50 Hz
		/i/	
Vélaires	voisées	/a/	↓90 Hz
		/i/	↓47 Hz
	sourdes	/a/	↓40 Hz
		/i/	

Tableau 15 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.25 cm , std =0.5cm)		Tout les sujets				
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5
Labiales	voisées	↓164 Hz	↓ 90Hz		↓164 Hz	↓90Hz
	sourdes	↑213 Hz			↑213 Hz	
Apicales		pas définie				
Vélaires						

Tableau 16 : synthèse des relations entre la distance interlabiale et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 13cm/s , std =6.8cm/s)		Tout les sujets				
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5
Labiales	voisées	↑20 Hz	↑13 Hz		↑20 Hz	↑13 Hz
	sourdes					
Apicales		pas définie				
Vélaires						

Tableau 17 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées. Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 18 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité).

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 0.9 cm , std =0.44 cm)	Tout les sujets				
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5
Labiales	pas défini				

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Apicales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td>↓95 Hz</td><td rowspan="4">↓ 63 Hz</td><td>↓95 Hz</td><td rowspan="4">↓ 63 Hz</td><td>↓95 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td rowspan="2">↓55 Hz</td><td rowspan="2">↓55 Hz</td><td rowspan="2">↓55 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Vélaires</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td>↓95 Hz</td><td>↓95 Hz</td><td>↓95 Hz</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
</table>

Tableau 19 : synthèse des relations entre Xapex et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.23 cm , std =0.52 cm)		**Tout les sujets**				
		groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales		pas défini				
palatales - voisées	**/a/**	↑161 Hz	↑50Hz			↑161 Hz
	/i/					
palatales -sourdes	**/a/**	↑161 Hz	↑33 Hz			↑161 Hz
	/i/					

Tableau 20 : synthèse des relations entre Ydorsum et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le centre de gravité spectral du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 9.6cm/s, std =3cm/s)	**Tout les sujets**				
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales	pas défini				

Apicales	**voisées**	**/a/**	↑40 Hz	↑61 Hz	↑40 Hz	↑61Hz	↑40 Hz	
		/i/	↑25Hz		↑25Hz		↑25Hz	
	sourdes							
Vélaires	**voisées**	**/a/**	↑40Hz		↑40Hz		↑40 Hz	
		/i/	↑25Hz		↑25Hz		↑25 Hz	
	sourdes		↑50 Hz		↑50 Hz		↑50 Hz	

Tableau 21 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6cm/s, std =3.2cm/s)			**Tout les sujets**				
			groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**
Labiales			pas défini				
Apicales	**voisées**	**/a/**	↑75 Hz	↑40 Hz	↑75 Hz	↑40 Hz	↑75 Hz
		/i/					
	sourdes		↑60 Hz		↑60 Hz		↑60 Hz
Vélaires	**voisées**	**/a/**	↑75 Hz		↑75 Hz		↑75 Hz
		/i/					
	sourdes		↑26 Hz		↑26 Hz		↑26Hz

Tableau 22 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le CDG du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). En rouge la ou les relations dont les pentes sont les plus élevées, en bleu la ou les relations dont les pentes sont les moins élevées.

3 - Contrôle de l'indice acoustique « Skewness » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 2.8, std = 2.5)	Tout les sujets

Tableau 23 : synthèse des relations entre Maximump(Pio) et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01 (moy = 0.51, std =0.1)	Tout les sujets

Tableau 24 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Delta_OQ / Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 25 : synthèse des relations entre Delta_OQ et Delta_f0 et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms	Tout les sujets

<table>
<tr><th colspan="2">(moy =128ms , std = 53 ms)</th><th>groupe G1</th><th>groupe G2</th><th>groupe G3</th><th>groupe G4</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td rowspan="2" colspan="4"></td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Apicales</td><td>/a/</td><td>↑0.035</td><td colspan="2">↑0.024</td><td>↑0.035</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td><td colspan="4">↑0.07</td></tr>
</table>

Tableau 26 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le Skewness du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><th colspan="2">Distance interlabiale ↓0.1cm
(moy = 1.25 cm , std =0.5cm)</th><th>Tout les sujets</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td></td></tr>
<tr><td>/i/</td><td>↓0.24</td></tr>
<tr><td colspan="2">Apicales</td><td rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 27 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 13cm/s , std =6.8cm/s)		**Tout les sujets**
labiales - /a/	**voisées**	↑0.02
	sourdes	
labiales - /i/		
palatales		pas définies

Tableau 28 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s (moy = 10.6cm/s , std =5.2 cm/s)		**Tout les sujets**
labiales - /a/	**voisées**	↑0.03
	sourdes	
labiales - /i/		
apicales		pas définies
vélaires		

Tableau 29 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le Skewness du bruit de plosion (consonne labiale, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 0.9 cm , std =0.44 cm)		Tout les sujets			
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4
Labiales		pas défini			
Palatales - /a/	voisées	↑0.14		↑0.14	
	sourdes	↑0.04		↑0.04	
Palatales - /i/					

Tableau 30 : synthèse des relations entre la position Xapex et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.23 cm , std =0.52 cm)	Tout les sujets

Tableau 31 : synthèse des relations entre la position Ydorsum et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Skewness du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 32 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 33 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le Skewness du bruit de plosion (consonne linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

4 - Contrôle de l'indice acoustique « Kurtosis » (du spectre du bruit de plosion)

Relations entre Maximum(Pio) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.34, std = 1.19)		Tout les sujets
/a/	voisées	
	sourdes	
/i/	voisées	↓1
	sourdes	↑ 1.5
Vélaires		pas de valeurs de Pio

Tableau 34 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

OQ_reprise	Tout les sujets

Tableau 35 : synthèse des relations entre OQ_reprise et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 36 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy =128ms , std = 53 ms)			Tout les sujets
Labiales	voisées	/a/	
		/i/	
	sourdes	/a/	↑0.1
		/i/	
Apicales	voisées	/a/	
		/i/	
	sourdes	/a/	
		/i/	
Vélaires	voisées	/a/	
		/i/	↑0.3
	sourdes	/a/	
		/i/	↑0.3

Tableau 37 : synthèse des relations entre la durée d'occlusion et le kurtosis du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.25 cm , std =0.5cm)		Tout les sujets
Labiales	/a/	
	/i/	↓1.12
Apicales		pas définie
Vélaires		

Tableau 38 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 13cm/s , std =6.8cm/s)			Tout les sujets
Labiales	voisées	/a/	↓0.08
		/i/	
	sourdes	/a/	
		/i/	
Apicales			pas définie
Vélaires			

Tableau 39 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des lèvres ↑1cm/s	Tout les sujets

Tableau 40 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 0.9 cm , std =0.44 cm)			Tout les sujets	
			groupe G1	groupe G2
Labiales			pas défini	
Apicales	voisées	/a/	↑ 0.3	↓2.2
		/i/		
	sourdes	/a/		
		/i/		
Vélaires	voisées	/a/	↑ 0.3	
		/i/		
	sourdes	/a/	↓0.4	
		/i/		

Tableau 41 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Ydorsum ↑0.1cm	Tout les sujets

Tableau 42 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et le Kurtosis du spectre du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 9.6cm/s, std =3cm/s)	Tout les sujets	
	groupe G1	groupe G2

Labiales	pas défini	
Apicales		↑0.25
Vélaires		

Tableau 43 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s	**Tout les sujets**

Tableau 44 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et le kurtosis du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

5 - Contrôle de l'indice acoustique « durée du bruit de plosion »

Relations entre Maximum(Pio) et la durée du bruit de plosion

Maximum(Pio) ↑1hPa (moy = 1.34, std = 1.19)			Tout les sujets					
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5	groupe 6
Labiales	voisées	/a/						
		/i/	↓1.5 ms				↓1.5 ms	
	sourdes	/a/	↑2.3 ms					↑2.3 ms
		/i/	↓1.5 ms				↓1.5 ms	
Apicales	voisées	/a/						
		/i/	↓1.5 ms				↓1.5 ms	
	sourdes	/a/	↑2.3 ms					↑2.3 ms
		/i/	↓1.5 ms				↓1.5 ms	
Vélaires			pas de valeurs de Pio					

Tableau 45 : synthèse des relations entre le maximum de Pio et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le Quotient Ouvert à la reprise de voisement (OQ_reprise) et la durée du bruit de plosion

OQ_reprise ↑0.01	Tout les sujets

Tableau 46 : synthèse des relations entre OQ_reprise et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les deltas de Quotient Ouvert et de f0 (Delta_OQ et Delta_f0, calculés entre la voyelle précédent l'occlusion et l'occlusion) et la durée du bruit de plosion

delta_OQ/Delta_f0	Tout les sujets

Tableau 47 : synthèse des relations entre Dela_OQ et Delta_f0 et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion

Durée d'occlusion ↑10ms (moy =128ms , std = 53 ms)			Tout les sujets					
			groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5	groupe 6
Labiales	voisées	/a/			↓0.8 ms	↓1.2 ms	↓0.8 ms	↓1.2 ms
		/i/			↓0.7 ms			
	sourdes	/a/						
		/i/						
Apicales	voisées	/a/			↓0.8 ms	↓1.2 ms	↓0.8 ms	↓1.2 ms
		/i/			↓0.7 ms			
	sourdes				↓0.1 ms			
Vélaires	voisées	/a/			↓0.8 ms	↓1.2 ms	↓0.8 ms	↓1.2 ms
		/i/			↓0.7 ms			
	sourdes				↓0.1 ms			

Tableau 48: synthèse des relations entre la durée d'occlusion et la durée du bruit de plosion (cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

Distance interlabiale ↓0.1cm (moy = 1.25 cm , std =0.5cm)	Tout les sujets					
	groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5	groupe 6

<table>
<tr><td rowspan="2">Labiales</td><td>/a/</td><td rowspan="2">↑2ms</td><td>↓2 ms</td><td rowspan="2">↑2ms</td><td>↓2ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Apicales</td><td colspan="5" rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td>Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 49 : synthèse des relations entre le degré de compression labiale et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses de fermeture et d'ouverture labiale et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes labiales)

<table>
<tr><td colspan="3">Vitesse de fermeture des lèvres ↑1cm/s (moy = 13cm/s , std =6.8cm/s)</td><td>Tout les sujets</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Labiales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td>↑ 0.25 ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td>↓0.31 ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Apicales</td><td rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="3">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 50 : synthèse des relations entre la vitesse de fermeture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vitesse d'ouverture des	**Tout les sujets**

<table>
<tr><td colspan="3">lèvres ↑1cm/s
(moy = 10.6cm/s , std =5.2 cm/s)</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Labiales</td><td rowspan="2">voisées</td><td>/a/</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>/i/</td></tr>
<tr><td rowspan="2">sourdes</td><td>/a/</td><td>↓0.9ms</td></tr>
<tr><td>/i/</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Apicales</td><td rowspan="2">pas définie</td></tr>
<tr><td colspan="3">Vélaires</td></tr>
</table>

Tableau 51 : synthèse des relations entre la vitesse d'ouverture des lèvres et la durée du bruit de plosion (consonnes labiales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les coordonnées Xapex et Ydorsum et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Xapex ↑0.1cm (moy = 0.9 cm , std =0.44 cm)	**Tout les sujets**					
	groupe G1	**groupe G2**	**groupe G3**	**groupe G4**	**groupe 5**	**groupe 6**
Labiales	pas défini					
palatales - voisées	↓0.9ms		↑ 0.54 ms	↓0.9ms	↑ 0.54 ms	↓0.9ms
palatales - sourdes	↓0.6 ms		↑0.63ms	↓0.6 ms	↑0.63ms	

Tableau 52 : synthèse des relations entre la coordonnée Xapex et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide).

Ydorsum ↑0.1cm (moy = 1.23 cm , std =0.5 cm)		Tout les sujets					
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5	groupe 6
Labiales		pas défini					
Apicales	voisées			↑0.9 ms		↑0.9 ms	
	sourdes	↑0.8 ms					
Vélaires	voisées			↑8.5 ms		↑8.5 ms	
	sourdes	↑0.8 ms					

Tableau 53 : synthèse des relations entre la coordonnée Ydorsum et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Relations entre les vitesses tangentielles d'élévation et d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (pour les consonnes palatales)

Vit. elev. langue ↑1cm/s (moy = 9.6cm/s, std =3cm/s)	Tout les sujets

Tableau 54 : synthèse des relations entre la vitesse d'élévation de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

Vit. abais. langue ↑1cm/s (moy = 6cm/s, std =3.2cm/s)		Tout les sujets					
		groupe G1	groupe G2	groupe G3	groupe G4	groupe 5	groupe 6
Labiales		pas défini					
Apicales	voisées	↑1.25 ms					
	sourdes			↑1.25 ms			↑1.25 ms

Vélaires	**voisées**	↑1.25 ms			
	sourdes		↑1.25 ms		↑1.25 ms

Tableau 55 : synthèse des relations entre la vitesse d'abaissement de la langue et la durée du bruit de plosion (consonnes linguales, cas parole chuchotée et débit rapide). Les cases noires correspondent à une absence de relations pertinentes de contrôle (trop faibles en intensité)

ANNEXE 5 : transformation des équations de pente de régression linéaire de l'univers « zscore » à des équations de pentes de régression linéaire dans l'univers des unités standards des données.

Il faut rappeler que pour mettre en place la modélisation fonctionnelle, nous avons dû « zscorer » l'ensemble des données, par sujet et par catégorie phonétique. De là, il résulte que l'interprétation se fait en terme « d'augmentation ou de diminution de **n unité(s)** des paramètres et variables ». Pour parler en terme de valeur réelle, avec les unités propres à chaque descripteurs, le calcul présenté ci-dessous permet de revenir aux ordres de grandeur que l'on a l'habitude de manipuler.

Prenons le cas où augmenter d'1 unité la pression Pio augmente en sortie du modèle de β_1 unités l'intensité Iburst.

Combien cela représente t-il en terme de Pio (hPa) et d'intensité acoustique (dB) ??

L'équation dont nous partons est la suivante :

(1) $$Z^I_{sc} = Z^{Pio}_{sc} * \beta_1 + \beta_0$$

Avec s=sujet, c=catégorie.

$Z^I_{sc} = \frac{X^I{}_{sc} - \mu^I_{sc}}{\sigma^I_{sc}}$, $Z^{Pio}_{sc} = \frac{X^{Pio}{}_{sc} - \mu^{Pio}_{sc}}{\sigma^{Pio}_{sc}}$ → données « zscorées »

μ^I_{sc} et σ^I_{sc} sont respectivement la moyenne et la variance estimées de l'intensité du burst, dans la catégorie c et pour le sujet s.

β_1 est la pente estimée (par la méthode de partitionnement récursif) qui explicite la relation entre Iburst et maxPio, dans la catégorie c pour le sujet s

β_0 est l'ordonnée à l'origine estimé (par la méthode de partitionnement récursif) de la relation entre Iburst et maxPio, dans la catégorie c pour le sujet s

On développe l'équation (1) ci-dessus :

$$\frac{X^I{}_{sc} - \mu^I_{sc}}{\sigma^I_{sc}} = \left[\frac{X^{Pio}{}_{sc} - \mu^{Pio}_{sc}}{\sigma^{Pio}_{sc}}\right] * \beta_1 + \beta_0$$

$$\frac{X^I{}_{sc} - \mu^I_{sc}}{\sigma^I_{sc}} * \sigma^{Pio}_{sc} = (X^{Pio}{}_{sc} - \mu^{Pio}_{sc}) * \beta_1 + \beta_0 * \sigma^{Pio}_{sc}$$

$$\frac{X^I{}_{sc} - \mu^I_{sc}}{\sigma^I_{sc}} * \sigma^{Pio}_{sc} = X^{Pio}{}_{sc} * \beta 1 - \mu^{Pio}_{sc} * \beta_1 + \beta_0 * \sigma^{Pio}_{sc}$$

$$X^I{}_{sc} * \frac{\sigma^{Pio}_{sc}}{\sigma^I_{sc}} = X^{Pio}{}_{sc} * \beta 1 - \mu^{Pio}_{sc} * \beta_1 + \mu^I_{sc} * \frac{\sigma^{Pio}_{sc}}{\sigma^I_{sc}} + \beta_0 * \sigma^{Pio}_{sc}$$

On note k = $-\mu_{sc}^{Pio} * \boldsymbol{\beta}_1 + \mu_{sc}^{I} * \frac{\sigma_{sc}^{Pio}}{\sigma_{sc}^{I}} + \boldsymbol{\beta}_0 * \sigma_{sc}^{Pio}$

Et k' = $\frac{\sigma_{sc}^{Pio}}{\sigma_{sc}^{I}}$

L'équation devient :

$X^{I}{}_{sc} * k' = X^{Pio}{}_{sc} * \beta 1 + k$

et donc :

$X^{I}{}_{sc} = X^{Pio}{}_{sc} * \beta 2 + \frac{k}{k'}$

avec $\beta 2 = \frac{\beta 1}{k'}$

L'assertion du haut de la page peut également se dire :

« une augmentation de 1hPa de Pio entraine une augmentation de β_2 dB d'intensité acoustique »

ANNEXE 6

Analyse électromyographique de la production des plosives labiales : enjeux méthodologiques.

Thibault Cattelain, Maëva Garnier, Christophe Savariaux, Silvain Gerber, Pascal Perrier
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, France
* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes
thibault.cattelain@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

RESUME

Notre objectif est de montrer l'intérêt d'une d'analyse temporelle détaillée des gestes de production des consonnes occlusives labiales, en distinguant différentes phases, y inclus durant l'occlusion où les lèvres sont immobiles. Quatre adultes ont été enregistrés pour cette étude. Il leur était demandé de produire des logatomes contenant les plosives /p/ et /b/, dans différents contextes vocaliques (/a/, /i/, /u/) et avec différents niveaux d'effort articulatoire. Les signaux EMG de surface de cinq muscles péri-oraux ont été acquis simultanément avec une vidéo des lèvres. Les mouvements de parole ont été segmentés en quatre phases à l'aide du signal cinématique de distance interlabiale. Des patrons d'activation musculaire semblables ont été observés chez les quatre locuteurs, quels que soient la consonne et le contexte vocalique. Enfin, les activités du muscle dépresseur de la lèvre inférieure et du mentalis dans certaines phases du mouvement semblent être de bons descripteurs de l'effort articulatoire.

ABSTRACT

Our goal is to show the interest of distinguishing several phases in the gesture underlying the production of labial consonants, including during the occlusion, where lips are essentially static, in order to better understand their control. Four adult speakers were recorded, while producing logatoms including the consonants /p/ and /b/, followed by 3 vowels (/a/, /i/ or /u/) and with increasing levels of articulatory effort. Five surface EMG signals targeting five orofacial muscles involved in several lip movements were recorded simultaneously with a video of the lips. The speech gestures were segmented into four phases, based on the interlabial distance. Similar muscle activation patterns were observed for the four speakers, regardless of the consonant (/p/ or /b/) and the vowel context. Finally, the activities of the lower lip depressor and the mentalis muscles in some movement phases appear to be reliable descriptors of articulatory effort.

MOTS-CLES : plosives, électromyographie, effort articulatoire, patrons d'activation musculaire

KEYWORDS: labial stop consonant, electromyography, articulatory effort, muscle activation patterns

1 Introduction

La production des gestes de parole requiert une coordination complexe des gestes respiratoires, laryngés et articulatoires. Le déplacement des articulateurs (langue, lèvres…), en particulier, est contrôlé à partir du recrutement précis de plusieurs muscles orofaciaux. La connaissance détaillée

des muscles impliqués dans ces gestes, et des efforts physiologiques associés, serait d'un grand intérêt pour la modélisation de la production et la compréhension de divers troubles articulatoires. Cependant, si diverses méthodes sont communément utilisées en phonétique expérimentale pour caractériser le déplacement cinématique des articulateurs, l'électromyographie de surface reste encore très rarement utilisée pour caractériser les activités musculaires orofaciales sous-jacentes à ces gestes articulatoires.

Une des principales raisons à cela est certainement la difficulté de positionnement des électrodes. L'anatomie du visage est en effet fine et complexe: la densité musculaire est élevée, avec plusieurs muscles se superposant en particulier sur le pourtour des lèvres, et l'anatomie présente une importante variabilité inter-individuelle. De ce fait, les signaux EMG enregistrés avec les techniques d'électromyographie de surface bipolaire peuvent varier considérablement en fonction du positionnement des électrodes (voir par exemple : Beck et al., 2008 ; Campanini et al., 2007 ; Hogrel et al., 1998; Jensen et al., 1993; Roy et al., 1986), et une électrode peut capter l'activité d'un muscle proche, même s'il n'est pas directement situé sous cette électrode (on parle alors de « diaphonie »). O'dwyer et al. (1981) ont été les premiers à proposer des recommandations précises pour le placement des électrodes EMG sur le visage. Ils ont pu localiser précisément l'emplacement de fibres musculaires sous le derme du visage en réalisant l'acquisition des signaux EMG avec une technique intra-musculaire très invasive, mais permettant de capter les potentiels d'action moteurs directement sur les fibres musculaires, et en demandant à leurs participants de réaliser un ensemble de mouvements orofaciaux simples, silencieux, impliquant des recrutements musculaires bien identifiés. Leurs travaux se sont concentrés sur 10 muscles orofaciaux, parmi lesquels l'orbicularis oris, le mentalis (ou mentonnier) et le dépresseur de la lèvre inférieure, principalement recrutés dans les gestes de parole. Plus récemment l'avènement de l'électromyographie à haute-densité (HD-EMG), qui exploite des matrices d'électrodes EMG de surface, a permis à Lapatki et al. (2010) d'apporter des compléments précieux aux connaissances sur la localisation des muscles orofaciaux et leur recrutement dans divers mouvements. Malheureusement, la forte variabilité anatomique inter-individuelle ne permet pas d'établir des règles universelles pour le placement des électrodes sur le visage, et des ajustements sont nécessaires pour chaque sujet lors du recueil des données.

Une autre source de difficultés relative à l'étude des activités musculaires orofaciales est la complexité de ces gestes et le fait qu'ils se composent en réalité de plusieurs sous-mouvements. La question se pose, par conséquent, de l'échelle de temps sur laquelle analyser les signaux EMG, et de la globalité vs. localité des descripteurs à en extraire. Certains auteurs (McClean et Tasko, 2003. Blair et Smith, 1986) se sont penchés sur cette question et ont ainsi cherché à décrire les patrons temporels d'activation des muscles orofaciaux lors de la production de la parole ou de mimiques faciales. McClean et Tasko (2003) ont ainsi proposé de décomposer les signaux de déplacement de la mandibule et des lèvres en une séquence de mouvements, grâce d'abord à la détection des pics de vitesse tangentielle, puis par le repérage des débuts et fins de mouvements correspondant aux minima de la vitesse tangentielle situés immédiatement avant et immédiatement après chacun des pics de vitesse. Plutôt que de mesurer l'énergie du signal EMG sur l'intégralité du mouvement, ils ont alors proposé de mesurer l'intensité électromyographique à partir du pic dans l'enveloppe EMG précédant un pic de vitesse de la mandibule ou des lèvres.

Dans cette présente étude des activations musculaires associées à la production des plosives labiales, nous proposons une méthodologie de segmentation des signaux cinématiques plus fine encore, dans laquelle nous définissons des phases correspondant à des portions de mouvements. Nous appliquons cette technique d'analyse pour décrire les patrons d'activation musculaire orofaciale (5 muscles) lors de la production de plosives prononcées par 4 sujets dans plusieurs conditions expérimentales. Dans une première partie nous présenterons le corpus et la méthode d'acquisition puis de traitement des données. Puis nous illustrerons l'intérêt de la segmentation en

phases que nous nous proposons, d'abord par une analyse globale, puis en étudiant l'effet du contexte vocalique et de l'effort articulatoire sur les activations musculaires. Nous discuterons finalement ces résultats et conclurons.

2 Matériel et Méthodes

2.1 Sujets et corpus

Quatre sujets adultes (2 femmes, âge entre 21 et 33 ans) ont participé à l'expérience. Il leur était demandé de produire six logatomes : /ləpa/, /ləba/, /ləpi/, /ləbi/, /ləpu/, /ləbu/. Chaque logatome a été répété de manière isolée par séries de 5 items d'effort articulatoire (auto-évalué) croissant, à un rythme confortable et en insérant une courte pause entre chaque item. Les enregistrements duraient 30 secondes, permettant la production de cinq à six séries de logatomes à chaque fois.

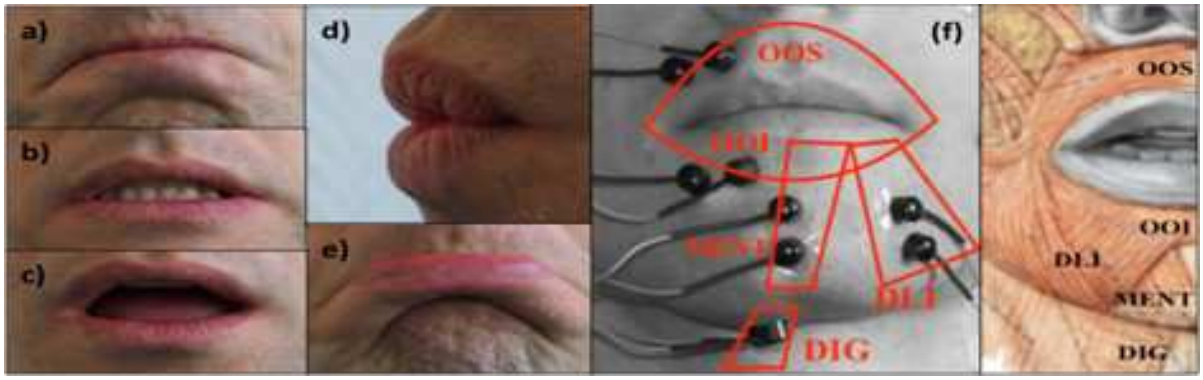


FIGURE 1 : Gestes orofaciaux silencieux utilisés pour valider le positionnement des électrodes EMG (a. compression labiale ; b.abaissement de la lèvre inférieure ; c. abaissement mandibulaire ; d. protrusion labiale ; e. relèvement de la lèvre inférieure), localisation des 5 paires d'électrodes (f) et vue anatomique dans la région des lèvres.

2.2 Matériel d'acquisition

Cinq signaux EMGs de surface (fe = 20kHz) ont été simultanément acquis ciblant cinq muscles du pourtour des lèvres supposés intervenir dans le geste de production des consonnes occlusives labiales (Digastrique - DIG, Mentalis - MENT, Dépresseur de la lèvre inférieure – DLI, Orbicularis oris superior et inferior – OOS et OOI, cf Figure 1.f). Les conséquences du recrutement de ces muscles ont été abondamment décrites dans la littérature (voir par exemple O'dwyers et al., 1981). Le Mentalis (MENT) est recruté pour le relèvement de la lèvre inférieure tandis que le Dépresseur (DLI) est recruté pour l'abaissement de la lèvre inférieure. Ces deux muscles agissent de manières antagonistes lors du déplacement de la lèvre inférieure. Les deux parties, supérieure et inférieure, du muscle Orbicularis Oris (OOS et OOI) sont recrutées dans les mouvements de protrusion et de compression labiale. Le Digastrique (DIG), lui, est recruté dans l'abaissement de la mandibule. Les lèvres des sujets, maquillées en bleu pour faciliter la détection de leurs contours (Lallouache, 1991), ont été filmées de face à l'aide d'une caméra rapide (100 images/s). Le signal acoustique a été acquis à l'aide d'un microphone et d'un amplificateur de mesure Bruël & Kjaer (Fréquence d'échantillonnage à 20kHz) permettant de réaliser une mesure calibrée de l'intensité acoustique. Le signal audio et les signaux EMGs ont été acquis à l'aide du système BIOPAC MP160, qui par ailleurs assure la synchronisation de tous les signaux par l'envoi d'une impulsion de synchronisation à l'ensemble des dispositifs d'acquisition.

2.3 Segmentation des signaux cinématiques en 4 phases et extraction des descripteurs cinématiques.

Dans la lignée des travaux de McClean & Tasko (2003) nous avons procédé à une segmentation sur la base d'évènements mesurables sur les signaux cinématiques. Mais alors que McClean & Tasko se sont essentiellement appuyés sur l'extraction des minima et maxima de la vitesse tangentielle, nous avons basé cette segmentation sur une analyse de la distance interlabiale et la détection des phases de contact entre les lèvres. En effet, lors de la production de consonnes occlusives labiales, il existe toute une phase pendant l'occlusion du conduit vocal où les lèvres sont en contact et où la vitesse de déplacement des lèvres est nulle ou très faible, alors même que l'activité musculaire est significative. Ce contact interrompt brutalement le mouvement, alors même que, de manière sous-jacente, l'activation des muscles varie pour assurer l'occlusion et pour préparer le geste d'ouverture. C'est pourquoi nous avons observé la compression des lèvres durant la phase de contact et repéré des évènements temporels sur la base de la variation de la distance interlabiale et non du mouvement des lèvres. Nous avons préféré cette démarche à celle qui aurait consisté à segmenter directement les signaux EMG car elle fournit une information sur l'organisation temporelle des gestes phonétiquement pertinents, et nous semble donc bien caractériser les buts moteurs de la tâche pour lesquels les activations musculaires sont coordonnées.

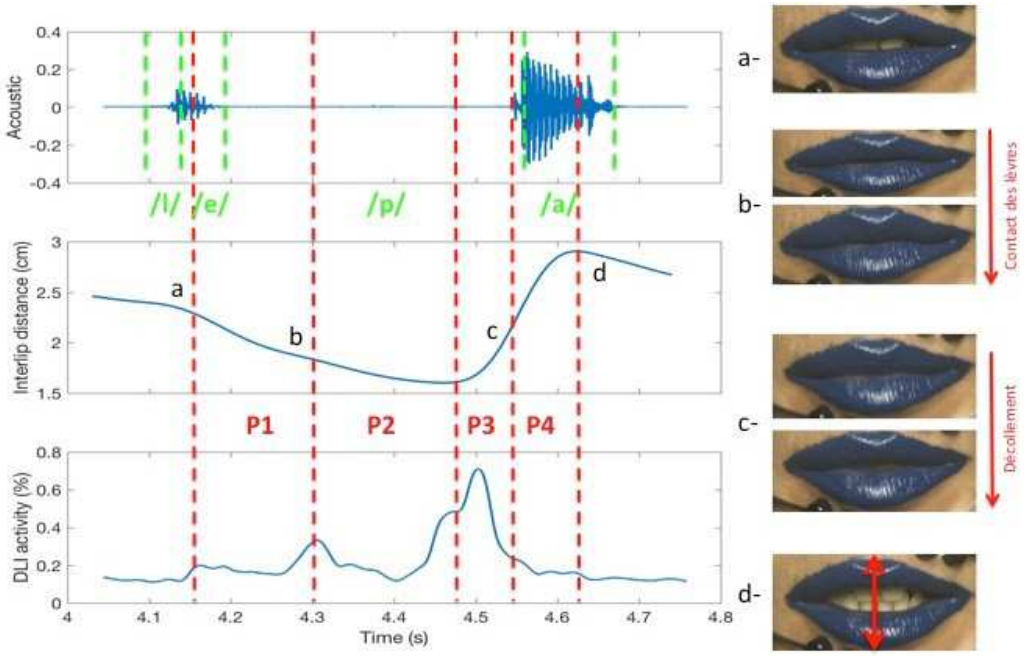


FIGURE 2 : Décomposition en 4 phases du mouvement labial lors de la production de la consonne /p/ dans /ləpa/. Les lignes pointillées vertes indiquent les limites de l'étiquetage phonétique de la séquence à partir du signal acoustique (cadre du haut); les lignes pointillées rouges marquent les évènements cruciaux pour la délimitation des phases, repérés sur le signal de distance interlabiale (cadre du mlieu): a=début de décroissance avant l'occlusion, b=début de contact, c=fin de contact, d fin de croissance après l'occlusion. Le cadre du bas représente l'activité EMG du Dépresseur de la Lèvre Inférieure (DLI).

Pour cela, dans chaque image vidéo, le contour externe des lèvres a été extrait à l'aide d'une technique d'apprentissage statistique de la couleur qui reprend les principes proposés par Lallouache (1991). Ces contours nous ont permis de mesurer la distance interlabiale qui sépare l'arc de cupidon du point le plus bas de la lèvre inférieure (Fig 2, flèche rouge sur l'image « d » et tracé du milieu). Nous avons ensuite repéré automatiquement l'instant de début de décroissance de la distance interlabiale précédant l'occlusion consonantique (Fig. 2, étiquette et image « a ») et l'instant de fin de croissance suivant le relâchement de la consonne (Fig. 2, étiquette « d »). Puis dans l'intervalle [a d] nous avons automatiquement détecté l'instant où la distance interlabiale atteint son minimum, et manuellement repéré les instants de début (Fig.2, étiquette et images « b ») et de fin (Fig2.

Etiquette et images « c ») de la phase de contact interlabial. Ces quatre étiquettes et le minimum de la distance interlabiale définissent 4 phases dans le mouvement des lèvres qui est à la base de la production de la consonne : une phase P1 de fermeture vers l'occlusion (intervalle [a b]), puis, pendant l'occlusion, une phase P2 de compression (de l'étiquette « b » au minimum de la distance interlabiale) et une phase P3 de relâchement de la compression (du minimum de la distance interlabiale à l'étiquette « c »), et enfin, après l'occlusion, une phase P4 d'ouverture (intervalle [c d]).

Trois autres paramètres ont été mesurés sur la variation de la distance interlabiale : la valeur minimum de la distance, appelée « degré de compression » et les amplitudes des pics de vitesse situés de part et d'autre de la phase d'occlusion (vitesses de fermeture et de réouverture).

2.4 Post-traitement des signaux EMG et mesure de l'activité musculaire par phase du mouvement

Le spectre fréquentiel des signaux EMGs est basse fréquence (maximum 500Hz). C'est pourquoi ces signaux, acquis à la fréquence d'échantillonnage de 20 kHz, ont été sous-échantillonnés à 2 kHz. Ils ont ensuite été filtrés à l'aide d'un filtre passe-haut (fc = 20Hz), afin de réduire les composantes basse-fréquences dues aux artefacts de mouvements des électrodes sur la peau. Leur enveloppe redressée a ensuite été calculée sur 500 points.

Pour chaque enregistrement (comprenant donc 20-25 répétitions d'un même logatome avec des variations d'effort), l'amplitude moyenne du bruit de mesure a été estimée sur chaque signal EMG à partir des premières centaines de millisecondes où le sujet était au repos, puis elle a été soustraite de l'enveloppe redressée du signal. Dans un second temps, pour chacun des cinq muscles ciblés, nous avons calculé la distribution des amplitudes de l'enveloppe redressée du signal EMG sur l'ensemble du corpus, repéré le seuil en dessous duquel les activités enregistrées pouvaient s'apparenter à un résidu de bruit, et soustrait cette valeur à l'enveloppe redressée du signal EMG. Les enveloppes redressées et seuillées ont ensuite servi de base à l'estimation des activités EMGs (Fig2, cadre du bas) : pour chaque muscle, l'amplitude de ces enveloppes a été normalisée par rapport à l'amplitude maximale observée pour ce muscle sur l'ensemble du corpus, permettant ainsi de comparer par la suite les activités des différents muscles en les exprimant en % des activités maximales observables sur chaque muscle. L'activité EMG sur une fenêtre temporelle d'intérêt a été définie comme l'intégrale de l'enveloppe redressée du signal EMG, divisée par la durée de la fenêtre. Nous avons ainsi mesuré l'activité EMG de chacun des cinq muscles lors des quatre phases (P1-P4) de chaque mouvement de production des occlusives /p/ ou /b/.

2.5 Analyses statistiques

Pour chaque muscle et chaque mouvement effectué, nous avons créé une variable réponse prenant comme valeur la phase dans laquelle l'activité musculaire est maximale. Nous considérons cette variable réponse comme une variable catégorielle ordonnée (4 niveaux : P1 à P4).
Nous avons testé l'influence du contexte vocalique (3 niveaux : /a/, /i/, /u/), du niveau d'effort (5 niveaux), du muscle (5 niveaux, DIG, DLI, MENT, OOI et OOS) et de leurs interactions sur cette variable réponse, à l'aide d'une régression ordinale avec effets aléatoires (package ordinal de R).
Nous avons utilisé une procédure de sélection pas à pas, utilisant des tests de rapport de vraisemblance, pour sélectionner les termes du modèle qui apportent de l'information significative.
Nous avons ensuite effectué des comparaisons multiples (package mulcomp de R) pour tester, pour chaque muscle, la significativité des différences observée entre les contextes vocaliques.

Enfin, des analyses de corrélation de Spearman ont été conduites pour examiner la corrélation entre l'activité de chacun des 5 muscles, dans chaque phase du mouvement, et les 3 descripteurs cinématiques du mouvement des lèvres (compression labiale, vitesses de fermeture et de réouverture).

3 Résultats

3.1 Patrons d'activation musculaire orofaciale lors de la production de consonnes occlusives – Influence de la voyelle adjacente

La figure 3 ci-dessus représente les activités musculaires moyennes (calculées sur toutes les consonnes labiales et tous les locuteurs) des 5 muscles d'intérêt, selon que la voyelle suivant la consonne est /a /, /i/, ou /u/. On note d'abord une importante similitude dans l'évolution de ces activités pour chacune des voyelles et pour l'ensemble des muscles à l'exception de l'OOS : l'activité EMG croit dès la phase P1 pour atteindre un pic très marqué dans la phase P3 avant de décroitre dans la phase P4. Le muscle OOS est lui essentiellement actif en phase P1 et P2, et devient très faiblement actif dès la phase P3, sauf quand la voyelle suivant la consonne est un /u/. Pour les voyelles non labiales /i/ et /a/ les muscles présentant les activités les plus fortes sont les muscles « ouvreurs » DIG, DLI et MENT. Lorsque la voyelle suivante est /u/, l'activité de ces trois muscles est sensiblement réduite et ce sont les muscles OOS et OOI qui semblent les plus activés.

Dans tous les cas on note la pertinence de la décomposition en 4 phases : les activités EMG de tous les muscles varient entre les phases P2 et P3, qui, rappelons-le, correspondent à l'occlusion labiale au cours de laquelle les lèvres, en contact, sont sensiblement immobiles (i.e. à vitesse quasi nulle).

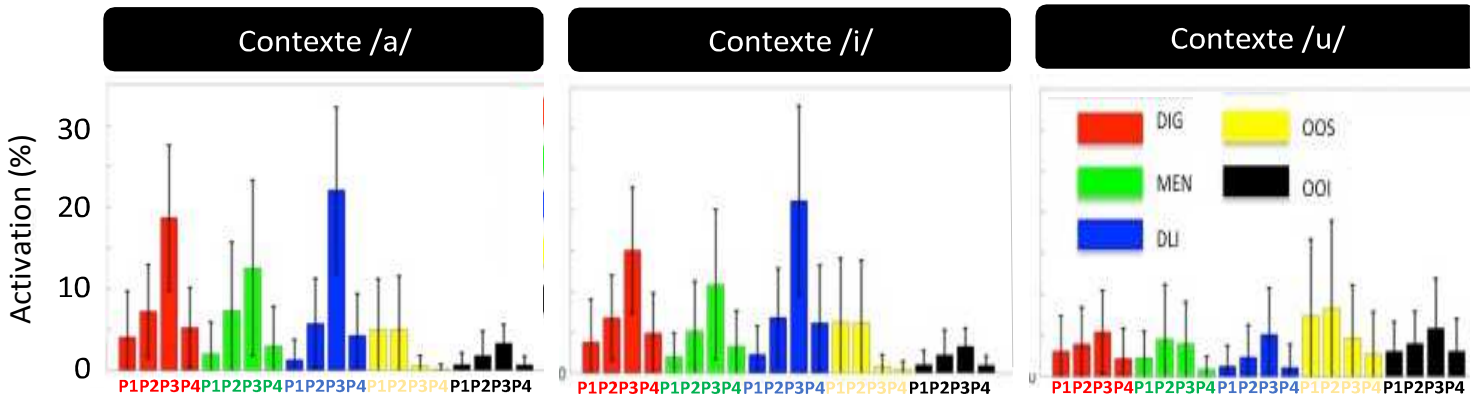


FIGURE 3 : Evolution de l'activité EMG (exprimée en pourcentage de l'activité maximum dans tout le corpus) au cours des phases P1 à P4, pour les cinq muscles étudiés, moyennée sur l'ensemble de consonnes labiales et sur les 4 sujets, lorsque la voyelle suivant la consonne est /a/, /i/ ou /u/.

L'analyse statistique de ces données selon le modèle décrit en section 2.5 permet de préciser ce premier constat global. La phase du mouvement dans laquelle une activité musculaire maximale est observée dépend significativement du muscle considéré, du contexte vocalique, du niveau d'effort, ainsi que de l'interaction entre le muscle considéré et le contexte vocalique ($chisq(8)=188.46$, $p<0.0001$), et de l'interaction entre le muscle considéré et le niveau d'effort ($chisq(16)=94.213$, $p<0.0001$). En contexte /a/ et /i/ les amplitudes des activités musculaires sont du même ordre de grandeur, tandis que l'amplitude des activités musculaires est plus faible pour le contexte vocalique /u/).

3.2 Corrélations entre l'activité musculaire et le déplacement des lèvres

Les analyses de corrélation entre l'activité de chacun des 5 muscles dans les 4 phases du mouvement, et les 3 descripteurs cinématiques du déplacement des lèvres (compression labiale, vitesse de fermeture, vitesse de réouverture) sont synthétisées sur la Figure 4. Celle-ci représente, pour chaque muscle et chaque phase du mouvement, la distribution des 24 coefficients de corrélation (Rho de Spearman) observés pour les 6 logatomes et les 4 locuteurs (chaque corrélation étant calculée sur environ 40 occurrences d'un même logatome). Cette représentation permet de repérer les cas pour lesquels une forte corrélation positive (>50%) est très fréquemment ou quasi-systématiquement observée entre l'activité d'un muscle dans une phase du mouvement, et l'un des 3 descripteurs cinématique du mouvement (distributions présentant un pic très marqué autour de 75%), et les cas pour lesquels l'activité musculaire n'est que peu corrélée, ou avec un degré de corrélation très variable, avec les descripteurs du mouvement.

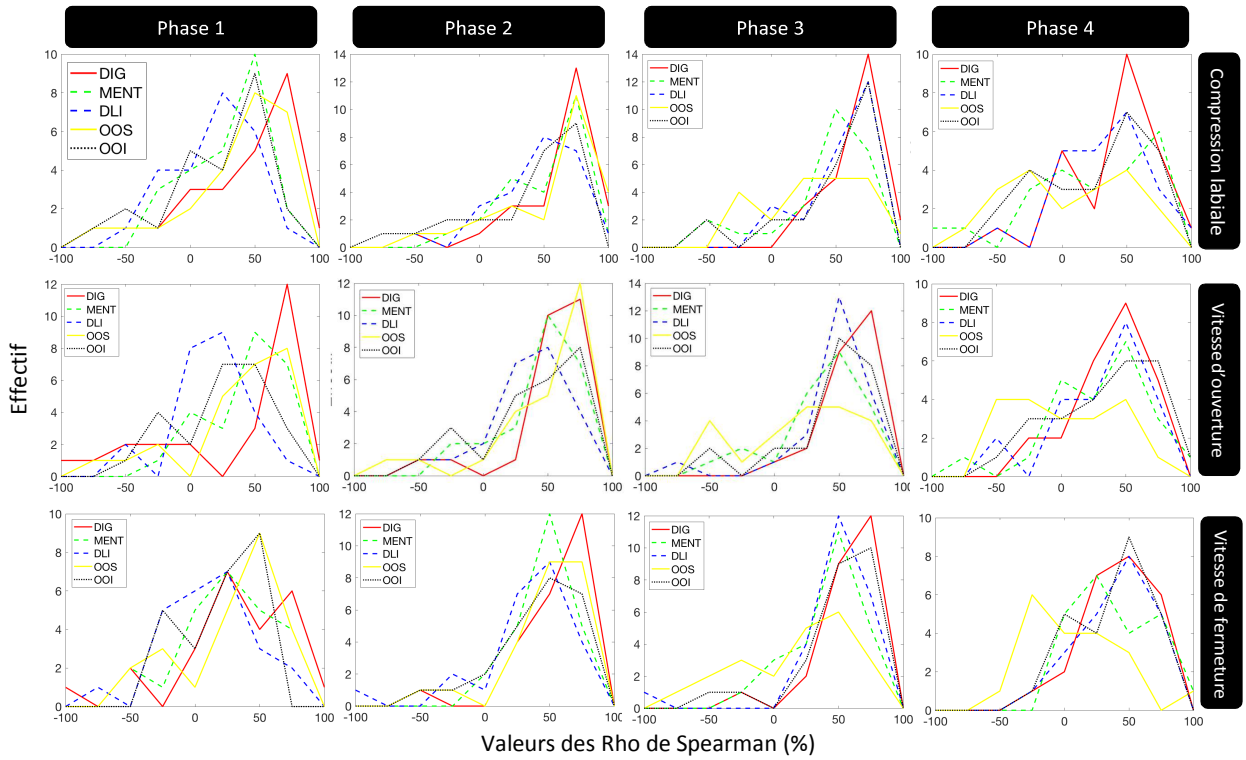


FIGURE 4 : Distribution des coefficients de corrélation (Rho de Spearman) entre l'activité de chacun des 5 muscles (DIG, MENT, DLI, OOS et OOI) dans les 4 phases du mouvement, et les 3 descripteurs cinématiques du déplacement des lèvres (compression labiale, vitesses de fermeture et de réouverture labiale).

Parmi les différentes corrélations d'intérêt, on note en particulier, que la compression labiale corrèle fortement, et de façon très reproductible, avec l'activité du MENT et de l'OOS en phase 2 du mouvement. On remarque également que la vitesse de ré-ouverture labiale corrèle fortement, et de façon très reproductible, avec l'activité du DIG en phase 3 du mouvement. Ces 3 activités musculaires repérées pourraient donc être de bons candidats comme descripteurs physiologiques de l'effort articulatoire. Ces pistes seront explorées plus en détails dans une prochaine base de données sur davantage de locuteurs.

4 Discussion

Pour les voyelles non labiales /i/ et /a/, l'analyse globale de la variation de l'activité des 5 muscles de la phase P1 à la phase P4 suggère que le muscle OOS (actif en phase P1 et P2) joue un rôle majeur dans la fermeture labiale, de l'initiation du mouvement jusqu'à la compression maximale, alors que le DIG, le DLI et le MENT, qui ont une activité croissante jusqu'en phase P3

jouent un rôle majeur dans le geste de réouverture. Ces observations sont cohérentes pour les muscles OOS, DIG et DLI avec les connaissances générales sur le rôle fonctionnel de ces différents muscles. En revanche, elles sont surprenantes pour le MENT qui est plutôt considéré comme un muscle élévateur de la lèvre. Deux explications potentielles à cette contradiction peuvent être formulées. La première serait que les signaux EMG collectés sur l'électrode du MENT soient en fait contaminés par les potentiels d'action des muscles abaisseurs adjacents, en particulier le DLI (phénomène de diaphonie). La seconde serait qu'il existe un mécanisme de coactivation des muscles élévateurs et abaisseurs de la lèvre pour garantir une meilleure stabilité du geste d'ouverture, dont on sait qu'il est crucial pour la production des plosives. Cette hypothèse serait cohérente avec le concept de « synergie » entre muscles antagonistes proposé par Latash (2007), observé de manière quasi-systématique dans les mouvements du bras, et qui permettrait de stabiliser les mouvements.

Il est intéressant de noter que pour la voyelle /u/ les muscles les plus actifs sont le OOS et le OOI qui jouent un rôle majeur (cf par exemple Nazari et al., 2011) sur l'arrondissement des lèvres, crucial pour la voyelle /u/. L'activation plus forte de ces deux muscles débute bien avant le geste de la consonne vers la voyelle. On note donc au niveau musculaire l'effet d'anticipation du geste d'arrondissement vocalique dans la consonne, déjà largement observé sur le plan cinématique (Noiray et al., 2011). On note aussi, que pour cette voyelle, l'OOS est actif en phase P3, ce qui est cohérent avec le rôle que nous attribuons à son activation pour la production de l'arrondissement vocalique.

De manière générale, il est important de noter qu'aucun des muscles considérés dans cette étude n'est actif en phase P4, qui est la phase d'ouverture où se produisent le bruit de plosion et les transitions formantiques vers la voyelle, dont la littérature a montré qu'ils sont des facteurs cruciaux de l'intelligibilité consonantique. Cela suggère que les muscles responsables du mouvement des lèvres lors de la production de la consonne ne conduisent pas le mouvement d'ouverture, mais déterminent les caractéristiques dynamiques des lèvres pour que leur vitesse d'ouverture et leur rigidité permettent les bonnes interactions entre les tissus et l'air pour donner les phénomènes aérodynamiques nécessaires à la réalisation de la consonne.

5 Conclusion

Les données présentées dans cet article ont permis de :

1. décrire temporellement l'activation musculaire de chaque muscle péri-oral ;
2. montrer l'intérêt d'une analyse temporelle plus détaillée de l'activité musculaire lors de la production de parole, ici de consonnes occlusives ;
3. identifier des descripteurs physiologiques de l'effort articulatoire, reproductibles entre les locuteurs et les segments de parole produits. Ainsi, trois descripteurs parmi d'autres possibles s'avèrent pertinents: l'activité des muscles MENT et OOS au cours de la phase de compression labiale (P2), et l'activité du muscle DLI au cours de la phase de relâchement de la compression (P3).

Remerciements

A Thomas Hueber de Gipsa-lab pour ses conseils avisés lors de la réalisation du programme de détection des contours labiaux.

Cette recherche est financée par l'Agence Nationale de la Recherche (Projet StopNCo : Effort et coordination dans la production des consonnes occlusives ; ANR-14-CE30-0017 ; Maëva Garnier).

Références

BECK T.W, HOUSH T.J, CRAMER J.T, WEIR J.P (2008). The effects of electrode placement and innervation zone location on the electromyographic amplitude and mean power frequency versus isometric torque relationships for the vastus lateralis muscle. *Journal of Electromyography and Kinesiology,* 18, 317-328.

BLAIR C, SMITH A (1986). EMG recording in human lip muscles : can single muscles be isolated ? *Journal of Speech and Hearing Research,* 29, 256-266.

CAMPANINI I, MERLO A, DEGOLA P, MERLETTI R, VEZZOZI G, FARINA D. (2007). Effect of electrode location on EMG signal envelope in leg muscles during gait. *Journal of Electromyography and Kinesiology,* 17, 515-526.

HOGREL J.-Y, DUCHÊNE J, MARINI J.-F (1998). Variability of some SEMG parameter estimates with electrode location. *Journal of Electromyography and Kinesiology,* 8, 305-315.

JENSEN C, VASSELJEN O, WESTGAARD R.H, (1993). The influence of electrode position on bipolar surface electromyogram recordings of the upper trapezius muscle. *European Journal of Applied Physiology,* 67, 266-273.

LALLOUACHE, M. T. (1991). *Un poste «Visage-parole» couleur. Acquisition et traitement automatique des contours des lèvres.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.

LAPATKI B.G, OOSTENVELD R, VAN DIJK J.P, JONAS I.E, ZWARTS M.J, STEGEMAN D.F (2010). Optimal placement of bipolar surfaceEMGelectrodes in the face based on single motor unit analysis. *Psychophysiology,* 47, 299-314.

LATASH M.L, SCHOLZ J.P, SCHÖNER G. (2007). Toward a New Theory of Motor Synergies. *Motor Control*, 11, 276-308.

MCCLEAN M.D, TASKO S.M, (2003). Association of Orofacial Muscle Activity and Movement During Changes in Speech Rate and Intensity. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research,* 46, 1387-1400.

NAZARI, M. A., PERRIER, P., CHABANAS, M., PAYAN, Y. (2011). Shaping by stiffening: a modeling study for lips. *Motor control*, 15(1), 141-168.

NOIRAY, A., CATHIARD, M. A., MÉNARD, L., ABRY, C. (2011). Test of the movement expansion model: Anticipatory vowel lip protrusion and constriction in French and English speakers. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 129(1), 340-349.

O'DWYER N.J, QUINN P.T, GUITAR B.E., ANDREWS G, NEILSON P.D (1981). Procedures for verification . of electrode placement in EMG studies of orofacial and mandibular muscles. *Journal of Speech and Hearing Research,* 24, 273-288.

ROY S.H, DE LUCA C.J, SCHNEIDER J, (1986). Effects of electrode location on myoelectric conduction velocity and median frequency estimates. *The American Physiological Society,* 67, 1510-1517.