



Production de consonnes occlusives : Analyse statistique des corrélations entre données acoustiques et physiologiques

Modibo DIABATE
Licence 3 MI - IM²AG (UJF)

Stage professionnel réalisé au GIPSA-lab, en collaboration avec le LJK
du 12 Mai au 11 juillet 2014

Encadrants

Maëva GARNIER (GIPSA-lab)
Silvain GERBER (GIPSA-lab)
Caroline BAZZOLI (LJK)

Membres de Jury

Françoise JUNG
Bernard YCART

This work has been partially supported by the LabEx PERSYVAL-Lab
(ANR-11-LABX-0025-01)

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à l'endroit de mes encadrants Maëva GARNIER, Silvain GERBER et Caroline BAZZOLI pour toute l'aide, la formation et les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués tout au long du stage.

Je remercie le LabEx PERSYVAL-Lab (ANR-11-LABX-0025-01) qui a financé le projet de recherche Phon&Stats dans lequel s'inscrivait mon stage.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à Adeline Leclercq Samson pour m'avoir aidé à trouver ce stage et pour sa disponibilité à me renseigner sur les questions relatives aux métiers de la statistique.

Je voudrais montrer toute ma reconnaissance aux membres de ma famille qui n'ont cessé depuis le Mali de m'encourager et de me motiver pendant ce stage sinon pendant toute l'année.

Je tiens à remercier mon amie Sonia Mariam MASSENYA et ma collègue de classe Mariam BARRY pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de ce travail.

Je remercie mes collègues de bureau Pierre PRABLANC et Sandeep PANDA avec qui j'ai passé les deux mois du stage et tous les autres stagiaires du Département Parole et Cognition (DPC) pour leur sympathie.

Enfin, je tiens à montrer toute ma gratitude envers toutes les personnes qui ont pu m'aider, m'encourager et me soutenir pendant ce stage et pendant cette année qui a été une année un peu spéciale pour moi.

Résumé

La production de la parole requiert la coordination précise de la respiration et des gestes laryngés et articulatoires. Appris par les enfants durant leur développement de la parole, cette coordination est alors automatisée. Cependant, elle reste encore une action motrice complexe qui peut être déstabilisée dans des styles de parole non standards (murmure, crié ou discours hyper-articulé) et peut dysfonctionner dans plusieurs troubles de la voix ou de la parole (forçage vocal, le bégaiement, la dyspraxie).

Les consonnes occlusives (cf au paragraphe définitions (2.2.1)) sont d'un intérêt capital pour une meilleure compréhension de cette coordination comme elles requièrent une coordination pas seulement dans le temps de la respiration, les gestes laryngés et articulatoires, mais aussi dans leur force.

La présente étude vise à explorer à l'aide du logiciel R, la relation (corrélation) entre différents descripteurs acoustiques, articulatoires et aérodynamiques de la production de consonnes occlusives bilabiales (cf 2.2.1) avec un intérêt particulier pour la force articulatoire des lèvres.

Le rapport est structuré en trois grandes parties :

Une première partie sur l'environnement du stage et le contexte de l'étude

Une deuxième partie sur le plan expérimental et les données

Une troisième partie sur les analyses statistiques et les résultats

Glossaire

Dans la suite du manuscrit, nous utiliserons de façon répétées les abréviations suivantes :

Pio	Pression intra-orale
VOT	Voice onset time (ou délai d'établissement du voisement)
IBurst	Intensité du bruit de plosion
CDG	Centre de gravité spectral de l'énergie acoustique du bruit de plosion

Sommaire

1. ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL	8
1.1 LE LABORATOIRE GIPSA-LAB	8
1.2 LE DÉPARTEMENT PAROLE ET COGNITION	8
1.2.1. GAMA (GESTES PHONATOIRES, ANALYSE ET MODÉLISATION ACOUSTIQUE)	8
1.2.2. SLD (SYSTÈMES LINGUISTIQUES ET DIALECTOLOGIE)	8
1.2.3. PCMD (PAROLE CERVEAU MULTIMODALITÉ DÉVELOPPEMENT)	8
1.2.4. MAGIC (MACHINES PARLANTES, GESTES ORO-FACIAUX, INTERACTION FACE-À-FACE, COMMUNICATION AUGMENTÉE)	9
1.3 L'ÉQUIPE PCMD (PAROLE-CERVEAU-MULTIMODALITÉ-DÉVELOPPEMENT)	9
1.4 LES RECHERCHES DE MAËVA GARNIER	9
1.5 LA COLLABORATION ENTRE LE GIPSA-LAB ET LE LJK	10
2. PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES	11
2.1. CONTEXTE ET QUESTIONS	11
2.2. ETAT DE L'ART	11
2.2.1. CONSONNES OCCLUSIVES BILABIALES : DÉFINITION	11
2.2.2. INDICES ACOUSTIQUES DE DISCRIMINATION DES CONSONNES OCCLUSIVES	12
2.2.3. CONTRÔLE DE CES INDICES	13
2.2.4. RELATIONS DE CORRÉLATION ET D'INDÉPENDANCE ENTRE PARAMÈTRES DE CONTRÔLE	14
2.3. HYPOTHÈSES TESTÉES	15
3. EXPÉRIENCE ET BASE DE DONNÉES	16
3.1. PLAN EXPÉRIMENTAL	16
3.2. MISE EN FORME DES DONNÉES	17
3.3. PLAN D'ANALYSES STATISTIQUES	18
3.3.1. STATISTIQUES DESCRIPTIVES	18
3.3.2. MODÉLISATION ET RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE	18
4. RÉSULTATS	24
4.1. INTENSITÉ DU BRUIT DE PLOSION (IBURST, EN DB)	24
4.2. CENTRE DE GRAVITÉ SPECTRAL (CDG EN Hz)	25
4.3. COEFFICIENT D'ASYMÉTRIE DU SPECTRE DU BRUIT DE PLOSION (SKEWNESS)	26
4.4. COEFFICIENT D'APLATISSEMENT DU SPECTRE DU BRUIT DE PLOSION (KURTOSIS)	26
4.5. DURÉE D'ÉTABLISSEMENT DU VOISEMENT (VOT EN MS)	28
4.6. Δf_0, LA VARIATION DE FRÉQUENCE DE VIBRATION DES CORDES VOCALES ENTRE LA VOYELLE SUIVANTE ET LA PHASE D'OCCLUSION (EN Hz).	29
CONCLUSION	31
RÉFÉRENCES BIBLIO	33
ANNEXE	34

1. Environnement de travail

1.1 Le laboratoire GIPSA-lab

Le GIPSA-lab, Grenoble Images Parole Signal Automatique, est une unité mixte de recherche du CNRS et de l'université de Grenoble (Université Stendhal, INPGrenoble, UPMF, UJF). Avec un personnel de 300 personnes dont une centaine de doctorants, il comprend 3 départements: le DPC (Parole cognition), le DIS (Image Signal) et le DAUTO (Automatique).

1.2 Le Département Parole et Cognition

Le Département Parole et Cognition (DPC) du GIPSA-lab a pour originalité d'être centré sur un objet d'étude: la parole, la voix, la communication humaine, et de l'envisager selon différents points de vue disciplinaires: les sciences physiques (acoustique, mécanique), les sciences du langage (phonétique, phonologie, dialectologie), les (neuro)sciences cognitives et les sciences de l'ingénieur (informatique, traitement du signal, robotique). Le département se compose de 4 équipes :

1.2.1. GAMA (Gestes phonatoires, Analyse et Modélisation Acoustique)

Cette équipe du DPC travaille principalement sur la compréhension des principes mécaniques intervenant dans la production de la voix (vibration des cordes vocales, création de sons turbulents par rétrécissement ou occlusion du conduit vocal.).

1.2.2. SLD (Systèmes Linguistiques et Dialectologie)

Les sons d'une langue humaine doivent satisfaire un ensemble de règles pour pouvoir être « décodés » par l'auditeur. Les travaux menés dans cette équipe portent essentiellement sur l'étude de ces règles ou contraintes (dites phonologiques), sur la variabilité et les limites admissibles de ces sons, sur les indices acoustiques qui permettent de distinguer des catégories (par exemple, ce qui distingue un /p/ d'un /b/). Elle s'intéresse aussi à d'autres questions comme le bilinguisme, l'acquisition d'une seconde langue, ou encore les accents régionaux.

1.2.3. PCMD (Parole Cerveau Multimodalité Développement)

L'équipe PCMD, dans laquelle j'ai effectué mon stage, s'intéresse aux mécanismes cognitifs de production et de perception de la parole. Les travaux menés portent sur :

- la façon dont on perçoit et intègre les différents sons de parole pour en reconstituer un message.
- la façon dont on coordonne nos mouvements articulatoires (lèvres, langue, mâchoire, ...) et que l'on contrôle ces mouvements à partir de nos retours sensoriels (auditifs, proprioceptifs, ...)
- les zones cérébrales impliquées dans la production et la perception de la parole.
- les étapes de développement de cette production et perception de la parole chez l'enfant
- les dysfonctionnements cognitifs qui peuvent être à l'origine de troubles de la voix et de la parole.

1.2.4. MAGIC (Machines parlantes, Gestes oro-faciaux, Interaction face-à-face, Communication augmentée)

L'équipe MAGIC travaille sur la conception et le développement de systèmes de reconnaissance de la parole et de synthèse vocale, de systèmes de communication ("têtes parlantes" et robots humanoïdes communicants) avec des applications notamment pour l'aide au handicap (personnes laryngectomisées, handicaps moteurs) et l'aide à la rééducation orthophonique (visualisation de l'articulation, aide à l'apprentissage de la lecture).

1.3 L'équipe PCMD (Parole-Cerveau-Multimodalité-Développement)

Les projets de recherche de l'équipe se déclinent selon les 4 axes de son acronyme : Parole, Cerveau, Multimodalité, Développement.

- Cerveau

Des travaux sont menés sur les réseaux cérébraux de production et perception de la parole, et sur le lien qu'entretiennent ces deux systèmes (notion de « perception motrice » et de neurones miroirs, capacités d'imitation, ...)

- Multimodalité

Les indices de parole ne sont pas seulement audibles mais aussi visibles. Ainsi, les gestes manuels et les mouvements articulatoires visibles vont être très importants pour communiquer dans certains contextes (endroit bruyant, distance, ...). Par ailleurs, il existe dès les premiers mots de l'enfant un lien très étroit entre geste et parole, qu'il est intéressant de mieux comprendre pour pouvoir également se servir du geste comme canal de rééducation de certains troubles de la parole et de la communication.

- Développement

Des études sont menées sur le développement de la parole, non seulement dans l'évolution de l'homme par rapport au primate (ontogénèse), mais également au cours de la vie d'un homme, et notamment dans l'acquisition du langage chez l'enfant, (phylogénèse). Ces travaux s'intéressent aux contraintes anatomiques qui conditionnent ce développement, mais également au développement du contrôle articulatoire (indépendance de certains articulateurs, précision des mouvements).

1.4 Les recherches de Maëva GARNIER

Les travaux de recherche de Maëva GARNIER portent sur les troubles de la voix, en particulier chez les personnes qui utilisent leur voix comme outil de travail (enseignants, avocats, ...). Ces troubles de la voix, pouvant être associés à des lésions au niveau des cordes vocales, se manifestent par une altération de la qualité et/ou de la puissance de la voix. Le but des travaux de M. Garnier est de comprendre pourquoi certaines personnes sont plus susceptibles que d'autres de développer ces troubles, de comprendre comment optimiser la production de la voix (coordination des efforts laryngés, respiratoires, articulatoires) et la communication en général, de façon à développer des programmes de prévention et de rééducation des troubles de la voix.

Pour cela, M. Garnier travaille sur la notion d'effort et d'efficacité vocale, et plus largement sur les efforts et l'efficacité de communication. Elle mène des travaux sur des

personnes maîtrisant certaines techniques expertes d'optimisation de la phonation (chanteurs) et essaie de comprendre l'intérêt de ces techniques d'un point de vue acoustique. Elle conduit également des travaux sur l'adaptation de la parole en situations perturbées (bruit, réverbération, ...), en examinant les différentes stratégies mise en œuvre par différents individus pour rester intelligibles dans de tels environnements, et en comparant les efforts de production que ces différentes stratégies requièrent.

1.5 La collaboration entre le GIPSA-lab et le LJK

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet collaboratif entre le GIPSA-lab et le LJK, intitulé Phon&Stats. Ce projet a été initié en 2013, suite de l'organisation d'une formation en statistiques par les chercheurs du LJK pour les chercheurs du GIPSA-lab. Les problèmes d'analyses statistiques rencontrés par les chercheurs du GIPSA-lab n'étaient en effet pas triviaux d'un point de vue mathématique, du fait qu'ils font intervenir des données répétées et appariées. Un projet a alors été développé entre ces deux laboratoires pour explorer ces questions statistiques, et a reçu le soutien du labex Persyval-lab (ANR-11-LABX-0025-01) grâce auquel a été financé mon stage. Une première réunion commune du projet a eu lieu le 30 Juin, au cours de laquelle nous avons présenté mon travail de stage aux chercheurs du GIPSA-lab et du LJK.

2. Problématique et hypothèses

2.1. Contexte et questions

Le questionnement initial provient de l'observation des mouvements articulatoires de locuteurs en environnement bruyant. Lorsqu'ils communiquent dans le bruit, des locuteurs "hyper-articulent", c'est à dire qu'ils amplifient les mouvements d'ouverture de leur mâchoire et de leurs lèvres (en ouverture, en étirement – comme sur un /i/, en protrusion – comme sur un /u/). Ils amplifient également leurs mouvements de fermeture sur les consonnes. En particulier, on observe une compression des lèvres accrue sur les consonnes bilabiales /p/, /b/, /m/ (Garnier et al. 2007 ; 2008)

La question que se pose Maëva Garnier, c'est de savoir si cette hyper-articulation rend compte d'une stratégie de communication qui viserait à renforcer les indices visibles de parole et ainsi à améliorer l'intelligibilité visuelle dans le bruit, où la modalité auditive est dégradée.

Ou bien si cette hyper-articulation est simplement liée au fait de parler plus fort dans le bruit. En effet, lorsqu'on crie, on accumule davantage de pression dans la bouche (pression intra-orale) lors de la production de consonnes occlusives telles que /p/, /b/. Une compression des lèvres accrue pourrait simplement servir à « contrer » cette force de pression dans la bouche, et à maintenir la fermeture du conduit vocal.

Ce projet a pour ambition de mieux comprendre les contraintes physiques qui sous-tendent les variations de compression des lèvres, et quelle est la part de contrôle individuel possible. Pour cela, le projet cherche à examiner la covariation de paramètres de contrôle de la production (pression intra-orale, compression des lèvres, activité musculaire des lèvres) et diverses caractéristiques acoustiques du son produit (présentés en détails dans la partie suivante), de façon à déterminer s'il existe une corrélation forte entre ces paramètres ou si ces paramètres varient de façon relativement indépendante. S'il existe une corrélation forte, nous souhaitons savoir dans quelle mesure celle-ci est invariante, toujours identique quelles que soient les conditions et les locuteurs, ou dans quelle mesure elle dépend de facteurs tels que le type de consonne, la rapidité du débit de parole ou le niveau d'effort vocal de la production.

2.2. Etat de l'art

2.2.1. Consonnes occlusives bilabiales : définition

D'un point de vue articulatoire, les consonnes occlusives sont réalisées avec une occlusion de la cavité buccale, une augmentation de la pression derrière cette occlusion et un relâchement de la fermeture permettant à l'air d'être expulsé rapidement.

Acoustiquement, ces consonnes sont caractérisées par trois principaux événements (voir Figure 1)

- Occlusion : Durant la phase d'occlusion, il y a un blocage de l'écoulement d'air, et par conséquent la pression augmente dans la bouche. Cette phase est caractérisée par un silence pour les occlusives non voisées ou par une très faible énergie en basse fréquence pour les occlusives voisées du français. Cette

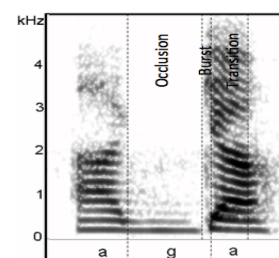


Fig 1. Spectrogramme d'un mot /aga/.

occlusion est brève, 100 ms au maximum.

- « Burst »: Un bruit d'explosion est créé au relâchement de l'occlusion. Il est caractérisé sur le spectrogramme par un pic d'intense énergie avec une durée d'environ 10 ms.
- Transition: La transition est la phase entre le relâchement de l'occlusion et la stabilisation de la voyelle suivante.

Les consonnes occlusives françaises diffèrent par:

- le voisement: [b d g] sont voisées, [p t k] sont non voisées
- le lieu d'articulation : [p b] sont des occlusives bilabiales, elles sont produites par une occlusion du conduit vocal au niveau des lèvres. [t d], sont des occlusives apico-dentales, l'occlusion est faite avec la pointe de la langue contre la partie alvéolaire du palais. [k g] sont des occlusives dorso-vélaires, l'occlusion est faite avec le dos de la langue contre la partie vélaire du palais. (voir Figure 2)
- le mode d'articulation (oral vs. nasal) : Les consonnes nasales (/m/, /n/, /ŋ/) sont produites avec la même place d'articulation et le même voisement que les occlusives orales (/b/, /d/, /g/), mais diffèrent par une position abaissée du voile du palais (extrémité molle du palais, au niveau du pharynx). Le conduit oral est toujours fermé, mais de l'air s'échappe par le nez, de telle façon qu'aucune pression ne se forme dans la cavité orale. Par conséquent, aucun bruit d'explosion n'est créé au moment du relâchement de l'occlusion.

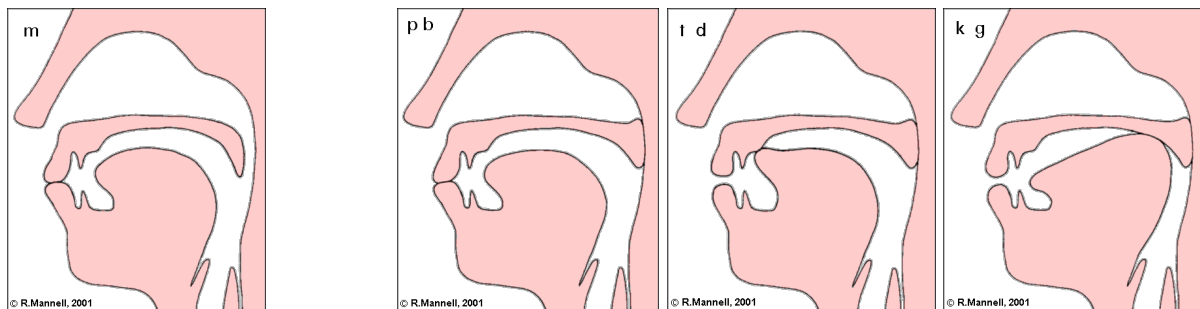


Fig 2. Représentation schématique de la configuration du conduit vocal au cours de la phase d'occlusion des consonnes occlusives orales et nasales du français.

2.2.2. Indices acoustiques de discrimination des consonnes occlusives

Indices de voisement

En français, l'opposition entre occlusives voisées et non voisées repose littéralement sur la vibration ou non des cordes vocales pendant la phase d'occlusion. Les segments [b d g] sont généralement prévoisés (les cordes vocales vibrent avant le relâchement de l'occlusion) (voir Figure 3).

Le délai d'établissement du voisement (ou VOT pour « Voice Onset Time » en anglais) est défini par Klatt (1975) comme la durée (en ms) entre le relâchement de l'occlusion – correspondant à la création du bruit de plosion (burst) – et la reprise de vibration des cordes vocales. Avec cette définition, le

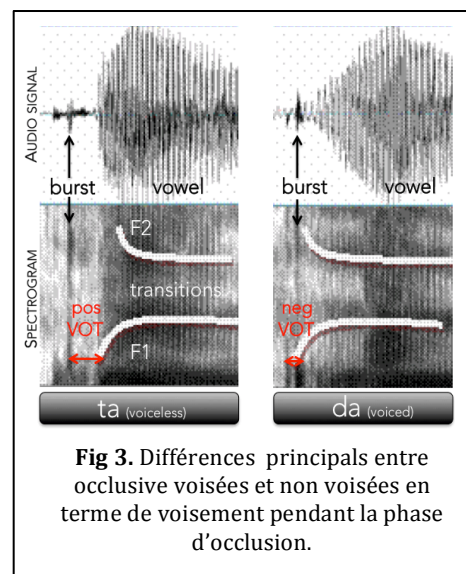


Fig 3. Différences principales entre occlusive voisées et non voisées en terme de voisement pendant la phase d'occlusion.

VOT est positif pour les consonnes non voisées et négatif pour les consonnes voisées.

Une autre définition élargie du VOT a été proposée par Lisker & Abramson (1964). C'est sur la base de cette définition qu'a été mesuré le VOT dans cette étude. Dans cette définition alternative, le VOT est toujours positif.

Indices du lieu d'articulation

Le lieu d'articulation configure le volume des cavités situées devant et derrière le point d'occlusion du conduit vocal (au niveau des lèvres, des dents ou du palais). La taille de la cavité avant joue un rôle déterminant sur l'enveloppe du spectre du bruit de plosion créé au relâchement de l'occlusion (burst).

L'enveloppe spectrale du burst est caractérisée en la considérant comme une distribution de 0 à 8kHz et en calculant les 4 premiers moments de cette distribution (Forrest et al. 1988):

- Le 1^{er} moment est appelé Centre de Gravité Spectral (CDG) et caractérise le barycentre spectral de l'énergie. Autrement dit, il indique très globalement si le spectre est plutôt riche en basses fréquences (bruit perçu comme grave) ou en hautes fréquences (bruit perçu comme aigu). Il s'exprime en Hertz.
- Le 2^{ème} moment correspond à l'écart type de cette distribution d'énergie, mais n'est pas d'intérêt ici, car elle ne permet pas de distinguer les spectres des différentes consonnes occlusives.
- Le 3^{ème} moment, usuellement normalisé, est appelé coefficient d'asymétrie (ou skewness en anglais). Il traduit le degré d'asymétrie de la distribution, par comparaison avec une distribution gaussienne. Ce coefficient est supérieur à 1 lorsque l'énergie augmente dans les hautes fréquences (spectre « montant »), inférieur à 1 lorsque l'énergie est renforcée dans les basses fréquences (spectre « descendant »).
- Le 4^{ème} moment spectral, également communément normalisé, est appelé coefficient d'aplatissement (ou kurtosis en anglais). Il permet de décrire le degré d'aplatissement de la distribution d'énergie. Ce coefficient est supérieur à 3 dans le cas où la distribution est plus « pointue » et acute qu'une distribution gaussienne (distribution « leptokurtique »). Au contraire, ce coefficient est inférieur à 3 dans le cas où la distribution est plus plate qu'une gaussienne (distribution « platikurtique »).

Et bien sûr, il est possible de mesurer l'intensité acoustique de ce bruit de plosion en décibels (dB).

Pour les occlusives labiales [p b], il n'y a presque pas de cavité avant, sauf si elles sont suivies par les voyelles arrondies telles que [y u]. Dans ce cas, l'intensité du burst est faible, son spectre est diffus et descendant avec une amplification des basses fréquences (voir Figure 4a). Cela se traduit par une faible CDG (~ 350Hz, plus élevé pour les voyelles antérieures), un coefficient d'asymétrie positif et un faible degré d'aplatissement (Forrest et al 1988).

2.2.3. Contrôle de ces indices

Contrôle du délai d'établissement du voisement (VOT)

Le voisement est conditionné par l'existence d'une différence de pression positive entre les cavités situées au dessus (conduit vocal) et en dessous des cordes vocales

(poumons). Pour les occlusives voisées en français, les cordes vocales peuvent continuer à vibrer pendant la phase d'occlusion aussi longtemps que la pression intra-orale (Pio) ne dépasse pas la pression sous-glottique (Psub).

Le temps minimum à partir duquel les cordes vocales peuvent commencer à vibrer à nouveau après le relâchement de l'occlusion correspond à l'instant où la Pio descend jusqu'au niveau de Psub. Plus il atteint vite ce seuil, plus le VOT est court. Par conséquent, la valeur du VOT devrait pouvoir être contrôlée dans une certaine mesure par:

- la Pio max : Plus la Pio est grande, et plus le VOT devrait être long. Dans le sens de cette hypothèse, il a été montré que le VOT augmentait avec l'effort vocal (Arkebauer et al 1987) et que les occlusives non voisées, avec des VOT positifs, étaient produites avec des niveaux plus élevés de Pio que les occlusives voisées (Koenig 2008).
- la vitesse articulatoire: plus le relâchement est rapide, plus le VOT devrait être court. Allant dans le sens de cette hypothèse, il a été montré que, les consonnes voisées, ayant des VOT positifs, étaient produites avec une plus grande force d'articulation et vitesse de fermeture que les consonnes non voisées (Sussman et al 1973). Par ailleurs, Nabu et Blumstein (1998) ont montré que le VOT des occlusives voisées du français était affectée par des variations de rapidité du débit de parole.

Contrôle des caractéristiques acoustiques du bruit de plosion (burst)

Les différentes caractéristiques d'intensité et de spectre du burst observées pour les occlusives vélaires, dentales et labiales peuvent être liées au volume de la cavité située en avant de la constriction du conduit vocal. Cette cavité *avant* affecte non seulement l'intensité du burst (plus grande pour une cavité avant plus large), mais aussi l'enveloppe spectrale du burst (diffus pour les occlusives dentales et labiales, compact pour les vélaires). Il est clair, par conséquent, que l'intensité et l'enveloppe spectrale du burst, devraient pouvoir être variées au sein d'une même catégorie de consonnes (/p/, /t/, /k/) en faisant varier légèrement le lieu de l'occlusion du conduit vocal. C'est le cas, en particulier, pour les consonnes chuchotées, dont le lieu d'articulation est légèrement modifié, résultant en une élévation du centre de gravité (CDG) du spectre du burst (Osfar 2011).

2.2.4. Relations de corrélation et d'indépendance entre paramètres de contrôle

Pour les consonnes occlusives voisées (orales ou nasales), les cordes vocales continuent de vibrer pendant la phase d'occlusion. Cependant, on observe une diminution importante et soudaine de la fréquence de cette vibration (Fréquence fondamentale f_0 , exprimée en Hertz) pendant l'occlusion, comparée à la fréquence de vibration pendant les voyelles précédentes et suivantes. Cette diminution de la f_0 pourrait être la conséquence de l'accumulation de pression dans la cavité orale (Pio) pendant l'occlusion, du moins pour les consonnes occlusives orales.

Plusieurs auteurs ont montré une forte corrélation entre l'activité musculaire des lèvres et la vitesse des mouvements de lèvres (McClean et Tasko 2003), ou entre l'augmentation de Pio et la force de compression des lèvres (Lübker et Parris 1969), mais à notre connaissance, aucune étude n'a encore examiné l'influence possible de la de Pio, de la force et de la vitesse des gestes articulatoires, sur l'intensité et l'enveloppe spectrale du bruit de plosion. Pour les consonnes fricatives, cependant, il est connu que le spectre de bruit de frottement dépend de l'aire de constriction du conduit vocal, au

travers de laquelle s'écoule l'air, ainsi que de l'importance de ce débit (Grandchamp et al. 2008).

2.3. Hypothèses testées

Sur la base de ces connaissances antérieures, Maëva Garnier formule les hypothèses suivantes, que nous cherchons à tester dans cette étude:

La première hypothèse est que les variations de VOT soient fortement et positivement corrélées aux variations de pression intra-orale (Pio), et au contraire relativement indépendantes des variations de compression des lèvres.

Nous attendons que cette relation dépende significativement du segment (entre la consonne voisée /b/ et la non voisée /p/) et qu'elle puisse être affectée par le débit de parole, du fait que celui-ci influence la vitesse articulatoire.

De même, en ce qui concerne la diminution soudaine de la fréquence de vibration des cordes vocales pendant l'occlusion, par rapport aux voyelles adjacentes (Δf_0).

La deuxième hypothèse est que les variations d'intensité et d'enveloppe spectrale du bruit de plosion soient influencées significativement, mais peut être faiblement, par à la fois les variations de Pio et de force interlabiale.

Nous nous attendons à ce que l'intensité du burst augmente avec la Pio et la force des lèvres.

Nous attendons que l'énergie hautes-fréquences augmente avec la Pio et la force des lèvres. Autrement dit que le centre de gravité spectral (CDG) augmente, de même que le coefficient d'asymétrie (Skewness), restant sans doute négatif, mais se rapprochant de zéro).

Enfin, nous nous attendons à une variation du coefficient d'aplatissement (Kurtosis) avec la Pio et la force interlabiale, mais sans hypothèse a priori sur le sens de cette variation.

Nous n'attendons pas que ces relations diffèrent significativement entre une consonne voisée et non voisée. En revanche, il est probable que ces relations soient influencées également par la vitesse articulatoire, et par conséquent indirectement par la rapidité du débit de parole.

Enfin, en ce qui concerne le lien entre les paramètres de contrôle, nous attendons tout d'abord une forte corrélation entre l'activité musculaire des lèvres et leur force de compression, avec une relation entre ces paramètres qui fasse également intervenir les variations de pression intra-orale (Pio) derrière les lèvres. Par conséquent, nous attendons une relation qui dépende du type de consonne (/p/, /b/, /m/), et certainement aussi de la rapidité du débit de parole.

3. Expérience et base de données

3.1. Plan expérimental

Pour commencer, une étude pilote a été réalisée sur une locutrice française.

Celle-ci a été enregistrée dans des conditions de laboratoire, en produisant les mots /apa /, /aba/ et/ ama /

- dans 2 modes de phonation (modal (c'est à dire normal) et en voix chuchotée)
- avec 3 niveaux d'effort vocal pour le mode modal (murmuré, conversationnel et crié) et 2 niveaux d'effort pour le mode chuchoté (faible et fort).
- avec 3 rapidités croissantes du débit de parole, données par un métronome (90 bits per minute (bpm), 180 bpm et 270 bpm).

20 répétitions des mots ont été enregistrées dans chaque mode et niveau d'effort vocal.

Nous avons par conséquent considéré 3 facteurs qualitatifs :

- SEGMENT, à 3 niveaux (/p/, /b/, /m/)
- MODE DE PRODUCTION, à 5 niveaux (modal murmuré, modal conversationnel, modal crié, chuchoté faible, chuchoté fort).
- DEBIT DE PAROLE, à 3 niveaux (débit 90, 180 et 270 bpm)

Plusieurs signaux ont été acquis simultanément (voir Figure 4):

- Le signal audio a été enregistré avec un microphone de pression 1/4-in (Bruel et Kjaer 4944-A) placé à 30 cm de la bouche.
- La pression intra-orale (Pio) a été enregistrée avec un tube capillaire et le système d'acquisition EVA.
- L'activité du muscle principal de la lèvre (orbicularis oris) a été mesurée à l'aide de deux paires d'électrodes de placées sur la lèvre supérieure (EMG1) et la lèvre inférieure (EMG2).
- La force de compression entre les lèvres supérieure et inférieure a été estimée en utilisant un capteur de force semblable à celle insérée dans le dispositif PRESLA (Jeannin et al. 2008), collé sur la lèvre inférieure et calibré en cm H2O, en utilisant une colonne d'eau et un récipient en latex.

Les 4 descripteurs suivants ont ensuite été extraits pour tous les mots:

- l'intensité moyenne du mot (en dB SPL), variable quantitative continue et positive.
- le maximum de Pio (en cm H2O), variable quantitative continue et positive. A noter que la Pio est nulle ou très proche de zéro pour la consonne nasale/m/.
- l'énergie maximale des deux signaux EMG (sans unité).
- la force maximale de compression de la lèvre (en kPa).

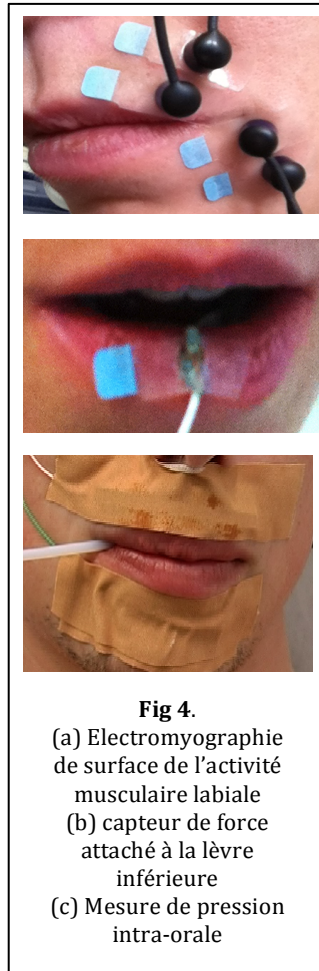


Fig 4.

(a) Electromyographie de surface de l'activité musculaire labiale

(b) capteur de force attaché à la lèvre inférieure

(c) Mesure de pression intra-orale

Les 3 descripteurs suivants ont été extraits pour les consonnes occlusives orales seulement (/p/ et /b/), pour lesquelles un bruit de relâchement est produit au relâchement de l'occlusion:

- le VOT (en ms).
- l'intensité du bruit de plosion (en dB SPL),
- le centre de gravité spectral du bruit de plosion (en kHz).
- le coefficient d'asymétrie (Skewness, sans unité).
- le coefficient d'aplatissement (Kurtosis, sans unité)

Le descripteur suivant a été extrait pour les consonnes voisées seulement (/b/ et /m/), pour lesquelles les cordes vocales continuent de vibrer pendant la phase d'occlusion :

- Δf_0 , la variation de fréquence de vibration des cordes vocales entre la phase d'occlusion et la voyelle suivante (en Hz).

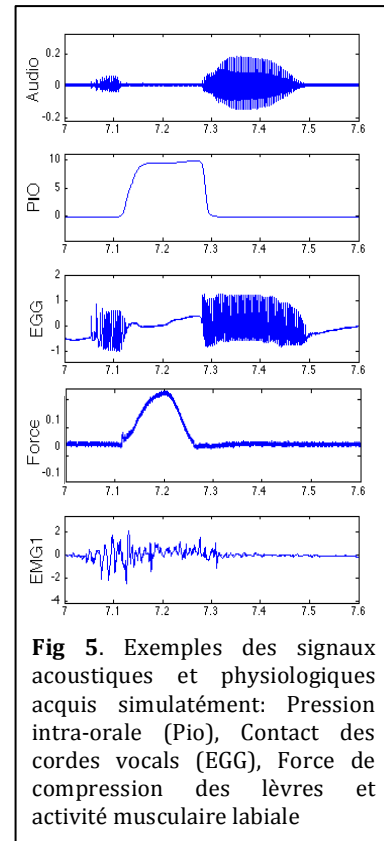


Fig 5. Exemples des signaux acoustiques et physiologiques acquis simultanément: Pression intra-orale (Pio), Contact des cordes vocales (EGG), Force de compression des lèvres et activité musculaire labiale

3.2. Mise en forme des données

Les données recoltées à partir de l'expérience ci-dessus ont été stockées dans un fichier excel. Ce fichier comporte 14 colonnes et chacune d'elle correspond aux valeurs d'une variable quantitative ou qualitative. On classe ces variables en trois groupes :

- ❖ Variables à expliquer, correspondant aux descripteurs acoustiques du son produit
 - VOT, délai d'établissement du voisement : variable quantitative continue et positive, exprimée en ms.
 - Δf_0 , variation de fréquence de vibration des cordes vocales (f_0) entre la voyelle suivante et la phase d'occlusion : variable quantitative et positive, exprimée en Hz.
 - lmean, l'intensité moyenne du mot: variable quantitative continue et positive, exprimée en dB SPL.
 - lburst, l'intensité du bruit de plosion : variable quantitative continue et positive, exprimée en dB SPL.
 - CDG, Centre de gravité spectral du bruit de plosion : variable quantitative continue et positive, exprimée en Hz.
 - Skewness, Coefficient d'asymétrie du spectre du bruit de plosion: variable quantitative continue et réelle (pouvant être négative), sans unité.
 - Kurtosis, Coefficient d'aplatissement du spectre du bruit de plosion : variable quantitative continue et réelle (pouvant être négative), sans unité.
- ❖ Variables explicatives quantitatives, correspondant aux descripteurs physiologiques du geste de contrôle
 - Pio, le maximum de pression intra-orale : variable positive, exprimée en cmH2O.
 - Force, le maximum de force de compression entre les lèvres supérieure et inférieure: variable positive, exprimée en kPa.

- EMG1 et EMG2, les maxima d'activité musculaire des lèvres supérieure et inférieure: variables positives, sans unité.

❖ Variables explicatives qualitatives (ou catégorielles), correspondant aux facteurs distinguant les différentes conditions du plan expérimental

- SEGMENT, le type de consonne bilabiale, avec 3 modalités : /p/, /b/ ou /m/).
- MODE, le mode de production, avec 5 modalités : modal murmuré, modal conversationnel, modal crié, chuchoté faible, chuchoté fort.
- DEBIT, la rapidité du débit de parole, variable ordinale à 3 modalités (90, 180, 270 bpm).

Le fichier de données (tableau excel) est constitué d'environ 20 répétitions de chacune des 45 combinaisons des 3 segments * 5 modes de production * 3 débit de parole. Soit environ 900 observations.

3.3. Plan d'analyses statistiques

L'ensemble de la méthodologie a été réalisé à l'aide du logiciel R. L'analyse a été effectuée en deux temps: une partie statistique descriptive consistant à illustrer graphiquement les comportements d'une variable explicative sur une variable à expliquer suivant une hypothèse de linéarité dans chacune des 45 conditions expérimentales) et une partie modélisation (régression multiple)

3.3.1. Statistiques descriptives

Nous avons visualisé les données (à travers des nuages de points d'une variable à expliquer en fonction d'une variable explicative) dans chacune des conditions expérimentales (définies par les facteurs SEGMENT, MODE et DEBIT) afin d'observer des tendances de variation d'une variable en fonction d'une autre et de voir dans quelle mesure cette relation peut être considérée comme linéaire. Cela nous a orienté vers une modélisation à l'aide de modèles linéaires.

3.3.2. Modélisation et régression linéaire multiple

Pour chaque variable à expliquer, nous avons alors construit un modèle complet de régression linéaire multiple dans lequel figure les facteurs Segment, Debit, Mode, les variables quantitative Pio et Force ainsi que l'ensemble de leurs interactions. Chaque modèle de régression comporte les étapes qui suivent :

- Régression linéaire multiple (fonction lm() de R)

L'écriture standard d'un modèle de régression se présente sous la forme suivante :

$$Y_i = b_0 + b_1X_{i1} + \dots + b_pX_{ip} + \varepsilon_i$$

Avec :

Y_i : la $i^{\text{ème}}$ observation de l'endogène Y (la variable à expliquer) pour i allant de 1 à n (n étant le nombre d'observations)

$X_{i1}, \dots, X_{ip}$: représentent les p variables explicatives

ε_i : le terme d'erreur qui par hypothèse suit une loi normale de moyenne nulle et de variance constante σ^2 ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$)

Les paramètres $b_1, \dots, b_p$ sont finis mais inconnus. Ils sont estimés avec la méthode des moindres carrés ou du maximum de vraisemblance.

- La sélection de modèles (fonction `step()` de R avec le critère BIC)

La procédure de sélection de variables choisie est la procédure stepwise (sélection « pas à pas ») qui est une version combinée des procédures de sélection ascendante et descendante. À chaque pas, elle permet de réexaminer les variables ôtées dans le modèle aux étapes antérieures en se basant sur le Critère d'Information Bayésien (BIC) défini par $BIC = -2\log(L) + k\log(n)$ (avec n le nombre d'observations, k le nombre de paramètres estimés et L la vraisemblance du modèle).

- Validation du modèle

L'analyse des résidus

Pour qu'un modèle de régression soit accepté, il lui faut remplir certaines conditions d'application. Ces conditions d'application peuvent être vérifiées à partir d'un certain nombre de tests statistiques ou par des graphiques portant sur quelques propriétés que le modèle se doit de vérifier (Rakotomalala 2011). La figure 6 représente un exemple de ces graphiques.

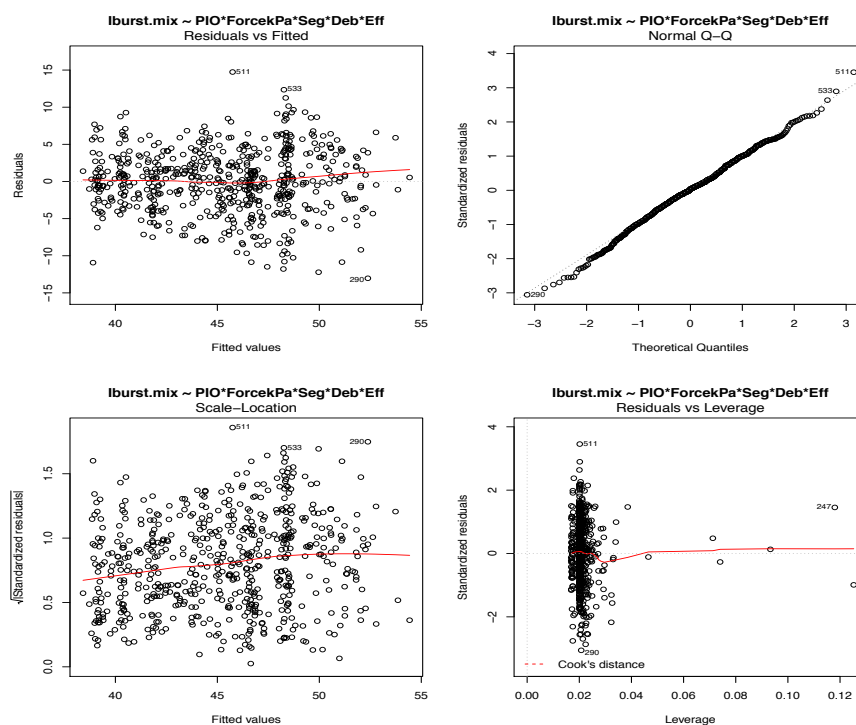


Fig 6 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «Iburst ~ Force + Debit + Segment * Mode».

- L'homogénéité des résidus : Graphique « Residuals vs Fitted » (en haut à gauche)

Ce graphique permet de se rendre compte de la qualité de la régression. Les résidus doivent être répartis aléatoirement autour de la valeur 0, ils ne doivent pas avoir tendance à prendre des valeurs différentes selon les valeurs de la variable à expliquer. On cherche surtout à voir si la prédiction est d'égale qualité sur tout le domaine de valeurs de la variable à expliquer. Si pour une valeur ou

une plage de valeurs de la variable à expliquer, les résidus s'écartent visiblement, il faut s'inquiéter car cela indique que certaines valeurs de la variable à expliquer ont été mal reconstituées par le modèle.

- Normalité des résidus : Graphique « Normal Q-Q » (en haut à droite)

Il ne s'agit pas d'un test au sens statistique du terme. Le graphique Normal Q-Q plot (quantile-quantile plot) est un graphique "nuage de points" qui vise à confronter les quantiles de la distribution empirique et les quantiles d'une distribution théorique normale, de moyenne et d'écart type estimés sur les valeurs observées. Si la distribution est compatible avec la loi normale, les points forment une droite. Dans la littérature francophone, ce dispositif est appelé Droite de Henry. Vérifier cette hypothèse semble incontournable pour obtenir des résultats exacts parce que une grande partie de l'inférence statistique (ex. test de pertinence globale de la régression, prédiction par intervalle, etc.) repose sur l'hypothèse de distribution normale du terme d'erreur de l'équation de régression.

- Homoscédasticité: Graphique «Scale-Location » (en bas à gauche)

Ce Graphique est similaire au premier (le Graphique « Residuals vs Fitted »), mais il utilise la racine carrée des résidus standardisés. Comme le premier, il ne devrait y avoir aucune tendance discernable. Ce graphique peut être utile pour vérifier l'homoscédasticité. On parle d'homoscédasticité lorsque la variance des erreurs stochastiques de la régression est la même pour chaque observation de l'endogène (une hypothèse de base de la régression linéaire).

- Détection des points aberrants et points influents : Graphique « Residuals vs Leverage » (en bas à droite)

Ce dernier graphique représente en même temps les résidus et le levier. On peut y observer également la distance de COOK qui est une mesure de l'influence de chaque point dans l'ajustement du modèle.

Autres critères de validation

En plus des graphiques sur les résidus, il existe d'autres critères de validation du modèle comme le coefficient de détermination ajusté ou R^2 ajusté (Adjusted R-squared) qui renseigne sur la qualité d'adéquation du modèle ou encore l'estimation de l'écart-type résiduel (residual standard error) qu'on compare à l'étendue de variation de la variable à expliquer.

Transformation de variables

Au cas où certaines conditions d'application (par exemple l'homogénéité ou la normalité des résidus) ne sont pas vérifiées, on peut faire une transformation normalisante comme la transformation logarithmique (on prend le Log de la variable à expliquer) et on recommence la procédure de modélisation. Les interprétations se feront ensuite en tenant compte de cette transformation.

Ci-dessous, la figure 7 représente les résidus d'un modèle simplifié avant la transformation logarithmique de sa variable à expliquer et la figure 8 représente les résidus du modèle simplifié obtenu après la transformation logarithmique de la variable à expliquer précédente.

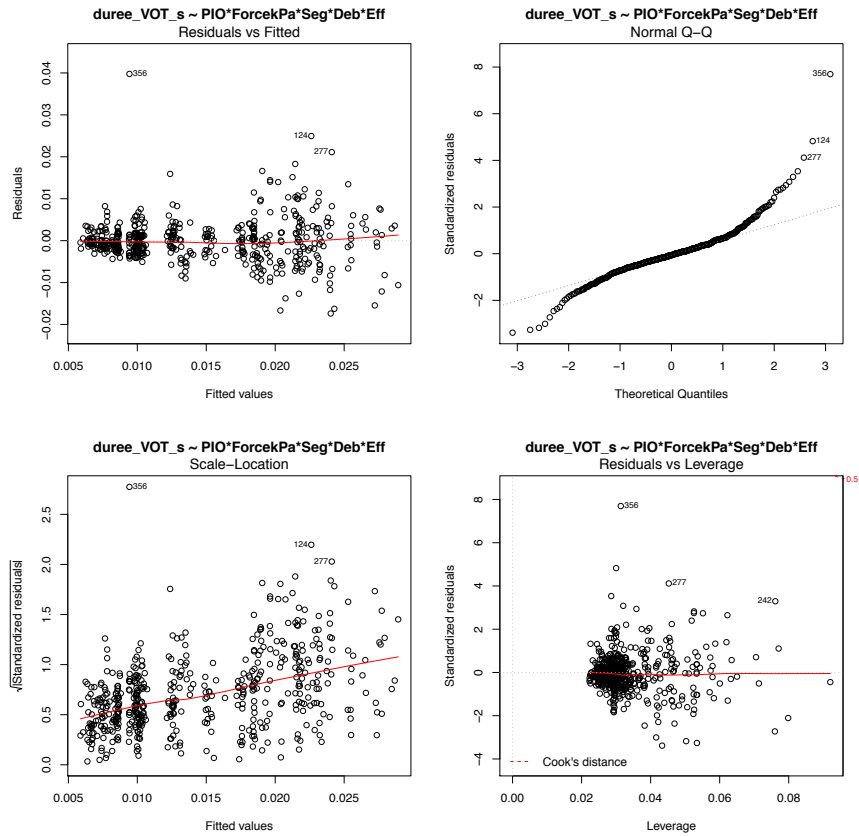


Fig 7: Représentation des résidus pour le modèle simplifié «VOT ~ Pio*Debit + Segment*Debit + Segment*Mode».

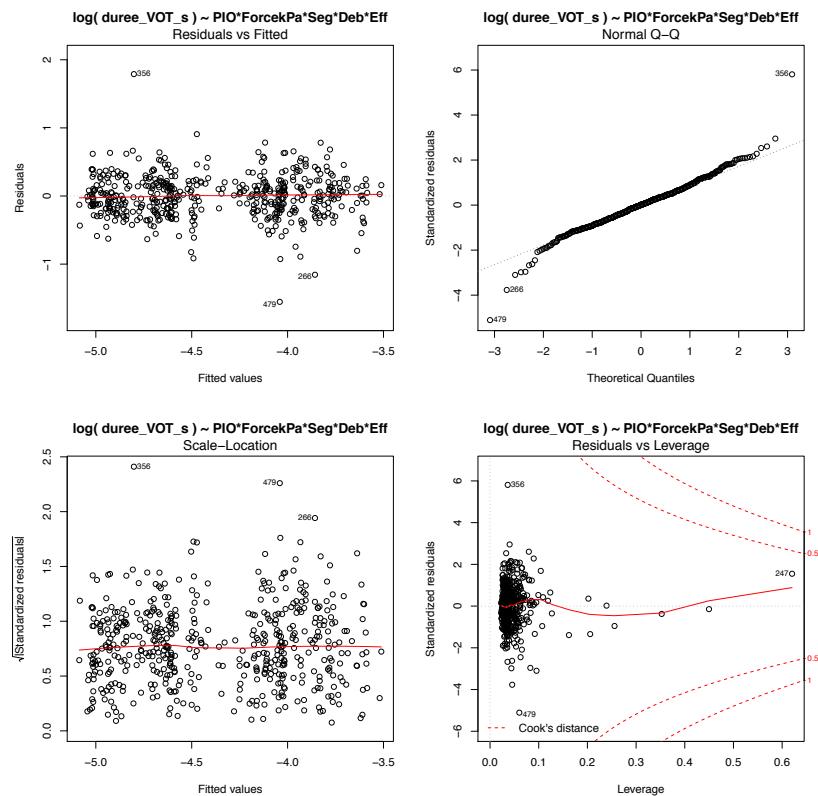


Fig 8: Représentation des résidus pour le modèle simplifié «Log(VOT) ~ Segment*Mode + Segment*Debit + Pio*Force*Debit»

- Interprétation des résultats

Une fois que la procédure de sélection de modèle a été réalisée et que nous savons quels sont les effets qui ont un impact significatif sur la variable réponse (informations données par les sorties de R : le « Summary » du modèle), nous pouvons nous interroger sur les pentes de régressions et leurs différences entre les modalités des facteurs concernés (qu'on peut représenter graphiquement à l'aide de la fonction visreg de R).

- Le « Summary » du modèle (lu dans la console R)

Ci-dessous figure un exemple de Summary d'un modèle qui présente les paramètres conservés après la procédure de sélection.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0.214	0.095	-2.256	0.024
Segment2	0.498	0.079	6.305	< 0.001
Effort2	-0.254	0.067	-3.792	< 0.001
Effort3	-0.278	0.07	-3.978	< 0.001
Effort4	-0.201	0.061	-3.278	0.001
Effort5	-0.388	0.08	-4.875	< 0.001
Pio	-0.012	0.012	-1.002	0.317
Segment2:Pio	-0.063	0.014	-4.416	< 0.001

La première colonne (Estimate) donne l'estimation du paramètre. La deuxième colonne (Std.Error) donne l'écart-type estimé du paramètre. La troisième colonne (t value) donne la valeur de la statistique du test d'hypothèse (H_0 : paramètre = 0). Et enfin la quatrième colonne (Pr(>|t|)) donne la p-value du test (la probabilité sous H_0 de dépasser la valeur de la statistique du test).

- Analyse de contrastes

Nous réalisons également des tests de comparaisons multiples lorsqu'il reste une variable quantitative dans le modèle et que la pente de régression entre la variable à expliquer et celle ci peut varier suivant les suivantes les conditions expérimentales. Pour cela, après avoir écrit les matrices de contrastes, nous appliquons la méthode présentée dans l'article de Hothorn & al (2008). Cette méthode garantit que le risque de première espèce lié à la prise simultanée de toutes les décisions ne dépasse pas un seuil que l'on se fixe à l'avance (0.05) en ajustant les p-values. Nous utilisons la fonction glht du package multcomp du logiciel R.

Ci-dessous figure le résultat des comparaisons multiples (sur un exemple de modèle simplifié) dont l'objectif est de savoir si les pentes de régression (ou leurs différences) sont significatives.

hypothesis	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Pio_S1 = 0	-0.012	0.012	-1.002	0.573
Pio_S2 = 0	-0.075	0.015	-4.892	< 0.001
Pio_S2 - Pio_S1 = 0	-0.063	0.014	-4.416	< 0.001

La première colonne du tableau indique l'hypothèse du test. La colonne « estimate » contient les estimations ponctuelles des pentes (ou de leurs différences). La colonne « Std. Error » contient les écarts-type estimés des pentes (ou de leurs différences). La colonne « t value » donne la valeur de la statistique du test. La colonne « Pr(>|t|) » donne la p-value du test. Si la p-value est inférieur à 0.05, on rejette l'hypothèse du test et on considère que la pente de régression est significativement différente de 0 (ou que leur différence est significative).

4. Résultats

Dans cette partie, nous exposons les résultats des analyses statistiques menées.

4.1. Intensité du bruit de plosion (Iburst, en dB)

En partant du modèle global « $Iburst \sim Force * Pio * Debit * Segment * Mode$ », nous aboutissons au modèle simplifié « $Iburst \sim Force + Debit + Segment * Mode$ ».

Les 4 Graphiques de résidus (figure 14 de l'annexe) nous permettent de vérifier que les conditions d'application de la régression sont vérifiées.

Par ailleurs, la valeur du R^2 ajusté (0.42) et l'erreur standard résiduelle (4.309 dB, comparé à l'étendue de variation de Iburst de 32.6 dB) confirment la qualité du modèle.

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 1 en annexe.

On remarque que le modèle simplifié ne prend plus en compte la variable quantitative Pio mais seulement la variable Force ainsi que les trois variables qualitatives Segment, Débit et Mode. Cela signifie que les variations de la Pio n'influencent pas significativement celles de Iburst.

Au contraire, l'intensité du bruit de plosion est significativement influencée par la Force, et que la pente de régression entre ces deux variables ne dépend pas significativement du segment, du mode de production et de la rapidité du débit de parole (cf figure 9).

Concrètement, Iburst tend à augmenter avec la Force selon une pente positive de 0.00044, significativement différente de zéro ($p = 5.10^{-4}$).

En consultant la table 1, on peut voir que cette pente est malgré tout assez faible, comparée à l'influence qu'exerce les facteurs qualitatifs Débit, Segment et Effort sur les variations de Iburst.

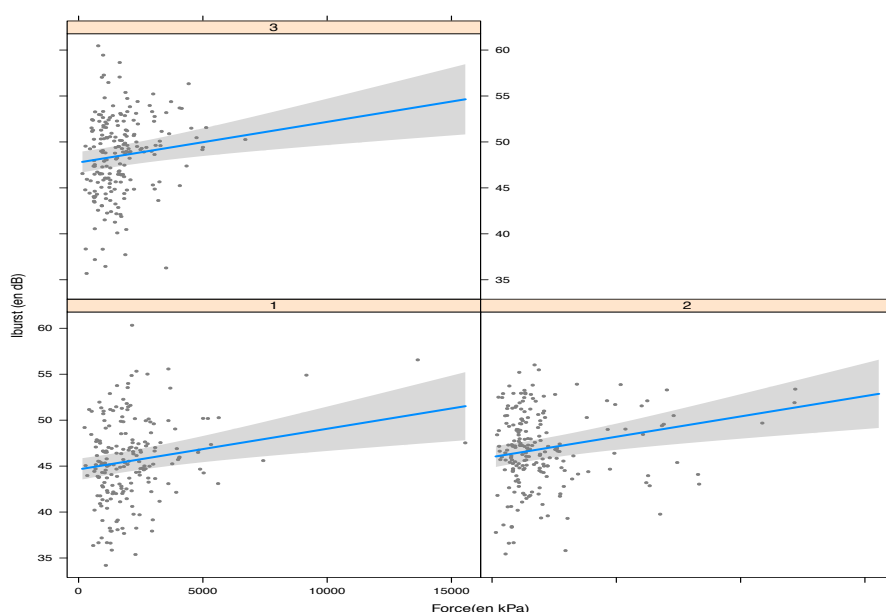


Fig 9: représentation des variations de Iburst en fonction de la Force pour trois rapidités du débit de parole (1: Débit faible ; 2 : Débit moyen ; 3 : Débit fort)

4.2. Centre de gravité spectral (CDG en Hz)

En partant du modèle global « $CDG \sim Force * Pio * Debit * Segment * Mode$ », nous aboutissons au modèle simplifié « $CDG \sim Pio + Mode$ ».

Les 4 Graphiques de la figure 15 nous permettent de vérifier que les conditions d'application de la régression sont vérifiées. Par ailleurs, la valeur du R^2 ajusté (0.42) et l'erreur standard résiduelle (383 Hz, comparé à l'étendue de variation de CDG de 2582.551 Hz) confirment la qualité du modèle.

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 2 en annexe.

On remarque que le modèle simplifié ne prend plus en compte la variable quantitative Force mais seulement la variable Pio ainsi que la variable qualitative Mode. Cela signifie que les variations de la force n'influencent pas significativement celles de CDG.

En revanche, le CDG est significativement influencé par la Pio, et la pente de régression entre ces deux variables ne dépend pas significativement des facteurs expérimentaux (Segment, Mode, et Debit) (cf figure 10).

Concrètement, le CDG tend à augmenter avec la Pio avec une pente positive de 33.27, significativement différente de zéro ($p = 10^{-7}$).

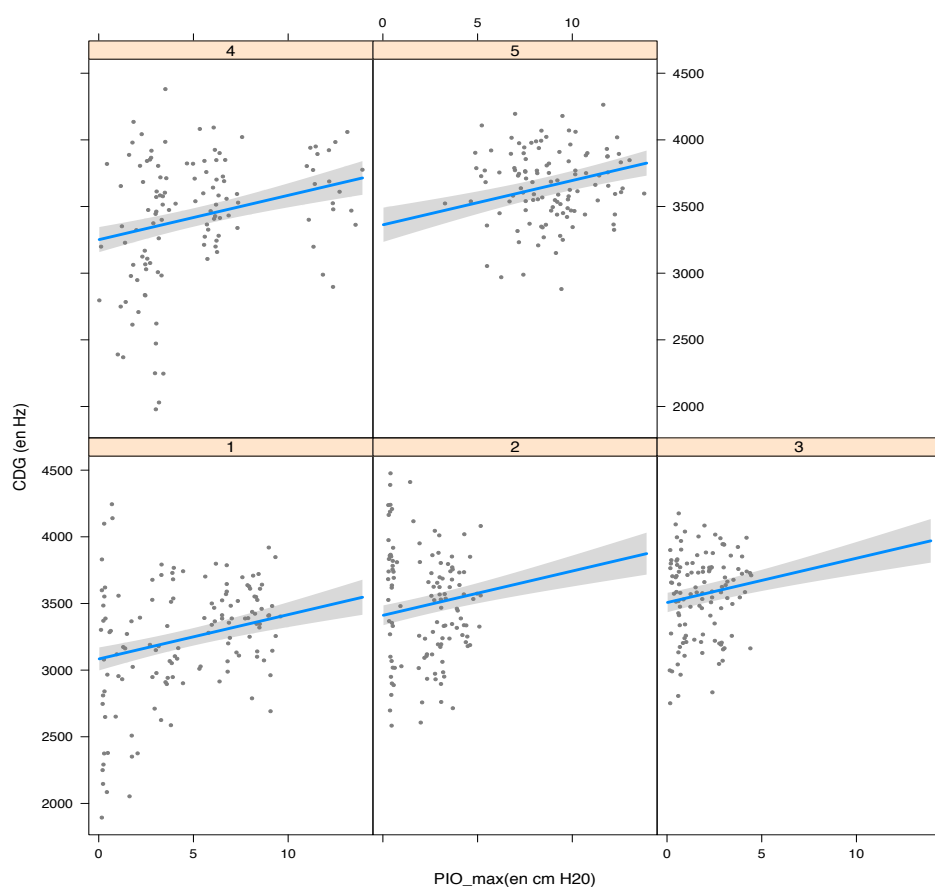


Fig 10 : représentation des variation de CDGmix en fonction de Pio pour les 5 modes de production (1 : Modal normal ; 2 : Modal murmuré ; 3 : Chuchoté faible ; 4 : Modal fort ; 5 : graphe du chuchoté fort)

4.3. Coefficient d'asymétrie du spectre du bruit de plosion (Skewness)

En partant du modèle global «Skewness ~ Force*Pio*Debit *Segment * Mode », nous aboutissons au modèle simplifié «**Skewness~ Pio*Segment + Mode** ».

Les 4 Graphiques de la figure 16 en annexe nous permettent de vérifier que les conditions d'application de la régression sont vérifiées. Par ailleurs, la valeur du R2 ajusté (0.26) et l'erreur standard résiduelle (0.48, comparé à l'étendue de variation de Skewness de 3.59) confirment la qualité du modèle.

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 3 en annexe.

On remarque que le modèle simplifié ne prend plus en compte la variable quantitative Force mais seulement la variable Pio ainsi que les variables qualitatives Segment et Mode. Cela signifie que les variations de la force n'influencent pas significativement celles de Skewness.

Par contre, le Skewness est significativement influencé par la Pio, et la pente de régression entre ces deux variables dépend significativement du facteur expérimental Segment.

Le tableau 4 en annexe, récapitule les résultats des comparaisons multiples. Concrètement, on peut voir dans ce tableau que le Skewness tend à diminuer avec la Pio selon une pente négative de -0.012 pour le Segment pa (non significative, $p = 0.573$) et selon une pente négative de -0.075 pour le Segment ba (très significative, $p < 0.001$) la différence de pente entre ces deux Segment est très significative ($p < 0.001$).

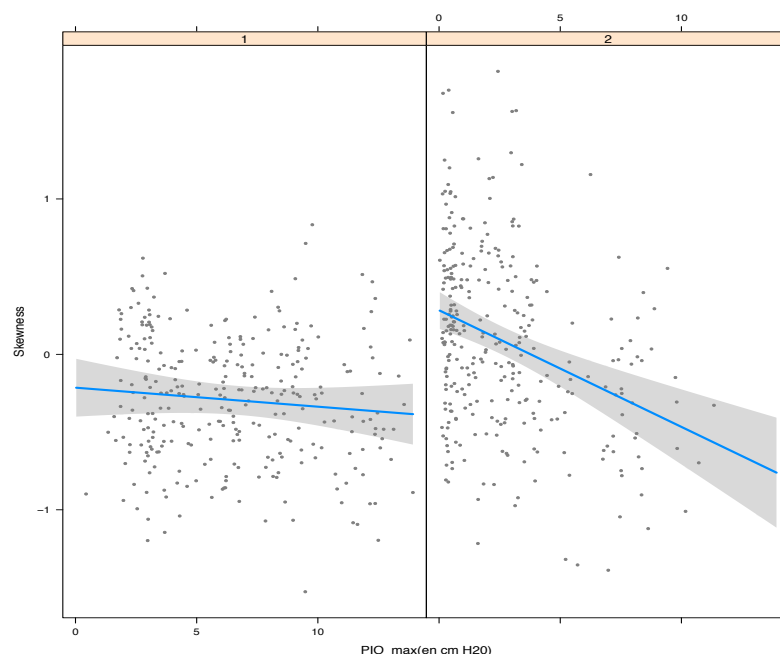


Fig 11 : représentation des variation de Skewness en fonction de Pio, pour les deux segments pa (1) et ba (2).

4.4. Coefficient d'aplatissement du spectre du bruit de plosion (Kurtosis)

La sélection de variables en partant du modèle global «Kurtosis ~ Force*Pio*Debit*Segment*Mode » nous donne le modèle simplifié
«Kurtosis ~ Pio * Force + Pio* Segment + Mode ».

Les 4 Graphiques de la figure 17 en annexe montrent que les conditions d'application de la régression ne sont pas vérifiées. Par conséquent, nous n'acceptons pas le modèle et nous procédons à une transformation normalisante (logarithmique) de la variable à expliquer Kurtosis avant de recommencer la procédure de sélection du modèle.

A partir du modèle global «Log(Kurtosis) ~ Force*Pio*Debit*Segment*Mode », nous reprenons l'étape de sélection de variables et aboutissons au modèle simplifié «Log(Kurtosis) ~ Pio + Mode + Pio*Mode»

Les 4 Graphiques de la figure 18 en annexe montrent les résidus de ce nouveau modèle. Après l'analyse de ces résidus nous avons accepté le modèle. Par ailleurs, la valeur du R2 ajusté (0.12) et l'erreur standard résiduelle 0.28, comparé à l'étendue de variation de Kurtosis de 1.92) confirment la qualité du modèle.

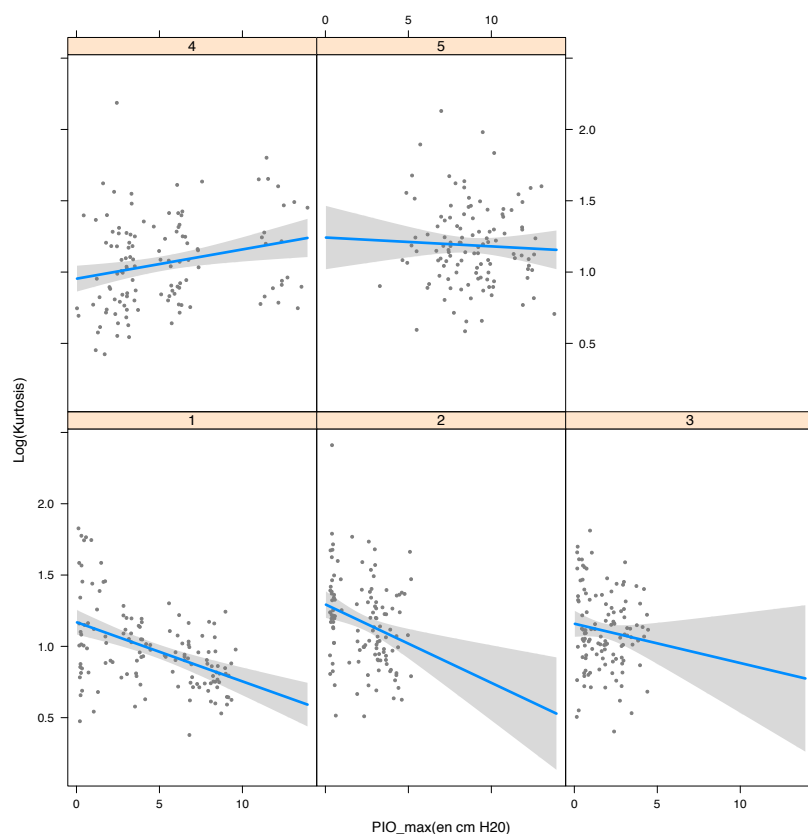


Fig 12: représentation des variations de Log(Kurtosis) en fonction de la Pio, pour les 5 modes de production (1 : Modal normal ; 2 : Modal faible ; 3 : Chuchoté faible ; 4 : Modal fort ; 5 Chuchoté fort)

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 5 en annexe.

On remarque que le modèle simplifié ne prend plus en compte la variable quantitative Force mais seulement la variable Pio ainsi que la variable qualitative Mode. Cela signifie que les variations de la force n'influencent pas significativement celles du Kurtosis. Par

contre, Kurtosis est significativement influencé par la Pio, et la pente de régression entre ces deux variables dépend significativement du facteur expérimental Mode de production (cf. Figure 12).

Le tableau 6 en annexe, récapitule les résultats des comparaisons multiples. Concrètement, on peut voir dans ce tableau que le Kurtosis tend à diminuer avec la Pio selon une pente négative de -0.041 pour le mode 1 (très significative, $p < 0.001$), de -0.055 pour le mode 2 (significative, $p = 0.01$), de -0.028 pour le mode 3 (non significative, $p = 0.71$) et de -0.006 pour le mode 5 (non significative, $p = 0.99$). Le Kurtosis tend à augmenter avec la Pio selon une pente positive de 0.021 pour le mode 4 (significative, $p = 0.034$). On observe, de plus, que cette pente de régression dans le mode 4, diffère significativement de celle observée dans le mode 1 et le mode 4 ($p < 0.001$).

4.5. Durée d'établissement du voisement (VOT en ms)

En partant du modèle global «VOT ~ Force* Pio*Debit *Segment * Mode», nous aboutissons au modèle simplifié
«VOT ~ Pio*Debit + Segment*Debit + Segment* Mode».

Les 4 Graphiques de la figure 19 en annexe montrent que les conditions d'application de la régression ne sont pas vérifiées. Par conséquent, nous n'acceptons pas le modèle et nous procédons à une transformation normalisante (logarithmique) de la variable à expliquer VOT avant de recommencer la procédure de sélection du modèle.

Nous reprenons l'étape de sélection de variables à partir du modèle global «Log(VOT) ~ Force*Pio*Debit*Segment* Mode» et aboutissons au modèle simplifié «Log(VOT) ~ Pio*Force*Debit + Segment* Mode + Segment*Debit »

Les Graphiques de la figure 20 en annexe montrent les résidus de ce nouveau modèle. Après l'analyse de ces résidus nous avons accepté le modèle. Par ailleurs, la valeur du R² ajusté (0.65) et l'erreur standard résiduelle (0.31, comparé à l'étendue de la variation de Log(VOT) est 2.58) confirment la qualité du modèle.

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 7 en annexe On remarque que le modèle simplifié conserve les deux variables quantitatives Force et Pio ainsi que les variables qualitatives Segment, Mode et Débit. Cela signifie que les variations de Log(VOT) sont significativement influencées par celles de la Pio, de la Force et de leur interaction, et que les coefficients de régression entre ces variables dépendent significativement du facteur Débit .

Pour résumer, $\text{Log(VOT)} = a \text{ Pio} + b \text{ Force} + c \text{ Pio.Force} + d$, d variant selon le Debit le Mode et le Segment et a, b, c variant en fonction du débit.

	a	b	c
Debit 1	$-5.4 \cdot 10^{-2}$	$-3.1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Debit 2	$-5.4 \cdot 10^{-2} + 6.9 \cdot 10^{-2}$	$-3.1 \cdot 10^{-5} + 1.3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6} - 1.2 \cdot 10^{-5}$
Debit 3	$-5.4 \cdot 10^{-2} + 3.5 \cdot 10^{-4}$	$-3.1 \cdot 10^{-5} - 1.3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6} + 1.7 \cdot 10^{-5}$

4.6. Δf_0 , la Variation de fréquence de vibration des cordes vocales entre la voyelle suivante et la phase d'occlusion (en Hz).

En partant du modèle global « $\Delta f_0 \sim \text{Force} * \text{Pio} * \text{Debit} * \text{Segment} * \text{Mode}$ », nous aboutissons au modèle simplifié

$$\ll \Delta f_0 \sim \text{Force} * \text{Segment} * \text{Mode} + \text{Segment} * \text{Debit} * \text{Mode} \gg$$

Les 4 Graphiques de la figure 21 en annexe nous permettent de vérifier que les conditions d'application de la régression sont vérifiées. Par ailleurs, la valeur du R^2 ajusté (0.79) et l'erreur standard résiduelle (14.6 , comparé à l'étendue de variation de Δf_0 de 149.82) confirment la qualité du modèle.

Les estimations des paramètres du modèle et leur significativité peuvent être consultées dans le tableau 8 en annexe.

On remarque que le modèle simplifié ne prend plus en compte la variable quantitative Pio mais seulement la variable Force ainsi que les variables qualitatives Segment , Mode et Debit. Cela signifie que les variations de la Pio n'influencent pas significativement celles de Δf_0 .

Par contre, la Δf_0 est significativement influencé par la Force, et la pente de régression entre ces deux variables dépend significativement du facteurs expérimentaux Segment et Mode (cf figure 13).

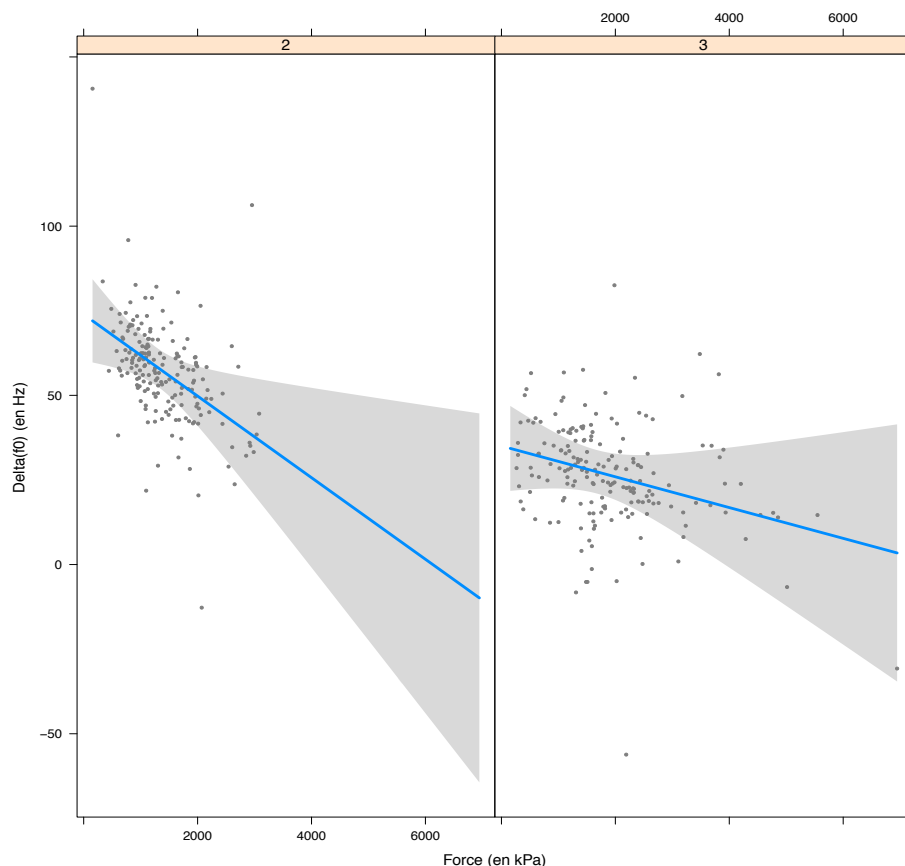


Fig 13: schema de correlation de Δf_0 en fonction de la Force qui interagit avec les facteurs Segment et Effort (2 : graphe du Segment ba ; 3 : graphe du Segment ma).

Le tableau 9 en annexe, récapitule les résultats des comparaisons multiples. Concrètement, on peut voir dans ce tableau que le Δf_0 tend à diminuer avec la Force selon une pente négative de

- 0.012 pour le Segment ba en Mode 1 (non significative, $p = 0.13$)
- 0.003 pour le Segment ba en Mode 2 (non significative, $p = 0.996$)
- 0.005 pour le Segment ma en Mode 1 (non significative, $p = 0.82$)
- 0.007 pour le Segment ma en Mode 4 (très significative, $p < 0.001$)

Δf_0 tend à augmenter avec la Force selon une pente positive de

- +0.007 pour le Segment ba en Mode 4 (très significative, $p = 0.13$)
- +0.007 pour le Segment ma en Mode 2 (non significative, $p = 0.35$)

Conclusion

Les analyses statistiques effectuées ont pu montrer que la variation des caractéristiques acoustiques des consonnes bilabiales

- intensité et enveloppe spectrale du bruit de plosion
- délai d'établissement du voisement
- variation de hauteur de la voix pendant l'occlusion)

était significativement influencée par la variation d'au moins un paramètre de contrôle

- pression dans la bouche
- force de compression des lèvres

voire par la variation conjointe de ces deux paramètres

Les analyses ont également permis de tester les hypothèses de départ, concernant le degré de corrélation ou d'indépendance dans la variation de ces paramètres, et concernant l'influence d'autres facteurs qualitatifs sur cette relation (Type de segment bilabial : oral voisé (ba), oral non voisé (pa), nasal voisé (ma) ; Rapidité du parole ; Mode de production : modal et chuchoté, avec différents niveaux d'effort).

Le résultat des tests a confirmé certaines de ces hypothèses :

Ainsi, conformément à nos hypothèses, nous avons observé que les variations de VOT sont significativement influencées par les variations de pression intra-orale (Pio), mais au contraire relativement indépendantes des variations de compression des lèvres.

Nous nous attendions à ce que cette relation dépende significativement du segment (entre la consonne voisée /b/ et la non voisée /p/) et qu'elle puisse être affectée par le débit de parole, du fait que celui-ci influence la vitesse articulatoire. L'influence significative du débit a été confirmée par l'analyse statistique, tandis que le type de segment n'a montré une influence que sur la valeur moyenne du VOT (ordonnée à l'origine des figures de la partie Résultats) mais pas sur la pente de régression entre le VOT et la Pio.

De même, en ce qui concerne la diminution soudaine de la fréquence de vibration des cordes vocales pendant l'occlusion, par rapport aux voyelles adjacentes (Δf_0).

De même, conformément à nos hypothèses, nous avons observé que les variations du coefficient d'aplatissement du spectre du bruit de plosion (Kurtosis) étaient significativement influencées par à la fois les variations de Pio et de force interlabiale.

Il en a infirmé d'autres :

Contrairement à nos hypothèses, nous avons observé que les variations de f_0 durant la phase d'occlusion n'étaient pas significativement influencées par les variations de pression intra-orale (Pio), et qu'elles étaient significativement influencées par les variations de compression des lèvres.

Certains résultats ont finalement confirmé à moitié nos hypothèses :

Ainsi, nous avons observé que les variations d'intensité du bruit de plosion (Iburst), de son centre de gravité spectral (CDG) et de son coefficient d'asymétrie spectral (Skewness) n'étaient pas, comme nous l'attendions, significativement influencées par à la fois les variations de Pio et de force interlabiale, mais seulement par les variations d'un seul de ces paramètres (La force pour Iburst, et Pio pour CDG et Skewness).

Il appartient maintenant à Maëva Garnier d'interpréter plus en détail ces résultats d'un point de vue phonétique.

Ce rapport de stage rapporte les analyses et résultats obtenus sur la durée d'un mois et demie de stage seulement. Naturellement, il reste donc encore de nombreuses possibilités d'analyses supplémentaires et complémentaires pour analyser plus en détail, et parfois plus pertinemment ces données. Dans les prochaines semaines, nous comptons continuer les analyses en examinant non plus seulement le lien entre la variation d'un paramètre acoustique, et la variation conjointe de paramètres de contrôle, mais également le lien entre la variation des paramètres de contrôle eux-mêmes, ainsi que l'influence des facteurs qualitatifs (mode, segment, débit) sur la variation des paramètres de contrôle eux-mêmes (jusqu'à maintenant considérés uniquement comme variables explicatives). De façon à tenir compte de ces corrélations qui peuvent exister entre variables explicatives, dans le modèle de variation des paramètres acoustiques.

Par ailleurs, au delà du simple test des hypothèses de travail, notre travail a permis d'apporter d'autres réflexions. Nous avons traité ici les données d'une expérience « pilote », c'est à dire visant à tester un protocole et à le modifier/ajuster en vue de répliquer ensuite l'expérience sur une cohorte de sujets, à plus grande échelle. Nos résultats ont ainsi mis en évidence un « problème » dans le plan expérimental. Initialement, les 3 niveaux d'effort dans le mode de production modal, et les 2 niveaux d'effort dans le mode de production chuchoté n'étaient pas pensés comme des facteurs expérimentaux, mais plutôt comme une façon de faire varier les observations (à la fois les variables explicatives et à expliquer) sur des gammes de valeurs suffisamment larges, de façon à pour examiner la corrélation entre ces variables. Or, les résultats ont montré que les valeurs des paramètres mesurées dans ces différents niveaux d'efforts restaient centrées autour de niveaux moyens, significativement distincts d'un niveau d'effort à l'autre, et non pas selon un continuum, du niveau d'effort le plus faible à celui le plus fort. Par conséquent, Maëva Garnier envisage maintenant de modifier son protocole expérimental pour pallier ce problème.

Enfin, ce stage m'a apporté en termes personnels, quant à ma formation et ma connaissance du monde de l'entreprise.

Tout d'abord, il m'a permis de prendre davantage en main et de maîtriser un certain nombre de fonctions du logiciel R, qui me seront utiles l'an prochain. Je souhaite en effet m'orienter vers les statistiques, à travers le Master Mathématiques Appliquées Industrielles. Cela m'a permis également de faire davantage le lien entre la théorie des tests statistiques et de leurs indicateurs, et leur mise en pratique, face à un problème concret, et en interaction directe avec un utilisateur.

Références biblio

- Arkebauer, H. J., Hixon, T. J., and Hardy, J. C. (1967). "Peak intraoral air pressures during speech," *J. Speech Hear. Res.* 10, 196–208.
- Forrest, K., Weismer, G., Hodge, M., Dinnsen, D. A., & Elbert, M.(1990). Statistical analysis of word-initial/k/and/t/produced by normal and phonologically disordered children. *ClinicalLinguistics & Phonetics*, 4(4), 327-340.
- Garnier, M. (2007). Communiquer en environnement bruyant: de l'adaptation jusqu'au forçage vocal (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- Garnier, M. (2008). May speech modifications in noise contribute to enhance audio-visible cues to segment perception?. In *Proceedings of AVSP* (Vol. 8, pp. 95-100).
- Jeannin, C., Perrier, P., Payan, Y., Dittmar, A., & Grosogeat, B. (2008). Tongue pressure recordings during speech using complete denture. *Materials Science and Engineering: C*, 28(5), 835-841.
- Klatt, D. H. (1975). Voice onset time, frication, and aspiration in word-initial consonant clusters. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 18(4), 686-706.
- Koenig, L. L., Lucero, J. C., & Perlman, E. (2008). Speech production variability in fricatives of children and adults: Results of functional data analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 3158-3170.
- Lisker, L. and Abramson, A.S. (1964) "A cross-language study of voicing in initial stops: acoustical measurements" *Word* 20, 384-422.
- 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 & Hearing Research*, 46(6).
- Osfar, M. J. (2011). Articulation of whispered alveolar consonants (Doctoral dissertation, University of Illinois).
- Rakotomalala, R. (2011). Pratique de la régression logistique. Régression Logistique Binaire et Polytomique, Université Lumière Lyon, 2.
- Sussman H.M., MacNeilage P.F. & Hanson R., 1973 Labial and mandibular movement dynamics during the production of bilabial stop consonants: Preliminary observations. *Journal of speech and Hearing Research*, 16, 397-420.

Annexe

Iburst

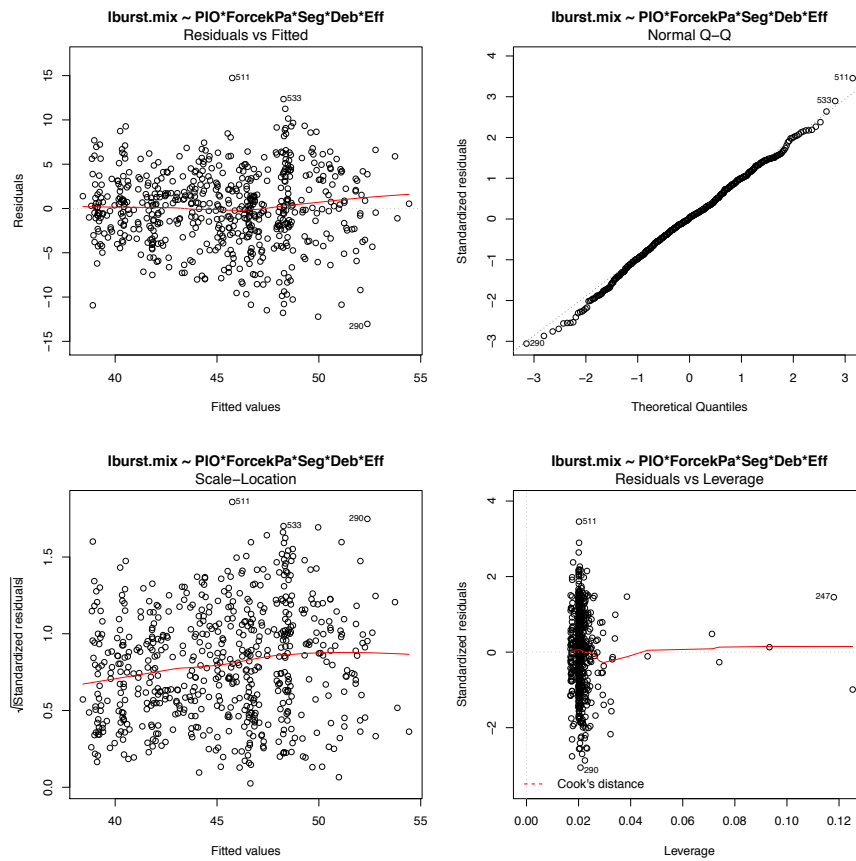


Fig 14 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «Iburst ~ Force + Debit + Segment * Mode ».

Table 1 : Estimation des paramètres du modèle «Iburst ~ Force + Debit + Segment * Mode ».

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	41.9869762	0.6591036	63.703	< 2e-16 ***
Force	0.0004422	0.0001275	3.469	0.000559 ***
Segment2	2.6548388	0.7562888	3.510	0.000482 ***
Debit2	1.3434379	0.4300967	3.124	0.001874 **
Debit3	3.1195273	0.4364004	7.148	2.61e-12 ***
Mode2	3.7564381	0.7898096	4.756	2.48e-06 ***
Mode3	0.7272597	0.7904861	0.920	0.357940
Mode4	-4.3682185	0.8590134	-5.085	4.94e-07 ***
Mode5	5.7171166	0.7990221	7.155	2.49e-12 ***
Segment2:Mode2	-9.9796459	1.0907121	-9.150	< 2e-16 ***
Segment2:Mode3	-6.6646482	1.0941617	-6.091	2.02e-09 ***
Segment2:Mode4	4.5221007	1.1317542	3.996	7.27e-05 ***
Segment2:Mode5	-3.6558072	1.1087260	-3.297	0.001035 **

CDG

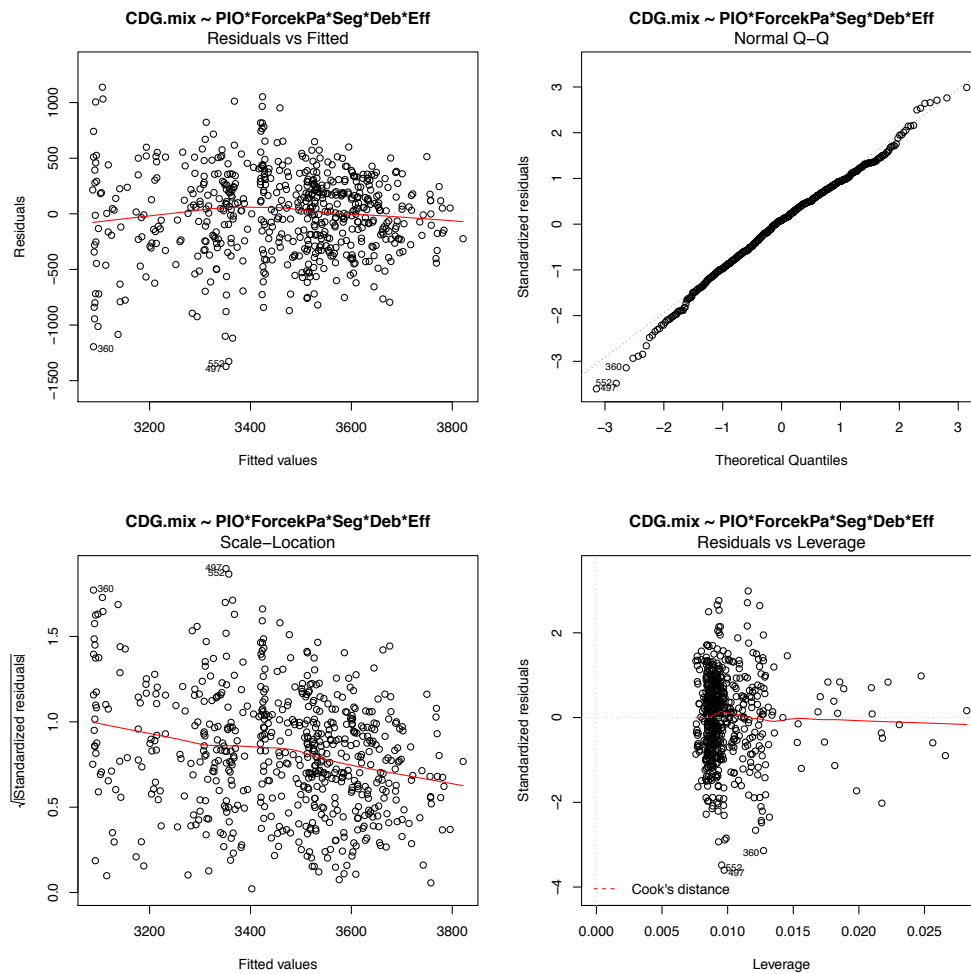


Fig 15 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «CDG ~ Pio + Mode ».

Table 2 : Estimation des paramètres du modèle «CDG ~ Pio + Mode ».

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3083.344	43.870	70.284	< 2e-16 ***
Pio	33.271	6.224	5.346	1.28e-07 ***
Mode2	327.173	50.274	6.508	1.62e-10 ***
Mode3	423.148	51.505	8.216	1.31e-15 ***
Mode4	167.768	48.593	3.453	0.000595 ***
Mode5	279.191	55.620	5.020	6.84e-07 ***

Skewness

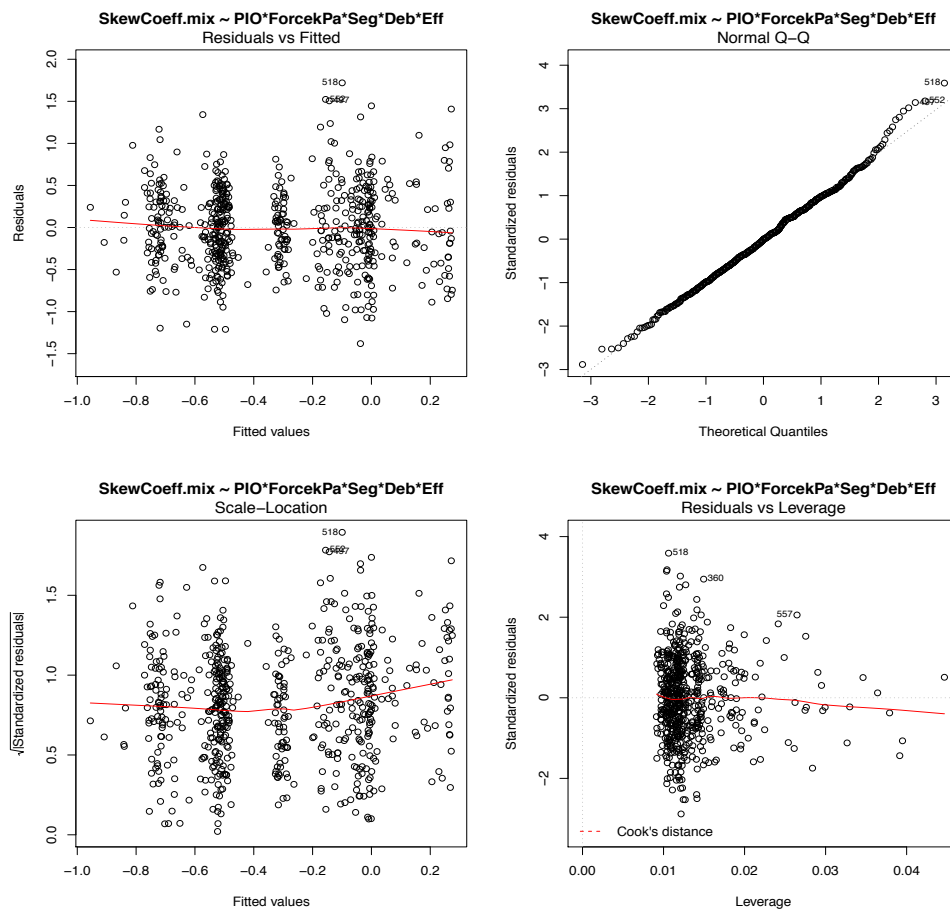


Fig 16 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «SkewCoeff~Mode + Pio*Segment».

Table 3 : Estimation des paramètres du modèle «SkewCoeff~Mode + Pio*Segment ».

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0.21429	0.09498	-2.256	0.024422 *
Pio	-0.01224	0.01221	-1.002	0.316557
Segment2	0.49810	0.07900	6.305	5.62e-10 ***
Mode2	-0.25392	0.06696	-3.792	0.000164 ***
Mode3	-0.27820	0.06993	-3.978	7.80e-05 ***
Mode4	-0.20079	0.06125	-3.278	0.001105 **
Mode5	-0.38807	0.07960	-4.875	1.39e-06 ***
Pio:Segment2	-0.06281	0.01422	-4.416	1.20e-05 ***

Table 4 : Résultats des tests de comparaison par paires

hypothesis	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Pio_S1 = 0	-0.012	0.012	-1.002	0.573
Pio_S2 = 0	-0.075	0.015	-4.892	< 0.001
Pio_S2 - Pio_S1 = 0	-0.063	0.014	-4.416	< 0.001

Kurtosis

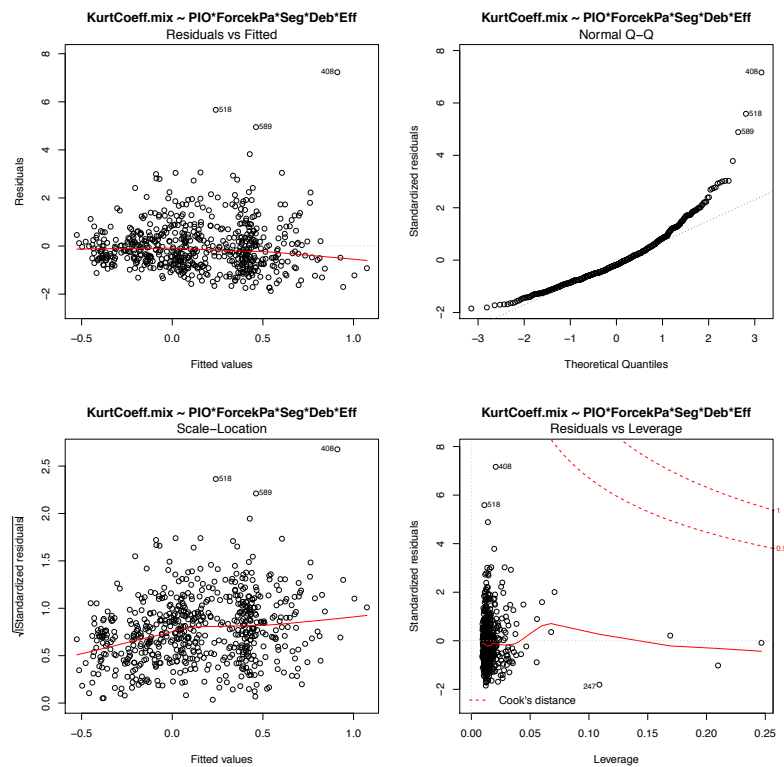


Fig 17 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «KurtCoeff ~ Pio * Force + Pio * Segment + Mode »

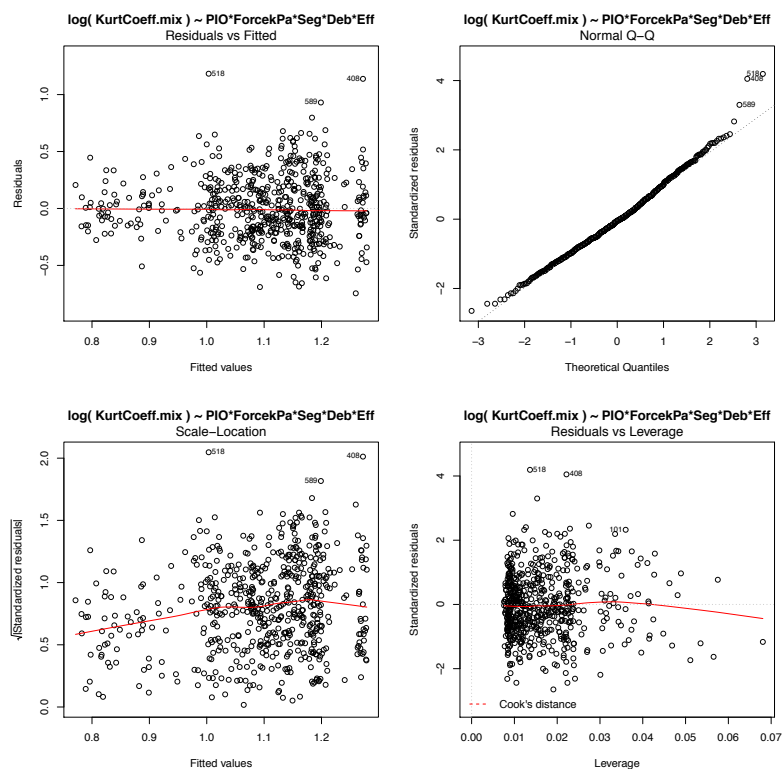


Fig 18 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié « Log(Kurtosis) ~ Pio * Force + Pio * Segment + Mode »

Table 5 : Estimation des paramètres du modèle «Log(Kurtosis) ~ Pio * Force + Pio * Segment + Mode »

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.169	0.044	26.654	< 0.001
Mode2	0.125	0.065	1.921	0.055
Mode3	-0.011	0.064	-0.166	0.868
Mode4	-0.216	0.064	-3.386	0.001
Mode5	0.073	0.122	0.599	0.549
Pio	-0.041	0.008	-5.249	< 0.001
Mode2:Pio	-0.013	0.019	-0.714	0.476
Mode3:Pio	0.014	0.023	0.609	0.543
Mode4:Pio	0.062	0.011	5.774	< 0.001
Mode5:Pio	0.035	0.015	2.388	0.017

Table 6 : Résultats des tests de comparaison par paires

hypothesis	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Pio_M1 = 0	-0.041	0.008	-5.249	< 0.001
Pio_M2 = 0	-0.055	0.017	-3.2	0.01
Pio_M3 = 0	-0.028	0.021	-1.285	0.717
Pio_M4 = 0	0.021	0.007	2.823	0.034
Pio_M5 = 0	-0.006	0.012	-0.496	0.994
Pio_M1 - Pio_M2 = 0	0.013	0.019	0.714	0.969
Pio_M1 - Pio_M4 = 0	-0.062	0.011	-5.774	< 0.001
Pio_M2 - Pio_M4 = 0	-0.076	0.019	-4.047	< 0.001
Pio_M3 - Pio_M5 = 0	-0.021	0.025	-0.861	0.932

VOT

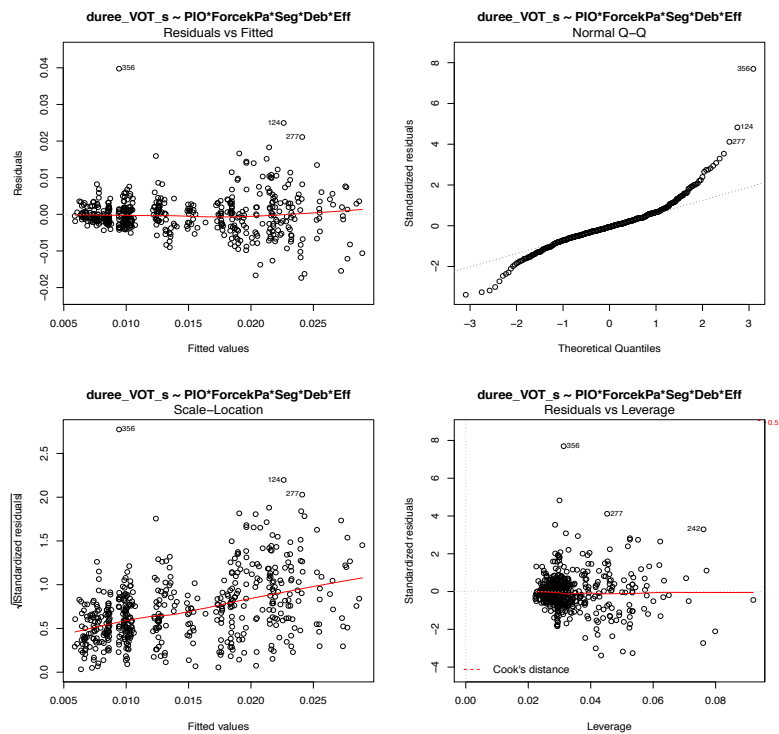


Fig 19 : Représentation des résidus pour le modèle simplifié «VOT ~ Pio*Debit + Segment*Debit + Segment*Mode ».

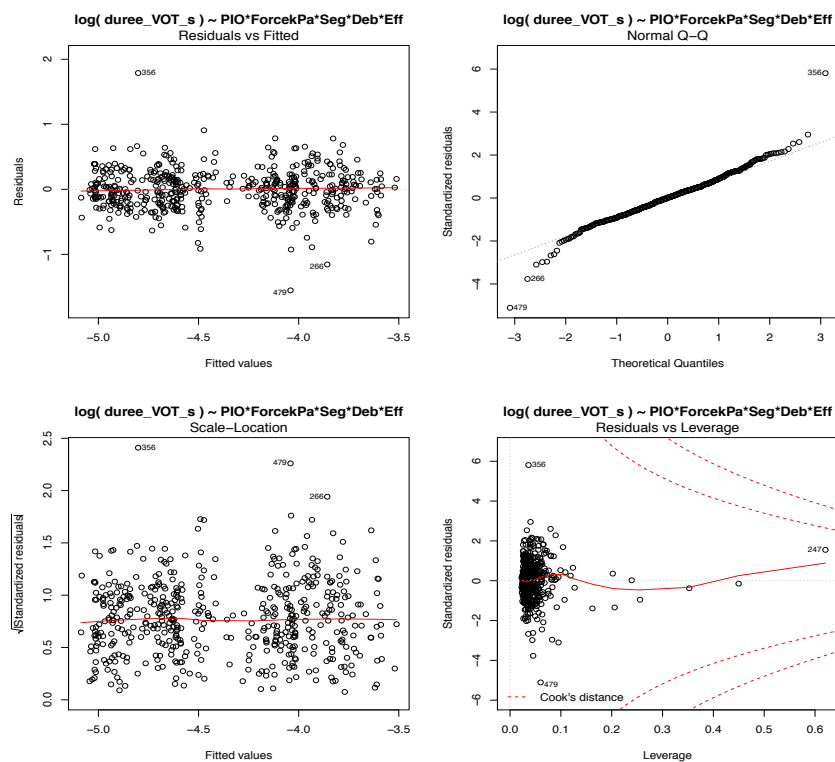


Fig 20: Représentation des résidus pour le modèle simplifié «Log(VOT) ~ Segment*Mode + Segment*Debit + Pio*Force*Debit »

Table 7 : Estimation des paramètres du modèle «Log(VOT) ~ Segment*Mode + Segment*Debit + Pio*Force*Debit »

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-4.288e+00	1.540e-01	-27.849	< 2e-16 ***
Pio	-5.403e-02	2.193e-02	-2.464	0.014082 *
Force	-3.181e-05	4.588e-05	-0.693	0.488444
Segment2	-5.081e-01	9.065e-02	-5.605	3.51e-08 ***
Debit2	-5.788e-01	1.438e-01	-4.025	6.62e-05 ***
Debit3	1.125e-01	1.735e-01	0.648	0.517188
Mode2	4.619e-01	7.401e-02	6.241	9.54e-10 ***
Mode3	6.547e-01	8.165e-02	8.019	8.24e-15 ***
Mode4	9.796e-02	7.016e-02	1.396	0.163284
Mode5	7.192e-01	6.983e-02	10.300	< 2e-16 ***
Pio:Force	6.034e-06	6.944e-06	0.869	0.385335
Pio:Debit2	6.927e-02	2.019e-02	3.431	0.000653 ***
Pio:Debit3	3.582e-04	2.392e-02	0.015	0.988058
Force:Debit2	1.391e-04	5.511e-05	2.525	0.011904 *
Force:Debit3	-1.319e-04	7.361e-05	-1.791	0.073862 .
Segment2:Debit2	3.172e-01	8.532e-02	3.718	0.000225 ***
Segment2:Debit3	6.735e-02	9.584e-02	0.703	0.482575
Segment2:Mode2	-2.876e-01	9.126e-02	-3.152	0.001725 **
Segment2:Mode3	1.873e-01	1.005e-01	1.864	0.062906 .
Segment2:Mode4	-1.226e-01	8.960e-02	-1.369	0.171758
Segment2:Mode5	5.501e-01	1.021e-01	5.387	1.12e-07 ***
Pio:Force:Debit2	-1.233e-05	7.683e-06	-1.605	0.109239
Pio:Force:Debit3	1.723e-05	9.982e-06	1.726	0.084955 .

Δf_0

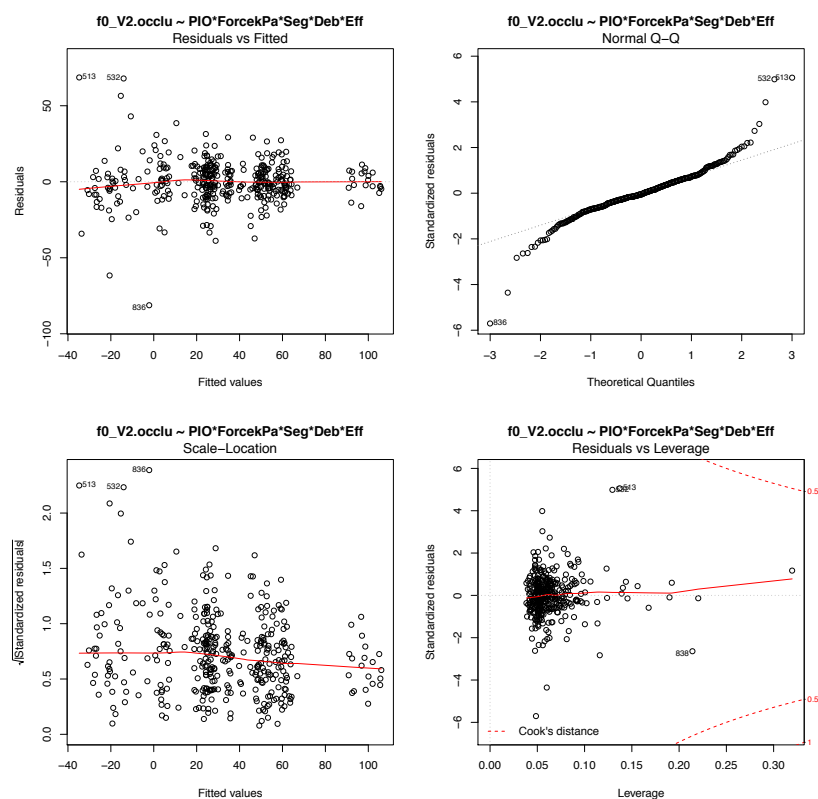


Fig 21: Représentation des résidus pour le modèle simplifié « $\Delta f_0 \sim \text{Force} * \text{Segment} * \text{Mode} + \text{Segment} * \text{Debit} * \text{Mode}$ »

Table 8 : Estimation des paramètres du modèle « $\Delta f_0 \sim \text{Force} * \text{Segment} * \text{Mode} + \text{Segment} * \text{Debit} * \text{Mode}$ »

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	71.948	5.872	12.253	< 0.001
Debit2	1.944	4.32	0.45	0.653
Debit3	0.762	4.887	0.156	0.876
Segment3	-12.438	10.592	-1.174	0.241
Mode2	-40.359	10.823	-3.729	< 0.001
Mode4	12.065	8.872	1.36	0.175
Force	-0.012	0.005	-2.471	0.014
Debit2:Segment3	-26.427	6.677	-3.958	< 0.001
Debit3:Segment3	-48.374	7.066	-6.846	< 0.001
Debit2:Mode2	5.032	6.71	0.75	0.454
Debit3:Mode2	-6.11	8.457	-0.722	0.47
Debit2:Mode4	-121.848	6.404	-19.027	< 0.001
Debit3:Mode4	-40.629	7.086	-5.734	< 0.001
Segment3:Mode2	-48.969	15.784	-3.102	0.002
Segment3:Mode4	-15.878	13.177	-1.205	0.229
Segment3:Force	0.008	0.006	1.237	0.217
Mode2:Force	0.01	0.007	1.446	0.149
Mode4:Force	0.019	0.006	3.393	0.001
Debit2:Segment3:Mode2	58.056	9.621	6.034	< 0.001
Debit3:Segment3:Mode2	104.201	11.859	8.787	< 0.001
Debit2:Segment3:Mode4	126.462	9.281	13.625	< 0.001
Debit3:Segment3:Mode4	44.944	9.774	4.598	< 0.001
Segment3:Mode2:Force	0.002	0.008	0.274	0.785
Segment3:Mode4:Force	-0.022	0.007	-3.117	0.002

Table 9 : Résultats des tests de comparaison par paires

hypothesis	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Force_S1_M1 = 0	-0.012	0.005	-2.471	0.126
Force_S1_M2 = 0	-0.003	0.004	-0.564	0.996
Force_S1_M4 = 0	0.007	0.003	2.457	0.13
Force_S3_M1 = 0	-0.005	0.004	-1.26	0.821
Force_S3_M2 = 0	0.007	0.004	1.98	0.347
Force_S3_M4 = 0	-0.007	0.001	-4.919	< 0.001
Force_S1_M1 - Force_S1_M2 = 0	-0.01	0.007	-1.446	0.708
Force_S1_M1 - Force_S1_M4 = 0	-0.019	0.006	-3.393	0.009
Force_S1_M2 - Force_S1_M4 = 0	-0.01	0.005	-1.843	0.433
Force_S3_M1 - Force_S3_M2 = 0	-0.012	0.005	-2.296	0.187
Force_S3_M1 - Force_S3_M4 = 0	0.002	0.004	0.54	0.997
Force_S3_M2 - Force_S3_M4 = 0	0.014	0.004	3.55	0.005
Force_S1_M1 - Force_S3_M1 = 0	-0.008	0.006	-1.237	0.833
Force_S1_M2 - Force_S3_M2 = 0	-0.01	0.006	-1.697	0.534
Force_S1_M4 - Force_S3_M4 = 0	0.014	0.003	4.253	< 0.001

