

**UNIVERSITE SORBONNE NOUVELLE - PARIS 3**

ED 268 : « Langage et langues : description, théorisation,  
transmission »

Laboratoire de Phonétique et de Phonologie, UMR 7018

Thèse de doctorat en phonétique

Laurianne GEORGETON

**RENFORCEMENT DES VOYELLES  
ORALES DU FRANÇAIS EN POSITION  
INITIALE DE CONSTITUANTS  
PROSODIQUES : INTERACTION AVEC  
LES CONTRASTES PHONOLOGIQUES**

Thèse dirigée par  
Mme Cécile FOUGERON et  
Mme Jacqueline VAISSIERE

Soutenue le 29 septembre 2014

**Jury :**

Mme Cécile Fougeron (directeur) Directeur de recherche, CNRS  
Mme Jacqueline Vaissière (directeur) Professeur  
Mme Lucie Ménard (pré-rapporteur) Professeur  
M Noël Nguyen (pré-rapporteur) Professeur  
Mme Hélène Loevenbruck (examinateur) Chargée de recherche, CNRS  
M Didier Demolin (examinateur) Professeur



# Résumé

## **Renforcement des voyelles orales du français en position initiale de constituants prosodiques : interaction avec les contrastes phonologiques.**

Le but de cette thèse est de mieux comprendre le phénomène de renforcement initial pour les voyelles du français : ses mécanismes de réalisations et sa fonction linguistique. Pour cela, cette thèse compare la réalisation acoustique et articulatoire (lèvres et menton) des voyelles orales du français /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ en position strictement initiale de Groupe Intonatif et en position médiane de Groupe Intonatif. Le corpus a été enregistré par quatre locutrices avec deux appareils en simultané : une caméra pour l'analyse de l'aperture et l'étirement des lèvres et un appareil de capture mouvements (Qualisys) pour l'analyse articulatoire de la protrusion des lèvres et de l'abaissement du menton. Une étude acoustique a également été menée (formants, intensité, durée). Cette thèse montre que, d'une part, le renforcement initial modifie des caractéristiques phonétiques des voyelles qui peuvent contribuer, à renforcer les contrastes syntagmatiques en augmentant la sonorité de la voyelle: augmentation de l'aperture et l'étirement aux lèvres pour l'ensemble des voyelles et augmentation d'intensité acoustique pour la plupart. D'autre part, le renforcement initial renforce des caractéristiques acoustiques et articulatoires propres à chaque voyelle. Ces variations contribuent à maximiser les contrastes paradigmatiques entre voyelles : soit par une maximisation de chacune des valeurs du contraste ([+F] et [-F]), soit par une maximisation d'une des deux valeurs du contraste ([+F] ou [-F]).

*Mots clés : renforcement initial, voyelles orales, français, contrastes phonologiques.*



# Abstract

## **Domain-initial strengthening on oral vowels in french: interaction with phonological contrasts.**

The goal of this thesis is to better understand the phenomenon of domain-initial strengthening on French vowels: how it is realized and its linguistic function. We compare the acoustic and articulatory variations (on the lips and chin) of the French oral vowels /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ in initial position of Intonational Phrase and in medial position of Intonational Phrase. The corpus was recorded by four female speakers with two different systems simultaneously. Lip aperture and lip width were analyzed from the video data and lip protrusion and lowering of the chin were captured by an optical motion capture system (Qualisys). An acoustic study was also conducted (formants, intensity, duration). Results show that initial strengthening affects phonetic properties of vowels which may contribute to enhance syntagmatic contrasts by increasing their sonority: increased lip aperture and width for all vowels, and increased acoustic intensity for most. Moreover, initial strengthening enhances vowel-specific acoustic and articulatory properties. Consequently, initial strengthening contributes to maximize paradigmatic contrasts between vowels, either by maximizing contrast of each of the values ([+F] and [-F]), either, or by maximizing the value of a single contrast ([+F] or [-F]).

*Keywords : domain-initial strengthening, oral vowels, french, phonological contrasts.*









## Remerciements

Et voici venu, le moment (tant attendu ? c'est certain) des remerciements. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, mes premiers remerciements les plus entiers et les plus sincères s'adressent évidemment à Cécile Fougeron. Cécile, je te suis extrêmement reconnaissante de m'avoir appris à travailler, de m'avoir donnée le goût de la recherche, de m'avoir toujours poussée à améliorer mon travail et de m'avoir guidée pendant ces cinq années de thèse. Je te remercie également de m'avoir accompagnée et soutenue dans mes présentations lors de conférences. Tes gestes de la main me disant d'aller moins vite, tes petits clins d'œil à la fin de la présentation pour me dire que c'était bon, m'ont permis de dépasser l'appréhension que j'avais devant le pupitre. Un énorme merci...

Je tiens également à remercier Jacqueline Vaissière, pour ses encouragements, son aide pour l'enrichissement de ce travail, pour ses enseignements et pour SL444. Merci Jacqueline de rattraper nos bêtises de doctorants ;-)

J'adresse ma gratitude à l'ensemble des membres de mon jury de soutenance pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger ce travail. Je remercie Lucie Ménard qui avait déjà accepté d'être rapporteur de ce travail il y a plus d'un an. Merci de vous être rendue si disponible. Je remercie également Noël Nguyen, d'avoir accepté d'être mon second pré-rapporteur, je suis très heureuse de rejoindre votre équipe du LPL dans quelques temps. Un grand merci à Hélène Loevenbruck qui a également bien voulu être jury de ce travail, je vous remercie pour votre lecture constructive et vos suggestions. Enfin, merci à Didier Demolin de me faire l'honneur de faire partie de mon jury.

Il est évident que je n'aurais jamais pu mener à bien ce travail sans l'aide si précieuse (et si chou !) de Nicolas Audibert. Nico, tout simplement, sans toi, je n'aurais pas de données articulatoires, je n'aurais pas fait ces 15000 clics sur des images de bouche, ma connaissance d'excel se limiterait au copier-coller, et je ne pourrais pas me la jouer geekette sur ma « console » (c'est comme ça qu'on dit ?). Merci aussi d'avoir rendu si chou et si agréable les heures passées sur Matlab à générer des fichiers, en affichant des images de pandas (en aléatoire en plus !). Merci pour toutes ces heures de travail que tu as fournies pour m'aider. J'espère que nous continuerons à écrire des articles Audibert Georgeton, ensemble, et que nous continuerons à faire de superbes posters Pantone.

En parlant de Pantone, ma transition est toute trouvée pour remercier Naomi Yamaguchi. Nao, c'était bon de t'avoir à mes côtés. On n'a pas eu une vie facile ces derniers mois, toi pour ton poste, moi pour ma thèse, mais d'en parler ensemble, ça soulageait déjà beaucoup. Tu vas beaucoup me manquer. Vivement les prochains mojitos au Bo Bar ;-)

J'en profite à présent pour remercier toutes les personnes du labo LPP qui font de cet endroit un lieu si sympathique. Merci à Gwen et Angélique, pour les petits moments de papotage ensemble. Merci à Annie

qui a toujours été soucieuse de savoir comment j'avancerais et si ça allait. Merci à Rachid, Pierre, Martine, Cédric, Lise pour vos encouragements. Merci aussi à Takeki, Jiayin, les fidèles de la fermeture du labo.

Je tiens aussi à remercier Pierre Jalenques et David Legac qui m'ont si gentiment accueillie à l'université de Rouen. C'était un vrai plaisir de travailler avec vous.

Enfin, que serait Georgito sans ses amis. Je remercie Agathe, évidemment, qui a toujours été présente, toujours là pour me soutenir et me dire « ça va aller Georgibulle », je suis si heureuse que tu reviennes à Paris en septembre. Je remercie aussi Marie qui a toujours été d'un grand réconfort. Merci à Lucie, également, pour nos discussions téléphoniques qui font toujours du bien au moral ! Compte sur moi pour te soutenir également pour ta thèse. Je remercie aussi Zoé qui a été particulièrement présente, ces derniers mois de thèse. Nos pique-niques et petits cafés m'ont beaucoup aidée, merci pour ton soutien et pour tes questionnements pour me montrer que « c'est sûr ça va le faire ! ». Merci aussi à Nono d'être toujours présente aux moments importants de ma vie. Merci à Peggy pour ses longs mails de debrief, qui m'ont permis plus d'une fois de faire diversion. Et enfin merci à tous ceux qui sont là pour rigoler et qui ne disent jamais non à une petite mousse ou un apéro/after à la maison : Valou (évidemment !), Tinou (dis tu nous joues un petit truc ?), Betty (merci d'être aussi fan !), Claire-So (merci d'être toujours là !), Nico et Alex (merci pour votre soutien)...

Je tiens également à remercier mes parents, qui m'ont toujours soutenue, et qui m'ont aussi laissée libre dans mes choix tout en ayant foi en moi et en mes capacités à réussir. Vous ne m'avez jamais mis la pression pour cette thèse et je vous en remercie. Merci pour votre confiance et votre amour si doux et si bienveillant. Je remercie aussi ma grand-mère, d'avoir toujours cru en moi, en me disant « non, c'est pas de la chance, la chance ça se crée ».

Je remercie aussi mes frères, qui sont restés bien loin de ce projet de thèse, mais qui n'oubliaient de me taquiner en me disant « alors, ça cherche ? ». Merci à Alexis, d'avoir pointé le bout de son nez, il y a deux ans maintenant, même si tu n'as rien compris à ce qu'il se passait, c'était un bonheur pour moi de te retrouver pendant cette période et de rester émerveillée à te regarder.

Je remercie aussi mes beaux-parents, Béatrice et Denis, qui m'ont également toujours soutenue. Je vous ai rencontré quand j'ai eu mon allocation doctorale, et vous avez toujours été présents pendant ces 5 dernières années en vous intéressant à mon sujet, me posant de multiples questions, je vous en suis très reconnaissante.

Enfin, voici le paragraphe que j'attends d'écrire depuis si longtemps, celui qui me permet de dire merci à Martin, celui qui a été le meilleur dans cette histoire, celui qui a toujours été là pour moi, à balayer mes doutes et mes angoisses, celui qui a toujours su trouver les bons mots. Martin, je te suis reconnaissante de m'avoir portée jusqu'ici, de m'avoir toujours dit « ça va aller », d'avoir toujours cru en moi. Je te remercie d'être resté à mes côtés le soir, parfois tard et de m'avoir encouragée avec tes « allez loulou ! ». Merci pour toutes ces petites attentions, ces cadeaux que tu me donnes (tu me gâtes trop mon chéri !). Merci pour toutes ces petites choses qui font que la vie est si belle et si douce à tes côtés. Il me tarde de te dire oui...





# Sommaire

Introduction	1
PREMIERE PARTIE	5
RENFORCEMENT PROSODIQUE ET SYSTEME VOCALIQUE DU FRANÇAIS	
1. Processus de marquage prosodique et renforcement prosodique	5
1.1 Premiers travaux sur les variations phonétiques positionnelles	7
1.2 Variations observées dans des constituants supérieurs au mot	10
1.3 Renforcement du contraste syntagmatique	13
1.4 Renforcement du contraste paradigmatique	17
1.5 Renforcement du contraste syntagmatique et/ou du contraste paradigmatique	20
2. Caractéristiques des voyelles orales du français	27
2.1 Le système vocalique du français : un système dense	29
2.2 L'implémentation phonétique du système	31
2.3 L'implémentation articulatoire du système : au niveau de l'articulation labiale et de la mâchoire	34
2.4 Conséquences attendues sur les valeurs des formants et sur les paramètres articulatoires lors d'un renforcement des contrastes syntagmatique ou paradigmatique	39
2.4.1 Renforcement du contraste syntagmatique : conséquences acoustiques sur les voyelles étudiées	40
2.4.2 Renforcement du contraste paradigmatique : conséquences acoustiques sur les voyelles [±arrondi]	43
2.5 Récapitulatif des questions de recherche abordées	47
DEUXIEME PARTIE	51
METHODE	
3. Matériel linguistique et locuteurs	53
3.1 Les conditions prosodiques choisies	53
3.2 Le corpus enregistré	54
3.3 Passation et locuteurs	56
3.4 Le codage des séquences étudiées	57
3.5 Premiers travaux avec trois frontières prosodiques : pour n'en garder que deux	66
4. Acquisition et analyse des données	67
4.1 Le système d'acquisition physiologique	67

4.2	Le post-traitement des données	70
4.3	Les mesures (acoustiques et articulatoires)	74
4.4	Analyses statistiques menées dans cette thèse	76
5.	Résumé de la Méthode : données traitées	79
TROISIEME PARTIE		81
RESULTATS		
6.	Analyse préliminaire	81
7.	Analyse par voyelle : Effet de la position initiale sur les paramètres articulatoires (labiaux et menton) et sur les paramètres acoustiques (spectraux, durée, intensité)	85
7.1	Voyelle /i/	86
7.2	Voyelle /y/	91
7.3	Voyelle /u/	96
7.4	Voyelle /e/	101
7.5	Voyelle /ø/	105
7.6	Voyelle /o/	110
7.7	Voyelle /ɛ/	114
7.8	Voyelle /œ/	118
7.9	Voyelle /ɔ/	123
7.10	Voyelle /a/	127
8.	Analyse du système sur l'espace acoustique	131
9.	Analyse des contrastes par paires de voyelles	139
9.1	Contraste [±arrondi]	141
9.2	Contraste [±arrière]	161
9.3	Contraste [±haut]	168
9.4	Contraste [±bas]	176
10.	Résumé et interprétation des résultats	183
DERNIERE PARTIE		197
Discussion des questions de recherche		
Conclusion		209
Bibliographie		213
Annexes		223
Annexe 1 : Composition segmentale du corpus		223

Annexe 2 : Résultats statistiques	224
Annexe 3 : Statistiques modèles mixtes	241
Annexe 4 : Articles	265
Listes des tableaux	309
Listes des figures	321





# Introduction

Cette étude cherche à comprendre comment la structuration prosodique peut influencer la façon dont le locuteur produit les segments d'un énoncé donné. Deux questions principales motivent ce travail de thèse : comment des variations phonétiques segmentales aux frontières prosodiques traduisent le découpage prosodique du message sonore ? Comment ces variations contribuent au renforcement des contrastes, syntagmatique et paradigmatisque dans la chaîne parlée ? Dans cette perspective, nous inscrivons cette thèse dans le domaine de la « prosodie articulatoire ».

L'évolution du latin au français montre que les voyelles ou les consonnes ont été : soit conservées, soit transformées ou ont tout simplement disparu, suivant leur position dans le mot (initiale/médiane/finale). Ensuite, les études sur la parole ont montré que la prosodie pouvait également influencer la réalisation des segments. Trois positions sont désignées comme des positions privilégiées, sujettes à la variation :

- La proéminence accentuelle (accent lexical, accent nucléaire, accent d'emphase, suivant la langue étudiée) (Straka, 1963 ; Edwards, Beckman & Fletcher, 1991 ; Beckman, Edwards & Fletcher, 1992 ; Beckman & Edwards, 1990, 1994 ; Cho, 2001, 2005, 2006 ; de Jong et al. 1995 ; de Jong, 1993 ; Harrington, Fletcher & Beckman, 2000 ; Harrington, Fletcher & Roberts, 1995)
- La frontière de constituants prosodiques pour laquelle on distingue :
  - la position initiale de constituants prosodiques (Cho, 2001, 2005, 2006 ; Cho & Jun, 2000 ; Cho & Keating, 1999, 2001 ; Fougeron & Keating, 1997)
  - la position finale de constituants prosodiques (Beckman et al., 1992 ; Byrd, 2000 ; Cho, 2006 ; Edwards et al. 1991, Cho, 2001, 2005, 2006, Tabain, 2003a , 2003b)

Il a été montré qu'un segment placé dans l'une de ces trois positions était sujet à un « renforcement prosodique » (« prosodic strengthening »). Ce renforcement entraîne des variations articulatoires et spectrales (amplitude, durée). Selon le niveau de proéminence ou selon la démarcation dans la hiérarchie prosodique, ces variations phonétiques suivent un caractère graduel : on parle de « renforcement prosodique cumulatif ».

La première question de cette thèse est la suivante :

- Existe-t-il un effet de la position initiale en frontière de constituant prosodique important sur les voyelles orales du français ?

Le renforcement prosodique a été particulièrement étudié pour la proéminence accentuelle et pour la position finale de constituants prosodiques. Ces études montrent que le renforcement prosodique modifie l'articulation des consonnes et des voyelles : les consonnes seraient articulées avec une constriction plus

extrême et plus longue, les voyelles quant à elles seraient articulées en atteignant complètement leurs cibles respectives avec une durée plus longue (Cho, 2001). Quant à la position initiale de constituants prosodiques, nous manquons d'informations sur la réalisation acoustique et articulatoire des voyelles car les études se sont particulièrement intéressées aux consonnes.

Notre but est de mieux définir le phénomène de renforcement prosodique en position initiale de constituants prosodiques, c'est-à-dire de mieux définir le renforcement initial sur les voyelles.

Deux raisons peuvent expliquer ce manque d'informations pour le renforcement initial sur les voyelles : premièrement, la plupart des études ont étudié l'influence de la position initiale de constituants prosodiques sur des segments du type #CV. Dans cette séquence, # représente la frontière prosodique, et V la voyelle étudiée. Cette voyelle est précédée d'une consonne et n'est donc pas directement précédée de la frontière prosodique. Or, il a été montré que les effets du renforcement initial étaient particulièrement forts en position immédiatement précédée de la frontière prosodique et que l'effet diminuait rapidement sur les segments suivants (Bombien, Mooshammer, Hoole, Rathcke & Kühnert, 2007). En ce sens, la position strictement initiale de domaine prosodique constitue une position privilégiée pour étudier l'effet direct de la frontière sur le segment. Cependant, peu d'études se sont intéressées à cette position strictement initiale pour les voyelles. A notre connaissance on compte trois études pour l'anglais, et deux études pour le français (Fougeron, 1998, Gendrot et Gerdes, 2009, Lehnert-Lehouillier, McDonough and McAleavey, 2010, Kim & Cho, 2011, 2012). Les études qui ont été menées sur les voyelles nous donnent donc qu'une vision parcellaire des propriétés potentiellement sujettes à la variation.

La seconde question de cette thèse est la suivante :

- Quelles propriétés acoustiques et articulatoires (au niveau des lèvres et du menton) des voyelles sont affectées en position initiale d'un constituant prosodique important et dans quelles directions vont ces modifications ?

Pour pouvoir rendre compte de ces propriétés sujettes à variation, nous avons mené une étude acoustique et une étude articulatoire en étudiant les modifications sur l'articulation des lèvres et l'abaissement du menton. De plus, l'originalité de notre étude est de s'intéresser non pas à quelques segments vocaliques, comme c'est le cas pour les études pour l'anglais, mais à la quasi-totalité du système vocalique du français i.e. les voyelles orales du français. Les dix voyelles orales /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/ ont donc été placées en position strictement initiale de groupe intonatif (position élevée dans la hiérarchie prosodique) et en position médiane de groupe intonatif (ou position initiale du second mot d'un mot composé, niveau hiérarchique plus bas).

Nous avons également cherché à savoir si les variations articulatoires et acoustiques renforcent/maximisent les contrastes syntagmatique et/ou paradigmatique entre les segments. Pour cela, nous avons confronté nos résultats aux prédictions de l'hypothèse d'expansion de sonorité et l'hypothèse d'hyperarticulation localisée. La troisième question de cette thèse est donc:

- Quelles sont les conséquences des variations provoquées par le renforcement initial sur le contraste syntagmatique (en renforçant la sonorité de la voyelle) et sur le contraste paradigmatique (en renforçant le contraste entre voyelles) ?

D'après la première hypothèse (H1) i.e. hypothèse d'expansion de sonorité, le renforcement en position initiale va contribuer au renforcement du contraste syntagmatique : la voyelle se distinguerait maximalelement des consonnes adjacentes dans la chaîne parlée en augmentant sa sonorité, et la consonne se distinguerait maximalelement des voyelles adjacentes en diminuant sa sonorité. Alors que la seconde hypothèse (H2) i.e. hypothèse d'hyperarticulation localisée, propose que l'effet de la frontière prosodique contribuerait au contraste paradigmatique entre les segments : les traits distinctifs de la voyelle seraient renforcés, les voyelles devenant plus distinctes les unes des autres.

Cette thèse a été subdivisée en 4 parties :

Dans la première partie (revue de littérature), nous présentons les données existantes sur le renforcement prosodique. Nous détaillons également le système vocalique du français, et son implémentation phonétique et articulatoire au niveau de l'articulation labiale.

Dans la seconde partie (méthodologie), nous présentons les mesures utilisées dans ce travail ainsi que le protocole d'acquisition des données et les analyses effectuées du pré-traitement au post-traitement.

Dans la troisième partie, nous présentons les résultats acoustique et articulatoire de cette thèse.

Dans la quatrième partie, nous discutons nos résultats à la lumière des hypothèses formulées dans la littérature et nous proposons une approche originale pour définir le renforcement initial sur les voyelles orales du français.



# PREMIERE PARTIE

## RENFORCEMENT PROSODIQUE ET SYSTEME VOCALIQUE DU FRANÇAIS

---

### 1. PROCESSUS DE MARQUAGE PROSODIQUE ET RENFORCEMENT PROSODIQUE

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord montrer que la position initiale influence la réalisation phonétique des segments, au niveau du mot (1.1). Ensuite, nous verrons que la position en frontière de constituants prosodiques supérieurs (position finale ou initiale) et la position sous l'accent sont considérées, dans la littérature, comme des positions fortes. Dans ces positions, le segment est soumis à « un renforcement prosodique » (1.2). Cette revue de littérature présente les principales modifications acoustique et/ou articulatoire relevées sous l'effet de ce renforcement prosodique. Deux hypothèses ont été proposées pour rendre compte de ces modifications : l'hypothèse d'un renforcement des contrastes syntagmatiques (1.3) et celle d'un renforcement des contrastes paradigmatiques (1.4). Certaines études montrent que les deux types de renforcement peuvent expliquer la réalisation des segments en position forte (1.5). Nous verrons à travers cette revue que peu d'études se sont concentrées sur la position initiale de constituant prosodique sur les voyelles.

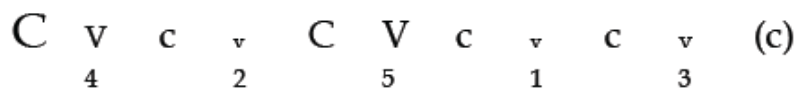


## 1.1 Premiers travaux sur les variations phonétiques positionnelles

Dès les travaux de Rousselot (1897-1908), les travaux de phonétique expérimentale ont montré que la réalisation phonétique des segments est influencée par leur position dans la chaîne parlée. Même si la description de ces positions n'est pas toujours expliquée de façon claire ou systématique, les auteurs font mention de variations en position initiale (généralement au niveau du mot) et en position accentuée. Nous allons montrer que la position initiale dans un mot a un statut particulier sur le plan de la production : dans cette position, les segments sont particulièrement résistants aux variations diachroniques. De plus, nous observerons que ces variations articulatoires varient selon le segment considéré : consonne ou voyelle. Nous présentons ces résultats dans le but de montrer que l'interprétation des variations observées au niveau du mot est le point de départ des hypothèses formulées pour rendre compte des variations observées dans des constituants prosodiques de niveaux supérieurs : niveaux que nous étudions dans cette thèse.

- **Du latin au français**

L'évolution diachronique du latin au français montre qu'en initiale de mot et sous l'accent de mot, les segments se sont maintenus alors qu'en position non-initiale et non-accentuée, les segments se sont réduits et ont parfois même disparu (Brunot & Bruneau 1937, Martinet 1955, Zink 1986). Compte tenu de cette capacité de préservation des propriétés phonétiques des voyelles ou des consonnes, la position initiale de mot et la position sous l'accent de mot ont été désignées comme des positions fortes. A l'opposé, les positions non initiales ou les positions non-accentuées dans un mot sont considérées comme des positions faibles. Par exemple, les voyelles initiales (le plus souvent en contexte CV) se sont maintenues. La préservation de ces voyelles peut être expliquée par la présence d'un accent secondaire en latin sur la première syllabe des mots. Vaissière (1996) établit ainsi une échelle de résistance construite en fonction de la suppression des voyelles dans le temps. Sur cet exemple (Figure 1), l'accent est porté sur la troisième syllabe. La consonne C et la voyelle V situées à cette position, montrent une résistance maximale aux modifications. La position initiale (CV) se montre également comme une position forte.

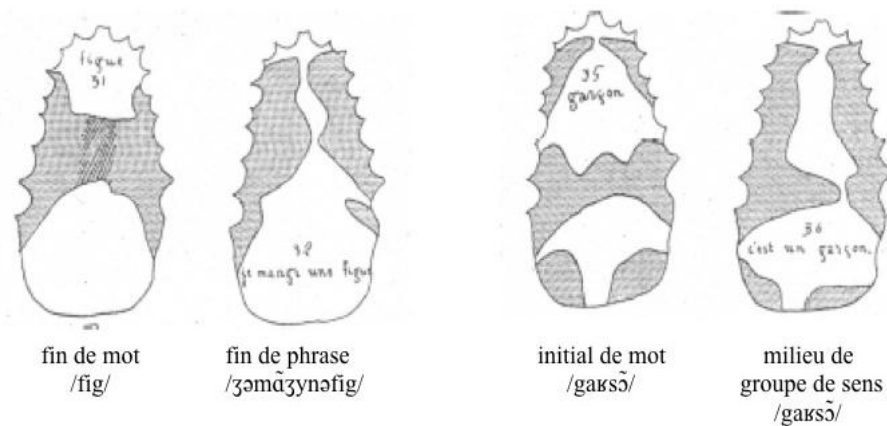


**Figure 1 : Echelle de résistance à la suppression des voyelles latines. L'accent est porté ici par la troisième syllabe. D'après Vaissière, 1996 (p68).**

Cette représentation est similaire à celle de Straka (1964) qui propose également une échelle de force gouvernant l'évolution diachronique des segments. Il montre que pour les voyelles, la position la plus forte est le milieu de syllabe entre consonnes (CVC) ou la position initiale de syllabe avant consonne (VC).

- **Variations articulatoires**

Si les segments placés en position initiale ou position accentuée de mot ont été préservés au fil des siècles, c'est notamment parce que ces positions entraînent des modifications articulatoires sur les segments. En anglais, en position initiale de mot, Vaissière (1988) montre (à partir d'études articulatoires, microbeam system) que la contraction du levator palatini (muscle du voile du palais) entraîne une nasalisation réduite des consonnes. Vaissière propose donc de spécifier ces segments forts par un trait prosodique [+strong]. En français, également, des variations articulatoires sont observées en position initiale de mot. Durand s'intéresse à l'articulation de la consonne postérieure [g], dans des études palatographiques. Un palatogramme est une photographie de l'empreinte de la langue sur le palais dur durant la réalisation du son. Il renseigne sur le degré de contact entre la langue et le palais dur durant l'articulation des sons antérieurs et leur mode articulatoire (degré de fermeture plus ou moins grand). Durand (1930) montre que l'articulation de la consonne est complète en position initiale de mot alors qu'elle se lénifie en fin ou en milieu de phrase (affaiblissement de l'articulation).



**Figure 2 : Schéma représentant les palatogrammes de "figue" (fin de mot) et "figue" (fin de phrase) à gauche et "garçon", "c'est un garçon" à droite, extrait de Durand (1930) (p11)**

Sur la figure 2, le palatogramme « garçon » représente l'empreinte de la consonne /g/ en initial de mot (après une pause) : la fermeture est complète, le segment est de type occlusif. Cette zone de contact peut être modifiée par le contexte vocalique environnant: sur le palatogramme de l'empreinte de la consonne /g/ dans « figue », l'articulation est plus antérieure à cause de la voyelle antérieure /i/. Contrairement à la position initiale, l'articulation de la consonne /g/ en position finale de phrase ou en position milieu de phrase s'affaiblit. En effet, en position finale de phrase « je mange une figue » et en milieu de groupe de sens/ de phrase « c'est un garçon », la zone de contact du segment /g/ n'est pas complète la consonne est lénifiée, le segment se spirantise.

Afin d'expliquer ces variations articulatoires, il a été proposé que l'articulation en début de mot ou en position accentuée de mot entraîne une activité musculaire plus importante pour les organes de la phonation et pour les articulateurs. En effet, au niveau de ces positions fortes, l'effort local expiratoire est plus élevé (Ladefoged 1963, Benguerel, 1973). Cet effort entraîne une énergie musculaire plus forte qui peut affecter l'ensemble des articulateurs supra-glottiques : la langue, les lèvres, la mandibule, le voile du palais. Les auteurs suggèrent qu'il s'exercerait une « énergie », une « tension » plus importante sur les segments en



position forte. Rousselot (1897-1908) et ensuite Straka (1963) parlent en effet de « force articulatoire », dans leurs études sur le français. Rousselot fait un parallèle entre la force de l'articulation et la capacité pour des segments « forts » à augmenter « la zone de contact » d'un articulateur sur un autre (p. 590 version 1924). Straka (1963), lui, parle d'une force articulatoire liée à une augmentation de l'activité musculaire : « la force de contraction des muscles entrant en action pour l'articulation [...] en renforçant l'articulation, [...] on renforce la contraction des muscles entrant en jeu » (p. 49).

Nous allons à présent montrer que cette « force articulatoire » s'exerce différemment suivant le segment et l'articulateur étudié.

- **Un fonctionnement différent entre consonnes et voyelles vers un renforcement des contrastes syntagmatique/paradigmatique**

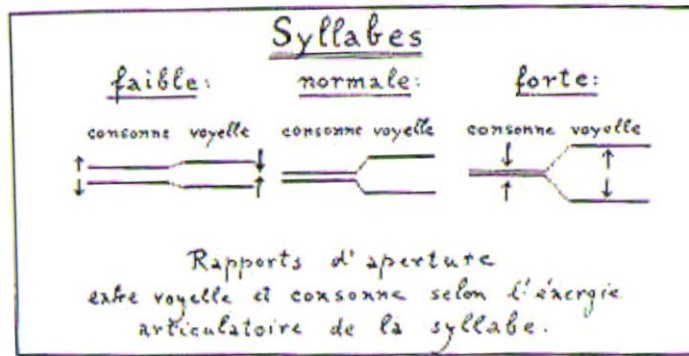
Dans son travail de 1963 portant sur le français, Straka compare la position de différents articulateurs (langue, mâchoire) sur des clichés cinéradiographiques. Les segments étudiés (/i, a/ et consonnes) sont produits avec un « accent d'insistance » (Straka, 1963 : 39), correspondant à des accents emphatiques. Il montre qu'en position accentuée, l'angle maxillaire augmente pour la voyelle ouverte /a/ et la voyelle fermée /i/ et diminue pour les consonnes. Il observe également un allongement des mouvements de la mâchoire en position accentuée. Ces résultats montrent que le fonctionnement des voyelles et des consonnes diffère : « [...] Sous l'effet du renforcement de l'énergie articulatoire, la consonne se ferme et la voyelle s'ouvre. Inversement, sous l'effet de l'affaiblissement articulatoire, la consonne s'ouvre et la voyelle se ferme » (Straka, 1963 : 77). Straka montre ainsi que le travail musculaire de la mandibule est différent suivant la nature du segment : « le renforcement articulatoire ne porte que sur les muscles qui assument le travail essentiel sur les élévateurs pour les consonnes, sur les abaisseurs pour les voyelles. » (Straka, 1963 : 92).

La constriction plus forte des consonnes et l'augmentation de l'ouverture des voyelles provoquent une augmentation du contraste d'aperture orale au sein de la syllabe CV.

Ainsi, en position dite « forte », les segments consonne et voyelle sont plus distincts les uns des autres, comme observé sur la Figure 3. Quand le contraste entre une consonne et une voyelle adjacente est maximisé, le contraste syntagmatique est maximisé (voir la Figure 4): « syntagmatic enhancement generally refers to the heightened phonetic contrast between neighboring segments, which gives rise to enhancement of structural information, including syllable structure and prosodic structure. »<sup>1</sup> (p3, Cho 2001).

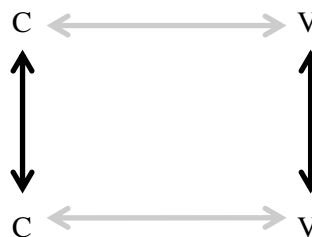
---

<sup>1</sup> « Le renforcement syntagmatique fait généralement référence à un contraste phonétique intensifié entre les segments voisins, ce qui entraîne une mise en valeur de l'information, au niveau de la structure syllabique et de la structure prosodique. » Traduction personnelle.



**Figure 3 : D'après Straka (1963, p83) rapport entre consonnes et voyelles selon l'énergie articulatoire des syllabes, d'après des clichés cinéradiographiques sur le français. Lorsque la syllabe est en position forte, le contraste d'aperture au sein de la syllabe CV est renforcé.**

Or, Straka observe également les modifications articulatoires de la langue et montre que l'articulation linguale des voyelles ne suit pas les mêmes variations que celles de la mâchoire (abaissement). Il montre, en effet, que l'articulation linguale est plus haute pour la voyelle /i/ (et pour les consonnes) et plus basse pour la voyelle /a/. Ces résultats vont être notamment confirmés par Giot (1977) qui observe que sous l'accent, la position linguale de la voyelle /i/ est plus haute. Dans cette perspective, les voyelles /i/ et /a/ sont plus distinctes l'une de l'autre sous l'accent. Quand la distinction entre les voyelles est renforcée : le contraste paradigmique est maximisé (voir Figure 4): « paradigmatic enhancement refers to the heightened phonetic contrast between contrastive sounds or phonemes in the sound system of the language. »<sup>2</sup> (p3, Cho 2005), (voir figure 4).



**Figure 4 : Deux types de contrastes linguistiques : syntagmatique et paradigmique (inspiré de Hsu & Jun 1997, et Fougeron 1998)**

Cette proposition de renforcement des contrastes paradigmique et syntagmatique a été reprise pour expliquer des variations dans des constituants supérieurs au mot.

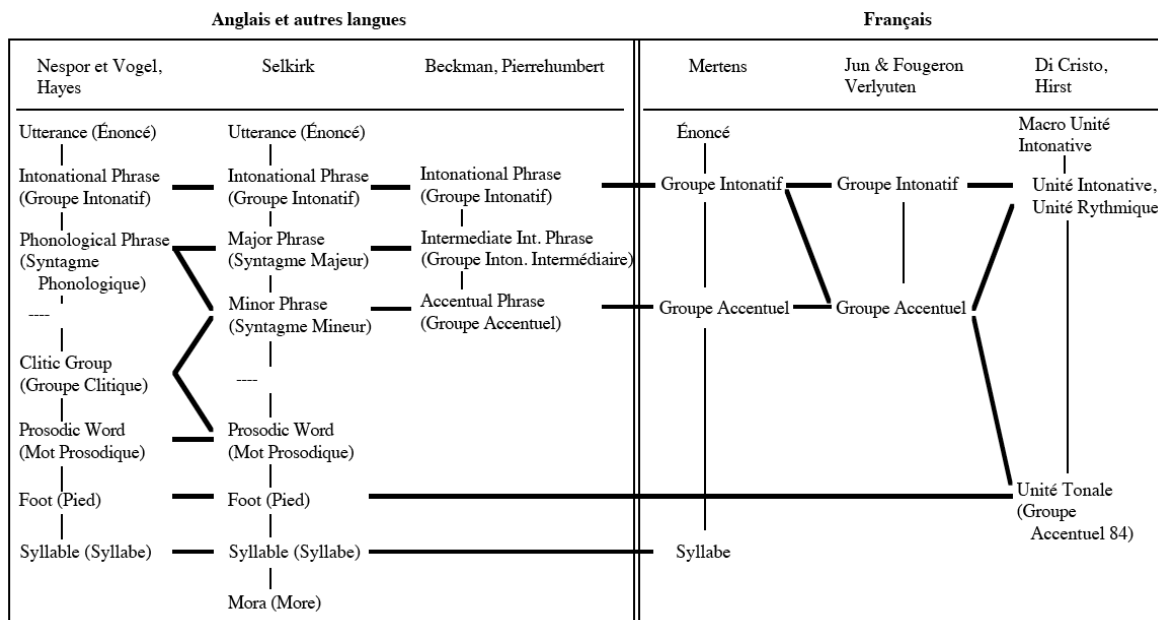
## 1.2 Variations observées dans des constituants supérieurs au mot

- **Frontières de constituants prosodiques et unités proéminentes**

Au delà du mot, la structuration prosodique d'un énoncé repose sur des regroupements en constituants prosodiques qui vont refléter le phrasé de l'énoncé et sur la mise en relief de certaines unités de

<sup>2</sup> « Le renforcement paradigmique fait référence à une intensification du contraste phonétique entre des sons ou des phonèmes dont l'opposition est contrastive dans le système de la langue. » Traduction personnelle.

l'énoncé rendues proéminentes. Dans cette thèse, nous adoptons une vision de la structuration prosodique selon laquelle les constituants prosodiques s'organisent sur plusieurs niveaux hiérarchiquement organisés (Lieberman and Prince 1977, Selkirk, 1980, 1984, 1986, Hayes, 1989, Nespor & Vogel, 1986, Beckman & Pierrehumbert, 1986). Comme le montre la Figure 5 (extraite de Fougeron 1998), la nature et le nombre de constituants dans cette Hiérarchie Prosodique varient entre les langues et entre les auteurs (voir aussi Shattuck-Hufnagel & Turk, 1996 pour une comparaison détaillée des constituants). Dans cette thèse, nous ne prendrons pas partie pour l'un ou l'autre des nombreux modèles phonologiques de la prosodie du français, ni ne les détaillerons (le lecteur est renvoyé, entre autres, à Hirst & Di Cristo 1984, 1996 ; Di Cristo & Hirst 1993, 1996, Mertens, 1987, 1993, Post, 1993 et Jun & Fougeron, 1997, 2002, voir aussi Delais, 1995 pour une revue). Ces modèles proposent différents niveaux de constituants organisés hiérarchiquement (comme dans les exemples illustrés sur la droite de la Figure 5) et ces différents niveaux entretiennent des relations hiérarchiques au regard de l'importance fonctionnelle des démarcations réalisées. Nous verrons par la suite, que le constituant que nous étudierons, est un niveau admis dans tous les modèles : le Groupe Intonatif ou Unité Intonative. Nous admettons également que la structuration hiérarchique des unités prosodiques répond à un principe d'étagement strict, en accord avec la Strict Layer Hypothesis (Selkirk, 1984, 1986 ; Nespor & Vogel, 1986). Selon ce principe un constituant est composé obligatoirement d'un (ou de plusieurs) constituants de niveau qui lui est immédiatement inférieur. Ainsi, dans la chaîne parlée, un constituant de niveau X ne peut être précédé que d'un constituant de même niveau prosodique. De ce fait dans notre étude, un segment placé en position initiale de Groupe Intonatif sera à la frontière entre deux Groupes Intonatifs.



**Figure 5 : Exemples de hiérarchies prosodiques pour l'anglais et autres langues et pour le français. Figure extraite de Fougeron 1998.**

Au niveau phonétique, les frontières des constituants prosodiques et les unités proéminentes sont encodées par des variations mélodiques (f0), des variations de durée et d'intensité, et des pauses. A ces indices phonétiques majeurs marquant l'organisation prosodique des énoncés s'ajoutent des processus de

sandhi qui vont favoriser la cohésion entre les unités au sein d'un constituant ou délimiter les frontières entre constituants (par exemple, la liaison, l'insertion d'un coup de glotte ou de segments épenthétiques) (Vaissière, 1999). Le marquage phonétique de la structure prosodique au niveau des frontières et des proéminences se traduit également par des variations qui vont affecter la réalisation phonétique des segments, c'est à dire des traits/aspects acoustiques et articulatoires propres à la production des segments. Ceux sont ces variations qui sont au cœur de notre problématique.

Si la structure prosodique s'organise de manière hiérarchique, il a également été montré que les variations phonétiques étaient cumulatives et dépendaient du niveau hiérarchique de la frontière prosodique. Cette cumulativité du phénomène a été observée en frontière de constituants prosodiques, (a) en position finale : Edwards, Beckman & Fletcher (1991), Wightman et al. (1992), Gussenhoven & Rietvelt, (1992), Byrd (2000), Byrd, Krivokapic & Lee (2006), Cho (2006) ; (b) en position initiale : Byrd & Saltzman (1998), Byrd, Kaun, Narayanan & Saltzman (2000), Lavoie, 2001 ; Kuzla, Cho & Ernestus (2007), Cole, Kim, Choi, Hasegawa-Johnson (2007), Onaka (2003), Onaka, Watson, Palethorpe & Harrington (2003).

Ainsi, il a été décrit que les variations phonétiques observées aux frontières relèvent d'un « renforcement prosodique cumulatif ». En position initiale de constituants prosodiques, position étudiée dans cette thèse, nous parlons de « renforcement prosodique initial » ou « renforcement initial ». Nous ne reviendrons pas sur la cumulativité du phénomène, car c'est un phénomène qui a été largement décrit, nous nous concentrons ici sur les paramètres acoustiques et articulatoires (principalement au niveau des lèvres et de la mâchoire) sujets à variation ainsi qu'aux hypothèses qui peuvent expliquer les variations observées sous l'effet de ce renforcement initial en début de groupe intonatif.

- **Deux hypothèses**

Pour expliquer les variations phonétiques dans ces positions, deux hypothèses ont été formulées : l'hypothèse d'expansion de sonorité et l'hypothèse d'hyperarticulation localisée.

- La première hypothèse stipule que la frontière prosodique et la proéminence accentuelle ont un effet sur l'axe syntagmatique en renforçant la distinction entre la consonne et la voyelle. Ce scénario correspond à la figure (b) de la Figure 6, proposée par Cole et al. (2007). Postulons que les deux éléments soient la voyelle fermée /i/ (représentée par un rond) et la voyelle ouverte /a/ (représentée par un triangle) et que la variable étudiée soit l'aperture aux lèvres. Les conséquences de la position accentuée sur ces segments sont identiques : une augmentation d'aperture aux lèvres pour les deux voyelles. La sonorité des voyelles augmente et elles deviennent plus distinctes des consonnes environnantes.
- La seconde hypothèse stipule que la frontière prosodique et la proéminence accentuelle ont un effet sur l'axe paradigmatique en renforçant les traits distinctifs des segments. Ce scénario correspond à la figure (a) de la Figure 6. Dans ce cas, en position accentuée, pour la voyelle /i/ (rond), l'aperture aux lèvres est plus petite et pour la voyelle /a/ (triangle), l'aperture aux lèvres est plus grande. Les

caractéristiques intrinsèques aux voyelles sont renforcées, les voyelles sont plus distinctes les unes des autres.

Cole et al (2007) présentent deux autres scénarii : dans le cas du graphique (c), l'aperture aux lèvres augmente pour les deux voyelles, mais l'augmentation étant plus importante pour la voyelle /a/ (triangle), les deux voyelles sont plus distinctes l'une de l'autre. Dans le cas du graphique (d), l'aperture aux lèvres augmente pour les deux voyelles, mais l'augmentation est plus importante pour la voyelle /i/ que pour la voyelle /a/, provoquant un rapprochement des valeurs sous l'effet de l'accent. Peu d'études ont observé ces deux derniers scénarii, alors que de nombreuses études ont tenté d'expliquer leurs résultats selon les deux premières hypothèses. Nous allons donc présenter les études dont les résultats peuvent être expliqués par ces deux hypothèses. Dans cette thèse, nous chercherons à savoir si les modifications articulatoires et acoustiques observées sur les voyelles orales en position initiale de constituant de groupe intonatif peuvent également être expliquées par ces hypothèses.

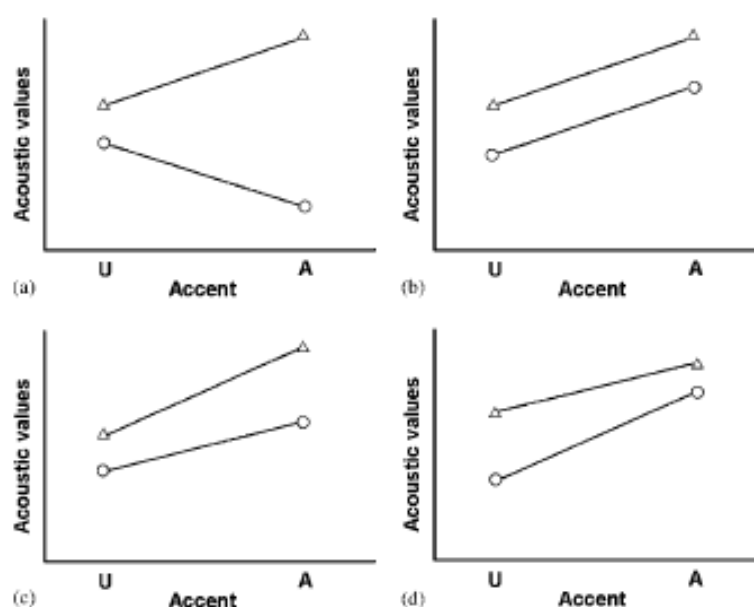


Figure 6: Graphiques schématiques des scénarios (a), (b), (c) et (d), illustrant l'effet du renforcement prosodique sous une position accentuée et sous une position non-accentuée, pour deux catégories phonologique contrastive, basé sur la figure 1 de Cole et al. (2007), (p 183).

### 1.3 Renforcement du contraste syntagmatique

Nous allons ici présenter les travaux de Beckman et al. (1992) qui ont permis de formuler l'hypothèse d'expansion de sonorité.

En étudiant la réalisation de séquence [pap] en anglais, Beckman et ses collègues montre que la proéminence accentuelle est le lieu d'une ouverture maximalisée du conduit vocal entraînant une mise en valeur de la sonorité des voyelles par une augmentation de l'énergie acoustique (Edwards & Beckman, 1988, Beckman & Edwards, 1992, Beckman et al. 1992). Cette augmentation de la sonorité de la voyelle entraîne une maximisation du contraste syntagmatique. Lors de l'articulation de la voyelle au sein de la syllabe, l'ouverture du conduit vocal est plus large et plus longue créant ainsi un accroissement de la sonorité

générale de la voyelle. Comparée aux propositions de Straka, dont les résultats étaient présentés en termes d'aperture, cette hypothèse prend en compte le contraste du couple consonne-voyelle selon des termes de sonorité : « the rhythms of stress and phrasing are represented phonetically in the time course for the realization of a substantive feature, 'sonority' »<sup>3</sup> (Edwards and Beckman, 1988). Dans cette perspective, sous l'influence des proéminences et frontières, la voyelle devient plus ouverte et le reste plus longtemps devenant ainsi plus sonore. Ainsi, l'hypothèse d'expansion de sonorité est construite autour de deux dimensions : « this sonority space has two dimensions. One dimension is Silverman and Pierrehumbert's (1990) notion of sonority : the impedance of the vocal tract looking forward from the glottis. We index this dimension by overall vocal tract openness, which can be estimated by jaw height in our target [pap] sequences. The other dimension of the sonority space is time ; a vertical increase in overall vocal-tract openness is necessarily coupled to a horizontal increase in the temporal extent of the vertical specification. »<sup>4</sup> (Beckman et al, 92, p 84).

Nous allons cependant montrer que l'organisation temporelle et les variations articulatoires ne sont pas identiques entre la proéminence accentuelle et la frontière prosodique.

- **Différences entre accents et frontières de constituants prosodiques**

Selon Beckman et collègues (Beckman et al, 92) les mécanismes articulatoires se réalisant sur les proéminences (« prominence effect ») et aux frontières de constituants prosodiques (« edge effect », seule la position finale de constituant prosodique (frontière droite) est considérée) sont différents.

- Sous la proéminence accentuelle : Les proéminences étudiées sont l'accent nucléaire ou l'accent focal, en anglais. Sous l'accent, la durée, l'amplitude et la vitesse de déplacement d'ouverture et de fermeture de la mâchoire de la voyelle sont plus élevées qu'en position inaccentuée. Ce contraste au sein de la syllabe accentuée est expliqué par la nécessité d'augmenter particulièrement l'énergie acoustique globale de la syllabe. Deux gestes articulatoires permettent d'atteindre ce but : soit une ouverture maximale élevée du conduit vocal, soit une ouverture moins large mais sur une portion plus longue de la voyelle. Ces deux gestes permettent d'optimiser l'aspect temporel nécessaire à la perception de l'intensité acoustique produite.
- En frontière de constituants prosodiques : l'effet de la frontière a été étudié principalement au niveau de l'allongement final de constituant intonatif (Intonational Phrase). L'allongement final est caractérisé par une raideur des gestes moins marquée (ou « stiffness », d'après le cadre théorique de la dynamique des tâches, Saltzman & Munhall, 1989). Ce mécanisme articulatoire est

---

<sup>3</sup> « le rythme de l'accent et la mélodie sont représentés phonétiquement dans le cours du temps par la réalisation d'un trait sous-jacent : 'la sonorité' ». Traduction personnelle.

<sup>4</sup> « La notion de sonorité possède deux dimensions. La première relève de la notion de sonorité introduite par Silverman et Pierrehumbert (1990) : la taille du conduit vocal de la glotte jusqu'à l'ouverture. Cette dimension rend compte de l'ouverture globale du conduit vocal, qui peut être estimée par la hauteur de la mâchoire dans nos séquences cibles [pap]. La seconde dimension de la notion de sonorité est le temps : une augmentation verticale de l'ouverture globale du conduit vocal est nécessairement couplée à une augmentation horizontale dans la mesure temporelle de la spécification verticale. » Traduction personnelle.

essentiellement dû à un ralentissement de l'articulation en syllabe finale de constituant. Ce ralentissement va provoquer des mouvements mandibulaires plus longs mais surtout moins rapides.

L'allongement final est donc caractérisé seulement par une augmentation temporelle, alors que les gestes articulatoires sous l'effet des prééminences accentuelles impliquent une augmentation temporelle et également spatiale. Le but serait de rendre maximale sonore le noyau de la syllabe accentuée. Par conséquent, deux rôles au niveau de l'axe syntagmatique peuvent donc être dégagés. Le premier rôle du principe d'expansion de sonorité est de mettre en valeur la voyelle par rapport aux consonnes adjacentes, et donc de mettre en valeur le noyau syllabique permettant ainsi de maximiser le contraste CV au niveau de la syllabe et aux marges. Le second rôle du principe d'expansion de sonorité se situe au niveau de la phrase ou des constituants prosodiques. En effet, l'augmentation de sonorité va permettre la mise en relief des syllabes accentuées, celles qui occupent une position forte. Elle participe également à la mise en relief des syllabes prééminentes dans le découpage prosodique de l'énoncé, par un contraste plus prononcé avec les syllabes non accentuées.

Ces résultats montrent également que la mâchoire et le paramètre de durée sont les variables essentielles pour mesurer indirectement la sonorité de la voyelle. Cependant, l'articulation labiale et les variations d'amplitude de F1, de F0 constituent également des mesures indirectes de la sonorité (Parker, 2002).

- **Abaissement de la mâchoire, articulation labiale, articulation linguale et variations d'amplitude de F1, F0 de durée : mesures indirectes de la sonorité**

- L'abaissement de la mâchoire constitue, selon l'article de Edwards et Beckman (1988), une mesure indirecte de la sonorité de la voyelle : «Jaw height in our experiments is then an articulatory measure of this «overall openness». And the time course of jaw opening and closing is an approximate representation of the rise and fall of sonority, or the syllable's 'sonority profile' »<sup>5</sup>. Les résultats de Beckman sur l'ouverture de la mâchoire ont été confirmés dans les travaux de Macchi qui montrent que peu importent les caractéristiques phonétiques des phonèmes étudiés, l'ouverture de la mâchoire sera plus extrême sous l'effet de l'accent. Elle a, en effet, montré que l'accent lexical provoque une ouverture maxillaire plus grande pour les voyelles ouvertes (/a/, /ʌ/) et également pour les voyelles fermées (/i/, /u/ et /ɛ/). De même, les travaux de Giot (1977) sur la voyelle /a/ en français et les travaux de Rietvelt & Van lieshout (1995) sur les voyelles /i, a/ en néerlandais, montrent qu'en syllabe accentuée comparée à une syllabe inaccentuée, la mâchoire est plus basse, le geste d'ouverture est plus ample et plus long. Ces auteurs montrent donc que la position de la

---

<sup>5</sup> « La hauteur de la mâchoire dans notre expérience est une mesure articulatoire de cette « ouverture globale ». Et la cadence d'ouverture et de fermeture de la mâchoire est une représentation approximative de la montée et la chute de la sonorité ou du profil de sonorité de la syllabe. »

mâchoire est particulièrement sensible aux variations liées à la présence d'un accent. Ceci a conduit certains auteurs à considérer la mâchoire comme l'articulateur marquant l'organisation prosodique (Macchi 1988, Beckman et al. 1992). Les études d'Erickson et al. montrent également que la focalisation contrastive (contrastive emphasis), s'accompagne d'une augmentation de l'amplitude de l'ouverture de la mandibule (Erickson et al., 1994, Erickson & Fujimura, 1996, Erickson & Honda 1996) notamment sur la portion VC (voyelle consonne) de la syllabe CVC.

- Un abaissement de la lèvre inférieure s'associe le plus souvent à l'abaissement de la mâchoire. Les études de Kelso et al. (1985) sur l'anglais et de Vatiokiotis-Bateson & Kelso (1993) sur l'anglais et le français se sont intéressées à l'ensemble mâchoire-lèvre inférieure sur un corpus de parole réitérée du type /mamama/ et /papapa/. Ils montrent que l'accent est produit par des gestes d'ouverture plus longs, plus amples et plus véloces par rapport aux syllabes inaccentuées. Keating et al. (2003) ont montré que la première voyelle d'un mot sous accent focal (phrasal stress) (Mimi, Bobby, Timmy, Debby, Tommy, Pammy) était caractérisé par un mouvement d'ouverture aux lèvres plus important, plus long et plus rapide. De même, Westbury & Fujimura (1989) montrent que les déplacements et les pics de vitesse maximum correspondant à la lèvre inférieure augmentent lorsque la syllabe considérée est sous emphase contrastive.
- Des variations de durée accompagnent le plus souvent l'augmentation de l'amplitude de la mâchoire. Les études montrent en effet pour la plupart que l'amplitude d'abaissement de la mâchoire s'associe à un geste plus long (Beckman et al. 1992, Kelso et al. 1985, Vatiokiotis-Bateson & Kelso, 1993, Keating, Cho, Fougeron & Hsu, 2003, Erickson & Lehiste, 1995 entre autres).
- Des variations d'amplitude de F1 et/ou de F0 peuvent accompagner l'abaissement de la mâchoire. Les modifications acoustiques notamment sur l'amplitude du formant F1 et de la fréquence fondamentale (F0), participent également à la maximisation du contraste entre la voyelle et la consonne. Pour les voyelles de l'anglais /ʌ/ et /æ/ sous l'accent focal contrastif, l'ouverture de la mâchoire est plus importante et l'augmentation de l'amplitude de la mâchoire s'associe à une augmentation de l'amplitude du formant F1 (Summers, 1987). Pour les voyelles /i/ et /æ/, Harrington et al. (2000) montrent que l'ouverture de la mandibule augmente pour les deux voyelles et que cette ouverture est associée à une augmentation de la F0. L'étude Erickson et al. 2000, s'intéresse à la réalisation des voyelles /i/ et /æ/ sous emphase contrastive sur un grand nombre de locuteurs de l'anglais américain (45). Les résultats montrent qu'il existe deux types de stratégies utilisées par les locuteurs. Certains locuteurs utilisent à la fois F0 et l'ouverture de la mandibule pour signaler l'emphase contrastive et d'autres n'utilisent que F0. Dans ce dernier cas, les pics de F0 sont plus importants que pour la première stratégie. Dans Ménard, Loevenbruck & Savariaux (2006), pour trois des locuteurs adultes, (séquences baba) l'aire aux lèvres est plus large sur la première syllabe sous l'accent contrastif, et diminue sur la syllabe suivante. Ce pattern est interprété comme une stratégie du locuteur adulte d'augmenter la prééminence de la première syllabe, en hypo-articulant la seconde syllabe. L'augmentation de l'aire aux lèvres est accompagnée d'une



augmentation de la vélocité du geste d'ouverture et d'une réduction de la durée du geste d'ouverture (pour deux locuteurs). Pour tous les locuteurs, F1 est significativement plus haut sous le focus qu'en position neutre, pour la première syllabe. Ces résultats peuvent être interprétés comme un renforcement de la sonorité de la voyelle.

- **Limites de l'expansion de sonorité**

Notons que dans ces études, seule la mâchoire ou les lèvres ont été considérées. Or, les résultats observés sur l'articulation linguale ne suivent pas toujours les variations de la mâchoire. Comme montré précédemment dans les travaux de Straka (1963), l'ouverture de la mâchoire est plus basse pour les deux voyelles /i/ et /a/ mais l'articulation linguale est plus haute pour la voyelle /i/ et plus basse pour la voyelle /a/. Ces résultats peuvent être interprétés comme une stratégie de renforcement des traits distinctifs inhérents à la voyelle. De plus, les voyelles étudiées sont majoritairement des voyelles ouvertes. L'augmentation de sonorité d'une voyelle ouverte peut également être interprétée comme un renforcement du trait inhérent à cette voyelle. Cette hypothèse de renforcement du trait va être proposée par De Jong et al. (1993).

## 1.4 Renforcement du contraste paradigmatique

De Jong propose que sous l'effet de la prosodie, l'ensemble des traits distinctifs du segment doivent être renforcés « all phonemically distinctive contrasts will be directly affected by stress, not just sonority contrast »<sup>6</sup> (de Jong 1995 :493). La proposition faite par De Jong et al. (1993) pour expliquer les variations sous l'accent, repose sur le modèle d'Hyper- & Hypo-Speech Theory (Lindblom, 1990) « Adopting Lindblom's (1990) terminology, we will call this the hyperarticulation hypothesis. A stressed syllable has a more extreme range for all phonetic features, so that all segmental specifications are realized more fully, not just sonority specifications. »<sup>7</sup> p206 (De Jong et al. 1993). Nous présentons ici succinctement le principe du modèle d'Hyper et d'Hypo-articulation de Lindblom.

- **Le modèle d'Hyper et d'Hypo-articulation de Lindblom**

Le modèle de Lindblom tente de rendre compte de la variabilité en production de la parole. Cette variabilité repose sur deux notions : la distinctivité perceptive (de l'auditeur) et l'économie articulatoire (du locuteur). Un équilibre doit être trouvé entre l'effort articulatoire produit par le locuteur et le besoin de compréhension de l'auditeur. La production de la parole alterne entre des périodes d'hypo-articulation correspondant à des séquences de sous-articulation et des périodes d'hyper-articulation correspondant à des séquences de sur-articulation. Dans cette perspective, l'unité phonique produite est influencée par ces hyper- et hypo-articulations. Pour l'hypo-articulation, l'économie d'effort va provoquer des ratages de cibles

---

<sup>6</sup> « L'ensemble des contrastes phonémiques distinctifs seront directement affectés par l'accent, et pas seulement le contraste de sonorité. » Traduction personnelle.

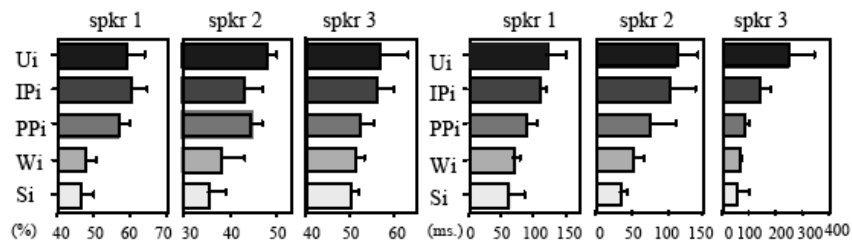
<sup>7</sup> « Reprenant la terminologie de Lindblom (1990), nous allons nommer cela par l'hypothèse d'hyperarticulation. L'influence de la syllabe accentuée a des conséquences sur l'ensemble des traits phonétiques de sorte que toutes les spécifications segmentales sont réalisées plus pleinement et pas seulement les spécifications liées à la sonorité. » Traduction personnelle.

nommés undershoot, les formes phoniques sont moins contrastives. Le locuteur va alors mettre en place des stratégies de compensation qui vont provoquer une réorganisation du système. Pour l'hyper-articulation, le locuteur va tendre à hyper-articuler le message, la forme phonique est alors plus prononcée, l'articulation est plus périphérique ou extrême, on parle d'overshoot. La sortie acoustique pourra correspondre à la sortie attendue en situation normale de communication mais en revanche les mouvements des articulateurs sont plus extrêmes (Lindblom 1983).

Nous allons voir que cette hypothèse d'hyperarticulation localisée a été vérifiée dans de nombreuses études sur différents segments (consonnes et voyelles) sous la prééminence accentuelle et en frontière de constituants.

- **Hyperarticulation des traits distinctifs des consonnes**

- Sous la prééminence accentuelle : Dans son étude de 1993, De Jong étudie les lieux d'articulation des consonnes /t/ et /ð/, dans la séquence « put the ». Il montre qu'en position accentuée, les deux lieux d'articulation (alvéolaire pour /t/ et dental pour /ð/) sont plus distincts renforçant leurs caractéristiques intrinsèques. Une augmentation de durée est relevée en position accentuée ce qui réduit la coarticulation entre les deux segments consonantiques. En 1995, il montre que les variations articulatoires des consonnes /t/ et /n/ s'expliquent par un renforcement de leurs propriétés distinctives : la consonne /n/ est réalisée par une position plus antérieure du corps et du dos de la langue entraînant un avancement de l'occlusion alvéolaire. La consonne /t/ est réalisée par une position plus haute de la langue.
- En frontière de constituants prosodiques : Fougeron (1998) observe l'articulation des consonnes /t, k, l/ suivant la hiérarchie prosodique (syllabe, mot, groupe accentuel, groupe intonatif, voir Figure 5). Elle montre que le contact EPG (ElectroPalatoGraphie) et la durée de ce contact sont plus importants pour les constituants prosodiques supérieurs. La constriction est donc plus extrême renforçant la caractéristique articulatoire de la consonne. Cette hyperarticulation du contact linguopalatal a été observée pour plusieurs langues. Sur le /t/, Hsu & Jun (1997) observent le contact linguopalatal et la durée acoustique en taiwanais et notent également une augmentation entre les positions interne de mot, initiale de mot et de groupe intonatif. En Coréen, la distinction sur la consonne /t/ est encore plus fine, montrant une distinction sur cinq niveaux hiérarchiques (positions initiales de syllabe, de mot ou groupe accentuel, de groupe intonatif et d'énoncé) (Cho, 1998). Les mêmes résultats sont observés sur la consonne /n/. En Anglais, le contact linguopalatal de la consonne /n/ augmente distinctivement selon trois ou quatre niveaux hiérarchiques et sa durée acoustique selon quatre positions. Les résultats sur le pourcentage de contact linguopalatal (à gauche) et la durée d'obstruction (à droite) sont observés sur la Figure 7 pour la consonne /n/ en anglais, d'après Keating, Cho, Fougeron & Hsu (2003):



**Figure 7: Pourcentage du contact linguopalatal (à gauche) et durée d'obstruction (à droite) de la consonne /n/ pour cinq positions prosodiques (U pour Utterance, IP pour Intonational Phrase, PP pour Phonological ou Intermediate Phrase, W pour word, S pour Syllabe), d'après Keating, Cho, Fougeron & Hsu (2003).**

- **Hyperarticulation des traits distinctifs des voyelles**

Sous la proéminence accentuelle : De Jong (1995) observe que sous l'effet de l'accent (accent nucléaire), les propriétés phonétiques distinctives de la voyelle vont être maximisées. La voyelle fermée postérieure /ɒ/ est produite par un abaissement général de la langue. Plus précisément, cet abaissement est réalisé sur la partie avant de la langue auquel est associé un mouvement en arrière (une rétraction) de la langue. Ce recul de la langue va avoir pour conséquence de réduire la cavité pharyngale, et également d'agrandir la cavité buccale. Par ces gestes, les qualités postérieure et grave de la voyelle se trouvent renforcées. Dans cette étude, De Jong (1995) observe également le mouvement de protrusion des lèvres. Ce mouvement de protrusion plus important sous l'accent renforce le caractère grave de la voyelle postérieure /ɒ/ (Stevens, Keyser & Kawasaki, 1986, Stevens & Keyser, 1989). Il interprète ce renforcement de la postériorité de la voyelle arrière comme une preuve tangible d'une hyperarticulation du contraste arrière car les résultats observés ne contribuent pas à une augmentation de la sonorité et ne peuvent donc pas être interprétés comme une expansion de sonorité. Les résultats suivants sont également en accord avec la proposition de De Jong : en français, sous l'effet de l'accent final de phrase (Giot, 1977), des accents initiaux, accent finaux et contrastifs (Loevenbruck, 1999, 2000), la voyelle /i/ est articulée avec une langue plus haute (Loevenbruck, 1999 et 2000) et plus avant (Giot, 1977) et avec des lèvres plus fermées (Giot, 1977). Les caractéristiques inhérentes à la voyelle /i/ i.e. [+antérieur] et [+haut] se trouvent maximisées. Loevenbruck (1999) reporte également que la position de la langue est plus basse pour les syllabes [la] produites sous l'effet de l'accent contrastif (comparé à la condition neutre). En Anglais, Kent & Netsell (1970) montrent également que la langue est plus avant et plus haute pour la production du /i/ et les voyelles /ɒ/ et /o/ sont articulées avec une protrusion aux lèvres plus élevée sous l'accent contrastif. En suédois, les voyelles tendues /i, a, u/ montrent une position plus haute dans la zone postérieure pharyngale sous l'accent. Ce geste peut être interprété comme un renforcement de cette qualité tendue (Engstrand, 1988). En italien, l'étude de Farnetani & Vayra (1996) montre par des données électropalatographiques que les variations linguales renforcent les caractéristiques des segments : les

caractéristiques [+bas] de la voyelle [a], [+haut] de la voyelle [i] et [+arrière] de la voyelle [u] se trouvent renforcées.

En frontière de constituants prosodiques : Dans l'étude de Fougeron & Keating (1995, 1997), la voyelle /o/ placée en position finale de constituant prosodique est articulée avec une augmentation de l'ouverture/postériorité (mesurée par électropalatographie). En néerlandais, van Lieshout et al. (1995) montrent une variation dans l'activité musculaire des lèvres lors de la production de voyelles arrondies en début d'énoncé qu'en fin d'énoncé. Les voyelles sont placées dans la syllabe initiale d'un mot CVC. Les résultats montrent une activité musculaire plus forte sur toute la séquence CVC.

Cependant, De Jong ne rejette pas l'hypothèse d'expansion de sonorité mais il l'intègre dans son hypothèse, présentant la sonorité comme un des traits distinctifs renforcés sous l'effet du renforcement prosodique « the sonority expansion hypothesis does not capture all of the effects associated with the articulation of prominence. Speakers enhance the articulation of non-sonority contrasts such as backness, roundness and point of articulation »<sup>8</sup> (de Jong, 1995 : 499). Nous allons donc passer en revue les études qui s'intéressent au renforcement prosodique sur les voyelles (sous la proéminence accentuelle, en position initiale de constituants prosodiques et en position finale de constituants prosodiques) pour savoir si les variations acoustiques ou articulatoires observées contribuent à renforcer la sonorité de la voyelle seulement, la sonorité et d'autres traits ou d'autres traits sans la sonorité.

## 1.5 Renforcement du contraste syntagmatique et/ou du contraste paradigmatique

- **Sous la proéminence accentuelle**

L'étude de Harrington et al. (2000) et reprise de Fletcher, Beckman & Harrington (1996) montrent clairement qu'il existe à la fois un renforcement de certains traits distinctifs des voyelles et également un renforcement de la sonorité. Harrington et al. (2000) et Fletcher et al. (1996) se sont intéressés aux voyelles /a :, æ, i:/ sous l'accent nucléaire en anglais australien. Tout d'abord, si nous considérons les variations observées sur la mâchoire, les résultats montrent une ouverture mandibulaire plus extrême sous l'accent pour les deux locutrices et cette augmentation s'accompagne d'une énergie (RMS) plus élevée : la sonorité est renforcée. Ensuite, sur les données linguales, les résultats montrent que les deux locutrices ont des stratégies articulatoires différentes. Pour la première, la position de la langue est plus antérieure, et ce mouvement peut être interprété comme un renforcement du trait [-arrière] de la voyelle /i:/. Pour la seconde locutrice, la position de la langue est opposée à celle de la mâchoire : l'articulation est plus haute. Ce mouvement peut être interprété comme un renforcement du trait [+haut] de la voyelle /i:/. Cette étude montre donc que les variations articulatoires contribuent à renforcer la sonorité de la voyelle et d'autres traits de la voyelle.

---

<sup>8</sup> « L'hypothèse d'expansion de sonorité ne peut rendre compte de l'ensemble des effets associés à l'articulation d'une proéminence. Les locuteurs renforcent l'articulation de l'ensemble des contrastes non-sonores comme le contraste d'antériorité/postériorité, l'arrondissement et le point d'articulation. » Traduction personnelle.

Cho (2005) observe la réalisation des voyelles /a/ et /i/ sous l'accent, en anglais. Il montre que les locuteurs (cinq) adoptent une stratégie de renforcement du contraste paradigmatique pour les variations linguales et une stratégie de renforcement du contraste syntagmatique pour les variations mandibulaires et labiales. En effet, comme observé précédemment chez Harrington et al. (2000), l'abaissement de la mâchoire est plus fort sous l'accent. Cette ouverture mandibulaire s'accompagne d'une apertures aux lèvres plus élevée pour les deux voyelles. Ces deux modifications contribuent à augmenter la sonorité des deux voyelles. Par contre, au niveau de l'articulation linguale, les deux voyelles se comportent différemment : pour la voyelle /i/, la langue est plus antérieure (mais pas nécessairement plus haute) et pour la voyelle /a/, elle est plus basse. Ces variations linguales contribuent à augmenter le contraste paradigmatique entre les deux voyelles. D'autres études montrent qu'un renforcement conjoint des contrastes syntagmatique et paradigmatique peut résulter de variations sur un même articulateur : les lèvres. Les travaux de Dohen (2005) montrent en effet, que l'accent d'emphase est marqué par une augmentation de l'aire aux lèvres (aperture et étirement) à laquelle s'ajoute un mouvement de protrusion sur les voyelles /y/ et /u/. L'augmentation de l'aire aux lèvres peut être interprétée comme une augmentation de la sonorité alors que l'augmentation de la protrusion peut être un corrélât articulo-phonatoire du renforcement de l'arrondissement pour les voyelles /y/ et /u/. Nous notons néanmoins que les mesures trouvées dans la littérature sur la protrusion ne sont pas toujours homogènes. En effet, dans l'étude de Ménard, Leclerc, Tiede, Prémont, Turgeon, Trudeau-Fisette et Côté (2013), les locuteurs voyants (comparés à des locuteurs non-voyants) ne montrent pas d'augmentation particulière de la mesure de protrusion, contrairement à ce qui avait été observé chez Dohen (2005). Cependant, l'aire aux lèvres est également plus large en position focus qu'en position neutre, dans cette étude.

Si les études se concentrent sur les variations des articulateurs supra-glottiques, les résultats acoustiques sont également riches d'informations. Dans son étude, Cho (2005) propose d'observer l'effet de l'accent dans l'espace acoustique F1/F2 sur la voyelle /i/ et /a/. Il interprète les variations acoustiques comme un renforcement de certains des traits distinctifs des voyelles /i/ et /a/ alors que ces variations n'avaient pas été directement observées sur les variations articulo-phonatoires. Les variations sur le plan F1/F2 montrent que l'articulation de la voyelle /i/ est plus antérieure et que l'articulation de la voyelle /a/ est à la fois plus basse et plus postérieure. Dans l'étude de Ménard et al. (2013), les résultats acoustiques montrent que pour les deux groupes de sujets (voyants et non-voyants), l'espace vocalique formé par les formants F1 et F2 est plus bas en condition focale qu'en condition neutre. Sur F1, les trois voyelles /i/, /y/ et /u/ sont moins affectées par le contexte prosodique que la voyelle /a/, qui montre une large augmentation du formant F1. Cette augmentation peut être interprétée comme un renforcement de la sonorité de la voyelle et/ou comme un renforcement du trait [+bas] de la voyelle.

- **En position finale de constituants prosodiques :**

Dans cette même étude de 2005, Cho étudie également la réalisation des voyelles /i/ et /a/ en position finale (CV#) de différents constituants prosodiques (Intonational Phrase, intermediate phrase et Word, voir Figure 5). En position finale d'Intonational Phrase, l'aperture aux lèvres pour les deux voyelles est plus importante que pour les autres constituants prosodiques. Cette augmentation est interprétée comme une expansion de sonorité. En position finale d'Intonational Phrase, l'articulation de la voyelle /i/ est plus haute (dans les deux espaces acoustique et articulatoire (espace articulatoire déterminé par les variations linguales)) et plus antérieure (dans l'espace acoustique, seulement). Pour la voyelle /a/, l'articulation de la voyelle est plus basse et plus postérieure (dans les deux espaces acoustique et articulatoire). Ces résultats montrent que les contrastes [ $\pm$ haut] [ $\pm$ arrière] sont renforcés entre ces deux voyelles. En français, Tabain et Perrier (2003, 2005 et 2007) se sont intéressés à l'articulation des voyelles /i/, /u/ et /a/ via les données EMA (Electromagnetic Midsagittal Articulatory) en position finale de cinq constituants prosodiques (5 niveau de hiérarchie prosodique ont été observé : Utterance > Intonational Phrase > Accentual phrase > Word > Syllable, voir Figure 5). Ils observent que l'abaissement de la mâchoire est dépendant des voyelles étudiées, que les stratégies articulatoires peuvent varier entre les locuteurs, alors qu'un objectif acoustique précis est atteint par la plupart. Cet objectif a pour but de renforcer les caractéristiques intrinsèques des voyelles lorsqu'elles sont suivies d'une frontière prosodique élevée.

- Pour la voyelle /a/ (Tabain 2003), les valeurs de F1 sont plus élevées et les valeurs de F2 sont plus basses en position IP. L'expansion articulatoire se réalise pour la voyelle /a/ par un abaissement de la mâchoire associé à un abaissement du corps de la langue.
- Pour la voyelle /i/ (Tabain et Perrier, 2005), aucun effet n'est observé sur la mâchoire ou sur les formants F1 et F2. Les locuteurs montrent des stratégies articulatoires différentes, notamment au niveau de la langue alors que le même but acoustique est atteint celui d'augmenter les valeurs acoustiques de F3. Les auteurs suggèrent que le locuteur vise un résultat acoustique qui serait celui de maintenir un F3 élevé pour la voyelle /i/.
- Pour la voyelle /u/ (Tabain et Perrier, 2007), le dos de la langue est plus postérieur et la pointe de la langue plus rétractée. Ces deux gestes sont renforcés par une plus forte protrusion des lèvres. Au niveau acoustique, F1 et F2 ont des valeurs plus basses, avant une frontière prosodique haute. L'effet le plus important a été observé pour F1 avant une frontière prosodique de type : « Utterance boundary » (frontière d'énoncé). Les indices acoustiques de la voyelle /u/ (caractérisés par formants F1 et F2 bas) se trouvent renforcés en frontière de constituants prosodiques. Ces résultats montrent que les traits acoustiques et articulatoires contrastifs de la voyelle /u/ sont renforcés en position forte. Cette stratégie de renforcement du contraste paradigmatique s'associe néanmoins à un abaissement plus important de la mâchoire, ce qui montre qu'il existe à la fois une augmentation de sonorité et un renforcement de certaines des caractéristiques distinctives des voyelles.

- **En position initiale de constituants prosodiques :**

La plupart des études qui se sont intéressées à l'effet de la frontière de constituants prosodique en position initiale ont observé les voyelles en position #CV. La voyelle ne se trouve donc pas directement précédée de la frontière prosodique. Nous allons voir que les résultats sont moins robustes quand la voyelle se trouve en position #CV plutôt qu'en position #VC.

Toujours dans la même étude, Cho (2005) observe la réalisation des voyelles /a/ et /i/ en position initiale (#CV) de différents constituants prosodiques (Intonational Phrase, intermediate phrase et Word). L'aperture aux lèvres est plus importante pour les deux voyelles mais dans une moindre mesure comparée aux résultats observés en position finale. L'articulation linguale de la voyelle /i/ est plus haute et la position de la mâchoire est plus haute pour la voyelle /i/. L'articulation linguale de la voyelle /a/ est plus postérieure mais l'effet est moins robuste que celui observé en position finale. Ces résultats se confirment dans l'étude de Kim & Cho (2011, 2012). Ils comparent la réalisation de la voyelle /æ/ dans des séquences du type #CV où la voyelle n'est pas strictement initiale (« had » et « pad ») à la réalisation de cette même voyelle dans un séquence de type #VC où la voyelle est strictement initiale dans le constituant et est directement précédée par la frontière prosodique (« add »). L'articulation linguale de la voyelle en position strictement initiale dans un constituant prosodique élevé est plus antérieure, alors qu'aucun résultat n'est trouvé en position #CV. « the vowel in « add » tended to get fronted in a domain-initial position, but the same tendency was not observed in « had » and « pad », suggesting the possibility that initial strengthening effect is conditioned by 'phonological' distance from the boundary edge. »<sup>9</sup>. Ces résultats viennent confirmer des résultats antérieurs montrant que le renforcement initial est un phénomène local (Bombien et al. 2007 entre autres). Par exemple, pour le français dans la thèse de Fougeron (1998). Les résultats sur la voyelle /i/ placée en position strictement initiale (#V) montrent que pour F1, seule la position initiale de groupe intonatif se différencie des autres positions par un F1 légèrement plus bas, ceci pour les deux locuteurs. L'auteure montre que dans une syllabe CV, le second élément (V) n'est pas modifié de façon régulière par la position prosodique. Et quand il y a une variation sur le second élément, celle-ci n'est pas observée sur tous les constituants étudiés. Compte tenu de ce résultat, il semble déterminant pour étudier l'effet de la frontière de placer la voyelle en position strictement initiale. Or, peu d'études se sont intéressées à cette position. A notre connaissance, seules trois études en anglais et deux études en français ont observées l'effet de la frontière sur des voyelles en position strictement initiale. Ceci peut expliquer en partie pourquoi l'effet de la position prosodique est un phénomène mal connu et mal défini pour les voyelles. L'intérêt de notre étude est donc de répondre à cette problématique

Nous allons à présent présenter les résultats de ces trois études sur l'anglais et de ces deux études sur le français. Pour les études sur l'anglais, si la première étude (Lehnert, Lehouillier, McDonough &

---

<sup>9</sup> « la voyelle dans le mot « add » tend à être plus antérieure en position initiale de constituant prosodique, mais le même résultat n'est pas trouvé pour les mots « had » et « pad » suggérant ainsi la possibilité que le renforcement initial soit conditionné par une distance 'phonologique' avec la frontière prosodique » Traduction personnelle.

McAleavey, 2010) donne peu d'informations sur les variations de la langue et aucune sur l'abaissement de la mâchoire qui pourraient contribuer à augmenter la sonorité des voyelles, les études de Kim & Cho (2011, 2012) présentent des variations en position (strictement) initiale qui peuvent contribuer à augmenter conjointement les contrastes paradigmatique et syntagmatique.

Lehnert-Lehouillier, McDonough and McAleavey, (2010) observent pour 8 locuteurs, les différences de contour de langue des voyelles /ɛ/ et /ɔ/ en anglais, entre les positions initiales de IP, AP et W. Les résultats montrent qu'entre les deux positions les plus extrêmes (IP et W) les contours de langue sont plus distincts l'un de l'autre entre ces deux positions. Cependant, aucune précision n'est donnée sur la direction de ces différences (variations sur la position horizontale ou verticale de la langue), ne nous permettant pas de conclure à un renforcement de la sonorité ou au renforcement d'autres caractéristiques distinctives. Les études de Kim & Cho (2011 et 2012) étudient les voyelles /i, ɪ, æ/ en position strictement initiale #V de Groupe Intonatif (position Intonational Phrase, IPi) comparée à une position médiane de Groupe Intonatif (Intonational-Phrase medial, IPm), et sont plus riches d'informations sur le sens des variations. Les résultats montrent qu'en position IPi, il y a un renforcement des traits distinctifs qui s'observe principalement sur l'axe [±haut] de la langue. En effet, ils observent en position IPi (vs IPm) une position de la langue plus haute pour les deux voyelles hautes /i, ɪ/ et une position de la langue plus basse pour la voyelle basse /æ/, ce qui peut être interprété comme un renforcement du contraste paradigmatique entre les voyelles. De plus, ils observent également un abaissement de la mâchoire et de l'aperture aux lèvres pour les trois voyelles /i, ɪ, æ/ ce qui a pour conséquence d'augmenter la sonorité des voyelles et de renforcer du contraste syntagmatique.

Pour les deux études sur le français, nous allons voir que les résultats ne nous permettent pas de valider l'une ou l'autre des hypothèses d'expansion de sonorité ou d'hyperarticulation localisée.

La première étude est celle de Fougeron (1998). Fougeron (1998) a étudié l'articulation linguale de la voyelle /i/ (avec l'EPG, pour deux locuteurs) et l'articulation nasale de la voyelle /ã/ (d'après les variations du flux d'air nasal, pour quatre locuteurs) en position initiale de trois constituants IP (groupe intonatif), AP (groupe accentuel) et W (voyelle initiale du deuxième mot d'un mot-composé) en français. Cette étude montre que pour les deux voyelles /i/ et /ã/ en français, le renforcement prosodique influence la réalisation de la voyelle en termes spectraux et en termes articulatoires (articulation de la langue pour /i/ et débit d'air nasal pour /ã/). Les résultats sont les suivants :

- Le contact linguo-palatal de la voyelle /i/ est plus fort après une position prosodique forte (IP et AP) qu'en position W. L'augmentation du contact linguo-palatal ne s'associe pas à une diminution de F1 et peut être interprétée comme un mouvement d'antériorisation qui serait observable à partir des variations de F2. Sur les deux locuteurs testés, l'un présente une augmentation de F2 alors que l'autre ne présente aucun effet. L'auteure conclue que « l'effet de la position prosodique sur une voyelle fermée ne se traduit pas par une augmentation d'aperture » (Fougeron, 1998, p194), sans pour toutefois tester l'influence de constituants prosodiques sur l'ouverture au niveau des lèvres ou de la mâchoire. Les résultats acoustiques montrent également une augmentation des valeurs F3



d'autant plus forte que la hiérarchie prosodique est haute (IP>AP>W) (pour deux locuteurs), que l'auteure interprète comme le reflet d'une réduction de coarticulation avec la consonne occlusive adjacente (/p/). Nous pouvons également interpréter ces variations sur le formant F3 comme un renforcement des caractéristiques phonétiques propres à la voyelle /i/.

- Le flux d'air nasal pour la voyelle /ã/ est moins élevé après IP, AP vs W pour deux locuteurs sur quatre. Ces variations de débit nasal sont interprétées comme la conséquence indirecte d'une modification de l'ouverture vélopharyngée et du degré d'élévation du velum. « Un velum plus élevé réduit la taille de l'orifice vélopharyngé et donc diminue la quantité d'air s'écoulant par le nez. Un velum plus bas augmente au contraire l'aperture de cet orifice ce qui se traduit par un débit nasal plus important » (Fougeron, 1998, p195). Par conséquent, la diminution du débit d'air nasal, observée en position IP peut s'interpréter comme une élévation du velum, mouvement articulaire caractéristique des voyelles nasales, mais peut également s'interpréter comme une diminution de la sonorité de la voyelle, résultat qui va à l'encontre de l'augmentation de sonorité.

En français, également, on relève l'étude de Gendrot et Gerdes (2009) qui traite de l'influence de la hiérarchie prosodique sur la réalisation spectrale des voyelles orales du français. Cette étude a été menée sur des données exclusivement acoustiques issues d'un corpus radiophonique (30h, un total de 500 000 segments, extraits du système d'alignement IRISA). Cette étude est particulièrement intéressante, car elle s'appuie sur un corpus de parole qualifiée de parole « naturelle » à laquelle on oppose souvent la parole contrôlée et lue de laboratoire (celle étudiée dans ce travail). L'objectif de l'étude étant de rendre compte de l'effet de la hiérarchie prosodique sur la taille de l'espace vocalique (F1/F2), cette étude ne précise pas les variations acoustiques voyelle par voyelle en termes de formants et le plus souvent les différences significatives entre les valeurs de formants ne sont pas précisées. Cependant, les résultats montrent qu'en position initiale de Groupe Intonatif, la réalisation des voyelles orales sur un plan F1/F2 s'inscrit dans un espace vocalique plus large comparé aux autres positions étudiées (position interne de mot, positions initiales de mot et de Groupe Accentuel). Ceux sont principalement les voyelles /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /u/, /o/, /ɔ/ qui provoquent cet élargissement de l'espace vocalique. Comme l'avait trouvé Fougeron (1998), la voyelle /i/ dans le corpus radiophonique est également caractérisée par des valeurs de F3 plus élevée en position initiale de Groupe Intonatif, auxquelles s'associe une diminution des valeurs du formant F4. Par conséquent, la distance entre les formants F3 et F4 diminue. En français, la voyelle /i/ est considérée comme une voyelle focale, elle est donc caractérisée par un rapprochement de deux formants : F3 et F4. C'est donc ce caractère focal qui est renforcé en début de Groupe Intonatif. De même, pour la voyelle /y/, dont la focalité est définie par un rapprochement de F2 et F3, on observe un renforcement du caractère focal en début de Groupe Intonatif : on observe une diminution des valeurs de F3, qui se rapprochent de F2. Les auteurs interprètent ces variations comme un renforcement des propriétés focales des voyelles « These F3 and F4 movements allow /i/ and /y/ to be more focal by bringing together F3/F4 and F2/F3 respectively (Schwartz et al.

1997)»<sup>10</sup> (Gendrot et Gerdes, 2009, p198). Si ces caractéristiques acoustiques peuvent être interprétés comme un renforcement des propriétés acoustiques des voyelles, l'absence de données articulatoires (mâchoire ou lèvres) et des valeurs de F1 ne nous permet pas d'éliminer l'hypothèse d'expansion de sonorité. D'autant plus que les mesures indirectes de la sonorité, portées par la durée, tendent à montrer une augmentation de sonorité. En effet, on observe un allongement de la durée pour les voyelles /e/, /ɛ/, /a/, /u/, /o/, /ɔ/ (mais pas pour /i/). Les auteurs postulent des « compensations between spectral and prosodic variations used to by speakers in order to signal boundaries. »<sup>11</sup> (Gendrot et Gerdes, p203).

Les études récentes qui se sont intéressées à l'effet du renforcement prosodique sur les consonnes ont montré l'importance d'observer le renforcement initial en termes de contrastes entre les segments (Cho & McQueen, 2005 ; Cole et al. 2007 ; Kuzla & Enestus, 2011). Sur les voyelles, excepté pour l'étude de Gendrot et Gerdes (2009) qui s'est intéressée aux dix voyelles orales du français, les études se sont le plus souvent intéressées à un nombre réduit d'éléments contrastifs (Kim et Cho, 2011, 2012). Or, il semble difficile de pouvoir tester les conséquences d'un renforcement initial sur les contrastes paradigmatiques sans considérer plusieurs éléments contrastifs d'un système et donc plusieurs dimensions de contrastes. C'est ce que nous proposons de faire dans cette thèse. Nous allons observer l'effet du renforcement initial sur un système vocalique quasi-complet (les voyelles orales du français) dont les segments s'opposent selon quatre contrastes : [±arrondi], [±arrière], [±haut] et [±bas].

Si le renforcement affecte les traits distinctifs des voyelles orales du français, et donc leur implémentation phonétique, il est nécessaire de décrire ce système. Pour cela, le second chapitre de cette thèse s'intéressera donc à la présentation du système vocalique du français et aux caractéristiques acoustiques et articulatoires (notamment les informations portées par les lèvres) des voyelles orales du français.

---

<sup>10</sup> « Ces variations sur les formants F3 et F4 permettent aux voyelles /i/ et /y/ d'être plus focales en rapprochant respectivement les formants F3/F4 et F3/F2. »

<sup>11</sup> « Compensation entre les variations spectrales et prosodique utilisée par les locuteurs dans le but de signaler les frontières. »  
Traduction personnelle.

## 2. CARACTERISTIQUES DES VOYELLES ORALES DU FRANÇAIS

Dans ce deuxième chapitre, nous verrons en quoi le système vocalique du français est particulièrement intéressant à observer pour répondre à notre problématique : il constitue en effet un système dense dont les voyelles s'organisent selon plusieurs contrastes : nasalité, antériorité-postériorité, arrondissement et aperture (2.1). Excepté pour le contraste de nasalité qui n'est pas étudié dans cette thèse, nous traiterons de l'implémentation acoustique (2.2) et de l'implémentation articuloire (lèvres) de ces contrastes (2.3). Dans la première partie de cette introduction, nous avons formulé diverses hypothèses concernant les modifications articuloires pouvant intervenir au niveau des lèvres et de la mâchoire, induites par l'accent (en anglais, accent lexical ou accent nucléaire ; en français : accent lexical et accent contrastif) ou aux frontières prosodiques (finale et initiale), à savoir : augmentation ou diminution des trois paramètres , celui d'étirement, d'aperture et de protrusion des lèvres et abaissement de la mâchoire. Le sens du changement (augmentation ou diminution) des valeurs des formants induit par ces modifications articuloires sur les voyelles orales a été estimé à partir du modèle articuloire de Maeda (2.4). Un récapitulatif des questions abordées dans ce travail est présenté dans le chapitre 2.5.



## 2.1 Le système vocalique du français : un système dense

Le système vocalique du français est structuré selon:

- **Un contraste de nasalité** qui permet de distinguer des voyelles nasales et des voyelles orales. La nasalité est corrélée sur le plan articulaire à la position du voile du palais (abaissée pour les voyelles nasales / relevée pour les voyelles orales).
- **Un contraste d'aperture** composé de quatre degrés: fermées, mi-fermées, mi-ouvertes et ouvertes. Le degré d'aperture sur le plan articulaire serait corrélé à la distance entre le point le plus élevé de la langue et le palais (Ladefoged, 1993) ainsi qu'à l'abaissement croissant de la mâchoire.
- **Un contraste d'arrondissement** permettant de distinguer les voyelles arrondies des non-arrondies, d'après la configuration des lèvres. (Ladefoged, 1993)
- **Un contraste de lieu** qui concerne la position de la langue sur un axe horizontal. Sont considérées comme antérieures les voyelles dont le point le plus haut de la langue se trouve en avant de la cavité buccale. Sont considérées comme postérieures (ou arrières) les voyelles dont le point le plus haut de la langue se situe en arrière de la cavité buccale.

L'organisation des voyelles du français suivant ces quatre contrastes est présentée dans le Tableau 1:

		antérieure		arrière	
		non-arrondie	arrondie	non-arrondie	arrondie
voyelles orales	fermée	i	y		u
	mi-fermée	e	ø		o
	mi-ouverte	ɛ	œ		ɔ
	ouverte	a		ɑ	
voyelles nasales		ɛ̃	œ̃	ɑ̃	ɔ̃

**Tableau 1: système vocalique du français classé selon les contrastes de nasalité, d'aperture, de lieu d'articulation (antériorité/postériorité) et d'arrondissement (note : tendance à une neutralisation entre les voyelles /ɛ̃/ - /œ̃/ et /ɑ̃/ - /ɔ̃/).**

A ces voyelles, on peut également ajouter le schwa /ə/ dont le statut phonologique est toujours en discussion (voir Dell (1985) entre autres). Cette voyelle centrale se réalise uniquement en syllabe inaccentuée (c'est-à-dire non finale) et elle est susceptible de disparaître.

Les voyelles mi-fermées et mi-ouvertes (/e/ vs /ɛ/, /o/ vs /ɔ/ et /ø/ vs /œ/) sont séparées ici selon leur degré d'aperture. Brandao de Carvalho, Nguyen & Wauquier (2010) proposent de distinguer les voyelles mi-fermées et mi-ouvertes du français (/e/ vs /ɛ/, /o/ vs /ɔ/ et /ø/ vs /œ/) selon des différences de tension : /e, o, ø/ étant considérées comme « tendues » et /ɛ, ɔ, œ/ étant considérées comme « lâches ». Cependant, les auteurs soulignent qu'« il n'est pas facile d'établir fermement le statut phonologique des voyelles moyennes en français » (p108). En effet, aujourd'hui, le contraste entre une voyelle tendue et sa contrepartie relâchée tend à se neutraliser selon la structure syllabique (fermée ou ouverte).

Nous nous limiterons dans ce travail à l'étude de la réalisation des voyelles orales du français sans la voyelle postérieure /ɑ/ qui n'a pas été considérée. Le contraste entre la voyelle ouverte arrière non-arrondie /ɑ/ et la voyelle ouverte antérieure /a/ tend à se neutraliser de nos jours. Lauret (1998) montre en effet que l'opposition entre les /ɑ/ et /a/, se réaliserait chez les locuteurs par une différence de durée (/ɑ/ long et /a/ bref), mais uniquement dans des paires minimales de type /pat/ (pâte) et /pat/ (patte). Cependant, cette distinction ne fait pas partie de l'inventaire phonologique de nos locutrices.

Les voyelles étudiées, dans ce travail, sont les voyelles : /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/, et s'oppose les unes aux autres selon un contraste d'aperture, d'arrondissement et de lieu.

### • Description du système en termes de traits

Les différents contrastes (arrondissement, aperture et lieu) structurant l'inventaire vocalique peuvent être définis en termes de **traits distinctifs**. Les traits distinctifs sont appréhendés comme des catégories abstraites qui sont néanmoins fondées sur des bases phonétiques. Jakobson et ses collègues (Jakobson et al. 1952 et Jakobson & Halle, 1956) définissent les traits distinctifs sur une base acoustico-perceptive et Chomsky & Halle (1968) définissent les traits distinctifs sur une base articulaire. Ces traits sont généralement binaires (+/-) et permettent de distinguer deux éléments dont l'un possède une propriété que sa contrepartie n'a pas : par exemple, l'arrondissement entre les deux phonèmes /i/ et /y/. Seront considérés ici comme distinctifs : « les traits communs à un certain nombre de sons en distribution complémentaire » et « les traits nécessaires et suffisants pour opposer ces sons à tous les autres sons qui ont la même distribution et dont la substitution est susceptible de changer le sens des mots. » (p70, Brandao de Carvalho, Nguyen, Wauquier, 2010 : 70).

	/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ε/	/œ/	/ɔ/	/ɑ/
[±haut]	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
[±bas]	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
[±arrière]	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+
[±arrondi]	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-

**Tableau 2: Représentation de la classification binaire des voyelles orales du français extrait de Dell (1985)**

Pour le français, Dell (1985) utilise la représentation des traits introduite par Chomsky & Halle (1968). D'après Dell (1985), les voyelles orales du français vont être caractérisées par un ensemble de 4 traits phonologiques : [±haut], [±bas], [±arrière], [±arrondi]. C'est cette représentation des voyelles que nous allons utiliser dans cette thèse. Dans le Tableau 2, nous présentons les phonèmes vocaliques du français comme étant complètement spécifiés par une valeur « + » ou « - » pour chaque trait phonologique. On notera que Dell désigne la voyelle /ɑ/ comme [+arrière], alors qu'au niveau phonétique elle est plutôt caractérisée comme une voyelle antérieure. D'après ce tableau, on remarque que certaines valeurs de traits sont liées : par exemple, toute voyelle [+bas] est également [-haut], l'inverse n'étant pas vrai. Ceci montre qu'à partir de certaines valeurs de trait, on peut prédire une autre valeur de trait. De même, les voyelles

[+arrière] sont également [+arrondi]. On parle de trait redondant (Chomsky et Halle, 1968; Stériade 1987; Clements, 1988).

Nous allons à présent nous intéresser à l'implémentation phonétique de ces contrastes.

## 2.2 L'implémentation phonétique du système

Parmi ces voyelles, les voyelles /i/, /u/ et /a/ sont considérées comme les voyelles les plus extrêmes du système vocalique. Pour réaliser /i/, le point le plus haut de la langue est maximalelement proche du palais et les lèvres sont étirées. Pour réaliser /u/, la langue se rapproche du voile du palais et les lèvres sont arrondies et protruses. La réalisation de la voyelle /a/ s'effectue par un déplacement du point le plus haut de la langue vers le bas. Les voyelles françaises sont souvent considérées comme proches des voyelles dites « cardinales primaires » et « cardinales secondaires » et constituent souvent des voyelles de « référence » (Jones, 1918). Les voyelles /i, e, ε, a, α, ɔ, o, u/, constituent les voyelles cardinales primaires (numérotés de 1 à 8). Les voyelles /y, ø, œ/ sont caractérisées comme des voyelles cardinales secondaires, et sont numérotés de 9 à 11, qui sont des repères pour la transcription des langues du monde (Jones, 1918). Ces voyelles cardinales, si elles sont redéfinies par des critères acoustico-perceptifs plutôt que articulatoires, constituent des voyelles « modèles » pour une description phonétique des voyelles d'une langue donnée (Vaissière, 2009). Il a été montré que les voyelles peuvent être organisées « de Haut vers Bas en suivant l'axe F1 et d'Arrière vers l'Avant en suivant l'axe F2. Par conséquent, l'axe F1 correspond à la dimension [haut/bas] et F2 à la dimension [antérieure/postérieure] » (entre autres : Ladefoged (1993), Maeda & Carré, 1996). C'est cette représentation qui est choisie par Cho dans son étude de 2005. Cependant, cette représentation F1/F2 ne tient pas compte de la dimension [arrondi/non-arrondi], une représentation F2/F3 est donc nécessaire pour le système vocalique du français.

- **[±haut] : [i-e], [y-ø], [u-o] [±bas] : [e-ε], [ø-œ], [o-ɔ]**

Il est admis que plus une voyelle est haute, plus la mâchoire est haute (Lindblom and Sundberg, 1971), plus la racine de la langue est maximalelement proche du palais (Lindau 1975, 1978 ; Jackson 1988), plus les lèvres sont protruses pour les voyelles postérieures, plus les lèvres sont respectivement arrondies ou étirées pour les voyelles antérieures arrondies ou non arrondies (Linker 1982).

Plus la voyelle est basse, plus le F1 augmente : « The perceptual dimension of height is often described as correlating with the frequency of F1, such that perceived vowel height lowers as F1 frequency increases »<sup>12</sup> (Peterson & Barnez, 1952 ; Fant 1960 ; Lindau, 1978). Les travaux de Jones (1918), puis ceux de Ladefoged (1980), Disner (1983) et Kingston (1991) montrent que les traits distinctifs [±haut] et [±bas] font le plus souvent référence à la hauteur du point le plus haut de la langue et du palais, mais peuvent également être corrélés à une notion perceptive de « hauteur » de la voyelle liée à des variations essentiellement portées par le F1. Kingston (1991) désigne le corrélât comme le « perceived F1 ». Ce F1

---

<sup>12</sup> « la dimension perceptive de la hauteur est souvent décrite comme un corrélât associé aux variations de F1, de telle manière qu'une voyelle basse sera perçue avec une fréquence F1 élevée. »

perçu correspond aux énergies dans les basses fréquences du spectre (notamment la première résonance). Vaissière (2011) montre en effet que « F1 is influenced by the position of the constriction, by the size of the constriction and lip configuration »<sup>13</sup> (Vaissière, 2011). Le formant F1 décrit la qualité acoustique des voyelles plus que la hauteur de la langue elle-même (comme considéré par Jones, 1918). Par exemple, toutes choses égales par ailleurs, une constriction en avant de la cavité buccale entraîne une diminution du F1 et une constriction en arrière de la cavité buccale entraîne une augmentation du F1 (Fant, 1960). De même, une constriction plus étroite en avant de la cavité buccale entraîne une diminution de F1, une constriction plus étroite en arrière de la cavité buccale entraîne une augmentation de F1 (Fant, 1960, Vaissière 2011). Les lèvres, en particulier, qui ne sont pas dépendantes de la position de la langue, influencent tous les formants et en particulier les formants dus essentiellement à la cavité antérieure.

Par conséquent, les variations de F1 ne rendent pas directement compte de la hauteur de la langue dans la cavité orale, mais constituent un bon paramètre acoustique pour rendre compte de la qualité de la voyelle et du contraste phonologique [±haut] et [±bas].

- [±arrière] : [i-u], [e-o], [ɛ-ɔ] et [y-u], [ø-o], [œ-ɔ]

Comme l'a montré Fant (1960), la constriction de la langue sur l'axe du corps de la langue est corrélée à la fréquence du formant F2, « such that a backed position leads to a maximally low F2 and a front position to a maximally high F2 »<sup>14</sup> (Beddor, 91). Le formant F2 est influencé par « place of articulation, the degree of constriction, and for the velar and laryngeal vowels, lip configuration »<sup>15</sup> (Vaissière, 2011). Dans le cas des voyelles [-arrière], quand le corps de la langue est haut et en avant, le premier formant diminue, le second formant augmente, la distance entre les deux premiers formants augmente, F2 se rapproche du formant F3 et la distance entre F2 et F3 diminue. Cette augmentation du second formant est un corrélât acoustique du trait [-arrière]. (Stevens, 1997 ; Keyser & Stevens, 2006). Deux gestes permettent de renforcer les voyelles [-arrière] et [+haute], en augmentant les formants F2 et F3 : en élevant la lame de la langue créant ainsi une constriction longue et étroite avec le palais dur et en étirant les lèvres provoquant un raccourcissement de la cavité antérieure. (Keyser et Stevens, 2006). Pour la voyelle /u/, les formants F1 et F2 sont clairement associées à deux résonances de Helmholtz : la forte constriction centrale de la langue et l'arrondissement des lèvres créent des formants F1 et F2 dont les fréquences se réalisent sous les 1000 Hz. Pour les autres voyelles [+arrière], la postériorisation de la constriction de la langue s'accompagne d'un geste compensatoire de délabialisation permettant de maintenir le rapprochement entre les deux formants F1 et F2 (Vaissière, 2011). Les voyelles françaises /u/, /o/, /ɔ/ sont considérées comme des voyelles focales, car quand elles sont prononcées en hyperarticulé : « the concentration of spectral energy in the low frequencies is created by the grouping of F1 and F2 »<sup>16</sup> (Vaissière, 2008).

<sup>13</sup> « Le formant F1 est influencé par la position de la constriction, la taille de la constriction et la configuration des lèvres. »

<sup>14</sup> « Une position de la langue en arrière entraîne des valeurs de F2 maximale basse et une position de la langue en avant entraîne des valeurs de F2 maximale haute. »

<sup>15</sup> « Le lieu de l'articulation, le degré de constriction et pour les voyelles vélaire et laryngées, à la configuration des lèvres »

<sup>16</sup> « La concentration de l'énergie spectrale dans les fréquences basses est créée par un regroupement des formants F1 et F2. »



Par conséquent, les variations de F2 et F2-F1 constituent de bons paramètres acoustiques pour rendre compte du contraste phonologique [±arrière].

- [±arrondi] : [i-y], [e-ø], [ɛ-ɔ]

Dans le cas des voyelles antérieures, le trait [±arrondi] est distinctif, il permet de distinguer les paires de voyelles antérieures entre elles : [i-y], [e-ø], [ɛ-ɔ]. L'arrondissement provoque un abaissement de tous les formants. Plus précisément, l'allongement de la cavité antérieure dû à l'arrondissement fait varier principalement les formants dûs à la cavité antérieure, principalement F2 et/ou le F3, selon les voyelles. Le formant F3 représente un indice permettant de rendre compte du contraste d'arrondissement pour la distinction des voyelles /i/ et /y/. Le formant F3 est maximalelement haut dans la réalisation de la voyelle /i/, et donc proche de F4, la constriction se situe dans la région prépalatale, et les lèvres sont étirées : le F3 est affilié à la cavité antérieure, la plus courte des deux cavités et le F2 à la cavité postérieure, la plus longue des deux cavités (Vaissière, 2011). Les voyelles /i/ et /y/ sont considérées comme des voyelles focales (Vallée, 1994 ; Schwartz et al., 1997). Pour la voyelle /i/, « there is a concentration of spectral energy in the high frequencies ; around 3000 Hz, by grouping F3 and F4 for /i/ »<sup>17</sup> (Vaissière, 2008) Pour la voyelle /y/, « around 1900 Hz, by grouping F2 and F3 (and F3 becomes a resonance of the back cavity) ». Pour les autres voyelles antérieures plus ouvertes, le formant F2 est également associé à la cavité antérieure, l'arrondissement des lèvres va donc provoquer un abaissement des formants supérieurs (et de F1).

Dans le cas des voyelles postérieures spécifiées par le trait [+arrière], l'arrondissement est considéré comme redondant dans le sens de Stevens et al. (1986), dans les langues où il ne joue pas de rôle distinctif, comme en anglais ou en français. D'après la théorie du renforcement « enhancement theory » (Stevens et al. 1986, Stevens & Keyser, 1989), ce trait redondant permettrait de renforcer les oppositions auditivement faibles. D'après Stevens et Keyser, 2010 « additional acoustic and articulatory attributes may be added in certain contexts to enhance the perceptual saliency of the defining acoustic attribute »<sup>18</sup>. L'arrondissement des voyelles postérieures provoque un abaissement du formant F2. Cet abaissement introduit un renforcement dans la distinction acoustique entre les voyelles antérieures et postérieures en augmentant la distance entre les deux premiers formants.

Par conséquent, les variations de F2 et F3 constituent de bons paramètres acoustiques pour rendre compte du contraste phonologique [±arrondi].

---

<sup>17</sup> « il existe une concentration de l'énergie spectrale dans les hautes fréquences : autour de 3000 Hz, par un rapprochement de F3 et F4 pour /i/. »

<sup>18</sup> « des caractéristiques acoustiques et articulatoires supplémentaires peuvent être ajoutés dans certains contextes afin d'augmenter la salience perceptive d'une caractéristique acoustique défini. »

## 2.3 L'implémentation articulatoire du système : au niveau de l'articulation labiale et de la mâchoire

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux variations articulatoires de deux articulateurs : la mâchoire et les lèvres. Sur le paramètre de la mâchoire, il existe un parallélisme entre les catégories fermées, mi-fermées, mi-ouvertes et ouvertes. Mais Ladefoged et al. (1972) montrent que la mâchoire n'est pas utilisée comme mécanisme primaire de distinction de la hauteur vocalique. Par contre, le paramètre labial se présente comme un paramètre contrastif pour les voyelles [ $\pm$ arrondi]. Il constitue également un corrélat secondaire pour les autres contrastes. Nous avons donc cherché à dégager les corrélats labiaux les plus représentatifs pour rendre compte de la distinction [ $\pm$ arrondi] et pour les autres contrastes.

Avant de définir pour chaque contraste phonologique l'implémentation articulatoire des lèvres, nous devons définir quels sont les paramètres de géométrie labiale, utilisés dans la littérature.

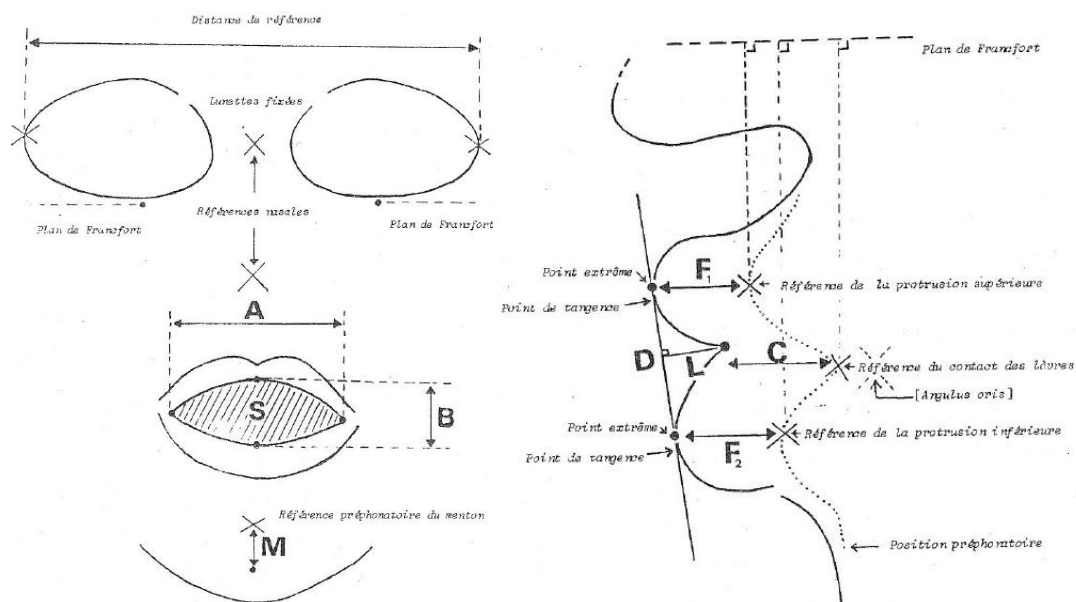


Figure 8 : Schéma descriptif des paramètres pris en compte dans l'étude de la labialité d'après Fromkin (1964) et Abry et Boë (1980). Voir le texte pour la définition des termes. D'après Abry et Boë (1980)

Les études pionnières sur la configuration des lèvres ont été entreprises par Fromkin (1964), Fujimura (1961) ou encore Lindblom (1965, 1968) sur les voyelles de l'anglais américain ou du suédois. Ces études montrent que seuls 3 paramètres peuvent suffire à rendre compte des différences labiales entre les voyelles : les paramètres

- de **distance horizontale**,
- de **distance verticale**
- et de **protrusion** des lèvres.

Ces 3 paramètres correspondent aux 3 degrés de liberté physiologique des lèvres proposés par Ladefoged (1979, 45) : « There are probably (for the lips) only three degrees of freedom involved : the

distance between the upper and lower lips (lip height) ; the distance between the corners of the lips (lip width) ; and the degree of lip protrusion »<sup>19</sup>. Fromkin (1964, 225) propose même une possibilité de simplification en prédisant la protrusion à partir de distance horizontale (tout en sachant que cette prédiction est relativement mauvaise pour les voyelles protruses).

On distingue les mesures prises sur le plan coronal (face aux locuteurs, schéma de gauche sur la Figure 8, extraites de « labialité et phonétique ») et celles prises sur le plan sagittal (schéma de droite sur Figure 8).

Sur le plan coronal, on peut mesurer les deux premiers paramètres :

- étirement (A sur le schéma)
- aperture (B sur le schéma)

auxquelles peuvent être ajoutées les mesures combinées suivantes :

- l'aire aux lèvres (S sur le schéma)
- Le facteur de forme K2 (étirement / aperture)

Sur le plan sagittal, on peut mesurer, le dernier paramètre de la labialité : la protrusion. Trois mesures sont relevées (Abry & Boe, 1986):

- Protrusion - rétraction supérieure (F1 sur la Figure 8)
- Protrusion - rétraction inférieure (F2 sur la Figure 8)
- Protrusion - rétraction de la commissure (C sur la Figure 8)

Certains de ces paramètres ont été utilisés pour rendre compte des distinctions phonologiques entre les voyelles, comme nous allons le détailler.

- **[±arrondi]**

Parmi ces différents paramètres, plusieurs sont à même de rendre compte du contraste [±arrondi].

Etirement : Une définition globale du contraste [±arrondi] a été donnée en 1975 par Ladefoged (ré-édition 1993, 266) « the physical measure corresponding to this feature is the distance between the corners of the lips »<sup>20</sup>. D'après cette définition, la distance horizontale semble être la plus à même de rendre compte de la distinction entre voyelles arrondies et non arrondies.

Etirement et aperture : Les travaux sur la labialité en français de Abry et Boe. (1980) montrent en effet que le paramètre le plus à même pour différencier les voyelles antérieures de même aperture mais opposées par l'arrondissement : /i/ vs /y/ et /e/ vs /ø/ est l'étirement, mais ils montrent aussi que l'aperture est discriminante entre ces paires. La distinction phonologique [+/- arrondi] s'observe par des valeurs plus élevées sur l'étirement et des valeurs plus élevées de l'aperture pour les voyelles non-arrondies.

Protrusion : En anglais, Abercrombie (1967, 57) montre également que la protrusion joue un rôle important dans la distinction phonologique [±arrondi] « rounded, when the corners of the lips are brought

---

<sup>19</sup> « Il existe probablement (pour les lèvres) seulement trois degrés de liberté impliqués : la distance entre les lèvres supérieure et inférieure (hauteur des lèvres) ; la distance entre les commissures des lèvres (largeur des lèvres) et le degré de protrusion. »

<sup>20</sup> « la mesure physique correspondant à ce trait est la distance entre les commissures des lèvres. »

forward ; unrounded (or spread) when the corners of the lips are pulled back »<sup>21</sup>. En français, dans l'étude sur « à la recherche des corrélats géométriques discriminants l'opposition d'arrondissement vocalique en français », (1980), Abry et Boë, ont voulu tester cette avancée des lèvres vers l'avant en considérant la protrusion des lèvres supérieure (nommé F1, voir image 3) et inférieure (nommé F2, voir image 3) sur les voyelles /i-e/ vs /y-ø/. Leurs résultats montrent que ces deux paramètres se révèlent inefficaces pour mettre en lumière l'opposition phonologique [-arrondi] / [+arrondi]. Dans leurs résultats, seule C, mesure de protrusion prise au niveau des commissures permet de séparer les voyelles (+/- arrondi) d'un locuteur sur 5. Ce résultat met en lumière deux points importants : la variabilité entre les locuteurs, la mesure de protrusion au niveau des commissures (C) comme mesure la plus à même de rendre compte de la protrusion-rétraction des lèvres et permettant de distinguer les voyelles [±arrondi] (du moins les paires /i-y/, et /e-ø/).

Étirement et protrusion : En français, les paramètres combinés comme l'étirement / aperture (Zerling, 1990) et protrusion / aire (Fant, 1960 ; Abry & Boe, 1980 ; Abry & Boe, 1986) sont également deux mesures permettant de distinguer les voyelles [±arrondi].

Étirement et aperture : En français, le rapport étirement / aperture (facteur K2) est une mesure qui rend compte du caractère plus ou moins arrondi de l'orifice labial, indépendamment de sa taille globale. La valeur du facteur K2 (étirement / aperture) est élevée pour les voyelles /i/ et /e/ (d'après Zerling, 1990): les lèvres sont étirées, l'aperture est faible. A l'inverse, le facteur K2 aura des valeurs faibles, lorsque la configuration labiale est arrondie, comme pour les voyelles /y/ et /o/ (d'après Zerling, 1990). Il a également été montré que les formes les plus variables sont celles des voyelles [ɔ] et [œ] (Zerling, 1990).

Aire et protrusion : En français, enfin, le rapport aire / protrusion permet de combiner directement les trois paramètres d'étirement, d'aperture et de protrusion. D'après Abry & Boe (1980), ce paramètre permet de parfaitement séparer les voyelles arrondies des non-arrondies (/i-y/ et /e-ø) pour les cinq locuteurs de l'étude.

Si la représentation phonologique ne recense que deux degrés de labialité, des études montrent que les voyelles arrondies du français s'organisent selon plusieurs degrés de labialité.

- **Plusieurs degrés de labialité**

Zerling (1990, 1993) a étudié l'ensemble des voyelles du français prononcées à l'isolée et de manière tenue. Il représente dans la Figure 9, présentée ci-dessous, la dispersion de 1171 réalisations des voyelles orales du français produites par 105 locuteurs (homme et femme). Les voyelles se regroupent selon trois catégories qu'il nomme : [-lab], [+lab] et [++lab], comme observé sur la Figure 9.

---

<sup>21</sup> « Arrondi, quand les commissures des lèvres sont projetés en avant ; non arrondi (ou étiré) quand les commissures des lèvres sont projetés en arrière. »

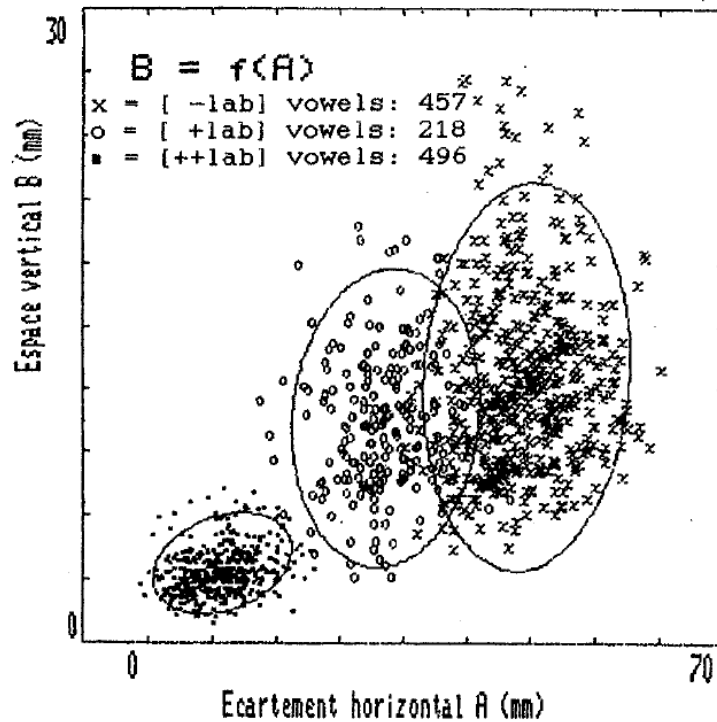


Figure 9 : Dispersion des voyelles du français [-lab], [+lab] et[++lab] suivant l'aperture (écartement vertical, mm) et l'étirement (écartement horizontal, mm), d'après Zerling, 1990.

Les voyelles arrondies phonétiquement et non-arrondies ne se divisent plus en deux groupes mais en trois groupes : les voyelles non-arrondies sont désignées comme [-lab] ([i, e, ε, a]), les voyelles arrondies se divisent en deux groupes, les voyelles [+lab] ([œ, ɔ]) et[++lab] ([y, ø, u, o]). « On constate que pour le français, les deux modes phonologiques (arrondi / non-arrondi) sont obtenus par deux types de labialisation, mais que ceux-ci se répartissent en trois degrés de labialisation du fait que les voyelles labialisées se scindent elles-mêmes en deux groupes », Zerling (1993, p73). »

Pour les voyelles [+lab] ([œ, ɔ]) :

- se distinguent des voyelles [-lab] ([i, e, ε, a]) par un étirement moins grand. La voyelle [ɔ] se distingue de [œ] par des mesures d'étirement et d'aperture plus élevées.

Pour les voyelles[++lab] ([y, ø, u, o]) :

- l'étirement et l'aperture sont plus faibles que pour les voyelles [+lab]. Les 4 voyelles [y], [ø], [u], [o] peuvent être décrites comme ayant le même degré de labialité. Zerling observe une légère augmentation de l'aperture et de l'étirement lorsqu'on passe de [y] à [ø] ou de [u] à [o]. Zerling observe également une différence d'aire (combinant l'aperture et l'étirement) très faible dans le sens suivant : [y] > [u], [o] > [ø].

Secondairement, les paramètres labiaux peuvent être utiles pour rendre compte d'autres contrastes, comme les contrastes [±haut], [±bas] et [±arrière].

- **[±haut] [±bas]**

D'après Zerling (1990), une augmentation de l'aire et de l'aperture permet de distinguer les voyelles [i] et [a]. Les réalisations des voyelles [i] et [e] se regroupent et sont caractérisées par un recouvrement des deux ellipses distinctes de celles de [ɛ] et [a]. Dans ces travaux, l'étirement n'est pas plus élevé, en contexte isolé, pour la voyelle [i] que pour la voyelle [a], alors que les récents travaux de Bonneau, Busset, et Wrobel-Dautcourt (2009) portant sur des données acquises via un appareil d'acquisition 3D, enregistrées également en contexte isolé, montrent que la distance entre les commissures est légèrement plus élevée pour la voyelle [i]. Pour les autres contrastes de hauteur, les auteurs (Descout, Boe & Abry) du chapitre « Labialité vocalique et consonantique en français » (1980) dont les mesures sont extraites de labio-films, montrent qu'aucun des paramètres étudiés (étirement et aperture) n'est à même de dissocier les voyelles très fermées /i, y/ des voyelles mi-fermées /e, ø/. Seul Zerling (1990), en contexte isolé, observe une distinction entre les voyelles [ø] - [œ] et [o] - [ɔ], sur les mesures d'aire, d'aperture et d'étirement (d'après Zerling, 1990). L'étude de Potard et Laprie (2005) portant sur des enregistrements cinéradiographiques ont montré que les voyelles arrondies [±haut] [±bas] pouvaient être classées selon 3 degrés de protrusion, comme montré sur la Figure 10, les voyelles [y] et [u] montrent une protrusion maximale (P4), suivie des voyelles [ø] et [o] (P3). Les voyelles les plus ouvertes [œ], [ɔ] montrent un degré de protrusion maximale bas pour les voyelles arrondies (P2). Les voyelles non-arrondies étant désignées par le degré P1. Ce lien entre la protrusion des lèvres et hauteur de la voyelle a également été décrit dans Abry & Boë (1986).

Vowel	D	O	S	P
i	D6	O1	S4	P1
e	D6	O2	S3	P1
ɛ	D6	O3	S2	P1
a	D7	O4	S1	P1
y	D6	O1	S1	P4
ø	D6	O2	S1	P3
œ	D6	O3	S1	P2
u	D8	O1	S1	P4
o	D8	O2	S1	P3
ɔ	D8	O3	S1	P2

**Figure 10 : Hiérarchie des voyelles orales du français selon les paramètres D : « position du dos de la langue » (D6 : antérieur à D8 : postérieur), O : « ouverture des lèvres » (O1 : fermé à O4 : ouvert) , S « étirement des lèvres » ( S1 : non-étiré à S4 : étiré) et P « protrusion des lèvres (P1 : non-protruses à P4 : protruses), d'après Potard & Laprie (2005).**

- **[±arrière]**

L'étude de Zerling montre que la comparaison par paires des voyelles arrondies [±arrière] [y, u], [ø, o], [œ, ɔ] révèle une cohérence articulatoire. En effet, les sujets ont tendance à produire un orifice labial de dimensions légèrement supérieures pour les voyelles postérieures, mais aucun des paramètres d'aire, de l'aperture et l'étirement ne permet de les distinguer entre elles. Une mesure maximale de protrusion est associée à une hauteur minimale de la mâchoire et un étirement peu élevé. On peut néanmoins noter que l'étude de Benguerel & Cowan (1974), portant sur l'activité électro-myographique de l'orbicularis oris, a

montré que l'activité de ce muscle est plus élevée pour [u] que pour [y]. Ce résultat suggère donc que la voyelle [u] est plus protruse que la voyelle [y].

## 2.4 Conséquences attendues sur les valeurs des formants et sur les paramètres articulatoires lors d'un renforcement des contrastes syntagmatique ou paradigmatique

Afin de prédire les variations acoustiques que peuvent provoquer différentes variations articulatoires sous l'effet du renforcement initial, nous avons utilisé le modèle de Maeda. Le modèle de Maeda se situe dans une approche descriptive du conduit vocal. Environ 1000 images cinéradiographiques et des données de labio-films du conduit vocal correspondant à 10 phrases en français répétés par deux locuteurs ont été extraits, projetés sur une grille semi-polaire et traités statistiquement (Maeda, 1978, 1979). Les résultats montrent que deux composantes suffisent à rendre compte de 90% de la variance des données de contours de langue. En utilisant, trois composantes principales, ce taux s'élève à 98%.

Sept paramètres se dégagent de ce modèle articulatoire (voir Figure 11):

- P1 : Position de la mâchoire (*jaw*)
- P2 : Position du corps de la langue (*tongue*)
- P3 : Forme du corps de la langue (*shape*)
- P4 : Position de l'apex de la langue (*apex*)
- P5 : Ouverture des lèvres (*lip\_ht*)
- P6 : Protrusion des lèvres (*lip\_pr*)
- P7 : Hauteur du larynx (*larynx*)

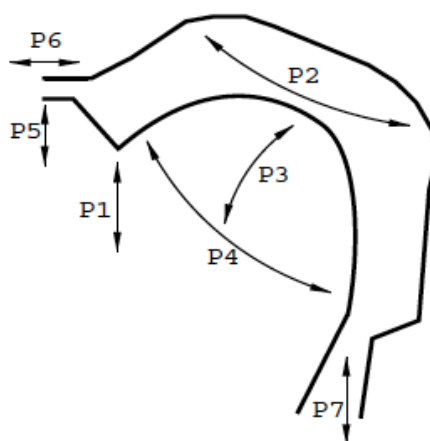


Figure 11 : Paramètres du modèle articulatoire de Maeda. Les flèches indiquent le sens de variation de chaque articulateur.

Il nous faut souligner que la relation articulation/acoustique n'est pas dite « bijective » dans le sens où il n'existe pas une correspondance parfaite entre une modification d'un paramètre articulatoire et une modification acoustique. Nous garderons donc à l'esprit que plusieurs fonctions d'aire sont capables de reproduire le même résultat acoustique. Par exemple : « Jaw and tongue dorsum positions compensate each other for palatal unrounded vowels ; lip aperture and the jaw for the back rounded series. (Maeda, 1990) »<sup>22</sup>.

#### 2.4.1 Renforcement du contraste syntagmatique : conséquences acoustiques sur les voyelles étudiées

La première hypothèse (H1) suit le postulat fait par Beckman et al. (1992), selon lequel en position prosodique forte (ici position initiale de frontière prosodique), il y aurait : une position de la mâchoire plus basse pour l'ensemble des voyelles (H 1.a) et une ouverture aux lèvres plus élevée pour l'ensemble des voyelles (H 1.b) en position initiale de constituants prosodiques élevés (ici IP, groupe intonatif). Ces modifications articulatoires ont un but celui de renforcer la sonorité de la voyelle.

- **Modélisation des conséquences acoustiques de l'abaissement de la mâchoire (H 1.a)**

Nous allons présenter la modélisation des conséquences acoustiques de l'abaissement de la mâchoire. Pour l'hypothèse H 1.a. qui postule une position de la mâchoire plus basse pour l'ensemble des voyelles en position IP, nous avons pris chaque voyelle proposée par le modèle de Maeda et nous avons modifié la position de la mâchoire (*jaw*, paramètre P1). Une valeur proche de -1 correspond à une mâchoire basse, une valeur proche de 1 correspond à une mâchoire haute. Dans ce modèle, le passage d'une voyelle fermée comme le /i/ ou le /y/ à sa contrepartie mi-fermée nécessite un abaissement de la mâchoire de 0,5. Pour cette raison nous avons modifié la position de la mâchoire de 0,5 pour chaque voyelle étudiée. La longueur du tube utilisée dans le modèle est de 17,5 cm. Si la longueur du tube diminue (pour les femmes par exemple), les fréquences résultantes sont plus élevées.

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
P1_initial	0,5	0	-1	-1,5	0,5	0	-1	0,5	-0,7	-0,4
modification	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
P1_modif	0	-0,5	-1,5	-2	0	-0,5	-1,5	0	-1,2	-0,9

**Tableau 3: Position du paramètre P1, correspondant à la mâchoire, proposée par le modèle de Maeda (P1\_initial) et position du paramètre P1 modifiée (P1\_modif) selon un abaissement de 0,5 pour chaque voyelle. (0,5= mâchoire haute, -1,5= mâchoire basse)**

<sup>22</sup> « Les positions de la mâchoire et du dos de la langue peuvent se compenser l'une avec l'autre pour les voyelles palatales non-arrondies ; les positions de l'ouverture et de la mâchoire pour les voyelles d'arrière arrondies. »



Les variations acoustiques sont les suivantes :

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
F1_initial	256	405	519	591	330	413	479	272	479	526
F1_modif	306	430	543	613	340	429	502	296	493	534
<b>F1_diff</b>	<b>+50</b>	<b>+25</b>	<b>+24</b>	<b>+22</b>	<b>+10</b>	<b>+16</b>	<b>+23</b>	<b>+24</b>	<b>+14</b>	<b>+8</b>
<b>F1_diff%</b>	<b>+19,5%</b>	<b>+6%</b>	<b>+4,5%</b>	<b>+4%</b>	<b>+3%</b>	<b>+4%</b>	<b>+5%</b>	<b>+9%</b>	<b>+3%</b>	<b>+1,5%</b>
F2_initial	2292	2002	1611	1534	1521	1487	1607	878	848	911
F2_modif	2260	1939	1564	1510	1479	1456	1567	884	838	894
<b>F2_diff</b>	<b>-32</b>	<b>-63</b>	<b>-47</b>	<b>-24</b>	<b>-42</b>	<b>-31</b>	<b>-40</b>	<b>+6</b>	<b>-10</b>	<b>-17</b>
<b>F2_diff%</b>	<b>-1,5%</b>	<b>-3%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1,5%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>-2,5%</b>	<b>+1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>
F3_initial	2927	2498	2412	2419	2337	2360	2422	2303	2097	2108
F3_modif	2724	2475	2046	2396	2336	2354	2414	2298	2085	2094
<b>F3_diff</b>	<b>-203</b>	<b>-23</b>	<b>-366</b>	<b>-23</b>	<b>-1</b>	<b>-6</b>	<b>-8</b>	<b>-5</b>	<b>-12</b>	<b>-14</b>
<b>F3_diff%</b>	<b>-7%</b>	<b>-1%</b>	<b>-15%</b>	<b>-1%</b>	<b>-0,5%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-0,3%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-0,6%</b>	<b>-0,7%</b>
F4_initial	3810									
F4_modif	3772									
<b>F4_diff</b>	<b>-38</b>									
<b>F4_diff%</b>	<b>-1%</b>									

**Tableau 4: Valeurs formantiques F1, F2, F3 (FX) pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX\_initial), relevées après abaissement de la mâchoire (FX\_modif). FX\_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif. FX\_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif en pourcentage %. (diminution en noir, augmentation en gris)**

En conclusion, un abaissement de la mâchoire entraîne une augmentation des valeurs de F1 pour les 10 voyelles, une diminution de F2 pour les 10 voyelles excepté /u/, une diminution de F3 pour les 10 voyelles, ainsi qu'une diminution de F4 pour /i/ (paramètre étudié uniquement pour /i/).

Pour les valeurs de F1, la plage de variation s'étale de +1,5% à +19,5%. Pour les valeurs de F2, la plage de variation s'étale de -1% à +1%. Pour les valeurs de F3, la plage de variation s'étale de -0,2% à -15%. Les variations sont donc plus larges pour le formant F1, l'abaissement de la mâchoire influence donc particulièrement les valeurs du formant F1.

- **Modélisation des conséquences acoustiques d'une augmentation de l'aperture aux lèvres (H 1.b)**

Nous allons présenter la modélisation des conséquences acoustiques d'une augmentation de l'aperture aux lèvres. Pour l'hypothèse H 1.b. qui postule un aperture aux lèvres plus élevée pour l'ensemble des voyelles en position IP, nous avons pris chaque voyelle proposée par le modèle de Maeda et nous avons modifié le paramètre P5 : ouverture aux lèvres (*lip\_ht*). Une valeur proche de -1 correspond à une aperture réduite et une valeur proche de 1 à une aperture large. Pour garder les mêmes proportions que celles utilisées

pour la mâchoire, le paramètre d'ouverture aux lèvres a été augmenté de 0,5 pour chaque voyelle, dans le modèle de Maeda.

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
P5_initial	1	1	1	0,5	-0,5	-0,2	0,2	-1	-0,6	-0,3
modification	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5
P5_modif	1,5	1,5	1,5	1	0	0,3	0,7	-0,5	-0,1	0,2

**Tableau 5: Position du paramètre P5, correspondant à l'ouverture aux lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P5\_initial) et position du paramètre P5 modifiée (P5\_modif) selon une augmentation de 0,5 pour chaque voyelle. (1= ouverture large, -1= apertures réduite).**

Les conséquences acoustiques sont les suivantes :

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
F1_initial	256	405	519	591	330	413	479	272	479	526
F1_modif	256	413	534	613	349	438	501	389	552	566
<b>F1_diff</b>	stable	+8	+15	+22	+19	+25	+23	+117	+73	+40
<b>F1_diff%</b>	stable	+2%	+3%	+4%	+6%	+6%	+5%	+43%	+15%	+8%
F2_initial	2292	2002	1611	1534	1521	1487	1607	878	848	911
F2_modif	2300	2051	1674	1597	1728	1623	1692	954	939	1005
<b>F2_diff</b>	+8	+49	+63	+63	+207	+136	+85	+76	+91	+94
<b>F2_diff%</b>	+0,3%	+2,5%	+4%	+4%	+14%	+9%	+5%	+9%	+10%	+10%
F3_initial	2927	2498	2412	2419	2337	2360	2422	2303	2097	2108
F3_modif	3093	2563	2434	2444	2366	2390	2459	2305	2103	2114
<b>F3_diff</b>	+166	+65	+22	+25	+29	+30	+37	+2	+6	+6
<b>F3_diff%</b>	+6%	+3%	+1%	+1%	+1%	+1%	+1,5%	+0,1%	+0,3%	+0,3%
F4_initial	3810									
F4_modif	3797									
<b>F4_diff</b>	-13									
<b>F4_diff%</b>	-0,3%									

**Tableau 6: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX\_initial), relevées après augmentation de l'aperture aux lèvres (FX\_modif). FX\_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif. FX\_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris)**

En conclusion, l'augmentation de l'aperture aux lèvres entraîne une augmentation des valeurs de F1, F2, F3 pour les 10 voyelles ainsi qu'une diminution de F4 pour la voyelle /i/ (paramètre étudié uniquement pour /i/).

## 2.4.2 Renforcement du contraste paradigmatique : conséquences acoustiques sur les voyelles [ $\pm$ arrondi]

La seconde hypothèse (H2) suit le postulat fait par de Jong (1993, 1995) selon lequel en position prosodique forte (ici position initiale de frontière prosodique), il y aurait : un renforcement des traits distinctifs des voyelles en position IP. Un renforcement du trait [+arrondi] pour les voyelles arrondies se réaliserait par une diminution de l'étirement aux lèvres, une diminution de l'aperture aux lèvres et/ou par une protrusion plus élevée en position IP. A l'inverse, un renforcement du trait [-arrondi] pour les voyelles non-arrondies se réaliserait par une augmentation de l'étirement aux lèvres, une augmentation de l'aperture aux lèvres et/ou une diminution de la protrusion. Le modèle ne nous permet pas de faire varier l'étirement aux lèvres. Nous allons donc présenter les conséquences acoustiques des variations articulatoires sur l'aperture et la protrusion.

- **Modélisation des conséquences acoustiques : variations sur l'aperture aux lèvres**

Pour les voyelles [-arrondi] le paramètre P5 : ouverture aux lèvres (*lip\_ht*) va augmenter. Pour les voyelles [+arrondi], le paramètre P5 va diminuer. Une valeur proche de -1 correspond à une aperture réduite et une valeur proche de 1 à une aperture large. Pour garder les mêmes proportions que celles utilisées pour la mâchoire, le paramètre d'ouverture aux lèvres a été augmenté de 0,5 pour chaque voyelle non-arrondie et diminué de 0,5 pour chaque voyelle arrondie, dans le modèle de Maeda (voir Tableau 7).

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
	voyelles non-arrondies				voyelles arrondies					
P5_initial	1	1	1	0,5	-0,5	-0,2	0,2	-1	-0,6	-0,3
modification	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
P5_modif	1,5	1,5	1,5	1	-1	-0,7	-0,3	-1,5	-1,1	-0,8

**Tableau 7: Position du paramètre P5, correspondant à l'ouverture aux lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P5\_initial) et position du paramètre P5 modifiée (P5\_modif) selon une augmentation de 0,5 pour les voyelles [-arrondi] et selon une diminution de 0,5 pour les voyelles [+arrondi] (1= ouverture large, -1= aperture réduite).**

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
F1_initial	256	405	519	591	330	413	479	272	479	526
F1_modif	256	413	534	613	256	355	453	176	363	428
<b>F1_diff</b>	stable	+8	+15	+22	<b>-74</b>	<b>-58</b>	<b>-26</b>	<b>-96</b>	<b>-116</b>	<b>-98</b>
<b>F1_diff%</b>	stable	+2%	+3%	+4%	<b>-22%</b>	<b>-14%</b>	<b>-5%</b>	<b>-35%</b>	<b>-24%</b>	<b>-19%</b>
F2_initial	2292	2002	1611	1534	1521	1487	1607	878	848	911
F2_modif	2300	2051	1674	1597	1263	1331	1503	852	786	822
<b>F2_diff</b>	+8	+49	+63	+63	<b>-258</b>	<b>-156</b>	<b>-104</b>	<b>-26</b>	<b>-62</b>	<b>-89</b>
<b>F2_diff%</b>	+0,3%	+2,5%	+4%	+4%	<b>-17%</b>	<b>-10%</b>	<b>-7%</b>	<b>-3%</b>	<b>-7%</b>	<b>-10%</b>
F3_initial	2927	2498	2412	2419	2337	2360	2422	2303	2097	2108
F3_modif	3093	2563	2434	2444	2315	2336	2399	2299	2088	2096
<b>F3_diff</b>	+166	+65	+22	+25	<b>-22</b>	<b>-24</b>	<b>-23</b>	<b>-4</b>	<b>-9</b>	<b>-12</b>
<b>F3_diff%</b>	+6%	+3%	+1%	+1%	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-0,4%</b>	<b>-0,6%</b>
F4_initial	3810									
F4_modif	3797									
<b>F4_diff</b>	<b>-13</b>									
<b>F4_diff%</b>	<b>-0,3%</b>									

**Tableau 8: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX\_initial), relevées après augmentation de l'aperture aux lèvres pour les voyelles non-arrondies et diminution de l'aperture aux lèvres pour les voyelles arrondies (FX\_modif). FX\_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif. FX\_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris).**

D'après les résultats présentés dans le Tableau 8, pour les voyelles non-arrondies, une augmentation de l'aperture entraîne une augmentation globale de l'ensemble des formants F1, F2, F3, et une diminution de F4 pour /i/ (paramètre étudié uniquement pour /i/). Pour les voyelles arrondies, une diminution de l'aperture entraîne une diminution des formants F1, F2, F3 (particulièrement F1).

- **Modélisation des conséquences acoustiques : variations sur la protrusion**

Pour cela, nous avons fait varier le paramètre P6, correspondant à la protrusion des lèvres. Des valeurs proches de -1 correspondent à des voyelles étirées, des valeurs proches de 1 correspondent à des voyelles arrondies, protruses. Le paramètre P6 pour les voyelles non-arrondies va diminuer (passage de -1 à -1,5 pour /i/ par exemple) et le paramètre P6 pour les voyelles arrondies va augmenter (passage de 0 à 0,5 par exemple pour /o/) (voir Tableau 9).

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
	Voyelles non arrondies				Voyelles arrondies					
P6_initial	-1	-1	-0,5	-0,5	1	0,5	-0,5	1,5	0	0
modification	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5
P6_modif	-1,5	-1,5	-1	-1	1,5	1	0	2	0,5	0,5

**Tableau 9: Position du paramètre P6, correspondant à la protrusion des lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P6\_initial) et modifié (P6\_modif) dans le sens d'une diminution du paramètre pour les voyelles non-arrondies et dans le sens d'une augmentation du paramètre pour les voyelles arrondies.**

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
F1_initial	256	405	519	591	330	413	479	272	479	526
F1_modif	256	405	525	597	307	404	478	256	462	511
<b>F1_diff</b>	<b>stable</b>	<b>stable</b>	<b>+6</b>	<b>+6</b>	<b>-23</b>	<b>-9</b>	<b>-1</b>	<b>-16</b>	<b>-17</b>	<b>-15</b>
<b>F1_diff%</b>	<b>stable</b>	<b>stable</b>	<b>+1%</b>	<b>+1%</b>	<b>-7%</b>	<b>-2%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-6%</b>	<b>-3,5%</b>	<b>-0,3%</b>
F2_initial	2292	2002	1611	1534	1521	1487	1607	878	848	911
F2_modif	2291	2027	1633	1550	1467	1464	1583	876	834	892
<b>F2_diff</b>	<b>stable</b>	<b>+25</b>	<b>+22</b>	<b>+16</b>	<b>-54</b>	<b>-23</b>	<b>-24</b>	<b>-2</b>	<b>-14</b>	<b>-19</b>
<b>F2_diff%</b>	<b>-0,04%</b>	<b>+1%</b>	<b>+1%</b>	<b>+1%</b>	<b>-3,5%</b>	<b>-1,5%</b>	<b>-1,5%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-2%</b>	<b>-2%</b>
F3_initial	2927	2498	2412	2419	2337	2360	2422	2303	2097	2108
F3_modif	3046	2539	2425	2426	2332	2354	2415	2308	2090	2105
<b>F3_diff</b>	<b>+ 119</b>	<b>+41</b>	<b>+ 13</b>	<b>+7</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>+5</b>	<b>-7</b>	<b>-3</b>
<b>F3_diff%</b>	<b>+4%</b>	<b>+2%</b>	<b>+0,5%</b>	<b>+0,3%</b>	<b>-0,2%</b>	<b>-0,3%</b>	<b>-0,3%</b>	<b>+0,3%</b>	<b>-0,3%</b>	<b>-0,1%</b>
F4_initial	3810									
F4_modif	3814									
<b>F4_diff</b>	<b>+ 4</b>									
<b>F4_diff%</b>	<b>+0,1%</b>									

**Tableau 10: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX\_initial), relevées après diminution de la protrusion pour les voyelles non-arrondies et après augmentation de la protrusion pour les voyelles arrondies (FX\_modif). FX\_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif. FX\_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX\_initial et FX\_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris).**

D'après les résultats présentés dans le Tableau 10, pour les voyelles non-arrondies, une diminution de la protrusion entraîne une augmentation globale de l'ensemble des formants F1, F2, F3 pour les 10 voyelles ainsi que F4 pour /i/ (paramètre étudié uniquement pour /i/). Pour les voyelles /i/ et /e/, les principales modifications sont observées sur F3 alors que les formants F1 et F2 varient peu ou restent stables. Pour les voyelles arrondies, une augmentation de la protrusion entraîne une diminution des formants F1, F2, F3 (excepté le F3 de la voyelle /u/ dont les valeurs augmentent).

Ces différents résultats nous seront utiles dans la suite de notre travail notamment dans la confrontation de nos résultats articulatoires (lèvres et menton) et acoustiques (formants).

## 2.5 Récapitulatif des questions de recherche abordées

La première question à laquelle nous allons chercher à répondre est la suivante :

*Q1 : Existe-t-il un effet de la position prosodique (IP vs W) sur les propriétés acoustiques et articulatoires (lèvres et menton) des voyelles du français ?*

Notre travail s'intéresse à la position initiale de constituants prosodiques. Le premier objectif de notre étude sera d'observer l'effet de la position strictement initiale sur la voyelle #V sur les 10 voyelles orales du français (/i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/) afin de savoir si et comment ce renforcement prosodique se réalise sur toutes les voyelles. Pour cela, nous observons les données spectrales des voyelles (formants, durée, Fo, intensité) et les données articulatoires via l'articulation labiale et l'abaissement du menton. La description de ces résultats, nous permettra de répondre à la deuxième question :

*Q2 : Quelles propriétés acoustiques et articulatoires (au niveau des lèvres et de l'abaissement du menton) des voyelles sont affectées par la position initiale de constituants prosodiques et dans quelles directions vont ces modifications ?*

Pour répondre à cette question, nous avons choisi d'observer la réalisation acoustique et articulatoire des voyelles orales du français positionnées **en début de Groupe Intonatif (IP) et en position médiane de Groupe Intonatif (IPm)** (position initiale du second mot d'un mot-composé, défini comme IPm dans les travaux de Cho (2005, entre autres). Nous nous sommes limités à l'observation de ces deux positions, car l'objectif de ce travail est de rendre compte du renforcement prosodique et de sa réalisation sur les segments vocaliques en français. Le Groupe Intonatif (Intonational Phrase, IP) est un constituant prosodique largement admis dans les théories prosodiques du français (Di Cristo 1976, Verluyten 1982, Jun & Fougeron, 2000). Il est délimité à droite en français par un ton de frontière majeure et représente un domaine de réalisation du contour intonatif complet. Il est l'unité phonologique la plus large, dont les frontières prosodiques sont parfaitement identifiables par des indices acoustiques. Nous avons choisi de prendre en compte les mesures de la configuration des lèvres car le français a un système vocalique pour lequel l'arrondissement est distinctif. Pour comparer nos résultats à ceux de l'anglais, nous avons également pris en compte le mouvement d'abaissement de la mâchoire, estimée par le mouvement d'abaissement du menton. Une étude acoustique a également été menée.

Nous avons également cherché à savoir quelles étaient les conséquences des variations articulatoires et acoustiques dues au renforcement initial sur le contraste syntagmatique et/ou sur le contraste paradigmatique entre les segments. Pour cela, nous avons confronté nos résultats aux prédictions de l'hypothèse d'expansion de sonorité et l'hypothèse d'hyperarticulation localisée.

*Q3 : quelles sont les conséquences des variations provoquées par le renforcement initial sur le contraste paradigmatique (en renforçant le contraste distinctif entre voyelles) et le contraste syntagmatique (en renforçant la sonorité de la voyelle) ?*

Nous pouvons d'ores et déjà proposer les hypothèses suivantes :

**HYPOTHESE 1 :** le renforcement initial influence la réalisation articulatoire (menton et lèvres) et la réalisation acoustique des voyelles orales du français et ces modifications suivent les prédictions de l'hypothèse d'expansion de sonorité (renforçant le contraste syntagmatique). Si cette hypothèse est validée alors, nous pouvons faire les prédictions suivantes. En position initiale de groupe intonatif IP, on s'attendrait alors à :

H 1.a : une position plus basse de la mâchoire pour l'ensemble des voyelles. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, un abaissement de la mâchoire entraîne des modifications sur les formants. On s'attendrait donc à une augmentation de F1, une diminution de F2 (sauf /u/) de F3 pour l'ensemble des voyelles orales et une diminution de F4 pour la voyelle /i/.

H 1.b : une ouverture aux lèvres plus élevée pour l'ensemble des voyelles. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, une augmentation de l'ouverture aux lèvres entraîne des modifications sur les formants. On s'attendrait donc à une augmentation globale des formants F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et une diminution de F4 (pour /i/).

H 1.c : à une augmentation des valeurs d'intensité pour l'ensemble des voyelles

H 1.d : à un allongement de l'ensemble des voyelles

**HYPOTHESE 2 :** le renforcement initial influence la réalisation articulatoire (menton et lèvres) et la réalisation acoustique des voyelles orales du français et ces modifications suivent les prédictions de l'hypothèse d'hyperarticulation localisée (renforçant le contraste paradigmatique). Si cette hypothèse est validée alors, nous pouvons faire les prédictions suivantes. En position initiale de groupe intonatif IP, on s'attendrait alors à :

H 2.a : un étirement et une ouverture aux lèvres plus élevées pour les voyelles non-arrondies et un étirement et une ouverture aux lèvres moins élevés pour les voyelles arrondies. Dans la modélisation des conséquences acoustiques seul le paramètre d'ouverture a pu être testé, car le paramètre d'étirement n'est pas présent pas dans le modèle de Maeda. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles non-arrondies, l'augmentation de l'ouverture aux lèvres entraîne une augmentation globale de l'ensemble des formants F1, F2, F3 pour les voyelles /i, e, ε, a/ ainsi qu'une diminution de F4 pour la voyelle /i/. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles arrondies, la diminution d'ouverture entraîne une diminution des formants F1, F2, F3 pour les /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/.

H 2.b : une protrusion moins élevée pour les voyelles non-arrondies et une protrusion plus élevée pour les voyelles arrondies. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles non-arrondies, la diminution de la protrusion aux lèvres entraîne une augmentation globale des formants F1, F2, F3 pour les voyelles /i, e, ε, a/ ainsi que F4 pour /i/. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles arrondies, l'augmentation de la protrusion entraîne une diminution des formants F1, F2, F3 sur les voyelles /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/ et particulièrement F2 et F1.



H 2.c : une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [+bas] et une diminution des valeurs de F1 pour les voyelles [-bas]

H 2.d : une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [-haut] et une diminution des valeurs de F1 pour les voyelles [+haut]

H 2.e : une augmentation des valeurs de F2 pour les voyelles [-arrière] et une diminution des valeurs de F2 pour les voyelles [+arrière]

Nous allons à présent présenter la méthode de travail que nous avons mise en place dans cette thèse pour répondre à notre objectif : mieux définir le renforcement initial pour les voyelles orales du français.



# DEUXIEME PARTIE

## METHODE

---

Cette partie a pour but de décrire la méthode utilisée dans ce travail.

Dans le premier chapitre, nous développons tout d'abord le matériel linguistique utilisé avec les conditions prosodiques choisies (3.1) et le corpus utilisé pour cette thèse (3.2). Ensuite, nous présentons les locuteurs, les conditions de passation de l'enregistrement (3.3), et le codage phonémique et prosodique des séquences étudiées (3.4). Nous motivons, enfin, notre choix d'avoir limité notre étude à deux conditions prosodiques (3.5).

Le second chapitre de cette partie se consacre à la description de l'acquisition des données (4): les données acoustiques et les données articulatoires via la vidéo et via un appareil de capture de mouvements (Qualisys) (4.1). Nous développons ensuite les techniques de post-traitement des données (4.2). Nous motivons notre choix d'avoir étudié deux conditions prosodiques (4.3) pour donner enfin un récapitulatif des mesures acoustiques et articulatoires à la fin de cette partie (5).



### 3. MATERIEL LINGUISTIQUE ET LOCUTEURS

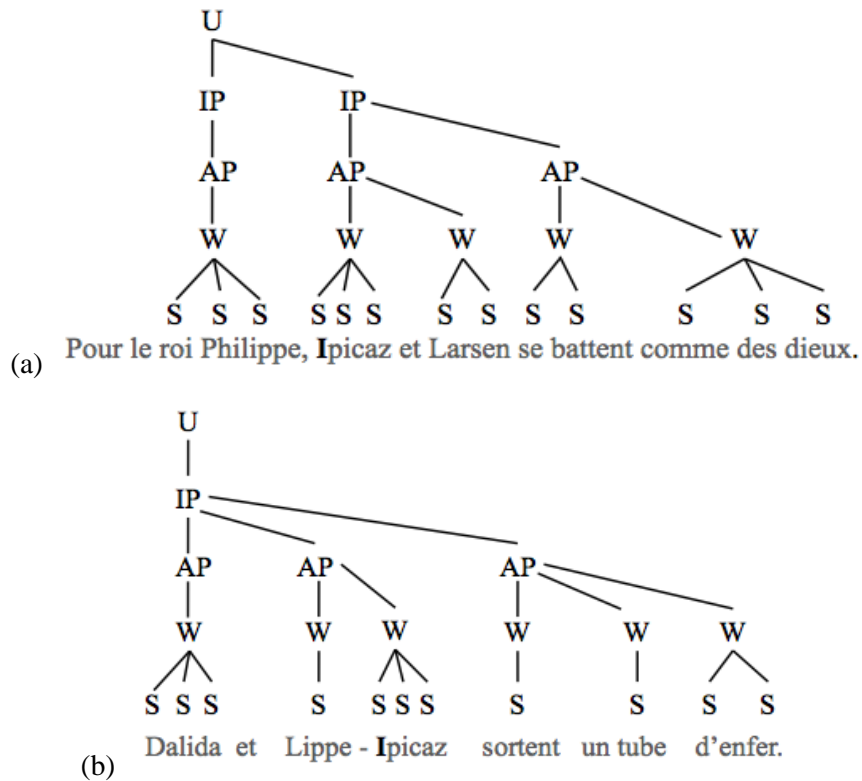
#### 3.1 Les conditions prosodiques choisies

Afin de rendre compte du phénomène de renforcement initial, nous avons considéré deux conditions prosodiques : la position initiale de Groupe Intonatif (que nous appellerons « position IP », avec IP pour Intonational Phrase) et la position en milieu de Groupe Intonatif qui correspondra au début du second mot d'un mot composé (que nous appellerons « position W », avec W pour Word).

Le Groupe Intonatif (ou Intonational Phrase) est un constituant prosodique généralement admis dans la plupart des modèles phonologiques de la prosodie du français. Il est caractérisé par un contour intonatif complet et par un ton (ou contour, selon les modèles) de frontière majeure (Delattre, 1966). A droite, le Groupe Intonatif est délimité par un contour mélodique important (continuation majeure ou contour descendant de finalité), correspondant à un ton de frontière haut ou bas (H% ou L%) dans les modèles à tons. Ce ton se réalise sur la dernière syllabe. Il est également délimité par un fort allongement final et il est optionnellement marqué par une pause. Le Groupe Intonatif est défini comme le constituant prosodique le plus haut défini par l'intonation et selon Ladd (1986) il est l'unité phonologique la plus grande, dont les caractéristiques phonétiques permettent de rendre parfaitement identifiables les frontières.

A la position initiale de Groupe Intonatif (IP), nous comparons une position médiane dans le Groupe Intonatif. Cette position va correspondre dans les phrases de notre corpus (voir Figure 12 et Tableau 11) à la position initiale du second mot d'un mot composé/mot lexical (W). Elle est similaire à celle utilisée dans les études de Cho (voir récemment Kim, Cho, 2012) où elle est nommée IP-medial condition. Cette position n'est pas définie par un contour intonatif particulier ou un allongement syllabique, le mot lexical n'étant pas un constituant prosodique à proprement parler.

Comme nous l'avons vu dans la partie 1.2, nous considérons que la structure prosodique du français est hiérarchiquement organisée et répond à un étagement strict (Strict Layering). Ainsi, un segment placé en position initiale de Groupe Intonatif est aussi en début de mot, mais un constituant en milieu de Groupe Intonatif ne peut pas être également en début de Groupe Intonatif. La Figure 12 illustre pour les deux positions initiales IP et W ce principe de hiérarchie et d'étagement strict.



**Figure 12: Structure prosodique conçue pour le segment test /i/ aux deux positions prosodiques étudiées. En (a) position initiale dans un Groupe Intonatif (IP) (b) position initiale dans un Mot lexical (W). Le constituant le plus haut est le constituant Phrase (U, Utterance), AP désigne le Groupe Accentuel (Accentual Phrase) et S le niveau syllabe. Ces arbres correspondent à une des structurations possibles de l'énoncé.**

### 3.2 Le corpus enregistré

Le corpus s'inspire du corpus utilisé dans la thèse de Cécile Fougeron, (Fougeron 1998, pp 63, 64) et dans les études de Tabain et Perrier (Tabain et Perrier 2007; Tabain et Perrier 2005) portant sur le français. Ce corpus permet l'utilisation de prénoms existants ou imaginaires facilitant l'insertion de l'ensemble des voyelles du français /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/ en position initiale IP et W. La voyelle cible est toujours précédée de la séquence /ip/.

Le corpus est présenté dans le Tableau 11:

/i/	IP W	Pour le roi Philippe, <b>Ipicaz</b> et Larsen se battent comme des dieux. Dalida et Lippe- <b>Ipicaz</b> sortent un tube d'enfer.
/e/	IP W	Avec Jean-Philippe, <b>Epéli</b> et Daniel marchaient dans la forêt. Jean-Marie et <b>Lippe-Epéli</b> s'entendaient vraiment bien.
/ɛ/	IP W	Pour le roi Philippe, <b>Eve-Marie</b> et Martin se battent comme des dieux. Dalida et Lippe- <b>Eve-Marie</b> sont deux sopranos en vogue.
/a/	IP W	Après Jean-Philippe, <b>Apala</b> et Paulo se sont rencontrés. Tommy-Lee et Rippe- <b>Apala</b> sont deux super bassistes
/y/	IP W	Avec saint Philippe, <b>Upulé</b> et Jo attaquèrent les géants. Dalida et Deep- <b>Upulé</b> sortent un duo terrible.
/ø/	IP W	D'après Philippe, <b>Eupidine</b> et Marie ont beaucoup voyagé. Dalida et Lippe- <b>Eupidine</b> sortent un tube d'enfer.
/œ/	IP W	D'après Philippe, <b>Œfali</b> et Jean-Charles s'entendent vraiment bien. Dalida et Rippe- <b>Œfali</b> dansent tous les soirs.
/u/	IP W	D'après Philippe, <b>Oupoulo</b> et Marie ont beaucoup dansé. Tommy-Lee et Deep- <b>Oupoulo</b> sont deux grands pianistes.
/o/	IP W	Face à Philippe, <b>Opalie</b> et Jeanne ne faisaient pas le poids. Marie-Lou et Fippe- <b>Opalie</b> sont deux petites sorcières.
/ɔ/	IP W	D'après Philippe, <b>Orgeat</b> et Camille sont deux petites pestes. Sheila et Deep- <b>Orgeat</b> sortent un tube chaque été.

**Tableau 11 : Corpus utilisé dans ce travail, pour les voyelles /y, ø, œ, u, o, ɔ/ du français en position initiale IP et W (en gras).**

La voyelle cible a été, le plus souvent, placée à la 6<sup>e</sup> syllabe de l'énoncé afin de contrôler un possible effet de la position sérielle dans l'énoncé (déclinaison articulatoire du début à la fin de l'énoncé). Le Tableau 12 résume le nombre de syllabes pour chacune des positions prosodiques étudiées ainsi que la position de la voyelle cible. Par exemple, pour la voyelle cible /i/ en position IP, la voyelle se trouve à la 6<sup>e</sup> syllabe d'une phrase de 16 syllabes.

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/u/	/o/	/ɔ/	/y/	/ø/	/œ/
IP	6 <sup>e</sup> /16	6 <sup>e</sup> /17	6 <sup>e</sup> /16	6 <sup>e</sup> /16	5 <sup>e</sup> /15	5 <sup>e</sup> /15	5 <sup>e</sup> /14	6 <sup>e</sup> /16	5 <sup>e</sup> /16	5 <sup>e</sup> /16
W	6 <sup>e</sup> /13	6 <sup>e</sup> /14	6 <sup>e</sup> /15	6 <sup>e</sup> /14	5 <sup>e</sup> /15	6 <sup>e</sup> /14	5 <sup>e</sup> /12	6 <sup>e</sup> /14	5 <sup>e</sup> /13	6 <sup>e</sup> /12

**Tableau 12: Tableau récapitulatif de la position syllabique de la voyelle cible dans la phrase cadre (constituée de 12 à 16 syllabes) selon la position prosodique étudiée et la voyelle. 6<sup>e</sup>/16 désigne la 6<sup>ième</sup> syllabe sur un nombre de 16 syllabes**

Les voyelles cibles /i/, /e/, /a/, /y/, /ø/, /u/, /o/ ont été insérées dans des syllabes ouvertes. Les voyelles cibles sont suivies de la consonne /p/ et d'une voyelle d'un degré d'aperture similaire afin de

favoriser une harmonie vocalique (excepté pour la voyelle /o/), comme le montre le Tableau 13. Nous avons choisi la consonne /p/ car son articulation n’interfère pas sur l’articulation linguale des voyelles, et ne modifie pas la réalisation de la voyelle cible.

voyelle	condition prosodique (#)	séquences
/i/	IP / W	/ip# <b>ipi</b> /
/e/	IP / W	/ip# <b>ipe</b> /
/a/	IP / W	/ip# <b>apa</b> /
/y/	IP / W	/ip# <b>ypy</b> /
/ø/	IP / W	/ip# <b>øpi</b> /
/u/	IP / W	/ip# <b>upu</b> /
/o/	IP / W	/ip# <b>opa</b> /

**Tableau 13 : Séquences pré et post-frontières pour les voyelles /i/, /e/, /a/, /y/, /ø/, /u/ et /o/ (en gras).**

En français, les voyelles mi-ouvertes /ɛ/, /ɔ/, /œ/ apparaissent de préférence en syllabe fermée. Afin de respecter les contraintes phonotactiques du français et afin d’amener le locuteur à avoir une réalisation la plus naturelle possible : la voyelle /ɛ/ a été intégrée dans une syllabe fermée de type « Vciblev » et la voyelle /ɔ/ dans une syllabe fermée de type « Vcibleɣ », comme observé dans le Tableau 14. Nous avons conscience que la consonne /ʁ/, consonne uvulaire, aura pour conséquence d’augmenter les valeurs de F1, de diminuer les valeurs de F2 et d’allonger la voyelle. La voyelle /œ/ a, elle, été insérée dans une syllabe ouverte de type « Vciblef », afin de favoriser la production du phonème /œ/ comme dans le mot /œf/ (œuf) mot fréquemment utilisé en français.

voyelle	condition prosodique (#)	séquences
/œ/	IP / W	/ip# <b>œfa</b> /
/ɛ/	IP / W	/ip# <b>ɛvm</b> /
/ɔ/	IP / W	/ip# <b>ɔʁʒ</b> /

**Tableau 14: Séquences pré- et post-frontières pour les voyelles /œ/, /ɛ/ et /ɔ/ (en gras).**

### 3.3 Passation et locuteurs

Les enregistrements ont eu lieu dans la chambre sourde du laboratoire de phonétique et phonologie de Paris 3-Sorbonne Nouvelle. Le corpus a été enregistré par quatre locuteurs français natifs n’ayant pas d’accent régional marqué. Les locuteurs sont des femmes âgées de 25 à 40 ans au moment de l’enregistrement. Pour chaque locuteur, l’acquisition des données articulatoires et acoustiques a été effectuée lors d’une même session d’enregistrement.



Lors de la session d'enregistrement, nous avons également fait produire aux locuteurs des énoncés, où la voyelle **Vcible** était positionnée en position initiale de constituant prosodique GA (Groupe accentuel).

/i/	Oupoulo, Philippe, <b>Ip</b> icaz et David sont comme ses frères.
/e/	Dalida, Philippe, <b>Ep</b> éli et Paulo n'aimaient pas leurs prénoms.
/ɛ/	A chaque fois, Philippe, <b>E</b> ve-Marie et Jean-Charles cherchent la solution.
/a/	Tommy, Philippe, <b>Ap</b> ala et Paulo sont toujours ensemble.
/y/	Ses amis, Philippe, <b>Up</b> ulé et Dani sont comme ses frères.
/ø/	Oupoulo, Philippe, <b>Eup</b> idine et David sont comme ses frères.
/œ/	Dalida, Philippe, <b>Oe</b> fali et Paulo aiment jouer ensemble.
/u/	Petros, Philippe, <b>Ou</b> poulo et Gillou sont toujours ensemble.
/o/	Eva, Philippe, <b>Op</b> alie et Tommy n'aimaient pas leurs prénoms.
/ɔ/	Marie, Philippe, <b>Or</b> geat et Daniel sont leurs quatre enfants.

**Tableau 15: Corpus voyelle par voyelle (en gras) en position GA**

Afin que le locuteur ne produise de séries monotones et afin d'introduire des temps de repos, nous avons séparé le corpus en deux listes principales, A1 et B1. Les 15 phrases tests comprenant les voyelles /a/, /i/, /u/, /y/, /o/, pour chaque position prosodique (IP, W et GA), ont été regroupées de façon aléatoire dans une première liste A1 et les 15 phrases tests comprenant les voyelles /e/, /ɛ/, /ø/, /œ/, /ɔ/ (en majorité des voyelles moyennes) pour chaque position prosodique (IP, W, GA), ont été regroupées de façon aléatoire dans une seconde liste B1. Deux autres listes A2 et B2 ont été créées et correspondent respectivement aux listes A1 et B1 mais organisées dans un autre ordre aléatoire.

Les listes ont été ensuite présentées dans l'ordre suivant sur un écran face au locuteur :

- A1 B1 A2 B2
- B2 A2 B1 A1
- B1 A2 B2 A1
- A2 B1 A1 B2

Pour une liste donnée, nous avons demandé au locuteur de répéter deux fois la phrase lue. Chaque phrase a donc été répétée 16 fois (en moyenne). Le temps d'acquisition de chacune des 4 listes s'élève à environ 3 min. Chaque locuteur a donc été enregistré une heure environ. De plus, nous avons demandé au locuteur de claquer dans ses mains, au début et à la fin de chaque liste. Ce claquement de mains nous sera utile pour la synchronisation des différentes acquisitions (voir 4.2).

### 3.4 Le codage des séquences étudiées

Les codages phonémiques et prosodiques ont été réalisés par l'auteure, via le logiciel Praat (Boersma & Weenick, 2009). Deux tires ont été nécessaires : une première tire pour la segmentation de la séquence [v1C1#**Vcible**C2], une seconde tire pour l'annotation des conditions prosodiques.

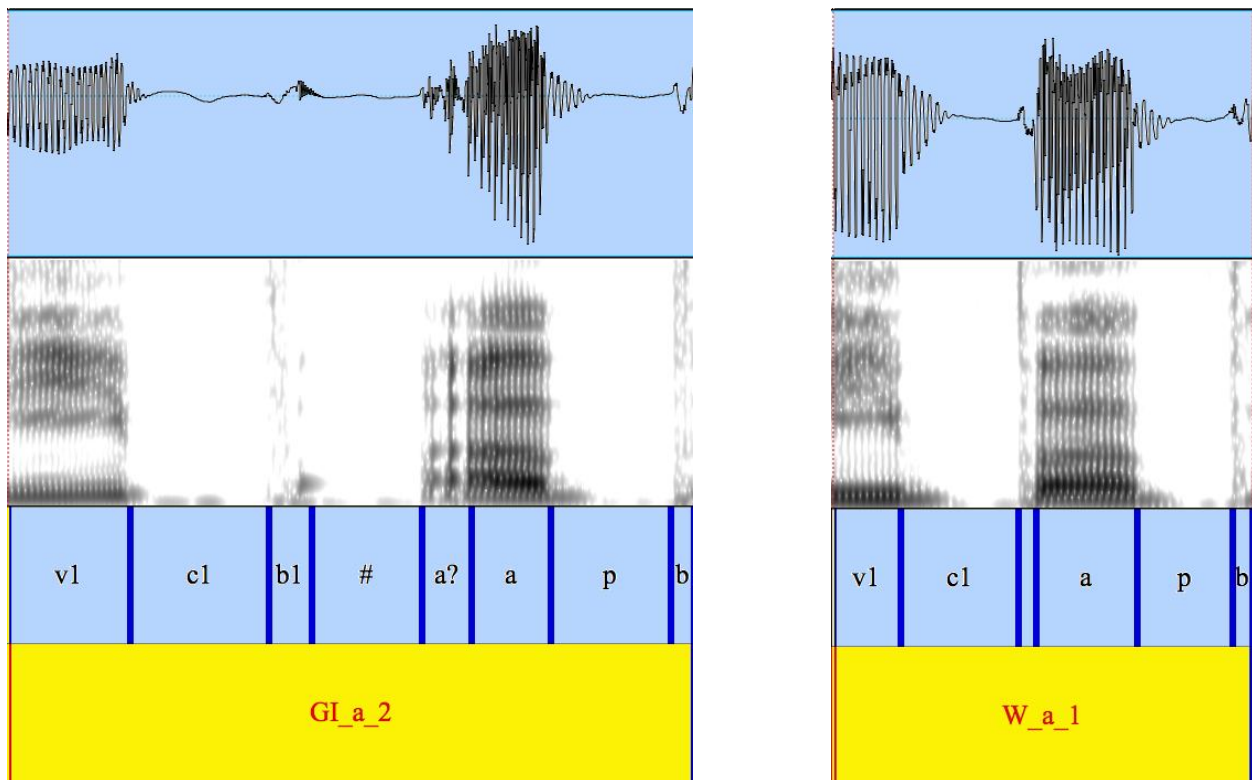


Figure 13: Illustration de la segmentation du signal acoustique avec le logiciel Praat, sur la séquence /V1C1ap/ en position IP (GI) en haut et W en bas, pour le locuteur S1.

- **Première tire (codage phonémique)**

Nous avons distingué la séquence pré-frontière par [v1c1b1] et la séquence post-frontière par [VcibleC2] où [Vcible] est successivement /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/ ou /ɔ/ suivie de la consonne /p/, /f/, /v/ ou /ʁ/. Cette segmentation, illustrée sur la Figure 13 a été faite manuellement suivant les critères suivants :

- Pour chaque voyelle [V1] ou [Vcible] (respectivement : /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/ ou /ɔ/) :

Le début et la fin acoustique ont été respectivement identifiés à partir du début et de la fin de la résonance vocalique, caractérisés par les bandes fréquentielles des 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> formants. L'amortissement final (« voice-decay time ») de la voyelle n'a pas été inclus dans la segmentation de la voyelle, mais intégré à la consonne suivante.

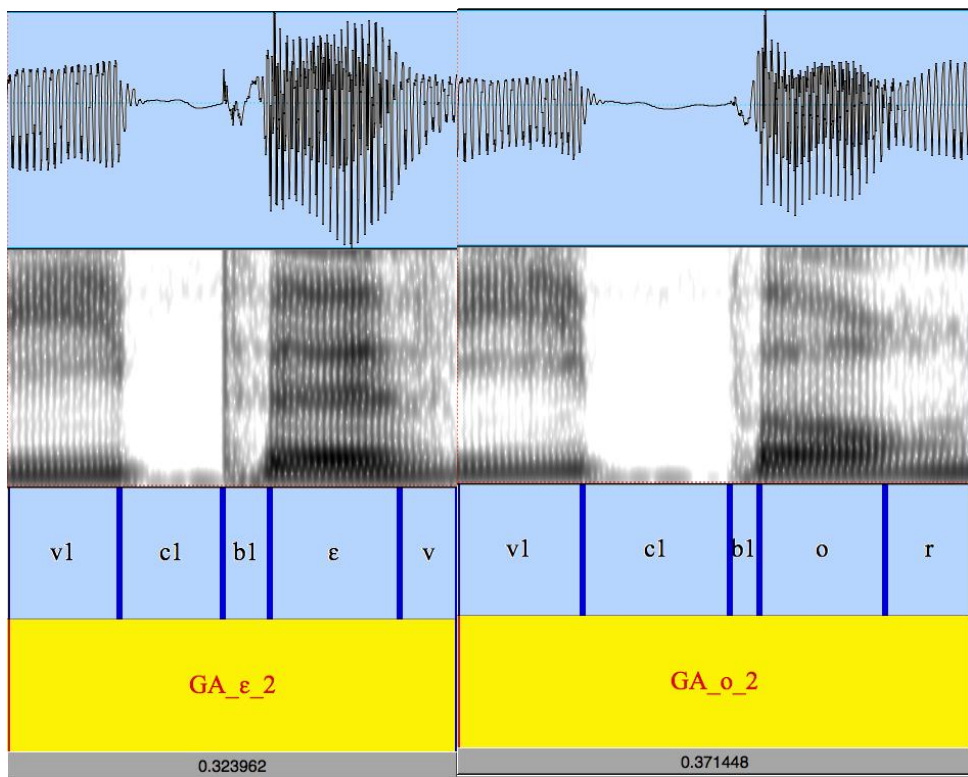
Des marques de glottalisation ont également été repérées et segmentées séparément de la voyelle. La glottalisation de la voyelle a été segmentée par le signe [Vcible?], elle est repérable sur le spectrogramme par des stries verticales. Elle commence au début du pic impulsionnel aperiodique avant la voyelle et jusqu'à la première période vocalique qui peut être détectée grâce à la fréquence fondamentale et grâce au début du voisement de la voyelle (voir Figure 13, en haut « a ? »). La glottalisation n'a donc pas été considérée dans la mesure de durée de la voyelle (voir Figure 13). Cette glottalisation correspond à une vibration irrégulière des plis vocaux (Umeda, 1978), provoquant une absence de Fo.

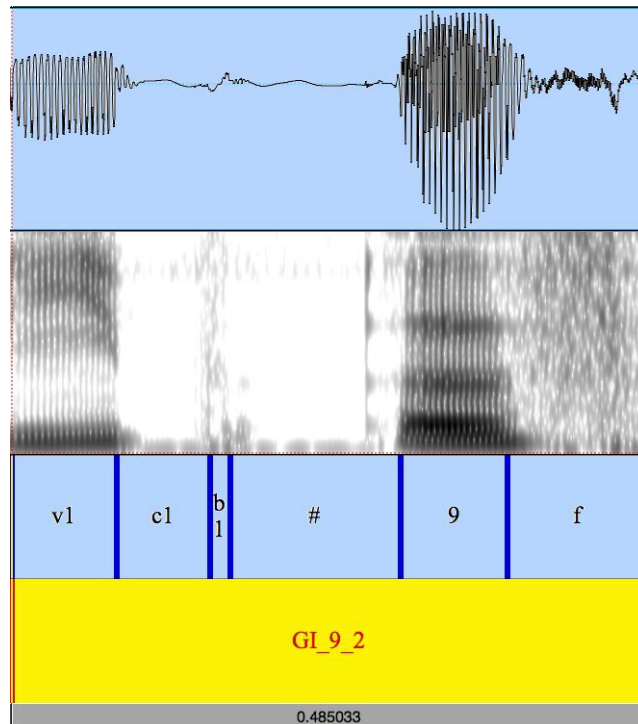
- Pour la consonne [c1] (voir Figure 13) :

[c1] correspond au silence de l'occlusive non voisée /p/ précédant la voyelle [V1]. [c1] débute avec la dernière période vocalique de [V1], comprend l'amortissement final, comme observé sur la Figure 14, et se termine par le début du relâchement de la consonne noté [b1]. Ce relâchement débute par un pic impulsionnel observable sur le signal acoustique, il comprend le pré-voisement initial de la voyelle et se finit à la première période vocalique.

- Pour la consonne [c2] (voir Figure 13 et Figure 14) :

[c2] correspond soit à une occlusive non voisée /p/, soit à l'une des consonnes /v/, /f/ et /ʁ/. Dans le cas de l'occlusive /p/, les critères de segmentation suivent ceux précédemment décrit pour [c1], le silence de l'occlusive a été noté /p/ et le relâchement /b/. Dans le cas des consonnes /v/, /f/ et /ʁ/, la segmentation de ces consonnes a été effectuée grâce au bruit turbulent observé (voir Figure 14).





**Figure 14: Illustration de la segmentation du signal acoustique avec le logiciel Praat, sur la séquence /V<sub>1</sub>C<sub>1</sub>εv/, et /V<sub>1</sub>C<sub>1</sub>ɔɓ/ et /V<sub>1</sub>C<sub>1</sub>œf/, en position GA (en haut) et GI (en bas) pour le locuteur S1. Le phonème /œ/ est transcrit par /9/, /ɔ/ par /o/ et /ɓ/ par /r/ sur la tire utilisée.**

- la pause a été notée par [#].

- **La seconde tire (codage prosodique)**

La seconde tire a permis de coder la condition prosodique étudiée : respectivement le groupe intonatif (GI ou IP), le groupe accentuel (GA) et la position mot (W) ainsi que la voyelle cible et le numéro de la répétition. La condition prosodique, la voyelle et la répétition ont été notées comme suit : IP, GA ou W, suivie de la voyelle cible i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ, suivie du numéro de la répétition \_1, \_2 parfois \_3 ou \_4 (voir exemple sur les Figure 13, Figure 14). Cette seconde tire débute au commencement de la voyelle v1 et se finit à la fin de la dernière consonne (qui suit la voyelle cible). Cette segmentation constitue une validation a posteriori des phrasés prosodiques produits par les locuteurs.

- Quand l'énoncé est caractérisé par la présence d'une pause au niveau de la frontière prosodique (#), par un allongement final et une continuation majeure (B% ou H%, d'après Jun & Fougeron, 2000), comme observé sur la Figure 15, l'énoncé a été segmenté comme une condition de Groupe Intonatif : IP.

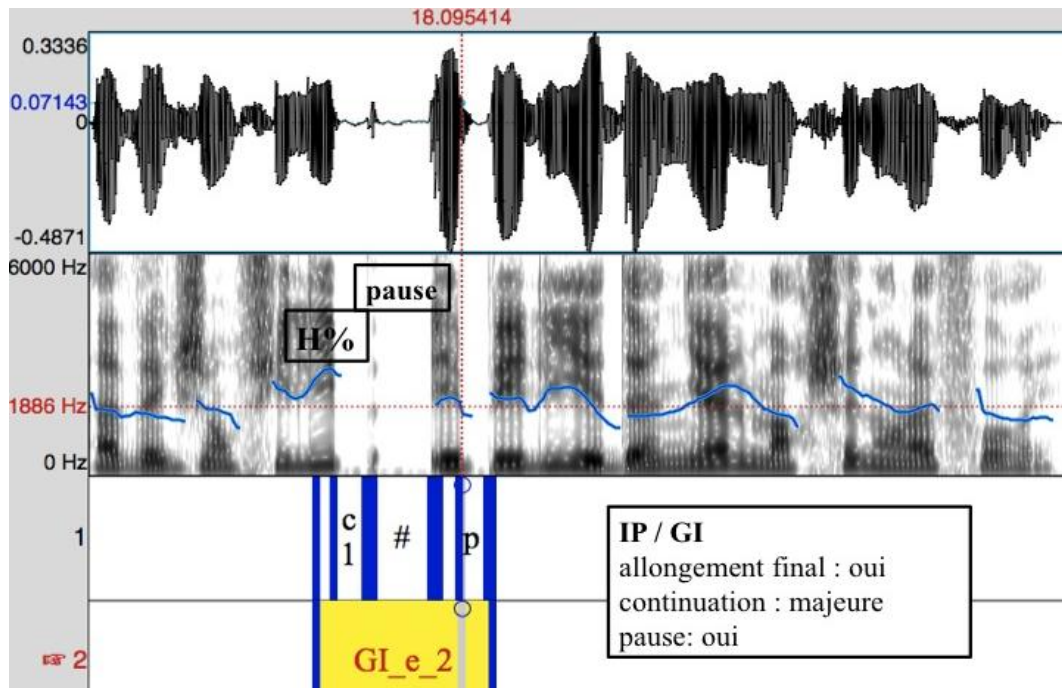


Figure 15 : Caractéristiques prosodiques attendues pour le codage prosodique d'un énoncé en tant que condition Groupe Intonatif (GI/IP).

- Quand l'énoncé est caractérisé par l'absence de pause, un allongement final et une continuation mineure (notée H\*, d'après Jun & Fougeron, 2000), comme observé sur la Figure 16, il a été segmenté comme une condition de Groupe Accentuel (GA).

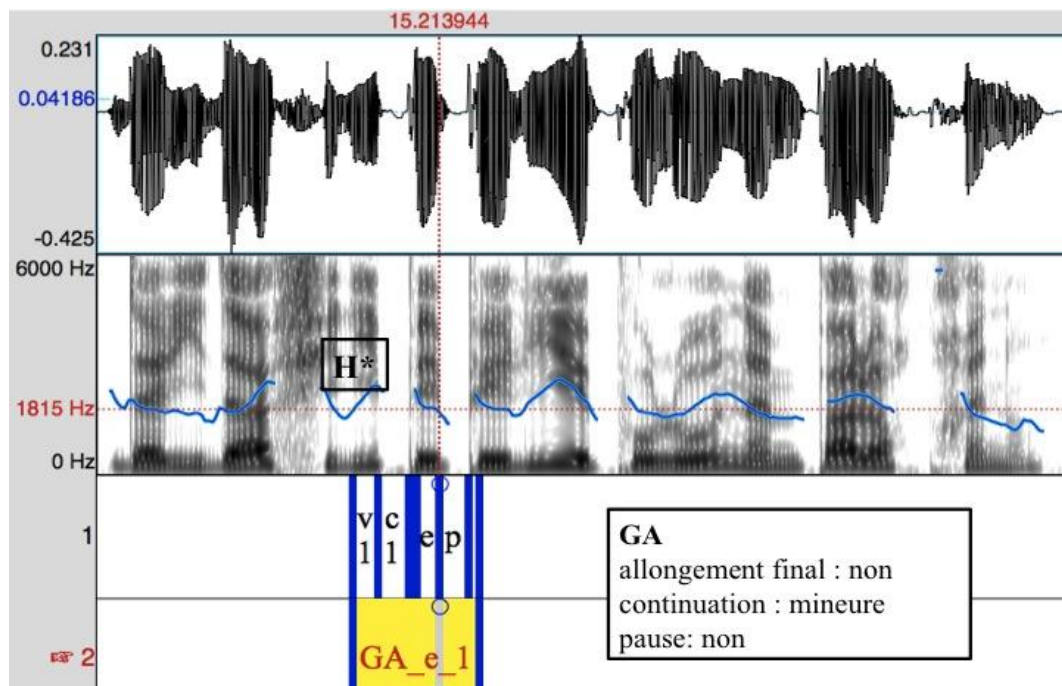


Figure 16 : Caractéristiques attendues pour le codage d'un énoncé en tant que condition Groupe Accentuel GA.

- Quand l'énoncé est caractérisé par l'absence de pause avec la syllabe précédente et l'absence de ton démarcatif (ou B, d'après Jun & Fougeron, 2000), il a été segmenté comme une condition Mot (W).

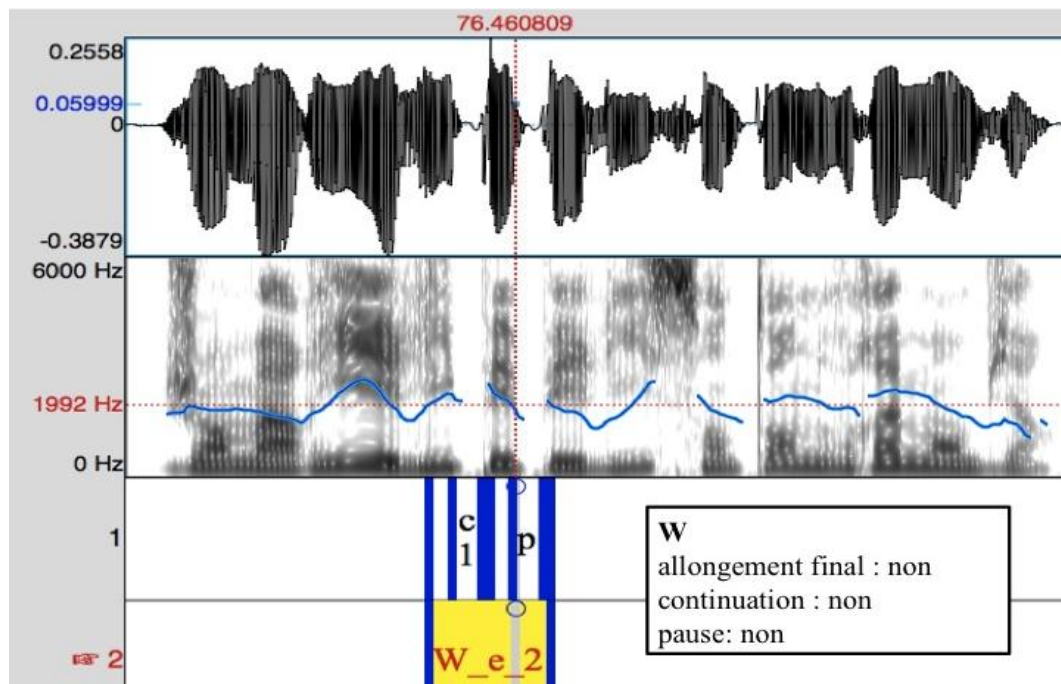


Figure 17 : Caractéristiques attendues pour le codage d'un énoncé en tant que condition Mot lexical W.

- **Cas ambigus**

Cependant, lors de la segmentation de nos items, nous avons relevé 3 types d'énoncés ambigus dont le phrasé prosodique ne correspondait à aucune des conditions prosodiques IP, GA ou W.

- Enoncé ambigu de type 1 : Comme observé sur la Figure 18, cet énoncé ambigu est caractérisé par l'absence d'un allongement final, une montée de continuation mineure et la présence d'une pause.

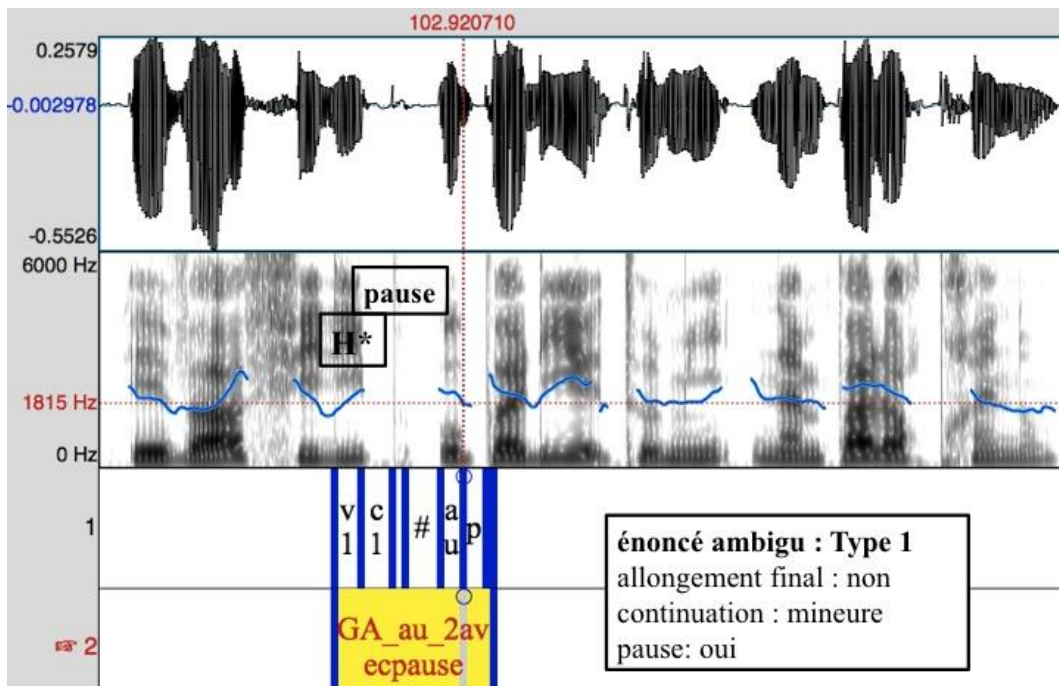


Figure 18 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 1.

- Énoncé ambigu de type 2 : Comme observé sur la Figure 19, cet énoncé ambigu est caractérisé par la présence d'un allongement final, une montée de continuation majeure et l'absence d'une pause.

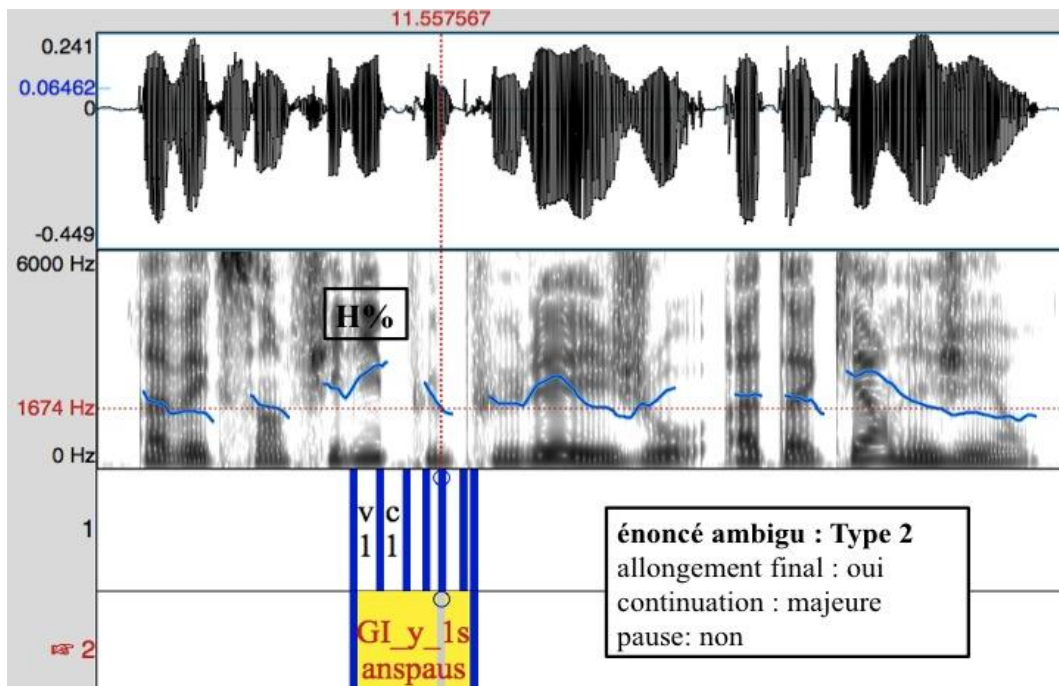


Figure 19 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 2.

- Énoncé ambigu de type 3 : Comme observé sur la Figure 20, cet énoncé ambigu est caractérisé par l'absence d'un allongement final, l'absence de ton démarcatif et l'absence d'une pause.

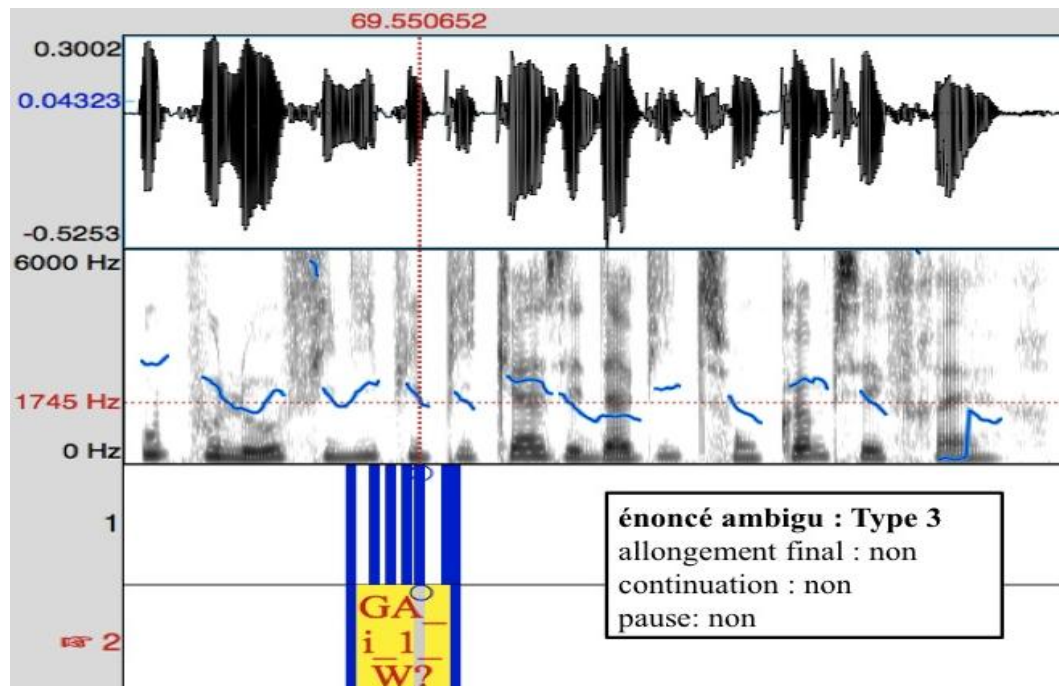


Figure 20 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 3.

Sur l'ensemble des 1280 items enregistrés, nous avons relevé 168 cas d'énoncés ambigus : 109 énoncés de Type 1 (soit 8,5 % des items enregistrés), 41 énoncés de Type 2 (soit 3% des items enregistrés) et 18 de Type 3 (soit 1,4% des items enregistrés).

- **Test de catégorisation avec choix forcé des phrases « ambiguës »**

Afin d'assigner une condition prosodique à ces énoncés ambigus, nous avons fait appel à 4 linguistes spécialistes de la prosodie du français, habitués à analyser et à coder des séquences prosodiques en français ou dans d'autres langues

Les 168 énoncés ambigus ont été présentés dans un ordre aléatoire à ces quatre spécialistes dans un test de perception. Nous avons ajouté à ce test 12 occurrences d'énoncés de condition IP (4 occurrences) de condition GA (4 occurrences) et de condition W (4 occurrences). Les quatre spécialistes avaient donc un ensemble de 180 énoncés à écouter. Dans une tâche de catégorisation avec choix forcé, les auditeurs devaient écouter chaque énoncé et juger la nature de la frontière réalisée avant le prénom cible. Les choix étaient : Groupe intonatif, Groupe accentuel ou Mot. Les juges avaient donc la tâche d'associer l'une de ces positions prosodiques à chaque phrase entendue et de reporter leurs réponses dans un fichier excel joint. Les juges pouvaient réécouter autant de fois que voulu chaque phrase. L'ensemble des phrases formait un corpus de 9 min à écouter. Les auditeurs ont consacré en moyenne 20 à 30 minutes pour ce test.

Quand trois des quatre auditeurs ont donné un jugement commun: nous avons redéfini cet énoncé par le codage prosodique choisi par ces auditeurs. Les 12 occurrences d'énoncés IP, GA et W ont tous été respectivement codé par les conditions IP, GA et W. 49 occurrences ont été exclues et abandonnées de notre étude car elles n'avaient pas trouvé l'approbation d'au moins trois auditeurs.



Les résultats de ce test sont présentés dans le Tableau 16.

	IP	GA	W	total
Type 1	11	71	0	82
Type 2	13	11	0	24
Type 3	5	8	0	13
total	29	90	0	119

**Tableau 16: Résultats du test perceptif montrant la condition prosodique choisie par les auditeurs, tous locuteurs confondus.**

Les 29 énoncés ambigus associées à la position IP et les 90 énoncés ambigus associées à la position GA par les auditeurs, ont été respectivement intégrés à nos données comme des conditions IP et GA. Notons, cependant, la pause demeure un critère essentiel à la distinction de la position IP avec les autres positions car les voyelles en position IP sont le plus souvent précédées d'une pause (91% des cas pour S1, 94% pour S2, 98% pour S3, 94% pour S4).

- **Détermination de la présence/absence d'un accent initial sur la voyelle cible, en position IP**

Afin de déterminer de l'absence ou de la présence d'un accent initial sur la voyelle Vcible, nous avons entrepris de segmenter la voyelle qui suit cette voyelle cible, que nous avons nommé V2 : [V1C1#VcibleCV2]. Nous avons comparé les valeurs moyennes de la fréquence fondamentale sur la voyelle [Vcible] aux valeurs observées sur la voyelle [V2]. La voyelle [V2] a été uniquement segmentée sur une sélection pour les séquences suivies d'une seule consonne c'est à dire pour les voyelles cibles /i/, /e/, /a/, /o/, /ø/, /œ/, /u/, /y/. Pour les voyelles mi-ouvertes /ɔ/ et /ɛ/, qui sont suivies de deux consonnes, respectivement /kʒ/ (voir Tableau 11) et /vm/ (voir Tableau 11), nous n'avons pas pu déterminer si elles avaient été produites avec un accent initial. La segmentation suit le codage utilisé pour la voyelle V1 et Vcible (voir 3.4).

La Fréquence fondamentale moyenne correspond à la moyenne des valeurs de F0 de tous les échantillons compris entre 33 % et 66% de la durée acoustique de la voyelle, ce qui permet de ne pas prendre en compte les micro-pics caractérisant la fréquence fondamentale en début de voyelle précédée d'une consonne sourde. Nous avons également extrait automatiquement la valeur de Fo sur l'ensemble de la voyelle toutes les 5 ms afin de caractériser l'évolution du contour mélodique de la voyelle.

En position IP, nous avons calculé l'écart-type de la Fréquence fondamentale (valeur moyenne) de la voyelle cible pour chaque catégorie de voyelle et pour chaque locuteur. Cette valeur d'écart-type a été ajoutée à la valeur de la fréquence fondamentale trouvée pour la voyelle v2. Quand la fréquence fondamentale de la voyelle cible est supérieure à cette nouvelle valeur de fréquence fondamentale (F0 de v2 + écart-type de vcible) nous avons considéré qu'il existait un accent initial.

12% des occurrences pour S1, 2% des occurrences pour S2, 33% des occurrences pour S3 et 4% des occurrences pour S4, ont été produites avec un accent initial.

### 3.5 Premiers travaux avec trois frontières prosodiques : pour n'en garder que deux

Dans un premier travail sur les variations acoustiques (F1, F2, F3 et F3-F2) des voyelles /i, e, a, y, ø/ en position initiale de constituants prosodiques (Georgeton, Audibert & Fougeron, 2011, voir annexe 3), nous avons considéré, pour 4 locuteurs, la réalisation acoustique de ces voyelles en début de groupe intonatif (IP), en début de groupe accentuel (GA) et en début de mot (W). Cette étude montre que les variations des formants observées en fonction du constituant prosodique sur les voyelles distinguent clairement la position IP de la position W. La position GA, quant à elle, montre plusieurs patterns différents selon le locuteur étudié, la voyelle étudiée et l'indice acoustique étudié. Trois patterns ont été observés : soit la position GA se distingue des deux positions IP et W, soit GA est similaire à IP ou similaire à W. Cette étude préliminaire est en accord avec les résultats observés des études de Fougeron (1998), Meynadier (2003) pour lesquelles, le marquage prosodique entre ces trois positions prosodiques peut être variable selon le locuteur, le segment étudié et/ou le paramètre étudié. Cette distinction claire entre la position prosodique IP et W, le fait que ces positions prosodiques « extrêmes » soient également celles qui sont choisies aujourd'hui (voir Kim & Cho 2011 et 2012, entre autres) nous a poussé à ne pas considérer, dans la suite de notre travail, la position GA.

Le corpus étudié pour cette thèse pour répondre à notre problématique de renforcement prosodique se limite à l'observation de la réalisation des voyelles orales du français placées en position initiale des deux conditions IP et W. Les données acoustiques de cette thèse sont résumées dans le Tableau 17:

voyelles	10
conditions prosodiques	2
locuteurs	4
répétitions	16
occurrences rejetées	163
total	1117

**Tableau 17 : Résumé du nombre d'items acoustiques pris en compte pour cette thèse.**

Les occurrences rejetées correspondent aux 49 énoncés retirés après le test de perception et à 114 items pour lesquelles l'analyse acoustique n'a pas permis de détecter les formants.

Nous avons un ensemble de **1117 items acoustiques**, organisés comme suit :

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/u/	/o/	/ɔ/	/y/	/ø/	/œ/	total
IP	50	53	53	44	54	50	57	56	53	47	517
W	58	57	56	62	59	57	62	65	59	65	600
total	108	110	109	106	113	107	119	121	112	112	1117

**Tableau 18: Récapitulatif des items acoustiques, par voyelle et par condition prosodique IP et W, pris en compte pour cette thèse.**

## 4. ACQUISITION ET ANALYSE DES DONNEES

### 4.1 Le système d'acquisition physiologique

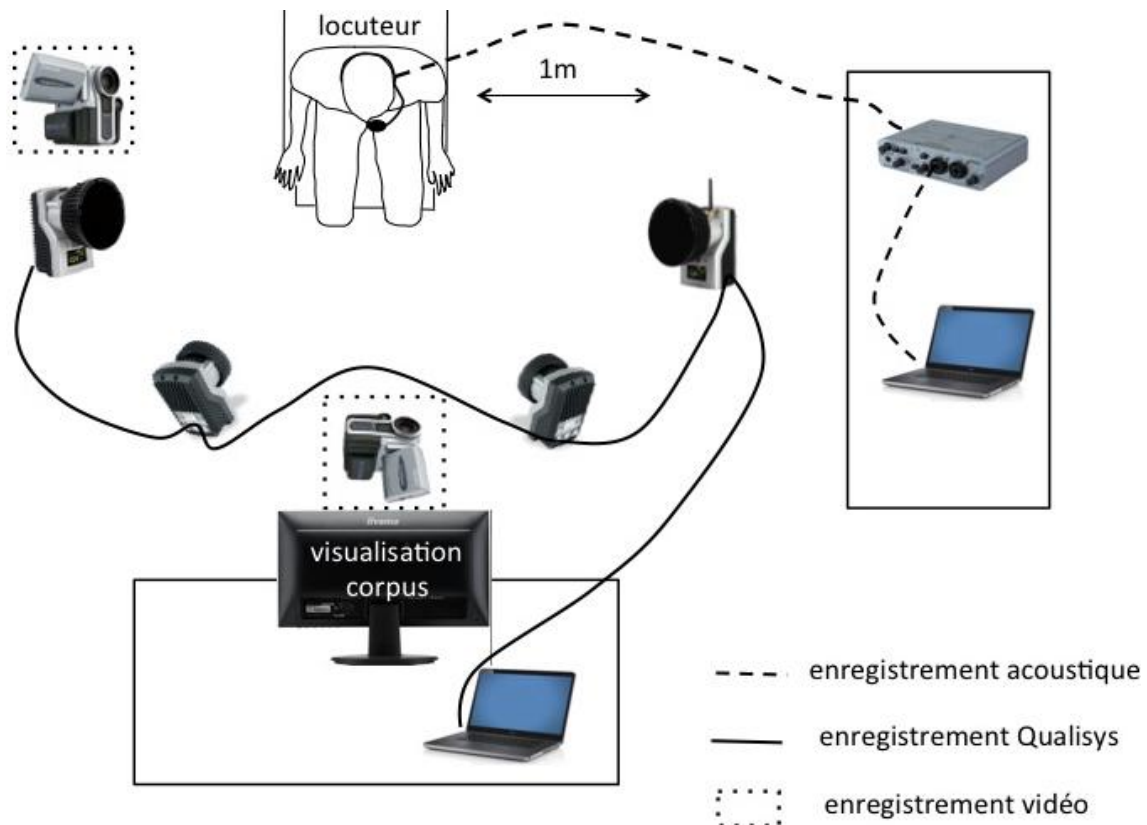


Figure 21: schéma du système d'acquisition physiologique utilisé dans cette thèse

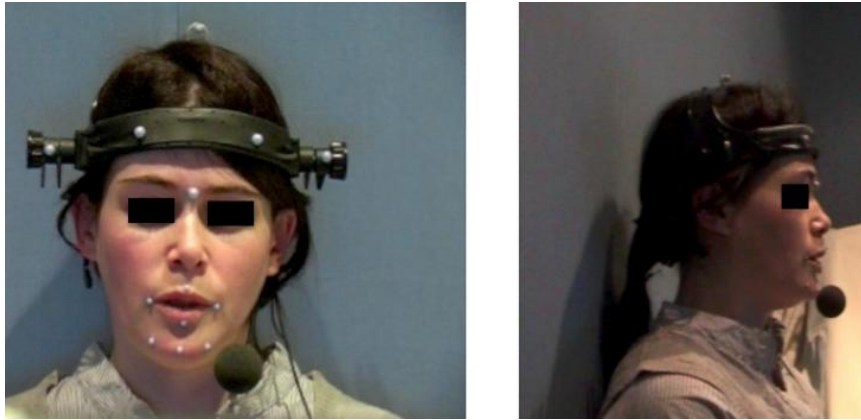
Dans cette thèse, trois types de données sont analysés :

- des données vidéo sur lesquelles ont été extraites les mesures labiales (étirement, aperture) sur le contour interne des lèvres. Ces données sont exploitables pour les 4 locuteurs de cette étude.
- des données issues d'un appareil de capture de mouvement (Qualisys) sur lesquelles ont été extraites les mesures de protrusion et une estimation de l'abaissement de la mâchoire (abaissement du menton). Suite à un problème lors de l'enregistrement de ces données pour l'un des locuteurs, nous disposons de mesures de protrusion et de menton pour seulement 3 des 4 locuteurs.
- des données audio sur lesquelles ont été extraites les mesures acoustiques. Ces données sont exploitables pour les 4 locuteurs de cette étude.

Nous allons présenter une à une ces données.

- **Données vidéo**

Deux caméras de type Sony DCR PC8 de fréquence d'échantillonnage 25 Hz, ont été positionnées à environ un mètre en face et à droite du locuteur (voir Figure 21, Image 1).



**Image 1: images face et profil de l'enregistrement du mouvement des lèvres via 2 caméras de type SONY DCR PC8. (les données de profil n'ont pas été utilisées).**

- **Données issues d'un appareil de capture de mouvements (Qualisys)**

Nous avons utilisé le système de capture de mouvements Qualisys (<http://www.qualisys.se>) pour enregistrer nos données articulatoires. Le principe des caméras infra-rouge consiste à détecter et enregistrer la position de marqueurs réfléchissants placés sur le sujet à des localisations biomécaniques cibles comme les commissures des lèvres, le menton. Un rayonnement infra-rouge est généré par les 4 caméras placées autour du sujet, et par contraste avec les autres sources lumineuses de la pièce, les caméras vont générer un trigger toutes les 10 ms et ainsi enregistrer les positions de ces marqueurs à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Les marqueurs utilisés sont des marqueurs dits « passifs », il reflète la lumière infra-rouge ambiante ou projetée et ont l'avantage de faciliter le mouvement contrairement à l'utilisation des marqueurs dits « actifs » du type Optotrack, où chaque diode électroluminescente placée sur le sujet est reliée aux appareils de mesures. Un traitement via le logiciel Qualisys Track Manager (<http://www.qualisys.se>), permet de reconstruire en 3D la position de chacun de ces marqueurs dans l'espace. Le micro-casque utilisé pour l'acquisition des données acoustiques est relié à ce logiciel QTM. Ce dernier génère des triggers toutes les 10 ms permettant ainsi une synchronisation entre le signal acoustique (du micro-casque) et le signal Qualisys (généré par les caméras). Une calibration est nécessaire avant toute session d'enregistrement. Cette calibration consiste à positionner, au centre des quatre caméras Qualisys, une équerre (fournie avec les caméras Qualisys) comportant un marqueur réfléchissant sur chaque extrémité. L'expérimentateur utilise alors une « magic wand » (comme nommé dans le logiciel QTM) correspondant à un petit râtelier sur lequel deux marqueurs Qualisys sont positionnés. L'expérimentateur doit ensuite balayer l'espace entre l'équerre et les caméras pendant un temps décidé par le logiciel QTM lors de la calibration. Cette étape permet de vérifier que chaque caméra détecte l'ensemble des marqueurs et d'enregistrer l'ensemble des coordonnées. La reconstitution 3D et la synchronisation avec l'enregistrement acoustique sont rendues possible par le logiciel QTM (Qualisys Track Manager).

Différentes tailles de marqueurs existent (de 2,5 mm à 4 cm) et peuvent ainsi s'adapter aux types de mouvements étudiés. Ici, nous avons choisi d'utiliser deux tailles de marqueurs, les marqueurs de 2,5 mm de diamètre et ceux de 4 mm.

Pour l'étude des variations aux lèvres et afin de ne pas gêner la production de la parole et le mouvement labial) :

- 4 marqueurs de 2,5 mm de diamètre ont été positionnés sur le vermillon des lèvres
  - o sur les commissures droite et gauche des lèvres
  - o sur les lèvres supérieure et inférieure, suivant un axe vertical passant par l'arc de cupidon.

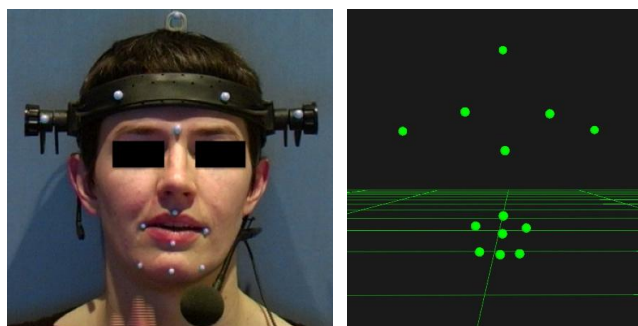
Pour l'étude des variations de la mâchoire / menton:

- 3 autres marqueurs de 2,5 mm de diamètre ont été positionnés sur le menton, afin de donner une approximation du mouvement de la mâchoire
  - o chacun suivant un axe imaginaire passant par la commissure droite, un axe passant par la commissure gauche et enfin un axe passant par l'arc de cupidon.
  - o On note que le mouvement de ces capteurs ne reflète pas exactement le déplacement de la mâchoire car ils sont notamment influencés par le glissement de la peau au niveau du menton. Nous les considérons donc comme une approximation des mouvements de la mâchoire.

Pour la constitution d'une référence :

- 5 marqueurs plus larges (4 mm) ont été positionnés sur un casque
- 1 dernier marqueur de 4 mm a été placé entre les 2 sourcils, dans la continuité de l'arête du nez

Ces 6 marqueurs nous seront utiles dans la suite de ce travail. Ceux sont ces marqueurs qui seront utilisés pour construire un plan de référence.



**Image 2: positions des différents marqueurs sur le visage du locuteur S2, à gauche image prise lors de l'enregistrement, à droite image résultante sur le logiciel QTM.**

#### • Données audio

L'acquisition du signal acoustique a été faite à l'aide d'une carte son ROLAND EDIROL UA 25 à une fréquence d'échantillonnage de 44 100 Hz et une quantification de 16 bits par échantillon via un micro-casque de type Shure SM 10A (voir Figure 21).

Afin de pouvoir extraire les mesures voulues dans cette thèse, un post-traitement des données a été nécessaire. Nous en présentons les étapes dans le chapitre suivant.

## 4.2 Le post-traitement des données

- **Post-traitement des données Qualisys**

Après les sessions d'enregistrement, la 1<sup>ière</sup> étape consiste à nommer chaque marqueur sur le logiciel QTM (Qualisys Track Manager). Dans le traitement de ces données, les marqueurs ont successivement été identifiés comme :

1. casque 1, 2, 3, 4 correspondant à l'ensemble des 4 marqueurs placés sur le casque (posé sur la tête de chacun des locuteurs enregistrés)
2. nez arête
3. lèvres supérieure, inférieure, droite, gauche (ensemble des marqueurs placés sur le vermillon des lèvres)
4. menton droite, milieu et gauche (ensemble des marqueurs placés sur le menton, comme observé sur l'Image 3).

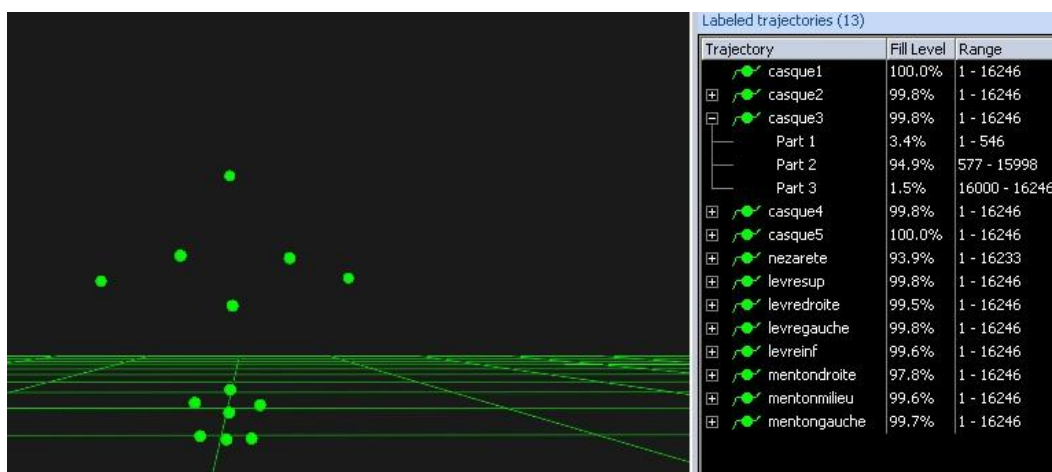


Image 3 : visualisation des marqueurs posés sur le visage d'un locuteur via le logiciel qtm.

La dernière étape de traitement consiste à exporter l'ensemble des données en .mat, afin de pouvoir exploiter les données sur Matlab. Ces données .mat se présentent comme un ensemble de points x, y, z pour chacun des 13 marqueurs utilisés. Pour ces données, un problème lors de l'acquisition des données nous a empêché de considérer les réalisations du 4<sup>e</sup> locuteur (S4). Pour les mesures de protrusion, d'abaissement du menton et de la configuration externe des lèvres, trois locuteurs sur quatre seront considérés.

- **Synchronisation entre la vidéo et le Qualisys**

Pour synchroniser les deux systèmes d'acquisition vidéo et Qualisys, nous avons utilisé les signaux acoustiques du micro-casque et du micro interne de la caméra. Un point de synchronisation a été repéré dans

ces deux fichiers audio. Ce point de synchronisation correspond au claquement de mains produit par les locuteurs à chaque début de session. Dans les cas où cet instant ne pouvait être localisé précisément, la première période voisée d'une voyelle réalisée en initiale a été considérée comme point de synchronisation. Au moyen de scripts Matlab, les données ont été alignées et coupées pour correspondre à un signal d'une durée multiple de celle d'une trame vidéo (40 ms). Les données suivantes ont été extraites : (1) les signaux audio issus de l'enregistrement micro-casque et le signal de synchronisation par trigger correspondant (Qualisys), (2) l'étiquetage des séquences phonétiques des segments et des frontières prosodiques, (3) les images .jpg correspondant aux trames vidéo de la séquence extraite (4) les trajectoires en 3 dimensions des marqueurs Qualisys sous forme d'une structure de données Matlab de même format que celle générée par QTM. Cette structure est complétée par les temps effectifs des trames Qualisys, localisés par détection des triggers. Le signal audio issu de la caméra vidéo, de moins bonne qualité que celui issu du micro-casque (Qualisys), n'a été exporté que pour permettre de vérifier a posteriori la synchronisation.

Etant donné que la fréquence d'échantillonnage n'est pas la même entre la vidéo et le Qualisys, deux possibilités ont été considérées pour vérifier la synchronisation des deux systèmes : soit extraire la trame Qualisys la plus proche du début de la trame vidéo (mesures alignées, supposées correspondre le mieux aux données vidéo dans le cas d'une synchronisation audiovisuelle parfaite du système d'acquisition vidéo), soit extraire la moyenne des 4 trames Qualisys correspondant à la trame vidéo courante (mesures moyennées). Les deux mesures Qualisys, alignées vs moyennées, ont été testées afin de pouvoir évaluer quelle version est la plus corrélée aux données vidéo. Une condition de contrôle a été définie en annotant sur la vidéo les positions des marqueurs Qualisys disposés sur le contour externe des lèvres. Cette annotation de contrôle a été réalisée sur un total de 40 séquences [ipap], [ipip], [ipyp] pour trois locutrices. Le Tableau 19 résume les corrélations observées en condition contrôle pour les mesures moyennées et les mesures alignées sur l'étirement et l'aperture (externe).

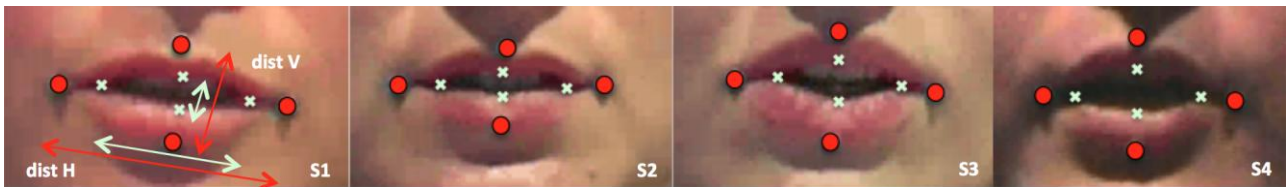
Contour externe	aperture	étirement
Mesures moyennées	0,91	0,84
Mesures alignées	0,88	0,80

**Tableau 19: Corrélations moyennes, tous locuteurs confondus, des distances verticale et horizontale externes issues de Qualisys (mesures moyennées et alignées) et de la vidéo.**

Les corrélations sont plus élevées pour les mesures moyennées que ce soit pour l'aperture et pour l'étirement. Les corrélations moins élevées pour les mesures alignées peuvent s'expliquer par l'incertitude de synchronisation audiovisuelle du système d'acquisition vidéo. La corrélation est plus élevée sur les mesures d'aperture que sur les mesures d'étirement. Cet écart pourrait provenir d'une imprécision plus importante pour l'annotation des positions exactes de marqueurs placés aux commissures comparativement à ceux placés au-dessus et en-dessous des lèvres. A la lumière de ses résultats de validation de la synchronisation, nous avons pris en considération les mesures moyennées, correspondant à la moyenne de 4 trames Qualisys.

- **Post-traitement des données vidéo**

Les enregistrements vidéo ont été numérisés puis exportés en séquences JPEG. Le signal acoustique issu du micro interne de la caméra a également été extrait au format .wav échantillonné à 44 100 Hz. A l'aide de scripts Matlab, les trames vidéo correspondant au signal acoustique de la voyelle (avec deux trames vidéo en plus au début et à la fin de la voyelle) ont été extraites. Le contour interne des lèvres a pu être annoté manuellement sur chaque trame vidéo, en agrandissant la région des lèvres du locuteur, afin de permettre une meilleure précision d'annotation (comme observé sur l'Image 4). En moyenne, cinq trames vidéo ont été annotées pour chaque voyelle. Environ 6900 trames vidéo ont donc été manuellement annotées. Pour chacune de ces trames, quatre points ont été manuellement déterminés sur le contour interne des lèvres du locuteurs. Ces quatre points correspondent aux positions des commissures internes des lèvres gauche et droite, le milieu des lèvres inférieure et supérieure (côté interne des lèvres, correspondant aux croix sur l'Image 4).



**Image 4: Illustration des quatre points du contour interne annotés (croix) et de leur position par rapport aux marqueurs Qualisys (ronds) pour les 4 locutrices (S1, S2, S3, S4)**

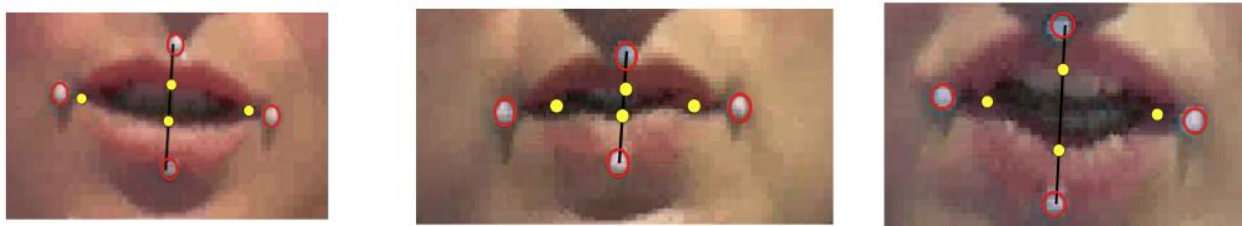
Comme illustré sur l'Image 4, les points du contour interne, a priori moins évidents à localiser que les commissures, ont été repérés en suivant une ligne imaginaire formée par les marqueurs du Qualisys (permettant, par la suite, de faire une comparaison entre mesures).

- **Comparatif des mesures labiales prises avec Qualisys et avec vidéo: Georgeton & Audibert 2012 (voir annexe 3)**

A ce stade de l'étude, deux appareils de mesures nous permettent de rendre compte de la configuration des lèvres. Le premier, la vidéo, nécessite un post-traitement assez lourd, mais les mesures sont extraites pour l'ensemble des 4 locuteurs. Le second, le qualisys, nécessite un post-traitement plus aisé, mais les mesures ne sont extraites que pour trois des quatre locuteurs. Afin de choisir lequel des deux appareils serait le plus performant à rendre compte des variations labiales, nous avons fait une comparaison entre les deux appareils. Pour cela, nous avons comparé les différences entre les deux systèmes de mesures (i.e. Qualisys et vidéo) quant à leur potentiel à rendre compte des différences entre voyelles, locuteurs et positions prosodiques. Les réalisations articulatoires des voyelles /i, a, y/ ont été étudiées dans des phrases V1C1#V2C2 où V2 : /i, a, y/, V1 : /i/ et C1, C2 : /p/, pour trois locuteurs (S1, S2 et S3). Dans cette étude, nous avons fait le choix d'intégrer trois positions prosodiques : IP, GA et W. L'appareil de mesure est considéré comme performant dans la mesure où les distinctions entre les trois positions prosodiques sont



observées, sur les mesures d'étirement et/ou d'aperture. Tous locuteurs confondus, nous obtenons un ensemble de 306 énoncés à étudier avec 104 énoncés pour V2 : /a/, 100 pour V2 : /i/ et 102 pour V2 : /y/.



**Image 5 : Illustrations des quatre points mesurés par le Qualisys (points rouge) et par la vidéo (points jaune) pour les trois locutrices : S1 (à gauche), S2 (au milieu) et S3 (à droite).**

Les résultats de cette étude, présentés en annexe 3, ont donc montré que les mouvements labiaux captés par la vidéo ne sont pas directement corrélés aux mouvements labiaux pris par le Qualisys. Quant à la distinction entre les voyelles /i, y, a/, les mesures Qualisys et vidéo rendent compte d'une hiérarchie différente selon l'instrumentation utilisée sur les mesures d'aperture et d'étirement. Un locuteur se distingue particulièrement des autres : S2. Sur les photos de la configuration labiale des trois locuteurs étudiés (Image 5), on peut voir que la physiologie des lèvres est différente et plus variable sur les marqueurs Qualisys (points rouge) que sur les points effectués sur la vidéo (points jaune). Enfin, l'observation des distinctions entre positions prosodiques montre que les mesures prises par la vidéo permettent de rendre compte de différences entre les positions prosodiques ce qui n'est pas le cas pour les mesures prises sur le Qualisys.

Pour conclure, nous pouvons dire que le traitement de la vidéo est un traitement coûteux car manuel et effectué a posteriori (contrairement à l'utilisation des marqueurs Qualisys dont les coordonnées sont extraites de façon automatique), mais il permet d'obtenir des mesures labiales qui s'avèrent plus à même de rendre compte de phénomènes articulatoires fins comme la distinction entre positions prosodiques et permet de considérer les variations labiales en se libérant des différences entre locuteurs (notamment sur la mesure d'étirement). Pour ces deux raisons et également parce que les données vidéo étaient disponibles pour les 4 locuteurs, nous avons pris le parti méthodologique d'étudier les mesures prises par la vidéo pour notre étude, pour les mesures d'étirement et d'aperture.

- **Choix dans la mesure de protrusion: Georgeton & Audibert 2014**

Nous avons néanmoins gardé les données Qualisys afin d'obtenir une mesure de protrusion. Dans la littérature, nous avons pu constater que 3 mesures de protrusion pouvaient être utilisées :

- le déplacement en avant de la lèvre supérieure
- le déplacement en avant de la lèvre inférieure
- le déplacement en avant de la commissure des lèvres.

Nous avons donc voulu comparer ces 3 mesures quant à la capacité à rendre compte du mouvement de protrusion entre les voyelles [±arrondi].

Les résultats montrent que la mesure la plus à même de rendre compte de la différence entre les voyelles antérieures arrondies et non-arrondies du français est l'avancement de la commissure des lèvres.

Pour les trois locutrices pour lesquelles les données Qualisys étaient exploitables, elle est la seule mesure à rendre compte de la distinction entre voyelles [ $\pm$ arrondi]. Cette mesure est également celle qui rend le mieux compte des changements acoustiques attendus c'est-à-dire l'abaissement des formants F3 et F2 dans les voyelles arrondies vs non-arrondies, ainsi que la réduction de la distance focale F3-F2 dans le cas de la paire /i-y/, suggérant une meilleure prise en compte de l'allongement de la cavité antérieure. Ces résultats sont également en accord avec les résultats de Abry et Boe (1980).

### 4.3 Les mesures (acoustiques et articulatoires)

Toutes les mesures articulatoires ont été extraites au milieu acoustique de la voyelle.

**MESURES ARTICULATOIRES** (voir Figure 22)

- **Mesures directes :**

- **La protrusion (en mm) : (3/4 locuteurs, S1, S2, S3)**

Le mouvement de protrusion correspond au déplacement, dans un plan sagittal, du point situé à équidistance des marqueurs Qualisys aux commissures gauche et droite des lèvres et d'un point de référence : l'arête du nez. Les valeurs de protrusion ont été normalisées par la soustraction de la valeur minimale relevée pour chaque locuteur. Ceci nous a permis d'obtenir des valeurs positives plus facilement interprétables.

- **Estimation de l'abaissement du menton (en mm) : (3/4 locuteurs, S1, S2, S3)**

Le mouvement du menton correspond au déplacement, dans un plan coronal, du marqueur du milieu situé sur le menton et d'un point de référence : l'arête du nez. Cette mesure a été normalisée en soustrayant la valeur minimale à chaque valeur, comme décrite pour les mesures de protrusion.

- **Étirement (en pixels) : (4/4 locuteurs)**

L'étirement correspond à la distance entre les commissures droite et gauche des lèvres (plan horizontal), annoté manuellement sur les images vidéo (voir 4.2).

- **Aperture (en pixels) : (4/4 locuteurs)**

L'aperture correspond à la distance verticale entre les points, annotés manuellement sur les images vidéo et se situant dans la continuité de l'arc de cupidon sur la lèvre supérieure et sur la lèvre inférieure.

- **Mesures combinées :**

- **Aire du contour interne (en pixels) (4/4 locuteurs)**

Une façon simple d'estimer l'aire aux lèvres à partir des points disponibles sur les données vidéo consisterait en une approximation par une ellipse reliant les 4 marqueurs, ce qui suppose toutefois une forme de bouche parfaitement symétrique, ce qui n'est physiologiquement pas possible. Dans ces conditions, et à défaut d'un modèle de mouvement des lèvres adapté aux productions de chaque locutrice, l'estimation de l'aire interne aux lèvres par celle d'un polygone reliant les points annotés a donc été considérée comme une approximation acceptable.

- **K2 (étirement / aperture) (en pixels) (4/4 locuteurs)**

Cette mesure rend compte du caractère plus ou moins arrondi (indépendamment de la taille de l'orifice labial). K2 est élevé quand la mesure d'étirement est plus élevée que la mesure d'aperture : K2 est donc élevé pour les voyelles non-arrondies et K2 est bas quand la mesure d'aperture est plus élevée que la mesure d'étirement : K2 est donc bas pour les voyelles arrondies.

## MESURES ACOUSTIQUES

- **Mesures spectrales (en Hz)**

La mesure des formants a été extraite automatiquement et correspond à la moyenne des valeurs de formants compris entre 33 % et 66 % de la durée acoustique. Après avoir rejeté les valeurs formantiques aberrantes, nous avons trié les valeurs moyennes des formants de chaque voyelle selon la position prosodique, pour chaque locuteur. Dans une procédure de vérification des extractions automatiques, nous avons calculé l'écart-type de ces valeurs moyennes. Nous avons ensuite isolé les voyelles dont les valeurs formantiques étaient soit supérieures à 2 écart-types, soit inférieures à 2 écart-types. Ces valeurs formantiques ont été corrigées en déterminant les valeurs correctes par inspection visuelle des spectrogrammes.

- les formants F1, F2, F3 pour chaque voyelle et le formant F4 pour la voyelle /i/ ont été extraits.
- Pour les voyelles focales, caractérisées par un rapprochement de deux formants, la distance entre les formants F2-F1 est considérée pour les voyelles postérieures (/u/, /o/ et /ɔ/), la distance entre les formants F3-F2 est considérée pour la voyelle /y/ et la distance entre les formants F4-F3 est considérée pour la voyelle /i/.
- La distance euclidienne entre chaque voyelle et le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3 (pour les voyelles antérieures) en position IP et W a été calculée, afin de rendre compte de l'étendu de l'espace acoustique du système vocalique sur ces plans F1/F2 et F2/F3

- **Durée acoustique (en msec)**

Nous avons vu que les limites de la voyelle ont été fixées d'après le début et la fin du second formant. La durée des voyelles a ainsi été calculée automatiquement sur la base de cette segmentation et extraite pour chaque voyelle.

- **Intensité globale (en dB)**

Les mesures d'intensité suivent les mesures observées sur les mesures de formants et de fréquence fondamentale et correspond à la moyenne des valeurs d'intensité entre 33% et 66 % de la durée acoustique. Ces mesures ont été extraites sur l'ensemble des voyelles. Il nous faut mentionner que ces mesures d'intensité ne représentent qu'une indication grossière de l'intensité réelle, mais comme nous avons utilisé un micro-casque les mesures relevées sont comparables entre elles.

#### 4.4 Analyses statistiques menées dans cette thèse

Avant de présenter nos résultats, nous avons souhaité justifier la méthodologie statistique mise en place dans cette thèse pour répondre aux hypothèses d'études précédemment développées (voir 2.5).

Les analyses statistiques ont été effectuées grâce à l'environnement de travail R (R development Core Team, 2008). Nous avons pris le parti de tester nos hypothèses avec des tests de type ANOVAs. L'ANOVA (ANalysis Of VAriance) est un test statistique de régression pour lequel la somme totale des carrés des écarts à la moyenne de l'ANOVA correspond à celle de la régression avec les facteurs catégoriels. Cette analyse permet de vérifier si une ou plusieurs variables dépendantes (variables à expliquer i.e. les paramètres acoustiques et articulatoires) sont en relation avec une ou plusieurs variables indépendantes (variables explicatives i.e. 'position prosodique', 'locuteurs', 'voyelles'). Il s'agit donc d'une analyse factorielle. En appliquant une ANOVA sur nos données, nous supposons que chaque échantillon analysé est indépendant des autres échantillons. Dans cette perspective, la répétition d'une voyelle dans une position prosodique donnée est considérée comme distincte de la répétition de cette même voyelle dans cette même position prosodique. Cette approche peut être discutable, mais elle nous a paru la plus cohérente pour répondre à nos questions d'études. Nous développons ci-dessous les raisons de ce choix méthodologique.

La plupart des études qui se sont intéressées à l'influence de la position prosodique ou de l'accent (voir particulièrement les études de Cho 2001, 2005), ont mené des analyses statistiques en considérant leurs échantillons comme des mesures répétées. Ainsi chaque échantillon est répété plusieurs fois et les statistiques sont menées sur la moyenne de ces répétitions : « Each point is an averaged value over four repetitions of each prosodic and vowel context » (Cho, 2001, p39). Cependant, dans le cas de mesures répétées, il est préférable d'avoir un nombre de données homogènes, ce qui n'est pas notre cas. Compte tenu des difficultés d'enregistrement et de l'abandon de certaines données articulatoires et acoustiques lors du post-traitement des données (voir 4.2), nous avons rejeté la perspective de supprimer une nouvelle fois des occurrences dans le seul but d'harmoniser le nombre de répétitions. En accord avec les propos d'Harrington (1998, p19) « The need to average across repetitions of the same materials for certain kinds of statistical test described in Max & Onghena (1999) seems justifiably bizarre to many experimental phoneticians, especially in speech physiology research in which the variation, even in repeating the same materials, may be so large

that an average or median becomes fairly meaningless.»<sup>23</sup>, nous n'avons pas choisi de mener un test statistiques de type ANOVA à mesures répétées.

Un autre type de tests statistiques est aujourd'hui mené pour traiter des données phonétiques : les modèles mixtes. Ces analyses statistiques correspondent à une série de modèles de régressions linéaires multiples à effet mixtes (Linear Mixed effects Models, LMM) dans le cas où la variable est continue, comme dans nos données. Ce type d'analyse présente deux avantages : (a) celui d'être plus robuste pour traiter un plan expérimental déséquilibré comme l'expliquent Onghena & Max (1999) « the Mixed Model is recommended when a more sophisticated analysis is required. This might be the case, for example, if there are missing data points, if the measurement occasions are unequally spaced, or if there are changing covariates »<sup>24</sup> (p264) et (b) celui de considérer de nombreuses répétitions sans les moyenner (Quené & Van den Bergh, 2008). De plus, les modèles mixtes intègrent des facteurs à effets fixes et des facteurs à effets aléatoires. La distinction entre effet fixe et effet aléatoire dépend du type de traitement que veut effectuer l'expérimentateur sur l'effet considéré. Ainsi, le facteur est désigné comme « fixe » dans le cas où l'objectif de l'expérimentateur est de comparer les niveaux de l'effet sur la variabilité dépendante. Le facteur est désigné comme « aléatoire » si les niveaux de l'effet ne sont pas sous le contrôle de l'expérimentateur, ainsi « The subjects and the words can be entered as so-called random factors into the same calculation. »<sup>25</sup> (Harrington, 1998, p19). Dans nos données, les variables 'position prosodique', 'locuteurs' et 'phonème' peuvent être considérées comme des facteurs fixes et les variables 'répétitions' et 'locuteurs' peuvent être considérées comme des facteurs aléatoires. Nous avons appliqué ce modèle à nos données et nous présentons les résultats dans l'annexe 3 à la fin de la thèse. Si les résultats observés avec les modèles mixtes rendent compte d'un effet global de la position prosodique sur la réalisation des voyelles orales du français, l'objectif de ce travail est de mener une descriptive fine de l'effet de la position prosodique voyelle par voyelle mais également locuteur par locuteur. Dans cette perspective, la méthode statistique adéquate serait celle de développer un modèle par voyelle et/ou par locuteur étudiés. Dans nos données, le nombre insuffisant de répétitions par voyelles et le nombre insuffisant de locuteurs ne nous permettent pas de mener cette étude statistique. Dans cette perspective et dans le but d'analyser l'effet voyelle par voyelle, le test statistiques de l'ANOVA simple, nous a semblé le plus adéquat.

Enfin, dans le cadre de l'ANOVA, on a cherché à savoir si les différences des moyennes de la variable dépendante entre les niveaux d'un facteur sont significatives ou non. Nous avons choisi de mener les tests post hoc HSD de Tukey car il est considéré comme plus conservateur que le test SDL de Fisher. Quand les niveaux d'une variable dépendante sont nombreux (supérieurs à 2 niveaux), il est conseillé d'appliquer une

---

<sup>23</sup> « La nécessité de moyenner les répétitions d'un même matériel peut sembler dans certains types de tests statistiques décrits dans Max & Onghena (1999) peu adéquate pour de nombreux phonéticiens expérimentaux et en particulier dans des études sur la parole physiologique dans laquelle la variation, même en répétant les mêmes matériaux, peuvent être si grand que la moyenne ou la médiane devient assez vide de sens. » Traduction personnelle

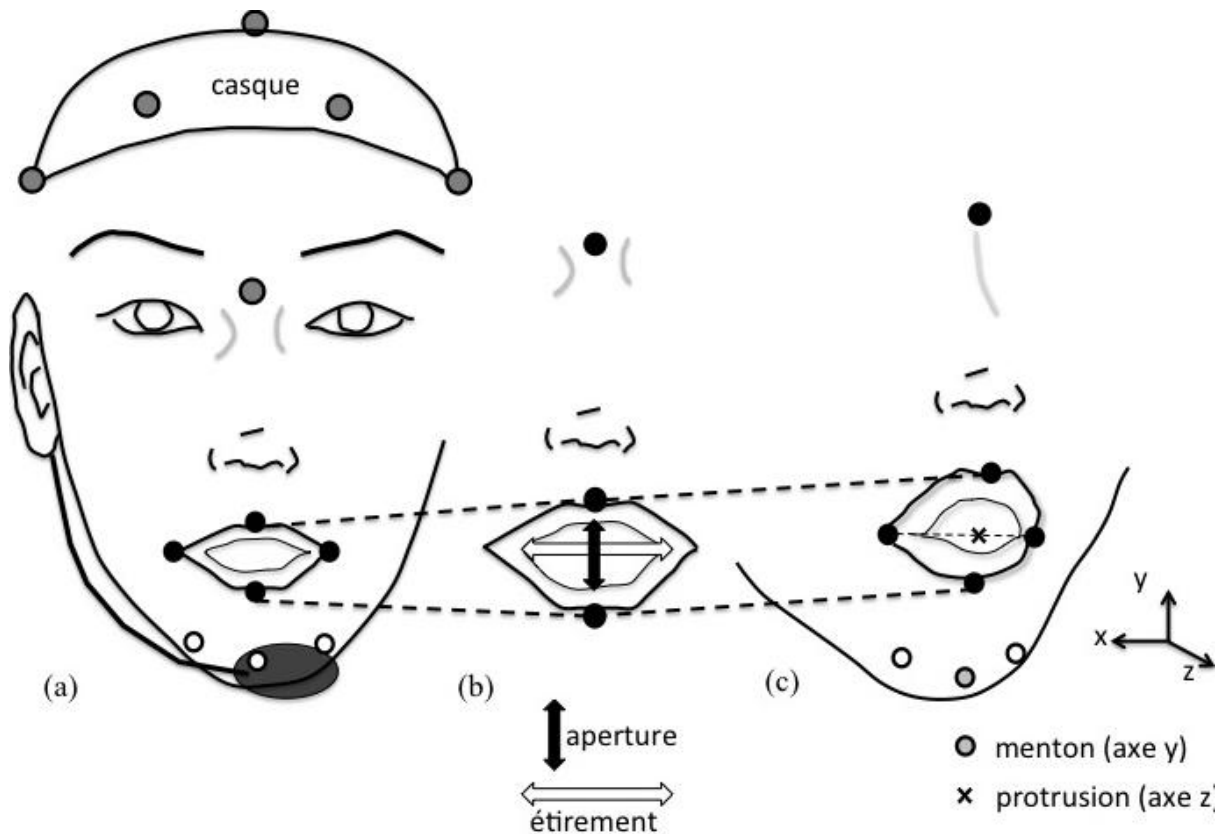
<sup>24</sup> « Le modèle mixte est recommandé quand une analyse plus poussée est nécessaire. Ce pourrait être le cas, par exemple, quand il y a des données manquantes, si les mesures sont inégalement espacées ou encore s'il y a des changements de variables. » Traduction personnelle

<sup>25</sup> « Les sujets et les mots peuvent être saisis comme des facteurs dits aléatoires dans le même calcul. » Traduction personnelle

correction, la plus célèbre étant celle dite de Bonferroni (voir Cho, 2001). Cette correction consiste à majorer le risque réel pour l'ensemble des tests (impossible à déterminer) par le niveau de test choisi (en général 5%), et en divisant pour cela le niveau de chacun des tests effectués par le nombre total de tests. Dans notre cas, et parce que nous avons choisi de mener une étude statistique voyelle par voyelle (voir chapitre 7 de cette thèse), le facteur étudié est de 2 niveaux (i.e. IP vs W) ce qui nous dispense de procéder à cette correction.

## 5. RESUME DE LA METHODE : DONNEES TRAITÉES

La Figure 22 donne un schéma récapitulatif des mesures articulatoires extraites dans ce travail : apertures et étirement via les données vidéo et protrusion et abaissement du menton via le Qualiys.



**Figure 22 : Schéma récapitulatif des mesures articulatoires prises dans ce travail. En (a), positionnement des marqueurs Qualiys, sur le visage du locuteur (en gris : marqueurs de références, en noir : marqueurs des lèvres, en blanc : marqueurs du menton). En (b), agrandissement des lèvres dans un plan frontal, mesures prises via la vidéo sur le contour interlabial (flèche blanche : étirement ; flèche noire : apertures). En (c), agrandissement des lèvres dans un plan sagittal, mesures prises via le Qualiys (croix : point à équidistance des deux commissures des lèvres, mesure de protrusion correspond au déplacement de cette croix dans le plan z ; marqueurs blancs : marqueur du milieu retenu pour mesurer l'abaissement du menton dans le plan y).**

Les Tableau 20 et Tableau 21 font un récapitulatif des mesures articulatoires et acoustiques étudiées dans cette thèse.

	mesures directes	mesures combinées
Analyse articulatoire	apertures (4/4 loc)	K2 (étirement/apertures) (4/4 loc) aire (4/4 loc)
	étirement (4/4 loc)	
	abaissement du menton (3/4 loc)	
	protrusion (3/4 loc)	

**Tableau 20 : Récapitulatif des mesures articulatoires retenues pour cette thèse.**

Analyse acoustique	formants (F1, F2, F3) (Hz)	pour l'ensemble des voyelles
	formant F4 (Hz)	pour /i/
	distance entre formants (Hz)	F1-F2 : voyelles postérieures
		F2-F3 : /y/ et /i/
		F4-F3 : /i/
	distance au centroïde F1/F2	pour l'ensemble des voyelles
	distance au centroïde F2/F3	pour l'ensemble des voyelles
	durée (msec)	pour l'ensemble des voyelles
	intensité (dB)	pour l'ensemble des voyelles

**Tableau 21 : Récapitulatif des mesures acoustiques retenues pour cette thèse.**

Le Tableau 22 fait un récapitulatif du nombre d'occurrences pour les mesures acoustiques, et pour les mesures articulatoires pour chaque voyelle et chaque condition prosodique considérée dans cette thèse.

	/i/	/e/	/ɛ/	/a/	/y/	/ø/	/œ/	/u/	/o/	/ɔ/
IP	50/51/40	53/54/41	53/53/36	44/44/35	54/57/39	50/50/39	57/58/40	56/57/40	53/58/45	47/50/32
W	58/60/46	57/58/43	56/56/40	62/63/47	59/59/45	57/57/42	62/62/47	65/65/53	59/59/49	65/70/49

**Tableau 22 : Récapitulatif du nombre d'occurrences pour les mesures acoustiques (4 locuteurs) /pour les mesures d'aperture et d'étirement (4 locuteurs)/ pour les mesures de protrusion (3 locuteurs), pour chaque voyelle, pour les deux positions prosodiques IP et W.**

L'ensemble de ces données acoustiques et articulatoires va nous permettre de répondre à l'objectif de ce travail qui est celui de rendre compte du renforcement initial en position initiale de constituants prosodiques pour les voyelles orales du français.

Nos résultats sont présentés dans la partie suivante.



# TROISIEME PARTIE

## RESULTATS

---

### 6. ANALYSE PRELIMINAIRE

**Q1** : Existe-t-il un effet global de la position prosodique (IP vs W) sur les paramètres acoustiques et articulatoires des voyelles orales du français ?

**Procédure** : ANOVA 3 facteurs ‘position prosodique’ (IP, W), ‘locuteur’ (S1, S2, S3, S4), ‘voyelle’ (/i/, /e/ /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/) sur les paramètres articulatoires et acoustiques.

**Résultats** : Oui, il existe un effet global de la position prosodique sur les paramètres acoustiques et articulatoires des voyelles orales du français. Mais, les variations de la position prosodique sont dépendantes de la nature de la voyelle et du locuteur considéré pour l’ensemble des critères acoustiques et articulatoires (sauf pour les mesures du menton et de la protrusion).

**Perspectives** : L’effet de la position prosodique doit être présenté voyelle par voyelle et locuteur par locuteur.

Dans cette partie, nous souhaitons répondre à notre première question qui est de savoir s’il existe un effet global de la position prosodique (IP vs W) sur les paramètres acoustiques et articulatoires de la voyelle. Afin de déterminer si nos paramètres acoustiques et articulatoires varient en fonction de la position prosodique de la voyelle (IP vs W) nous avons commencé nos analyses par une analyse globale de l’effet de la position prosodique toutes voyelles et tous locuteurs confondus. Nous avons ensuite observé l’interaction de cet effet avec le type de voyelles et de locuteurs, afin de savoir si cet effet est différent suivant le type de voyelle étudié et suivant le locuteur considéré.

Pour cela, nous avons procédé à une analyse ANOVA à 3 facteurs afin de tester l’effet de la frontière prosodique (2 niveaux : IP et W), du locuteur (4 locuteurs S1, S2, S3, S4, pour les données vidéo ou 3 locuteurs S2, S3, S4 pour les données Qualisys) et de la voyelle (10 niveaux : /i/, /e/ /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/) sur les paramètres articulatoires et acoustiques. Nous rappelons que dans le cas des paramètres « apertures », « étirement », 4 locuteurs sont considérés. Ces mesures correspondent aux données extraites de la vidéo. Dans le cas des paramètres « menton », « protrusion », 3 locuteurs sont considérés. Ces mesures correspondent aux données extraites du système Qualisys,

	pp	pp*voy	pp*voy*loc
F1	F(1,1037)=104**	F(9,1037)=31**	F(27,1037)=7**
F2	F(1,1037)=67**	F(9,1037)=12**	F(27,1037)=2**
F3	F(1,1037)=12**	F(9,1037)=29**	F(27,1037)=4**
F2-F1	F(1,1037)=10*	F(9,1037)=8**	F(27,1037)=2*
F3-F2	F(1,1037)=5*	F(9,1037)=16**	F(27,1037)=4**
F4-F3	F(1,1037)=4 ns	F(9,1037)=6**	F(27,1037)=3**
durée	F(1,1061)=4*	F(9,1061)=14**	F(27,1061)=2*
intensité	F(1,1037)=43**	F(9,1037)=11**	F(27,1037)=4**
dist_centrF1F2	F(1,1037)=42**	F(9,1037)=9**	F(27,1037)=2*
dist_centrF2F3	F(1,1037)=1 ns	F(9,1037)=16**	F(27,1037)=3**

**Tableau 23: Résultats des tests F ANOVA à 3 facteurs 'position prosodique', 'voyelle' et 'locuteurs' sur les 10 paramètres acoustiques étudiés. La première colonne correspond aux résultats du test F pour l'effet de la position prosodique, la seconde colonne rend compte de l'interaction entre la position prosodique et la voyelle et la troisième colonne l'interaction entre les trois facteurs. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

	pp	pp*voy	pp*voy*loc
aire	F(1,1061)=1251**	F(9,1061)=84**	F(27,1061)=10**
aperture	F(1,1061)= 446**	F(9,1061)=26**	F(27,1061)=5**
étirement	F(1,1061)=640**	F(9,1061)=42**	F(27,1061)=4**
K2	F(1,1061)= 35**	F(9,1061)=11**	F(27,1061)=3**
menton	F(1,788)=5*	F(9,788)=1 ns	F(18,788)=2 ns
protrusion	F(1,788)=0,3 ns	F(9,788)=1 ns	F(18,788)=1 ns

**Tableau 24: Résultats des tests F ANOVA à 3 facteurs 'position prosodique', 'voyelle' et 'locuteurs' sur les 6 paramètres articulatoires étudiés. La première colonne correspond aux résultats du test F pour l'effet de la position prosodique, la seconde colonne rend compte de l'interaction entre la position prosodique et la voyelle et la troisième colonne l'interaction entre les trois facteurs. Niveaux de significativité \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

L'analyse du Tableau 23 et du Tableau 24 nous montre qu'il existe un effet du facteur 'position prosodique' sur la majorité des paramètres acoustiques et articulatoires excepté sur trois d'entre eux : F4-F3, la distance centroïde F2-F3 et la protrusion. Pour F4-F3, cette distance est caractéristique de la voyelle /i/, mais n'intervient pas dans la caractérisation des autres voyelles, d'où l'absence d'effet. De même, la distance au centroïde F2-F3 et le mesure de protrusion sont des mesures pertinentes dans l'observation des voyelles arrondies uniquement, pas pour les voyelles non-arrondies.

Des interactions entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelle' montrent que les variations de la position prosodique peuvent être dépendantes de la nature de la voyelle. Des interactions entre ces deux facteurs sont observées sur l'ensemble des paramètres acoustiques et sur l'ensemble des paramètres

articulatoires excepté le menton, la protrusion. Enfin, nous observons une interaction entre les trois facteurs 'position prosodique', 'voyelle' et 'locuteurs', pour ces mêmes paramètres. Ces résultats statistiques montrent qu'il existe bien un effet de la position prosodique sur les paramètres articulatoires et acoustiques des voyelles, et que cet effet varie en fonction de la voyelle considérée et du locuteur considéré.

Dans cette perspective, nous allons étudier l'effet de la position prosodique pour chaque voyelle et en considérant les variations entre locuteurs.



## **7. ANALYSE PAR VOYELLE : EFFET DE LA POSITION INITIALE SUR LES PARAMETRES ARTICULATOIRES (LABIAUX ET MENTON) ET SUR LES PARAMETRES ACOUSTIQUES (SPECTRAUX, DUREE, INTENSITE)**

Au regard des interactions précédemment développées, nous allons observer les effets de la position prosodique voyelle par voyelle. Tout d'abord, un test ANOVA à 2 facteurs ('locuteur' et 'position prosodique') a permis de déterminer l'effet de la position prosodique pour chaque voyelle tous locuteurs confondus (correspondant à la ligne (a) dans les tableaux de résultats) ainsi que les interactions entre les facteurs 'position prosodique' et 'locuteurs' (correspondant à la ligne (b) dans les tableaux de résultats). Dans le cas où une interaction a été trouvée, nous avons testé, pour la voyelle considérée, l'effet de la position prosodique locuteur par locuteur avec un test ANOVA à un facteur ('position prosodique'). Pour plus de clarté dans les résultats, les résultats des tests statistiques, pour chaque locuteur se trouvent en Annexe 2. Pour chaque test statistique, un test post-hoc de Tukey a été effectué et le degré de significativité a été déterminé à  $p < .05$ . Les résultats issus de ces tests post-hoc sont indiqués dans la colonne (c) des tableaux de résultats. Nous avons suivi cette procédure de façon systématique pour chaque voyelle.

Nous allons présenter les résultats, pour chaque voyelle, en commençant par les trois paramètres « étirement », « aperture » et « protrusion », correspondant aux trois degrés de liberté des lèvres, puis le paramètre « menton » estimation de l'abaissement du menton, viennent ensuite les paramètres combinés « aire », « K2 » et enfin les résultats acoustiques et spectraux : formants, durée, intensité.

Les résultats acoustiques et articulatoires sont présentés voyelle par voyelle. A chaque voyelle correspond un chapitre. Un résumé des résultats est présenté au début de chacun de ces chapitres. Dans ce résumé, les résultats des tests statistiques sont présentés pour l'ensemble des locuteurs, si une variabilité entre locuteurs est rencontrée, les distinctions sont notifiées entre parenthèses.

## 7.1 Voyelle /i/

**Q2:** Pour la voyelle /i/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation des paramètres d'étirement, d'aperture et d'aire en position IP pour chaque locuteur
- Aucun effet n'est observé sur la protrusion et sur l'abaissement du menton.
- Une diminution du facteur K2 (S2, S3), en position IP

**Résultats des variations acoustiques :**

- Aucun effet sur les formants F1 et F2
- Une augmentation des valeurs de formants F3 (S1, S2, S4) et F4 (S1, S2) en position IP
- Une augmentation de la distance F3-F2 (S1, S3, S4) en position IP, aucun effet sur la distance F4-F3
- Aucun effet sur la durée. Une augmentation de l'intensité (S3, S4) en position IP.

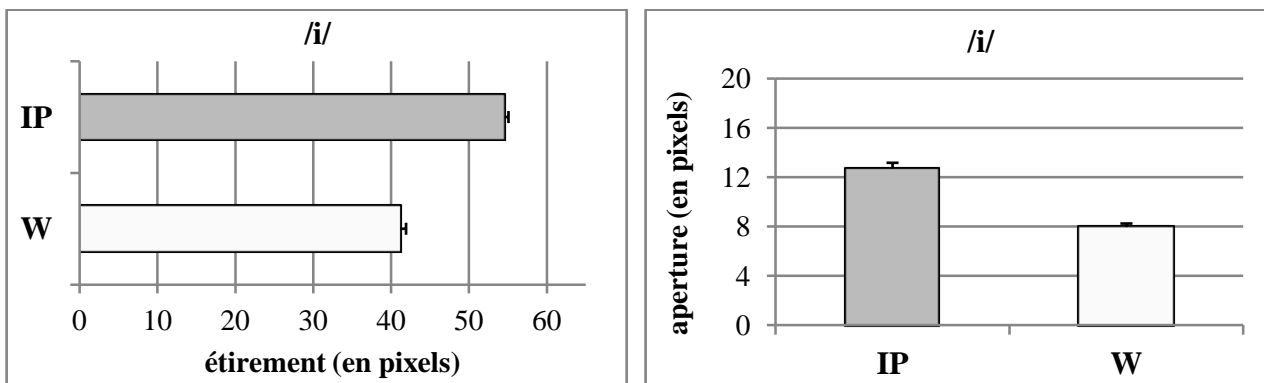
### 7.1.1 Analyse articulatoire

Pour la voyelle /i/, nous observons une modification des paramètres d'étirement et d'aperture mais aucun effet sur les valeurs de protrusion. En position IP, la voyelle /i/ est caractérisée par une plus grande aperture et un plus grand étirement (comme observé sur la Figure 23). Ces variations sont partagées par les quatre locuteurs comme le montre le Tableau 25.

	Etirement	Aperture	protrusion
(a)	$F(1,103)=258^{**}$	$F(1,103)=158^{**}$	$F(1,80)=0$ ns
/i/	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
(b)	$F(3,103)=7^{**}$	$F(3,103)=11^{**}$	$F(2,80)=0$ ns

(c)	Etirement	Aperture	protrusion
S1	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–
/i/ S2	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–
S3	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–
S4	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–

**Tableau 25: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 23: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).**

Dans le modèle d'expansion de sonorité de Beckman, on s'attend à un abaissement de la mandibule (H 1.a) sous l'effet de la position prosodique. Ici, nous avons mesuré l'abaissement du menton. Pour la voyelle /i/, la hauteur du menton ne varie pas entre les deux positions prosodiques (Tableau 26).

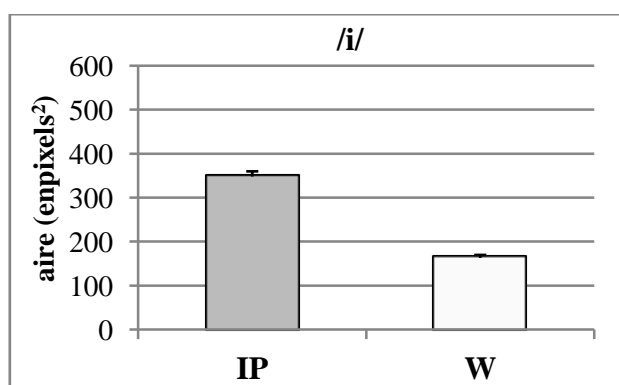
	menton
(a)	$F(1,80)=1$ ns
/i/	
(b)	$F(2,80)=0,4$ ns

**Tableau 26: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Sur les paramètres combinés, qui permettent de rendre compte de la configuration labiale ou de la forme des lèvres, on observe une augmentation de l'aire aux lèvres en position IP (voir Figure 24) et une diminution du paramètre K2. La diminution des valeurs de K2 montre que l'augmentation du paramètre d'aperture est plus importante que l'augmentation de l'étirement. Si tous les locuteurs montrent une augmentation de l'aire aux lèvres en position IP, deux locuteurs (S1 et S4) ne montrent aucune distinction pour le paramètre K2 entre les deux positions IP et W, comme le montre le Tableau 27.

	Aire	K2
(a)	$F(1,103)=413^{**}$	$F(1,103)=18^{**}$
/i/	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
(b)	$F(3,103)=18^{**}$	$F(3,103)=3^*$
(c)	Aire	K2
S1	<b>IP&gt;*W</b>	ns
/i/	S2 <b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	S3 <b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	S4 <b>IP&gt;*W</b>	ns

**Tableau 27: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'position prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 24: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

### 7.1.2 Analyse acoustique

L'effet de la position prosodique a été testé sur les quatre premiers formants, comme le montre le Tableau 28. Aucun effet n'est observé sur les valeurs de F1 et F2 alors qu'un effet significatif est observé sur les formants F3 (voir Figure 25) et également F4. En position IP, on observe une augmentation des valeurs des

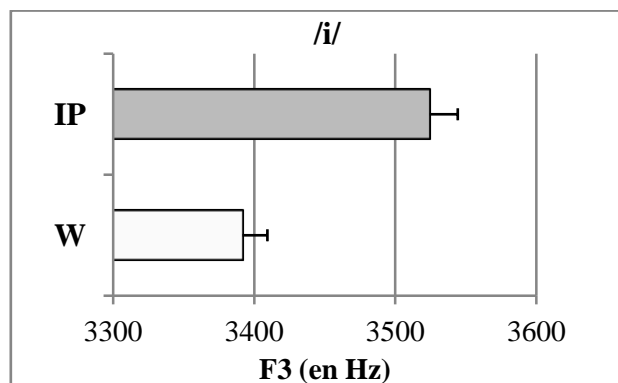


formants et également une augmentation des valeurs de F4 ce qui est en contradiction avec les observations de Gendrot et Gerdes (2009), qui montraient une diminution des valeurs de F4.

	F1	F2	F3	F4	F3-F2	F4-F3
/i/ (a)	$F(1,100)=1$ ns	$F(1,100)=0$ ns	$F(1,100)=32^{**}$	$F(1,100)=21^{**}$	$F(1,100)=70^{**}$	$F(1,100)=4$ ns
			<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
(b)	$F(3,100)=4^*$	$F(3,100)=2$ ns	$F(3,100)=3^*$	$F(3,100)=4^{**}$	$F(3,100)=5^*$	$F(3,100)=2$ ns

(c)	F1	F2	F3	F4	F3-F2	F4-F3
S1	ns	–	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–
/i/ S2	ns	–	<b>IP&gt;*W</b>	ns	ns	–
S3	ns	–	ns	ns	<b>IP&gt;*W</b>	–
S4	ns	–	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	–

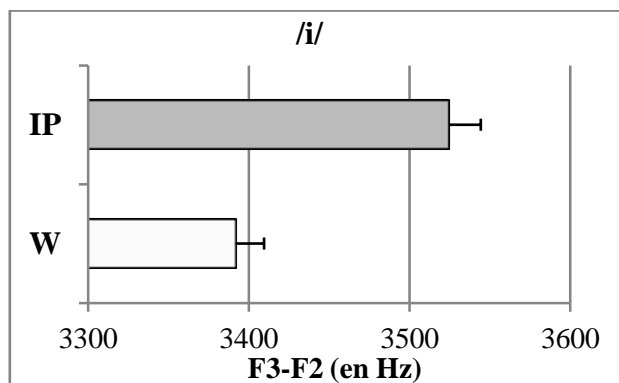
**Tableau 28: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3, F4, F3-F2 et F4-F3 pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 25: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).**

Précédemment, une augmentation significative des valeurs de F3 et de F4 a été observée en position IP, tous locuteurs confondus. L’augmentation respective des deux formants a pour conséquence de n’avoir aucun effet significatif sur la distance F4-F3. Nous observons, cependant, une augmentation significative de la distance F3-F2 en position IP, comme le montre la Figure 26. L’absence d’effet significatif sur les variations des F2 de la voyelle /i/ et l’augmentation observée pour F3 en position IP a pour conséquence d’augmenter la distance F3-F2 en position IP. Cet effet est partagé par trois des quatre locuteurs, comme le montre le Tableau 28. L’augmentation significative de la distance F3-F2 pour la voyelle /i/ est en accord

avec les résultats de Tabain et Perrier (2005), qui ont observé l'influence de la position finale de constituants prosodiques de différents niveaux sur la réalisation acoustique de la voyelle /i/. Il montre également une augmentation significative de la distance F3 et F2 pour les constituants les plus hiérarchiquement élevés (niveau phrase et groupe intonatif).



**Figure 26: Valeurs moyennes des mesures de F3-F2 de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).**

Aucun effet n'est observé sur la durée acoustique de la voyelle, comme le montre le Tableau 29. Une augmentation d'intensité de la voyelle /i/ est observée tous locuteurs confondus. L'étude locuteur par locuteur montre une augmentation de l'intensité pour deux locuteurs S3 et S4.

		durée	intensité
/i/	(a)	$F(1,103)=0$ ns	$F(1,100)=6^*$
		<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(3,103)=0$ ns	$F(3,100)=7^{**}$

(c)		durée	intensité
	S1	–	ns
/i/	S2	–	ns
	S3	–	IP>*W
	S4	–	IP>*W

**Tableau 29: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

## 7.2 Voyelle /y/

**Q2:** Pour la voyelle /y/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des facteurs d'étirement (S2), d'aperture (S1, S2) et d'aire (S1, S2, S4) en position IP
- Une stratégie différente pour le locuteur S3, avec une diminution de l'aire en position IP
- Aucun effet sur K2, sur le menton et sur la protrusion

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une diminution du formant F3 (S1, S3, S4) en position IP
- Variabilité entre locuteur pour F1 et F2: augmentation de F1 et de F2 pour S1, et diminution de F1 pour S4, en position IP
- Une diminution de la distance F3-F2 (S1, S3, S4) en position IP
- Une augmentation de l'intensité (tous locuteurs confondus) en position IP
- Une augmentation de la durée acoustique (S4) en position IP

### 7.2.1 Analyse articulatoire

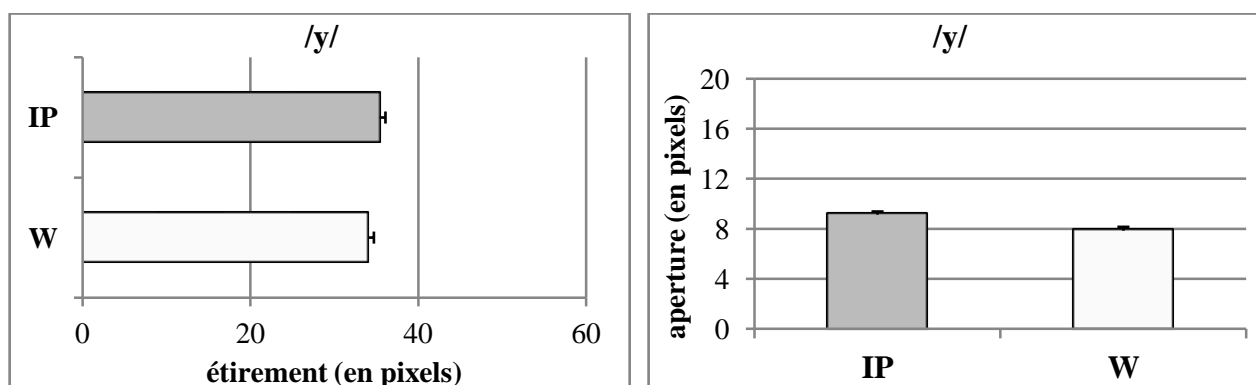
Comme pour la voyelle /i/, nous observons une augmentation des mesures d'étirement et d'aperture, tous locuteurs confondus, comme illustré sur Figure 27. Cependant, contrairement aux résultats de la voyelle /i/, les variations entre locuteurs sont plus importantes et l'effet est moins robuste sur la voyelle /y/ qu'il ne l'étaient sur la voyelle /i/. On observe en effet qu'un seul locuteur (S2) montre une différence entre les deux positions prosodiques sur les paramètres d'étirement et deux locuteurs (S1 et S2) montrent une augmentation sur les valeurs d'aperture.

Aucun effet n'est observé sur la protrusion, la voyelle n'est donc pas caractérisée par un avancement des commissures aux lèvres plus élevé en position IP, comme le montre le Tableau 30.

	Etirement	Aperture	protrusion
/y/ (a)	$F(1,108)=4^*$	$F(1,108)=18^{**}$	$F(1,78)=1$ ns
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
(b)	$F(3,108)=3^*$	$F(3,108)=3^*$	$F(2,78)=0,4$ ns

(c)	Étirement	Aperture	protrusion
S1	ns	IP>*W	–
/y/ S2	IP>*W	IP>*W	–
S3	ns	ns	–
S4	ns	ns	–

**Tableau 30: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 27: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).**

Comme pour la voyelle /i/, aucun effet sur les mesures d'abaissement du menton n'est observé sur la voyelle /y/. Il n'y a pas de différence entre les deux positions étudiées (voir Tableau 31).

		menton
/y/	(a)	$F(1,78)=1$ ns
	(b)	$F(2,78)=2$ ns

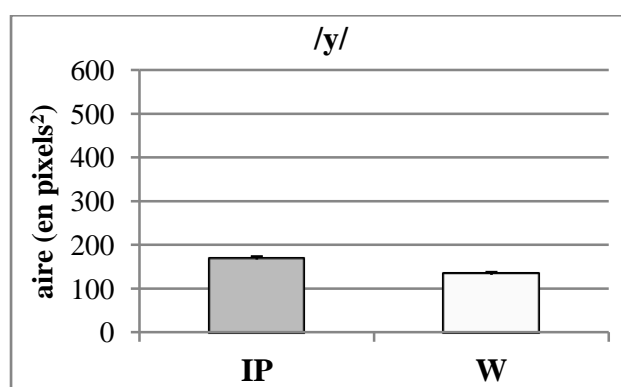
**Tableau 31 : Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

Sur les paramètres combinés, on observe que la voyelle /y/ en position IP montre des valeurs plus élevées de l'aire aux lèvres (Figure 28). Cet effet est particulièrement robuste, puisqu'il est partagé par trois des quatre locuteurs. Cependant, nous observons une stratégie différente pour le locuteur S3, qui montre lui une diminution de l'aire aux lèvres en position IP. Cette diminution de l'aire aux lèvres peut être interprétée comme une configuration labiale plus arrondie pour ce locuteur, en position IP. Les résultats sur le paramètre K2 (Tableau 32), montre que les variations de l'aperture sont plus élevées que celles observées pour l'étirement en IP.

		Aire	K2
/y/	(a)	$F(1,108)=38^{**}$	$F(1,108)=13^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(3,108)=10^*$	$F(3,108)=2$ ns

(c)	Aire	K2
S1	IP>*W	–
/y/ S2	IP>*W	–
S3	IP<*W	–
S4	IP>*W	–

**Tableau 32: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 28: Valeurs moyennes des mesures d’aire de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels², avec erreur-type).**

### 7.2.2 Analyse acoustique

Tous locuteurs confondus, nous observons un effet de la position prosodique uniquement sur les valeurs de F3, dont les valeurs diminuent en position IP. Cependant, une interaction entre les deux facteurs « position » et « locuteurs » est notée sur les trois premiers formants.

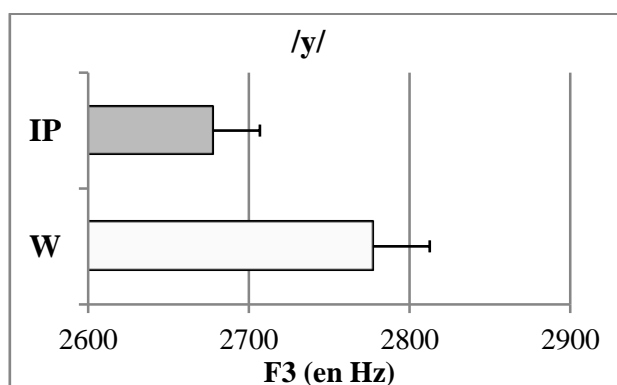
Comme observé sur la voyelle /i/, le formant F3 est particulièrement sensible aux variations de la position prosodique. Pour la voyelle /y/ : le formant F3 diminue en position IP (voir Tableau 33). Les résultats observés sur ces deux voyelles montrent qu’en position IP, ces caractéristiques sont accentuées : le F3 de /i/ augmente en position IP alors qu’il diminue pour la voyelle /y/.

On note par contre de la variabilité entre les locuteurs que les variations de F1 et F2 comme le montre le Tableau 33 : pour S1, les valeurs de F1 en IP sont plus élevées que celles en position W alors que pour S4, nous observons l’inverse. Pour le formant F2, seul un locuteur S1 montre un effet significatif de la position, avec des valeurs plus élevées en position IP.

	F1	F2	F3	F3-F2
/y/ (a)	$F(1,105)=1$ ns	$F(1,105)=1$ ns	$F(1,105)=14^{**}$	$F(1,105)=17^{**}$
			<b>IP&lt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
(b)	$F(3,105)=6^{**}$	$F(3,105)=5^*$	$F(3,105)=3^*$	$F(3,105)=5^*$

(c)	F1	F2	F3	F3-F2
S1	IP>*W	IP>*W	IP<*W	IP<*W
/y/ S2	ns	ns	ns	ns
S3	ns	ns	IP<*W	IP<*W
S4	IP<*W	ns	IP<*W	IP<*W

**Tableau 33: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3 et F3-F2 pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 29: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).**

Pour la voyelle /y/, nous observons un effet significatif sur la distance F3-F2 (voir la Figure 30). Ce résultat montre que la distance entre les formants F3 et F2 diminue en position IP (pour 3 des 4 locuteurs), que cette caractéristique focale est alors renforcée. Nous rejoignons les résultats de Gendrot et Gerdes (2009) qui ont montré un effet de la position initiale moins élevée en position IP qu’en position W

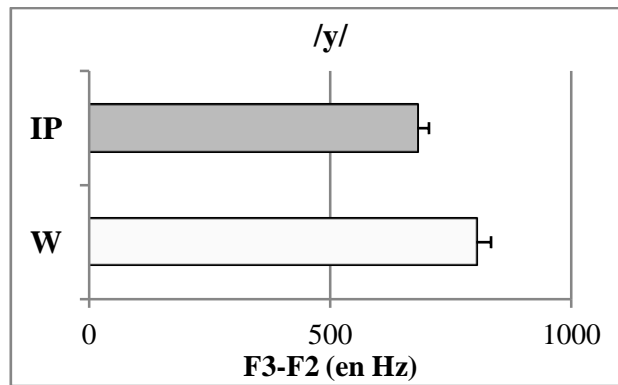


Figure 30: Valeurs moyennes des mesures de F3-F2 de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).

Les résultats suivants du Tableau 34 montrent un effet de la position prosodique sur les mesures d'intensité tous locuteurs confondus. Ce paramètre augmente en position IP. Pour la durée, seul le locuteur S4 montre une augmentation significative de la durée de la voyelle /y/ en position IP.

		durée	intensité
/y/	(a)	$F(1,108)=2$ ns	$F(1,105)=24^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(3,108)=6^{**}$	$F(3,105)=3$ ns

(c)		durée	intensité
	S1	ns	–
/y/	S2	ns	–
	S3	ns	–
	S4	IP>*W	–

Tableau 34: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.

### 7.3 Voyelle /u/

**Q2:** Pour la voyelle /u/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des facteurs d'étirement (S1, S2), d'aperture (S1) et d'aire (S1, S2) en position IP
- Une stratégie différente pour le locuteur S3, avec une diminution de l'aire en position IP
- Une diminution globale du facteur P/A (S1, S2) en position IP
- Aucun effet de la protrusion
- Une position du menton plus basse, tous locuteurs confondus en position IP
- Une diminution de facteur K2, tous locuteurs confondus en position IP

**Résultats des variations acoustiques :**

- Aucun effet sur F1 (sauf S1, S3) et F2
- Une diminution de la distance F2-F1 tous locuteurs confondus en position IP
- Une augmentation de durée (S1, S4) et d'intensité (S4) en position IP

#### 7.3.1 Analyse articulatoire

Enfin, terminons l'observation des voyelles fermées par la voyelle postérieure /u/. Comme observé pour la voyelle /i/ et /y/, les paramètres d'étirement et d'aperture augmentent pour /u/ en position IP comparé à la position W (Figure 31). Les résultats locuteur par locuteur montre, comme pour la voyelle /y/, que ces résultats sont moins robustes que ceux observés pour la voyelle /i/ : seuls deux locuteurs montrent un effet de la position prosodique sur l'étirement, et seul un locuteur montre un effet de la position prosodique sur l'aperture (voir Tableau 35).

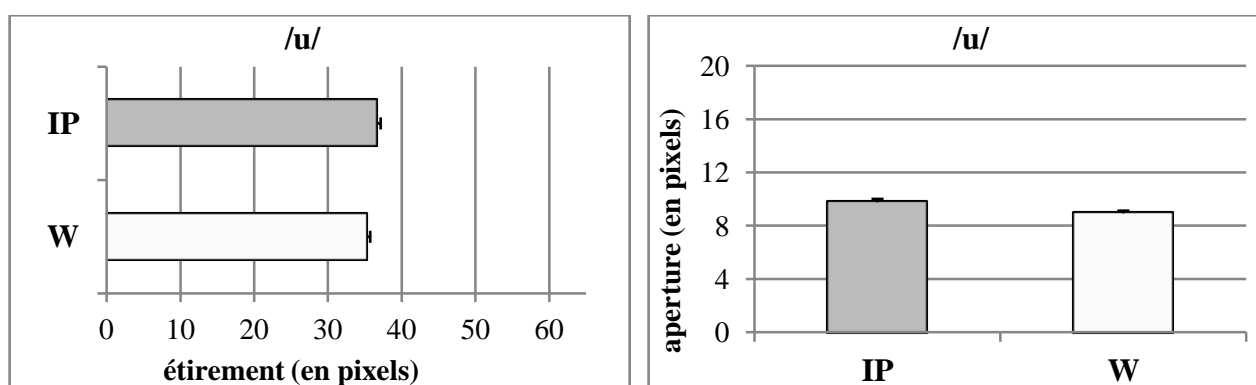
La protrusion n'est pas un paramètre sensible aux variations prosodiques sur la voyelle arrondie /u/. Comme pour la voyelle /y/ et la voyelle /i/, aucun effet de la protrusion n'est observé.



		Etirement	Aperture	protrusion
/u/	(a)	$F(1,114)=12^{**}$	$F(1,114)=15^{**}$	$F(1,87)=1$ ns
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(3,114)=5^*$	$F(3,114)=4^*$	$F(2,87)=2$ ns

(c)		Etirement	Aperture	protrusion
/u/	S1	IP>*W	IP>*W	–
	S2	IP>*W	ns	–
	S3	ns	ns	–
	S4	ns	ns	–

**Tableau 35: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 31: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).**

Contrairement aux deux autres voyelles fermées, /i/ et /y/, précédemment étudiées, un effet significatif de la position prosodique sur les mesures d'abaissement du menton est observée avec des valeurs plus élevées en position IP, comme le montre le Tableau 36.

		menton
/u/	(a)	$F(1,87)=10^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(2,87)=3$ ns

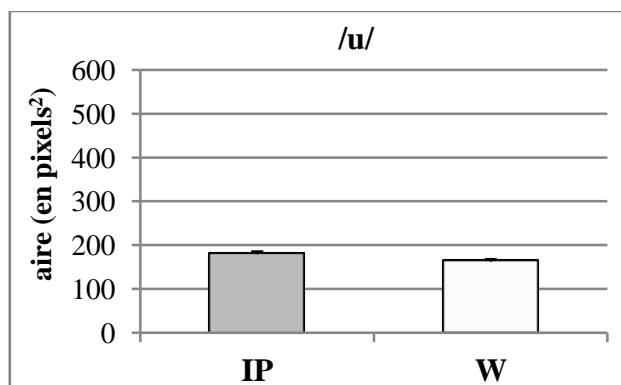
**Tableau 36: Résultats statistiques sur les paramètres de l'abaissement du menton pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

En position IP, les valeurs d'aire augmentent pour la voyelle /u/, comme le montre la Figure 32. Cette augmentation est partagée par deux locuteurs S1 et S2, comme le montre le Tableau 37. Cependant, comme observé pour la voyelle /y/, le locuteur S3 montre une stratégie différente des autres locuteurs en montrant une diminution de l'aire aux lèvres, accentuant ainsi le caractère arrondi de la voyelle /u/.

Les valeurs de K2 moins élevées en position IP montrent que les modifications de l'aperture sont plus élevées que celles de l'étirement.

		Aire	K2
/u/	(a)	$F(1,114)=15^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,114)=4^{**}$ <b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(3,114)=8^{**}$	$F(3,114)=1$ ns
<hr/>			
		Aire	K2
/u/	(c)		
	S1	IP>*W	–
	S2	IP>*W	–
	S3	IP<*W	–
	S4	ns	–

**Tableau 37: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2, pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 32: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

### 7.3.2 Analyse acoustique

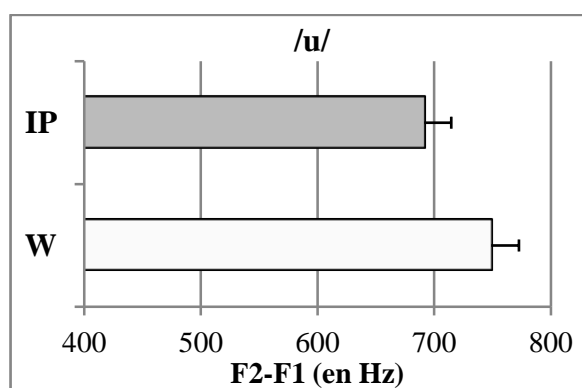
Aucun effet n'est observé sur les formants F1 et F2 de la voyelle /u/. Une interaction entre les deux facteurs 'position prosodique' et 'locuteurs' est cependant observée sur le formant F1. L'étude locuteur par locuteur montre que les valeurs de F1 sont significativement plus élevées en position IP pour les locuteurs S1 et S3. Le Tableau 38 montre que tous locuteurs confondus, la distance F2-F1 diminue significativement en position IP (comme également observé sur la Figure 33).

	F1	F2	F2-F1
/u/	$F(1,113)=3$ ns	$F(1,113)=4$ ns	$F(1,113)=6$ *
(a)			<b>IP&lt;*W</b>
(b)	$F(3,113)=8$ **	$F(3,113)=0$ ns	$F(3,113)=0$ ns

(c)	F1	F2	F2-F1
S1	IP>*W	-	-
/u/ S2	-	-	-
S3	IP>*W	-	-
S4	-	-	-

**Tableau 38: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 33: Valeurs moyennes des mesures de F2-F1 de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).**

Sur les paramètres de durée et d’intensité, les valeurs tous locuteurs augmentent en position IP, comme le montre le Tableau 39. Mais il existe une interaction avec le facteur locuteur. L’analyse par locuteur montre en effet que la distinction de durée entre IP et W est significative pour S1 et S4 seulement.

	durée	intensité
/u/ (a)	$F(1,114)=13$ **	$F(1,113)=22$ **
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
(b)	$F(3,113)=11$ **	$F(3,113)=12$ **

(c)		durée	intensité
	S1	ns	IP>*W
/u/	S2	ns	ns
	S3	ns	ns
	S4	IP>*W	IP>*W

**Tableau 39: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

## 7.4 Voyelle /e/

**Q2:** Pour la voyelle /e/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement (pour les 4 locuteurs), d'aperture (S2, S3, S4) et d'aire (pour les 4 locuteurs) en position IP
- Aucun effet sur le facteur K2, sur l'abaissement du menton, la protrusion

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une augmentation de F2 et F3 (tous locuteurs confondus) en position IP
- Une augmentation de F1 pour le locuteur S4 et une diminution pour le locuteur S3 uniquement, en position IP
- Une augmentation de durée pour S4 seulement, en position IP
- Une diminution de l'intensité (S3, S4), en position IP

### 7.4.1 Analyse articulatoire

Pour la voyelle antérieure non-arrondie, les paramètres d'étirement et d'aperture sont plus élevés en position IP qu'en position W. Cet effet est observé pour tous les locuteurs pour les mesures d'étirement et pour trois des locuteurs pour la mesure d'aperture (comme illustré sur la Figure 34). Aucun effet n'est observé sur la protrusion, comme le montre le Tableau 40.

	Etirement	Aperture	protrusion
/e/ (a)	$F(1,104)=183^{**}$	$F(1,104)=72^{**}$	$F(1,78)=0$ ns
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
(b)	$F(3,104)=7^{**}$	$F(3,104)=27^{**}$	$F(2,78)=1$ ns
(c)	Etirement	Aperture	protrusion
S1	IP>*W	ns	—
/e/ S2	IP>*W	IP>*W	—
S3	IP>*W	IP>*W	—
S4	IP>*W	IP>*W	—

**Tableau 40: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

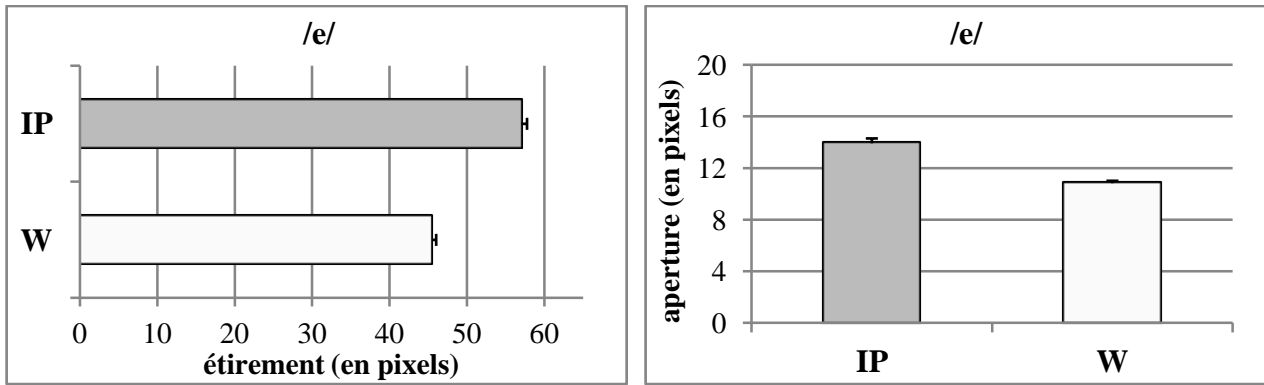


Figure 34: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /e/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).

Aucun effet n'est observé sur l'abaissement du menton pour la voyelle /e/, comme le montre le Tableau 41.

		menton
/e/	(a)	$F(1,78)=1$ ns
	(b)	$F(2,78)=2$ ns

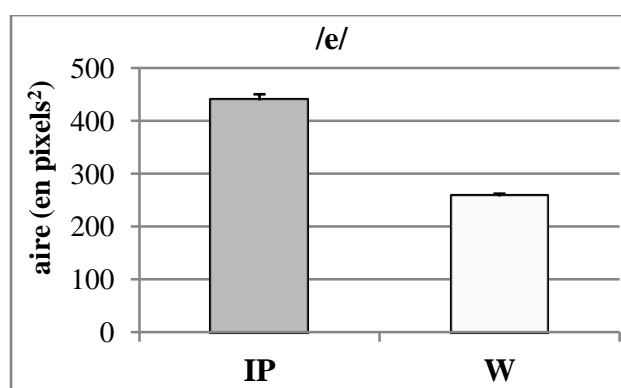
Tableau 41: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.

L'augmentation des paramètres d'aperture et d'étirement va provoquer une augmentation significative des mesures d'aire en position IP, comme observé sur Figure 35 et sur le Tableau 42. Cette augmentation est partagée par tous les locuteurs, comme nous pouvons l'observer sur le Tableau 42. Aucun effet n'est observé sur le facteur K2.

		Aire	K2
/e/	(a)	$F(1,104)=460^{**}$	$F(1,104)=0$ ns
<b>IP&gt;*W</b>			
	(b)	$F(3,104)=27^{**}$	$F(3,104)=2$ ns

(c)	Aire	K2
S1	IP>*W	-
/e/ S2	IP>*W	-
S3	IP>*W	-
S4	IP>*W	-

**Tableau 42: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 35: Valeurs moyennes des mesures d’aire de la voyelle /e/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

#### 7.4.2 Analyse acoustique

Au niveau acoustique, on observe un effet de la position prosodique sur les deux formants F2 et F3, comme le montre le Tableau 43. Alors qu’aucun effet n’avait été trouvé sur F2 pour la voyelle /i/, la voyelle /e/ va montrer un effet à la fois sur F3 et sur F2. L’augmentation de ces deux formants va dans le sens d’une augmentation des caractéristiques de la voyelle qui sont un formant F2 élevé et un formant F3 élevé. La position IP va favoriser ces caractéristiques. Cependant, aucun effet n’est observé sur le formant F1. L’augmentation des caractéristiques dues à la IP n’affecte donc pas l’ensemble des formants. On trouve néanmoins que deux locuteurs (S3 et S4) ont deux stratégies différentes : pour S3, les valeurs de F1 sont plus basses en position IP alors que S4 montre des valeurs plus élevées de F1 en position IP.

	F1	F2	F3
/e/	$F(1,102)=2$ ns	$F(1,102)=27^{**}$	$F(1,102)=83^{**}$
(a)		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
(b)	$F(3,102)=6^*$	$F(3,102)=1$ ns	$F(3,104)=2$ ns

(c)	F1	F2	F3
S1	ns	–	–
/e/ S2	ns	–	–
S3	IP<*W	–	–
S4	IP>*W	–	–

**Tableau 43: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Seul le locuteur S4 montre un effet de la position prosodique sur la durée acoustique de la voyelle : la voyelle s’allonge en position IP, comme le montre le Tableau 44. Une diminution globale de l’intensité est observée tous locuteurs confondus mais l’interaction avec le facteur ‘locuteur’ et les analyses par locuteurs montrent que cet effet n’est significatif que pour S3 et S4.

		durée	intensité
/e/	(a)	$F(1,104)=0$ ns	$F(1,102)=7^{**}$
			<b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(3,104)=4^*$	$F(3,102)=3^*$

(c)		durée	intensité
	S1	ns	ns
/e/	S2	ns	ns
	S3	ns	IP<*W
	S4	IP>*W	IP<*W

**Tableau 44: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



## 7.5 Voyelle /ø/

**Q2:** Pour la voyelle /ø/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

### Résultats des variations articulatoires

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement, d'aperture et d'aire (S1, S2, S4) en position IP
- Aucun effet sur la protrusion et sur l'abaissement du menton

### Résultats des variations acoustiques

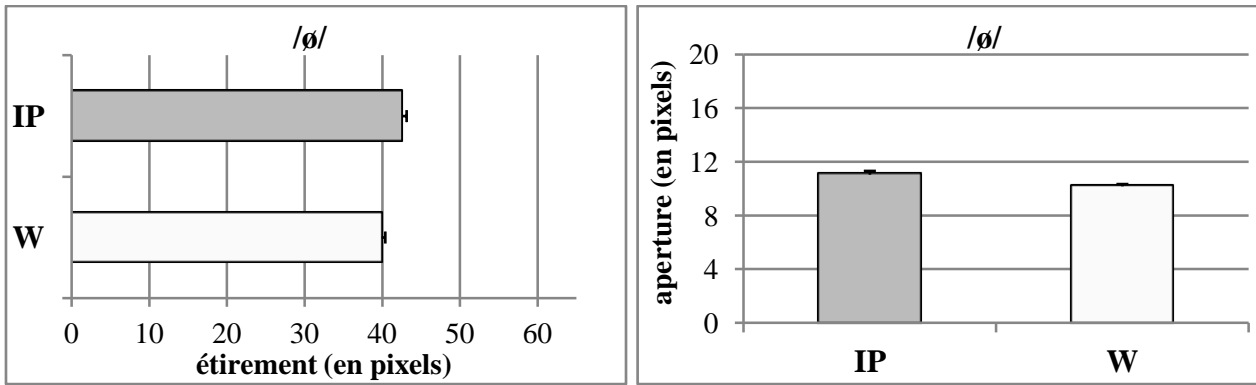
- Augmentation de F1, F2 (S1, S4) et diminution des valeurs de F3 (excepté pour S1 qui montre une augmentation) en position IP
- Augmentation de la durée acoustique et de l'intensité pour S4, en position IP
- Diminution de la durée pour S1

### 7.5.1 Analyse articulatoire

Comme observé pour les précédentes voyelles, les mesures d'étirement et d'aperture sont plus élevées en position IP qu'en position W, comme le montre le Tableau 45. Bien que faibles, comme le montre la Figure 36, ces différences sont significatives et ceci indépendamment du locuteur. Aucun effet de la position prosodique n'est observé sur la protrusion.

		Etirement	Aperture	protrusion
/ø/	(a)	$F(1,99)=18^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=14^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,75)=1$ ns
	(b)	$F(3,99)=2$ ns	$F(3,99)=10^{**}$	$F(2,75)=0$ ns
	(c)	Etirement	Aperture	protrusion
	S1	–	ns	–
/ø/	S2	–	ns	–
	S3	–	ns	–
	S4	–	IP>*W	–

**Tableau 45: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 36:** Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).

Aucun effet n'est observé sur l'abaissement du menton, comme le montre le Tableau 46.

menton	
/ø/ (a)	$F(1,75)=0$ ns
(b)	$F(2,75)=1$ ns

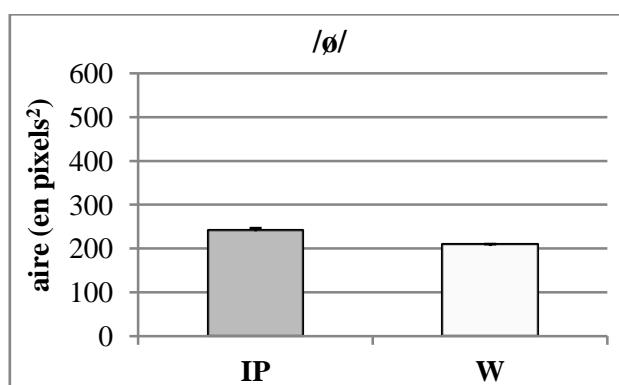
**Tableau 46:** Résultats statistiques sur les paramètres d'abaissement du menton pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.

L'augmentation des paramètres d'étirement et d'aperture va provoquer une augmentation de l'aire aux lèvres en position IP, comme le montre la Figure 37. Ces variations sont observées par trois des quatre locuteurs (S1, S2 et S4) et pour chacun l'aire est plus élevée en position IP, comme le montre le Tableau 47. Le paramètre K2 diminue pour un seul locuteur, pour celui-ci l'augmentation de l'aperture est plus importante que l'augmentation observée sur le geste d'étirement.

	Aire	K2
/ø/ (a)	$F(1,99)=39^{**}$	$F(1,103)=0$ ns
	<b>IP&gt;*W</b>	
(b)	$F(3,99)=15^{**}$	$F(3,104)=5$ *

(c)	Aire	K2
S1	IP>*W	ns
/ø/ S2	IP>*W	ns
S3	ns	ns
S4	IP>*W	IP<*W

**Tableau 47: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 37: Valeurs moyennes des mesures d’aire de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

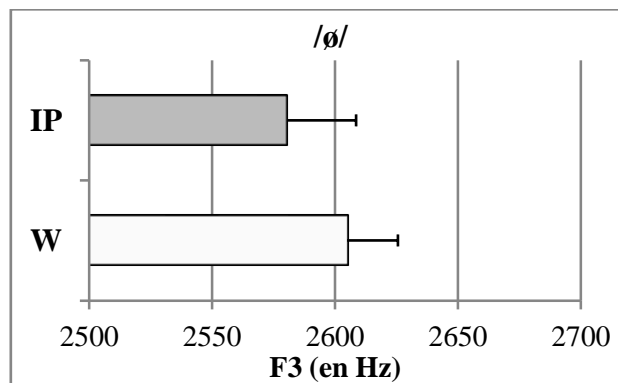
### 7.5.2 Analyse acoustique

Comme la voyelle antérieure /e/, les valeurs du formant F2 de la voyelle antérieure /ø/ augmentent en position IP. De plus, on observe également sur la Figure 38 une diminution du formant F3. Tous locuteurs confondus, F3 apparaît en effet plus bas en position IP. Il existe également une interaction avec le locuteur. Toutefois, l’analyse par locuteur montre que cette diminution de F3 atteint le seuil de significativité pour aucun des locuteurs et que le seul locuteur montrant un effet significatif est le locuteur S1 pour lequel la tendance s’inverse : F3 est plus bas en position IP pour S1 (voir Tableau 48).

		F1	F2	F3
/ø/	(a)	$F(1,99)=6^*$	$F(1,99)=18^{**}$	$F(1,99)=5^*$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(3,99)=0$ ns	$F(3,99)=10^{**}$	$F(3,99)=6^{**}$

(c)	F1	F2	F3
S1	–	IP>*W	IP>*W
/ø/ S2	–	ns	ns
S3	–	ns	ns
S4	–	IP>*W	ns

**Tableau 48: Résultats statistiques sur les F1, F2 et F3 pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 38: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type).**

Les résultats sur la durée acoustique varient selon le locuteur: S2 montre une diminution de la durée en position IP alors que le locuteur S4 montre une augmentation. Comme pour la voyelle /e/, seul le locuteur S4 montre des résultats significatifs pour la durée et l’intensité avec des valeurs plus élevées en position IP, comme le montre le Tableau 49.

		durée	intensité
/ø/	(a)	$F(1,99)=2$ ns	$F(1,99)=5^*$
		<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(3,99)=8^{**}$	$F(3,99)=3^*$

(c)		durée	intensité
	S1	ns	ns
/ø/	S2	IP<*W	ns
	S3	ns	ns
	S4	IP>*W	IP>*W

**Tableau 49: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

## 7.6 Voyelle /o/

**Q2:** Pour la voyelle /o/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement, d'aperture et d'aire (pour les 4 locuteurs) en position IP
- Aucun effet sur la protrusion
- Une position du menton plus basse (S2, S3) en position IP
- Une diminution du facteur K2, tous locuteurs confondus en position IP

**Résultats des variations acoustiques**

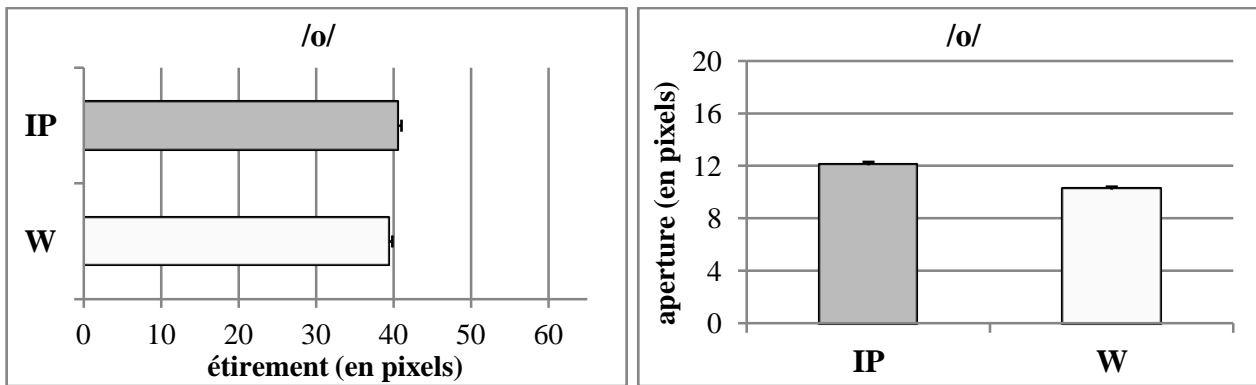
- Une diminution du formant F2 (S2, S4)
- Une diminution de la distance F2-F1, tous locuteurs confondus, en position IP
- Aucun effet sur la durée
- Diminution de l'intensité pour un locuteur S2 en position IP

### 7.6.1 Analyse articulatoire

La position IP a pour conséquence d'agrandir la cavité labiale pour la voyelle /o/ également en augmentant les mesures d'étirement et d'aperture, comme indiqué sur le Tableau 50 et la Figure 39. Aucun effet n'est observé sur les mesures de protrusion. Ces résultats ne vont donc pas dans le sens d'une augmentation des caractéristiques arrondies de la voyelle /o/.

		Etirement	Aperture	protrusion
/o/	(a)	$F(1,109)=5^*$	$F(1,109)=59^{**}$	$F(1,88)=3$ ns
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(3,109)=2$ ns	$F(3,109)=1$ ns	$F(2,88)=0$ ns

**Tableau 50: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 39:** Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /o/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).

Contrairement aux autres voyelles (sauf /u/), un effet de la position prosodique est observé pour la voyelle /o/ (voir Tableau 51) : la position du menton est plus basse en position IP comme cela a été observé pour la voyelle /u/. L'analyse par locuteurs montre que cet effet n'est significatif que pour deux d'entre eux : S2 et S3.

		menton	
/o/	(a)	$F(1,88)=8^*$	
		<b>IP&gt;*W</b>	
	(b)	$F(2,88)=6^*$	
(c)		menton	
	S1	ns	
/o/	S2	IP>*W	
	S3	IP>*W	
	S4	-	

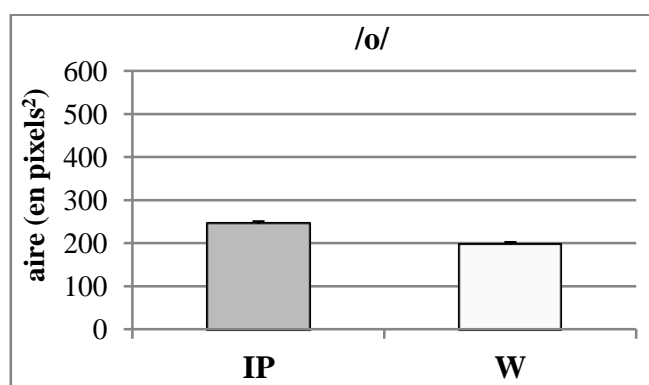
**Tableau 51:** Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.

Comme observé pour les précédentes voyelles, une augmentation des paramètres d'étirement et d'aperture va provoquer une augmentation du paramètre d'aire. Pour l'ensemble des locuteurs, on note, en effet, une augmentation de l'aire aux lèvres, comme observé Figure 40. La configuration labiale pour la voyelle /o/ est donc moins arrondie en position IP qu'en position W. De plus, le facteur K2 diminue en position IP comparé à la position W, comme le montre le Tableau 52. Cette diminution montre que dans le cas d'une augmentation des deux paramètres d'aperture et d'étirement que l'augmentation de l'aperture est plus importante que l'augmentation de l'étirement.

	Aire	K2
/o/ (a)	$F(1,109)=64^{**}$	$F(1,109)=36^{**}$
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
(b)	$F(3,109)=3^*$	$F(3,109)=1$ ns

	Aire	K2
S1	IP>*W	–
/o/ S2	IP>*W	–
S3	IP>*W	–
S4	IP>*W	–

**Tableau 52: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 40: Valeurs moyennes des mesures d’aire de la voyelle /o/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

### 7.6.2 Analyse acoustique

Sur les valeurs de formants, l’influence de la position prosodique est uniquement observée sur le formant F2, avec des valeurs moins élevées en position IP. L’étude par locuteur montre que la diminution des valeurs de F2 pour la voyelle /o/ en position IP est partagée par deux locuteurs S2 et S4 (voir le Tableau 53). Cette diminution des valeurs de F2 entraîne une diminution de la distance F2-F1 en l’absence d’effet sur F1. Les propriétés focales de la voyelle /o/ sont donc renforcées en position IP.



		F1	F2	F2-F1
/o/	(a)	$F(1,104)=3$ ns	$F(1,104)=8^*$	$F(1,104)=8^*$
			<b>IP&lt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(3,104)=3$ ns	$F(3,104)=3^*$	$F(3,104)=1$ ns

(c)		F1	F2	F2-F1
	S1	–	ns	–
/o/	S2	–	IP<*W	–
	S3	–	ns	–
	S4	–	IP<*W	–

**Tableau 53: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Seul un locuteur montre un effet significatif de la position prosodique sur l’intensité avec une diminution de l’intensité de /o/ en position IP, comme le montre le Tableau 54.

		durée	intensité
/o/	(a)	$F(1,109)=3$ ns	$F(1,104)=4$ ns
	(b)	$F(3,109)=1$ ns	$F(3,104)=4^*$

(c)		durée	intensité
	S1	–	ns
/o/	S2	–	IP<*W
	S3	–	ns
	S4	–	ns

**Tableau 54: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

## 7.7 Voyelle /ɛ/

**Q2:** Pour la voyelle /ɛ/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement, d'aperture et d'aire (pour les 4 locuteurs) en position IP
- Aucun effet sur la protrusion
- Une diminution du facteur K2, tous locuteurs confondus, en position IP

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une augmentation des formants F1 (S4), F2 et F3 (tous locuteurs confondus) en position IP
- Une diminution de la durée, une augmentation de l'intensité pour S4 et diminution de l'intensité pour S3 en position IP

### 7.7.1 Analyse articulatoire

Il existe un effet de la position prosodique sur l'étirement et l'aperture. Aucun résultat significatif n'est observé pour la mesure de protrusion, comme le montre le Tableau 55. Les valeurs d'aperture et d'étirement augmentent en position IP, comme le montre la Figure 41.

	Etirement	Aperture	protrusion
/ɛ/ (a)	$F(1,101)=56^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,101)=55^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,70)=0ns$
(b)	$F(3,101)=2 ns$	$F(3,101)=2 ns$	$F(2,70)=1ns$

**Tableau 55: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ɛ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

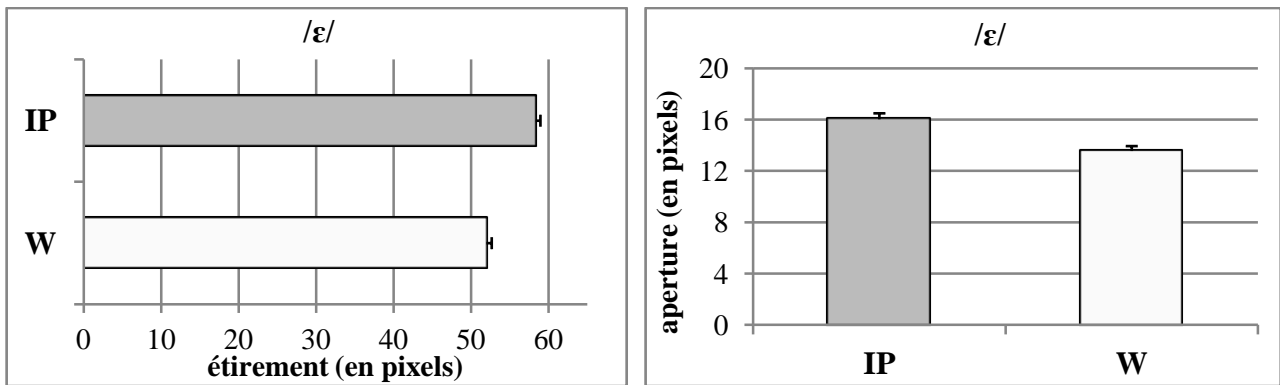


Figure 41: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ε/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).

Aucun effet significatif n'est observé sur l'abaissement du menton, comme le montre le Tableau 56.

menton	
/ε/	(a) $F(1,70)=0ns$
	(b) $F(2,70)=2ns$

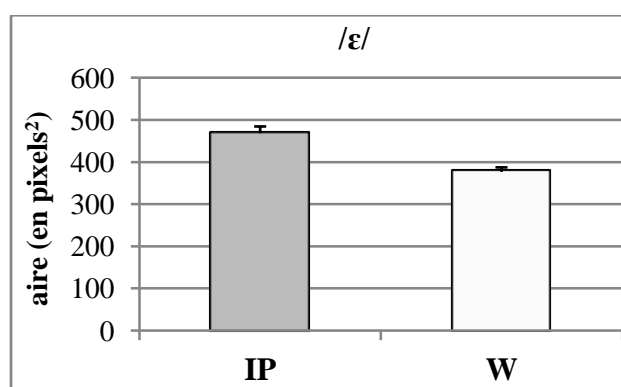
Tableau 56: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.

Comme observé sur les autres voyelles, l'augmentation des paramètres d'étirement et d'aperture en position IP entraîne une augmentation de l'aire (voir Figure 42) et une diminution du paramètre K2. Pour chaque locuteur, les valeurs d'aire sont plus élevées en position IP qu'en position W. Les valeurs de K2 diminuent en position IP, l'élargissement de l'aperture est donc plus important que celui de l'étirement en position IP.

		Aire	K2
/ɛ/	(a)	$F(1,101)=87^{**}$	$F(1,101)=5^*$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	(b)	$F(1,101)=87^{**}$	$F(3,101)=1$ ns

		Aire	K2
	S1	IP>*W	–
/ɛ/	S2	IP>*W	–
	S3	IP>*W	–
	S4	IP>*W	–

**Tableau 57: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /ɛ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 42: Valeurs moyennes des mesures d’aire de la voyelle /ɛ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels², avec erreur-type).**

### 7.7.2 Analyse acoustique

La position IP a un effet sur les valeurs des formants F1, F2 et F3. Pour chacun de ces formants, leurs valeurs sont plus élevées en position IP qu’en position W. Suite à l’interaction de l’effet sur F1 avec le facteur locuteur, les analyses par locuteurs montrent que l’augmentation de F1 en position IP n’est significative que pour un seul locuteur : le locuteur S4. Cette augmentation de F1 accentue ainsi l’ouverture de la voyelle et l’augmentation de F2 accentue l’antériorité de la voyelle la voyelle antérieure /ɛ/. De plus, comme une voyelle antérieure non-arrondie est caractérisée par une augmentation des valeurs de F3, nous retrouvons cette caractéristique accentuée en position IP, comme le montre Tableau 58.

		F1	F2	F3
/ɛ/	(a)	$F(1,101)=24^{**}$	$F(1,101)=23^{**}$	$F(1,101)=5^*$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(3,101)=5^{**}$	$F(3,101)=1$ ns	$F(3,101)=1$ ns

(c)	F1	F2	F3
S1	ns	–	–
/ɛ/ S2	ns	–	–
S3	ns	–	–
S4	IP>*W	–	–

**Tableau 58: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3, pour la voyelle /ɛ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Tous locuteurs confondus, on note une diminution de la durée de la voyelle /ɛ/ en position IP (voir Tableau 59). Cette diminution s’associe à une augmentation de l’intensité, tous locuteurs confondus, mais les résultats par locuteurs montrent une diminution de ce paramètre pour S3 et une augmentation pour S4.

		durée	intensité
/ɛ/	(a)	$F(1,101)=36^{**}$	$F(1,101)=15^{**}$
		<b>IP&lt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(3,101)=2$ ns	$F(3,101)=6^{**}$

(c)	durée	intensité
S1	–	ns
/ɛ/ S2	–	ns
S3	–	IP<*W
S4	–	IP>*W

**Tableau 59: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /ɛ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

## 7.8 Voyelle /œ/

**Q2:** Pour la voyelle /œ/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement (pour les 4 locuteurs), d'aire (S2, S3, S4), une diminution de la protrusion (tous locuteurs confondus)
- Une augmentation de l'aperture pour seulement deux locuteurs (S1 et S3)

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une augmentation de F1 (pour les 4 locuteurs), F2 (S1, S3)
- Une augmentation de F3 (S1 et S3) et une diminution de F3 (S4).
- Une augmentation de durée (S1, S3, S4) et une augmentation de l'intensité (S3, S4)

### 7.8.1 Analyse articulatoire

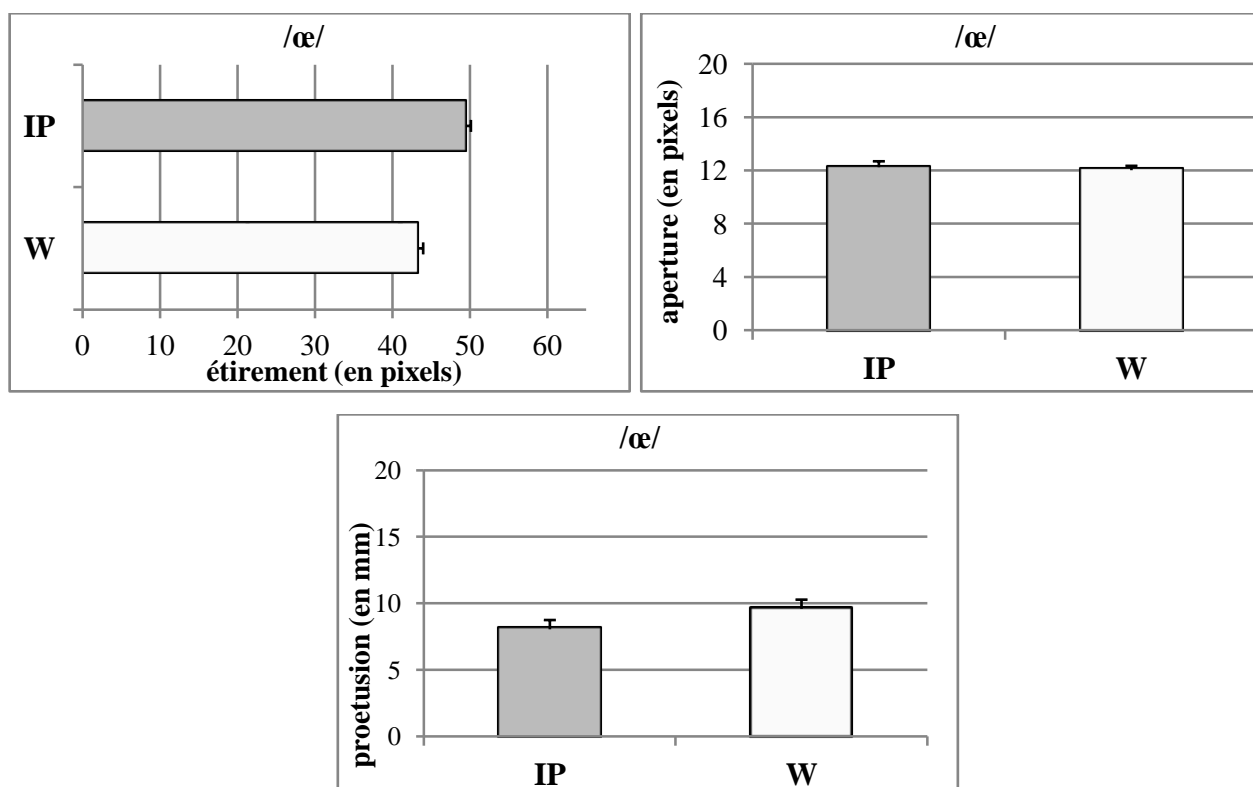
Pour la voyelle /œ/, contrairement à ce qui a été trouvé pour les autres voyelles, aucun effet n'est observé sur les mesures d'aperture tous locuteurs confondus. Il existe pourtant une interaction avec le facteur locuteur. Une étude par locuteur montre que les résultats locuteur par locuteur ne sont pas homogènes. Les valeurs d'aperture augmentent en position IP pour le locuteur S3 et diminuent pour le locuteur S1 en position IP.

Cette voyelle arrondie mi-ouverte se distingue des autres voyelles : en effet, un effet de la position prosodique a été trouvé sur la protrusion des lèvres. En position IP, on observe une diminution de la protrusion indépendante du locuteur (voir la Figure 43).

	Etirement	Aperture	protrusion
/œ/ (a)	$F(1,112)=62^{**}$	$F(1,112)=0$ ns	$F(1,81)=4^*$
	<b>IP&gt;*W</b>		<b>IP&lt;*W</b>
(b)	$F(3,112)=2$ ns	$F(3,112)=7^{**}$	$F(2,81)=0$ ns

(c)	Etirement	Aperture	protrusion
S1	–	IP<*W	–
/œ/ S2	–	ns	–
S3	–	IP>*W	–
S4	–	ns	–

**Tableau 60: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 43: Valeurs moyennes des mesures d’étirement (à gauche), d’aperture (à droite), de protrusion (en bas) de la voyelle /œ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).**

Aucun effet n’est à noter sur la position du menton, comme le montre le Tableau 61.

menton
(a) $F(1,81)=0$ ns
(b) $F(2,81)=0$ ns

**Tableau 61: Résultats statistiques sur le paramètre abaissement du menton pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Comme précédemment, la position IP est associée à une aire plus élevée que celle en position W (voir Figure 44 et Tableau 62). De plus, l’augmentation de l’étirement et l’absence d’effet sur les mesures de l’aperture entraînent une augmentation des valeurs de K2. Ce résultat est significatif pour deux locuteurs (S1 et S2). Le résultat du locuteur S1 (augmentation de K2 en position IP) nous montre que l’augmentation de l’étirement est particulièrement élevée. En effet, ce locuteur montre à la fois une augmentation des valeurs d’étirement et d’aperture, or l’augmentation de l’étirement est plus importante que celui de l’aperture, ce qui observé par un K2 plus élevé.

	Aire	K2
/œ/	(a) $F(1,112)=23^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=29^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>
	(b) $F(3,112)=9^{**}$	$F(3,112)=6^{**}$
(c)	Aire	K2
	S1	ns IP>*W
/œ/	S2	IP>*W IP>*W
	S3	IP>*W ns
	S4	IP>*W ns

**Tableau 62: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



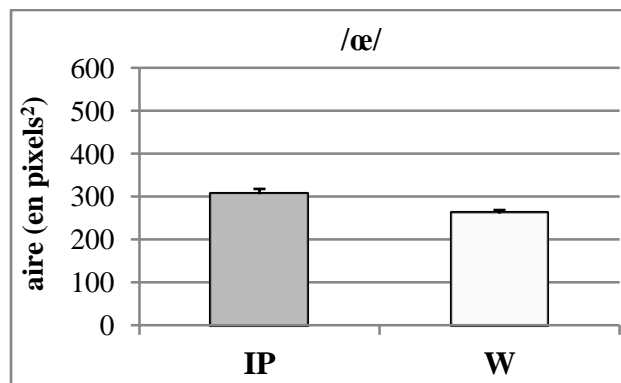


Figure 44: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /œ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).

### 7.8.2 Analyse acoustique

Au niveau acoustique, une augmentation globale des valeurs des trois formants F1, F2 et F3 de la voyelle /œ/ est observée en position IP, comme le montre le Tableau 63. L'analyse par locuteur montre que cette tendance est valable pour tous les locuteurs pour les valeurs moyennes de F1 et pour deux des quatre locuteurs pour les valeurs moyennes de F2. Pour les valeurs de F3, nous notons deux tendances différentes. Pour les locuteurs S1 et S3, la position IP va provoquer une augmentation des valeurs de F3 alors que le locuteur S4 montre une diminution des valeurs. Ces augmentations peuvent être interprétées comme une accentuation du caractère ouvert (F1) et du caractère antérieure (F2) de la voyelle /œ/. Cependant, selon ce même principe, on s'attendrait à avoir une diminution des valeurs de F3, comme attendu pour une voyelle antérieure arrondie et observé pour /y/ et /ø/. Seul le locuteur S4 marque cette tendance, pour les autres (S1 et S3), les valeurs de F3 sont plus élevées en position IP qu'en position W.

		F1	F2	F3
/œ/	(a)	$F(1,111)=116^{**}$	$F(1,111)=41^{**}$	$F(1,111)=30^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(3,111)=4^*$	$F(3,111)=5^*$	$F(3,111)=9^{**}$
	(c)	F1	F2	F3
/œ/	S1	IP>*W	IP>*W	IP>*W
	S2	IP>*W	ns	ns
	S3	IP>*W	IP>*W	IP>*W
	S4	IP>*W	ns	IP<*W

Tableau 63: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.

Les variations observées sur les paramètres de durée et d'intensité vont vers une augmentation de ces paramètres en position IP, qui ressort pour significatif pour trois locuteurs (S1, S3, S4) par l'augmentation de durée et pour deux locuteurs (S3, S4) pour l'augmentation d'intensité, comme le montre le Tableau 64.

		durée	intensité
/œ/	(a)	$F(1,112)=12^{**}$	$F(1,112)=31^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(3,112)=5^{**}$	$F(3,112)=5^*$
<hr/>			
	(c)	durée	intensité
	S1	IP>*W	ns
/œ/	S2	ns	ns
	S3	IP>*W	IP>*W
	S4	IP>*W	IP>*W

**Tableau 64: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

## 7.9 Voyelle /ɔ/

**Q2:** Pour la voyelle /ɔ/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement (S2, S3, S4), d'aperture (S2, S3, S4) et d'aire (S2, S3, S4)
- Une diminution de l'aperture pour S1
- Aucun effet sur les valeurs de protrusion et sur l'abaissement du menton
- Une augmentation de K2 (pour S1 uniquement)

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une augmentation de F1 (S1, S4) et de F3 (S3)
- Une diminution de la distance F2-F1, tous locuteurs confondus
- Une diminution de la durée pour un locuteur seulement S2
- Une diminution globale de l'intensité (diminution pour S1, S2 et augmentation pour S4)

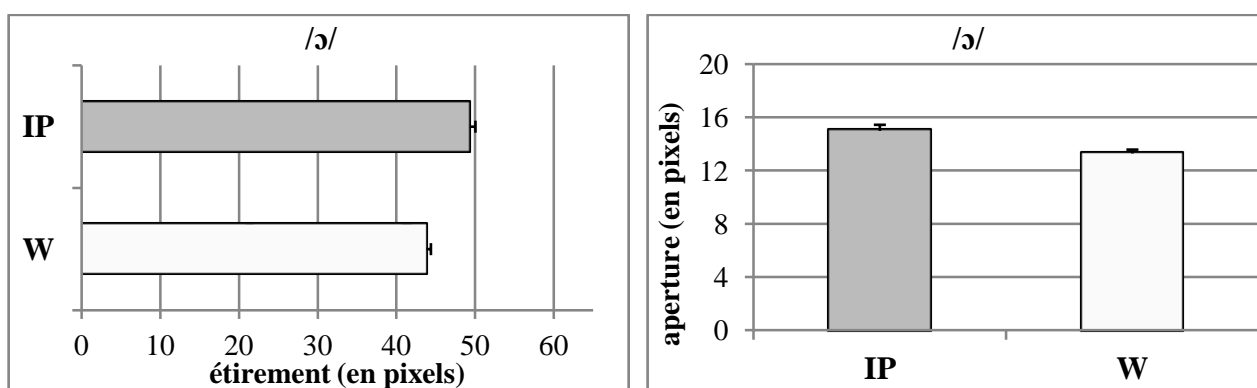
### 7.9.1 Analyse articulatoire

En position IP va augmenter les mesures d'étirement, d'aperture (voir Figure 45) augmentent pour la voyelle /ɔ/. Cette augmentation est partagée par trois des quatre locuteurs (S2, S3, S4). Alors que le locuteur S1 montre une diminution des dimensions d'aperture en position IP. Aucun effet n'est trouvé sur la protrusion, comme le montre le Tableau 65. Cette diminution d'aperture associée à une absence d'étirement pour le locuteur S1 accentue le caractère arrondi de la voyelle postérieure. Pour les autres locuteurs, l'augmentation générale d'aperture et d'étirement (voir Figure 45) diminue le caractère arrondi de la voyelle.

	Etirement	Aperture	protrusion
/ɔ/ (a)	$F(1,112)=63^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=41^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,75)=2$ ns
(b)	$F(3,112)=6^{**}$	$F(3,112)=19^{**}$	$F(2,75)=0$ ns

	Etirement	Aperture	protrusion
S1	ns	IP<*W	–
/ɔ/ S2	IP>*W	IP>*W	–
S3	IP>*W	IP>*W	–
S4	IP>*W	IP>*W	–

**Tableau 65: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 45: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ɔ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).**

Aucun effet sur l'abaissement du menton n'est observé, comme le montre le Tableau 66.

	menton
/ɔ/ (a)	$F(1,75)=0$ ns
(b)	$F(2,75)=1$ ns

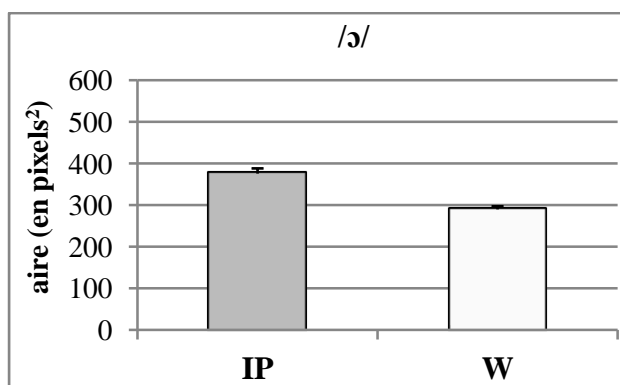
**Tableau 66: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

L'augmentation des mesures d'étirement et d'aperture pour les locuteurs S2, S3 et S4 va provoquer une augmentation des valeurs de l'aire, comme le montre la Figure 47. Pour S1, aucun effet n'est observé

sur les valeurs de l'aire, malgré la diminution des valeurs d'aperture (voir Tableau 67). Pour ce même locuteur, les valeurs de K2 sont plus élevées en position IP qu'en position W, ce qui correspond à une configuration labiale plus étirée qu'ouverte.

	Aire	K2
/ɔ/	(a) $F(1,112)=114^{**}$	$F(1,112)=0$ ns
	<b>IP&gt;*W</b>	
	(b) $F(3,112)=15^{**}$	$F(3,112)=8^{**}$
	(c)	
	Aire	K2
	S1	ns
/ɔ/	S2	IP>*W
	S3	IP>*W
	S4	IP>*W

**Tableau 67: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**



**Figure 46: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /ɔ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).**

### 7.9.2 Analyse acoustique

Les valeurs de F1 sont plus élevées en position IP qu'en position W comme le montre le Tableau 68, ce qui renforce le caractère mi-ouvert de la voyelle. Mais cette augmentation des valeurs de F1 est significative pour seulement deux locuteurs. Aucun effet n'est observé sur les valeurs de F2. La distance F2- F1 est réduite en position IP. La voyelle /ɔ/ est une voyelle focale caractérisée par le rapprochement des formants F2 et F1. Ces caractéristiques sont donc renforcées en position IP.

		F1	F2	F2-F1
/ɔ/	(a)	$F(1,104)=80^{**}$	$F(1,104)=0$ ns	$F(1,104)=7^*$
		<b>IP&gt;*W</b>		<b>IP&lt;W*</b>
	(b)	$F(3,104)=9^{**}$	$F(3,104)=1$ ns	$F(3,104)=1$ ns
	(c)	F1	F2	F2-F1
	S1	IP>*W	–	–
/ɔ/	S2	ns	–	–
	S3	ns	–	–
	S4	IP>*W	–	–

**Tableau 68: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Comme le montre le Tableau 69, aucun effet de la position prosodique n’est observé sur la durée, mais il existe une interaction avec le facteur locuteur. L’étude par locuteur montre qu’il existe une diminution de la durée acoustique pour le locuteur S2 uniquement. Pour l’intensité, on note une diminution de ce paramètre en position IP tous locuteurs confondus. L’étude par locuteur montre que l’intensité diminue pour les locuteurs S1 et S2 et augmente pour le locuteur S4.

		durée	intensité
/ɔ/	(a)	$F(1,112)=3$ ns	$F(1,104)=5$ *
		<b>IP&lt;*W</b>	
	(b)	$F(3,112)=4^*$	$F(3,104)=17^{**}$
	(c)	durée	intensité
	S1	ns	IP<*W
/ɔ/	S2	IP<*W	IP<*W
	S3	ns	ns
	S4	ns	IP>*W

**Tableau 69: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

## 7.10 Voyelle /a/

**Q2:** Pour la voyelle /a/, quelles sont les propriétés acoustiques et articulatoires affectées par la position prosodique et dans quelles directions vont ces modifications ?

**Résultats des variations articulatoires :**

- Une augmentation globale des paramètres d'étirement (pour les 4 locuteurs), d'aperture (pour les 4 locuteurs) et d'aire (pour les 4 locuteurs)
- Aucun effet sur la protrusion
- Une diminution K2 (S1, S2)

**Résultats des variations acoustiques :**

- Une augmentation des formants F1 (pour les 4 locuteurs) et F3 (S2, S3, S4)
- Une augmentation de la durée pour les 4 locuteurs et une augmentation de l'intensité (S1, S4)
- Diminution de l'intensité pour un locuteur S2.

### 7.10.1 Analyse articulatoire

Pour la voyelle /a/, il y a une augmentation de l'étirement et de l'aperture en position IP (voir Figure 47) et cet effet est observé pour les quatre locuteurs, comme le montre le Tableau 70. Il n'y a pas d'effet de la position prosodique sur la protrusion.

	Etirement	Aperture	protrusion	
/a/	(a) $F(1,99)=258^{**}$	$F(1,99)=237^{**}$	$F(1,76)=0$ ns	
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>		
	(b) $F(3,99)=4^*$	$F(3,99)=6^{**}$	$F(2,76)=0$ ns	
	(c)	Etirement	Aperture	protrusion
	S1	IP>*W	IP>*W	–
/a/	S2	IP>*W	IP>*W	–
	S3	IP>*W	IP>*W	–
	S4	IP>*W	IP>*W	–

**Tableau 70: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

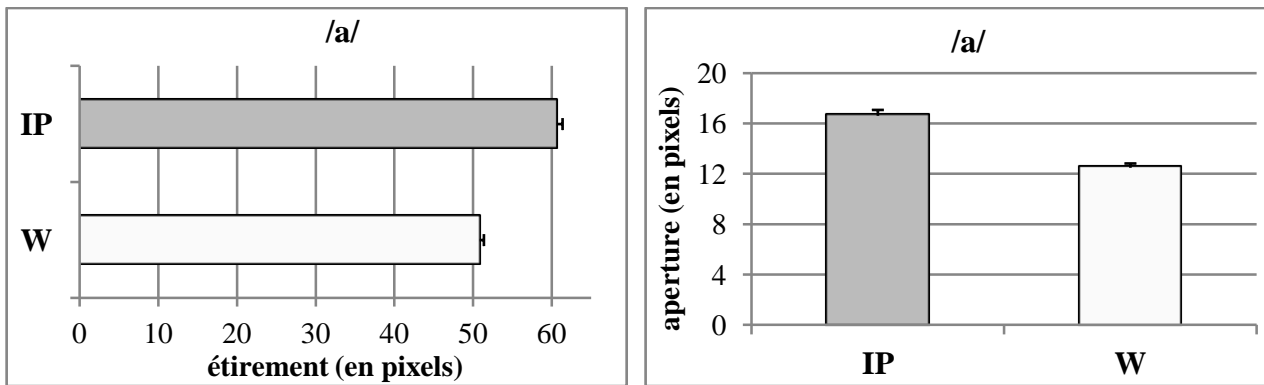


Figure 47: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /a/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type).

Il n'y a pas d'effet sur la position du menton comme l'indique le Tableau 69.

menton	
/a/	(a) $F(1,76)=3ns$
	(b) $F(2,76)=0ns$

Tableau 71: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.

Le paramètre d'aire est plus élevé en position IP qu'en position W et comme pour les paramètres d'étirement et d'aperture (voir la Figure 48). Il existe une interaction avec le facteur locuteur. L'analyse par locuteur montre que l'augmentation de l'aire est observée pour chacun des locuteurs. Les résultats sur K2 montre que l'augmentation d'aperture joue un rôle plus important que l'étirement dans la différence de configuration labiale entre IP et W.

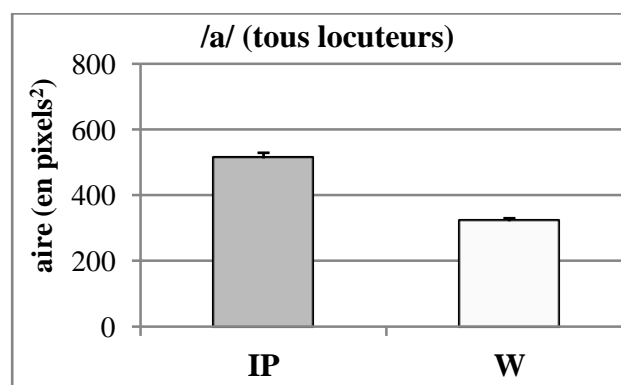


Figure 48: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /a/, tous locuteurs confondus en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels<sup>2</sup>, avec erreur-type).



	Aire	K2
/a/	(a) $F(1,99)=543^{**}$	$F(1,99)=38^*$
	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>
	(b) $F(3,99)=26^{**}$	$F(1,99)=12^*$

(c)	Aire	K2
S1	IP>*W	IP<*W
/a/ S2	IP>*W	IP<*W
S3	IP>*W	ns
S4	IP>*W	ns

**Tableau 72: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

### 7.10.2 Analyse acoustique

Les valeurs de F1 augmentent en position IP. Cette tendance est partagée par l’ensemble des locuteurs. Un effet de la position IP est également observé sur les valeurs F3, et les tests post-hoc montrent que cette tendance est partagée par trois des quatre locuteurs.

	F1	F2	F3
/a/	(a) $F(1,98)=198^{**}$	$F(1,98)=0$ ns	$F(1,98)=9^*$
	<b>IP&gt;*W</b>		<b>IP&gt;*W</b>
	(b) $F(3,98)=19^{**}$	$F(3,98)=2$ ns	$F(3,98)=21^{**}$

(c)	F1	F2	F3
S1	IP>*W	–	ns
/a/ S2	IP>*W	–	IP>*W
S3	IP>*W	–	IP>*W
S4	IP>*W	–	IP>*W

**Tableau 73: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p<.001$ , \* :  $p<.05$  et ns : non significatif.**

Les résultats présentés du Tableau 74 montre que la position prosodique entraîne un allongement de la voyelle en IP. Cet allongement s’associe une augmentation de l’intensité, significatif pour deux locuteurs S1 et S4. On note, toutefois, une tendance inverse pour le locuteur S2 : la durée de la voyelle augmente en position IP alors que l’intensité diminue dans cette même position.

		durée	intensité
/a/	(a)	$F(1,99)=65^{**}$	$F(1,99)=12^{**}$
		<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
	(b)	$F(3,99)=1^{**}$	$F(3,99)=13^{**}$

(c)		durée	intensité
	S1	IP>*W	IP>*W
/a/	S2	IP>*W	IP<*W
	S3	IP>*W	ns
	S4	IP>*W	IP>*W

**Tableau 74: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

## 8. ANALYSE DU SYSTEME SUR L'ESPACE ACOUSTIQUE

**Q2 :** Quelles sont les conséquences des variations formantiques observées sur l'espace acoustique des voyelles en position IP et W?

**Procédure :** calcul de la distance euclidienne entre chaque voyelle et le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3 pour les voyelles antérieures en position IP et W. Application de tests statistiques similaires aux précédents (ANOVA)

**Résultats :** Sur le plan F1/F2, les voyelles /u/, /e/, /ø/, /o/, /ɛ/, /ɔ/ et /a/ sont plus éloignées du centroïde F1/F2 en position IP qu'en position W à l'inverse /œ/ est plus centrale et se rapproche du centroïde.

Sur le plan F2/F3, /i/ et /e/ s'éloignent du centroïde F2/F3 et les voyelles /ø/ et /œ/, deviennent plus centrales en position IP.

Les résultats précédents ont montré que la position prosodique influençait les valeurs formantiques des voyelles. Il a également été montré dans d'autres études que la position prosodique affecte la distribution des voyelles dans l'espace acoustique (Gendrot et Gerdes, 2009 et Cho et al. 2011). Les voyelles extrêmes de l'espace acoustique occupent une aire acoustique plus large, devenant plus distinctes les unes des autres.

Il s'agira donc ici de vérifier si l'espace acoustique occupé en position IP comparé à celui occupé en position W est plus large non seulement pour les voyelles extrêmes mais aussi pour les autres voyelles du système. Pour cela, nous avons comparé la réalisation des voyelles sur l'espace acoustique en position IP et l'espace acoustique en position W. Le sous-système de voyelles contrastant en termes d'aperture a été représenté dans un plan défini par les formants F1 et F2. Le sous-système de voyelles contrastant en termes d'arrondissement a été représenté dans un plan défini par les formants F2 et F3. Pour chaque espace, la dispersion de la voyelle a été mesurée comme la distance euclidienne entre chaque voyelle et le centroïde de chaque espace. Ces centroïdes ont été calculés pour chaque locuteur sur l'ensemble des conditions prosodiques dans le but de pouvoir comparer les deux systèmes en position IP et W. Le centroïde F1/F2 a été calculé avec les valeurs moyennes des formants F1 et F2 de l'ensemble des voyelles du français alors que le centroïde F2/F3 a été calculé comme la moyenne des valeurs de F2 et F3 des voyelles antérieures arrondies et non-arrondies (/i, e, ε, a/) uniquement. Les triangles vocaliques sur le plan F1/F2 et F2/F3 avec les centroïdes respectifs ont été représentés sur la Figure 49 et la Figure 50.

Les résultats des tests anova ont été résumés dans les Tableau 75 et Tableau 76, à partir desquels nous pouvons extraire les résultats suivants :

Les voyelles /u/, /e/, /ø/, /o/, /ɛ/, /ɔ/ et /a/ sont plus éloignées du centroïde F1/F2 en position IP qu'en position W. Cette dispersion va avoir pour conséquence d'élargir l'espace acoustique sur le plan F1 et F2.

L'observation des espaces vocaliques (tous locuteurs confondus et locuteur par locuteur) nous permet de voir que l'augmentation sur l'axe F1 est particulièrement portée par les voyelles /a/ /ε/ et /ɔ/, dont les valeurs de F1 augmentent particulièrement en position IP et l'augmentation sur l'axe F2 est particulièrement portée par les voyelles antérieures /e/ et /ε/, dont les valeurs de F2 augmentent de façon importante en position IP. On peut cependant observer qu'aucun effet n'a été observé pour la distance au centroïde F1/F2 des voyelles /i/ et /y/. Ceci conforte les données de Gendrot et Gerdes (2009). Un effet opposé à la tendance générale est à noter pour la voyelle /œ/. En effet, la distance entre la voyelle et le centroïde F2/F1 est moins élevée en position IP qu'en position W. La réduction de cette distance montre que cette voyelle est plus centrale en position IP.

Sur le plan F2/F3, l'observation des résultats statistiques montre que les voyelles non-arrondies /i/ et /e/ sont plus éloignées du centroïde F2/F3 en position IP. Ce résultat est essentiellement dû à l'augmentation des valeurs de F3 pour les voyelles /i/ et /e/, comme le montrent les espaces vocaliques présentés Figure 49 et Figure 50. Pour les voyelles /ø/ et /œ/, on observe une diminution des distances entre la voyelle et le centroïde F2/F3. Ce résultat montre que ces deux voyelles /ø/ et /œ/, sont plus centrales dans cette dimension F2/F3 en position IP. Pour les voyelles /y/ et /ε/, l'effet de la position prosodique n'est pas significatif tous locuteurs confondus, mais il existe une interaction avec le locuteur. L'analyse par locuteur montre que la voyelle /y/ se rapproche du centroïde F2/F3 pour un locuteur seulement (S3) et pour la voyelle /ε/, la voyelle se rapproche du centroïde F2/F3 pour le même locuteur S3 et s'éloigne du centroïde pour un autre locuteur S1.

		/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ɛ/	/œ/	/ɔ/	/a/
<i>F1/F2</i>	(a)	$F(1,100)=1$ ns	$F(1,105)=1$ ns	$F(1,113)=4^*$	$F(1,102)=27^{**}$	$F(1,99)=9^*$	$F(1,104)=10^*$	$F(1,101)=36^{**}$	$F(1,111)=21^{**}$	$F(1,104)=10^*$	$F(1,98)=15^{**}$
				<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&lt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>	<b>IP&gt;*W</b>
dispersion	(b)	$F(3,100)=2$ ns	$F(3,105)=3$ ns	$F(3,113)=1$ ns	$F(3,102)=1$ ns	$F(3,99)=2$ ns	$F(3,104)=3^*$	$F(3,101)=0$ ns	$F(3,111)=4^*$	$F(3,104)=0$ ns	$F(3,98)=3^*$
	(c)	/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ɛ/	/œ/	/ɔ/	/a/
	S1	–	–	–	–	–	ns	–	<b>IP&lt;*W</b>	–	<b>IP&gt;*W</b>
<i>F1/F2</i>	S2	–	–	–	–	–	<b>IP&gt;*W</b>	–	ns	–	ns
	S3	–	–	–	–	–	ns	–	ns	–	<b>IP&gt;*W</b>
dispersion	S4	–	–	–	–	–	<b>IP&gt;*W</b>	–	ns	–	<b>IP&gt;*W</b>

**Tableau 75: Résultats statistiques sur la mesure de dispersion F1-F2 pour l'ensemble des voyelles orales. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

		/i/	/y/	/e/	/ø/	/ɛ/	/œ/
<i>F2/F3</i>	(a)	$F(1,100)=18^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,105)=0$ ns	$F(1,102)=52^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=6^*$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,101)=0$ ns	$F(1,111)=54^{**}$ <b>IP&lt;*W</b>
dispersion	(b)	$F(3,100)=4^*$	$F(3,105)=3^*$	$F(3,102)=1$ ns	$F(3,99)=15^{**}$	$F(3,101)=3^*$	$F(3,111)=8^*$
	(c)	/i/	/y/	/e/	/ø/	/ɛ/	/œ/
	S1	IP>*W	ns	–	IP<*W	IP>*W	IP<*W
<i>F2/F3</i>	S2	IP>*W	ns	–	ns	ns	ns
	S3	ns	IP<*W	–	ns	IP<*W	IP<*W
dispersion	S4	IP>*W	ns	–	IP<*W	ns	ns

**Tableau 76: Résultats statistiques sur la mesure de dispersion F2-F3 pour l'ensemble des voyelles orales. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**

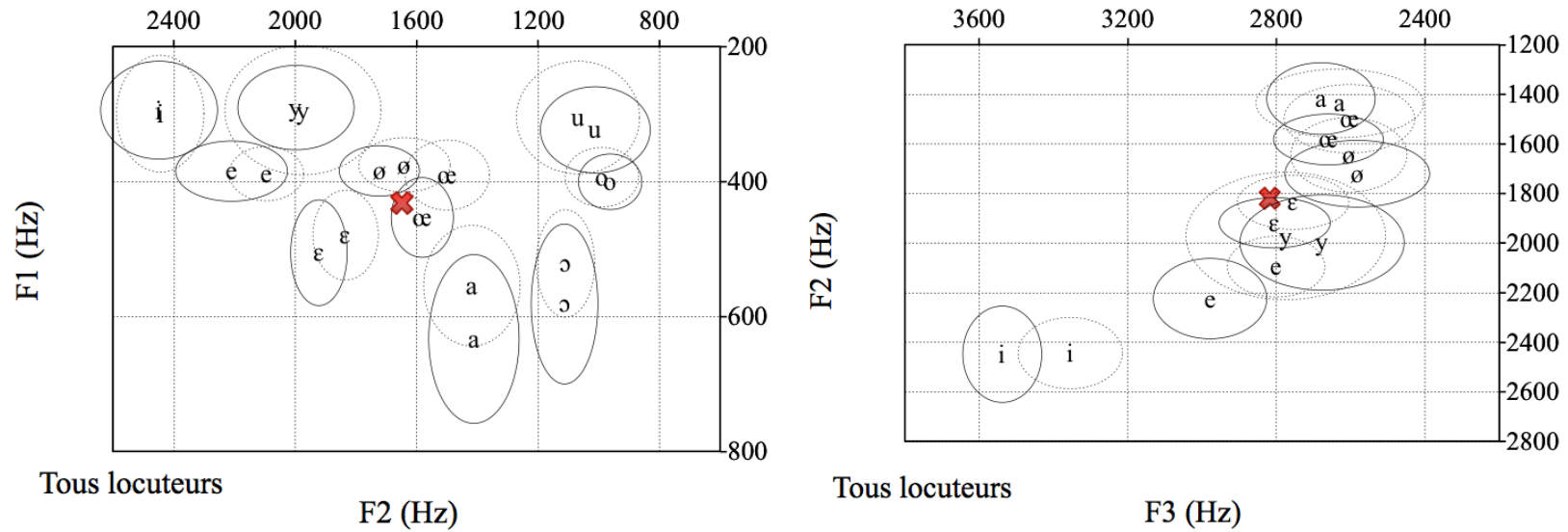
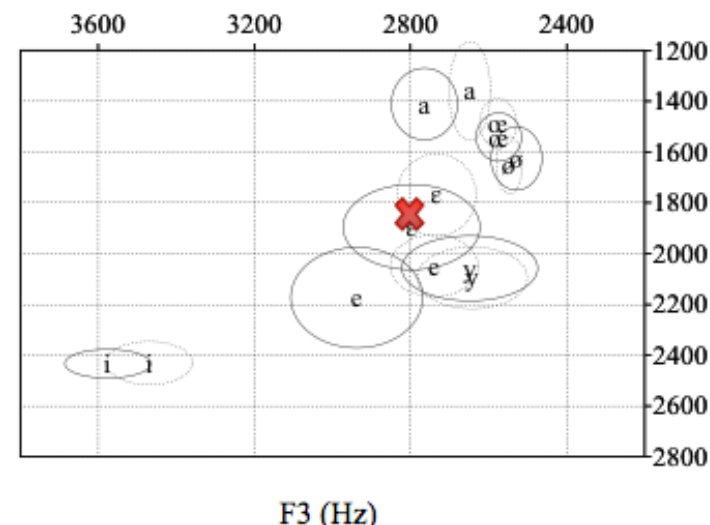
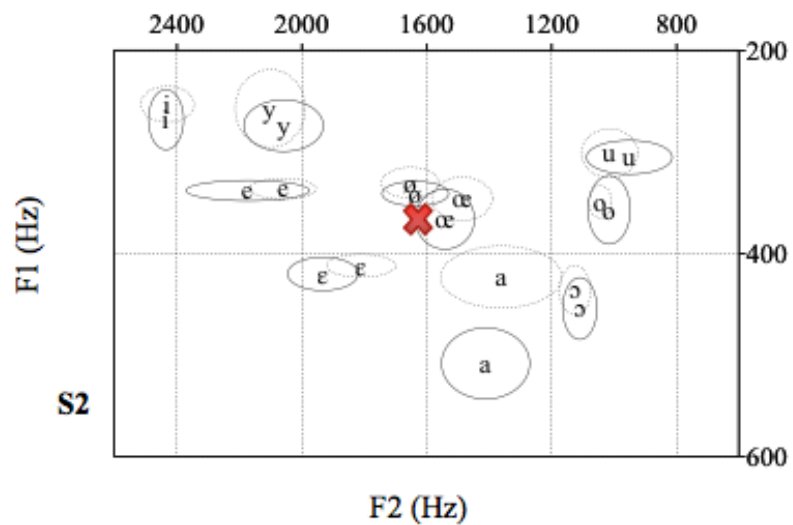
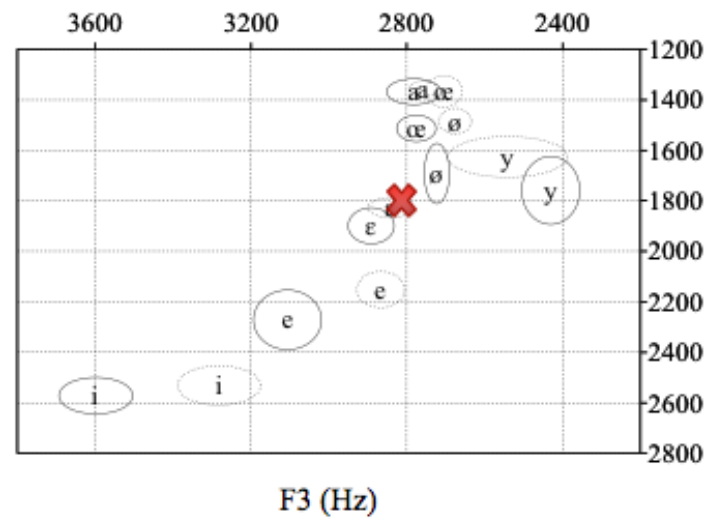
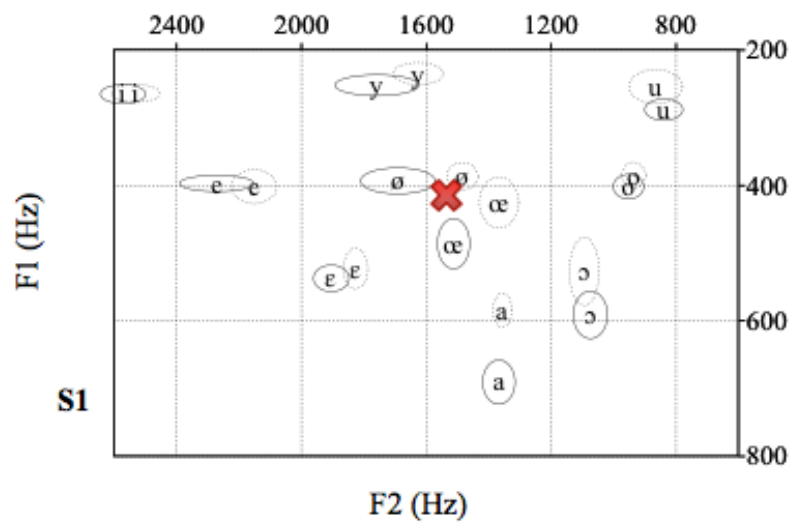


Figure 49 : Valeurs moyennes des voyelles /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/ et /u/, /o/, /ɔ/ sur les axes F1/F2 à gauche et F2/F3 à droite (en Hz), en position IP (ellipse d'écart-type en trait plein) et position W (ellipse d'écart-type en trait pointillé), tous locuteurs confondus. La croix rouge représente le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3.





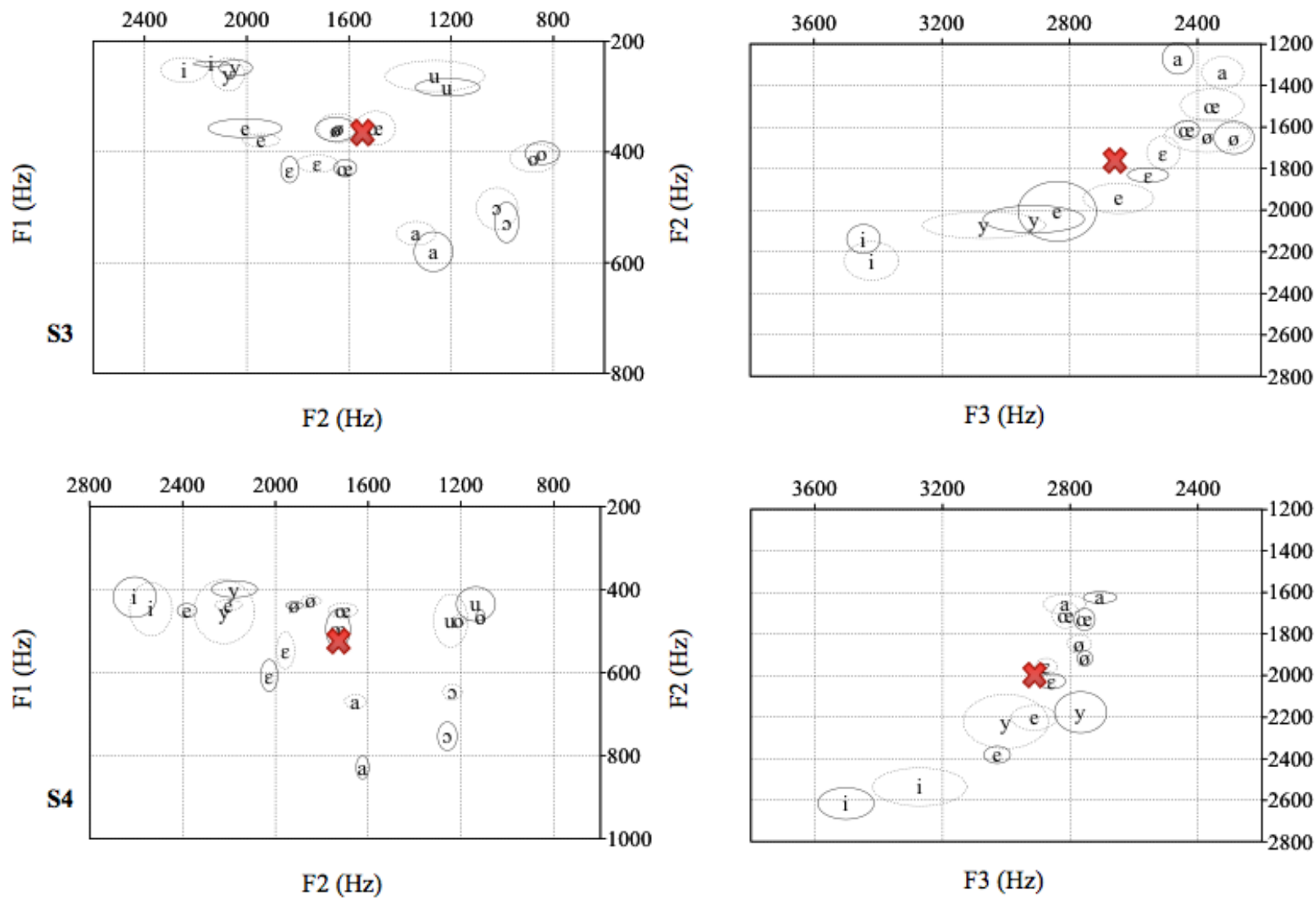


Figure 50 : Valeurs moyennes des voyelles /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/ et /u/, /o/, /ɔ/ sur les axes F1/F2 à gauche et F2/F3 à droite (en Hz), en position IP (trait plein) et position W (trait pointillé), pour chaque locuteur S1, S2, S3 et S4. La croix rouge représente le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3



## 9. ANALYSE DES CONTRASTES PAR PAIRES DE VOYELLES

Dans ce chapitre, nous souhaitons tester l'effet de la position prosodique sur les différents contrastes phonologiques [ $\pm$ arrondi], [ $\pm$ haut], [ $\pm$ bas] et [ $\pm$ arrière], contrastes qui organisent et définissent les voyelles étudiées dans cette thèse. Afin de répondre à cette question, nous avons effectué des analyses par paires de voyelles.

La position initiale de constituant IP, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, modifie la réalisation spectrale et articulatoire des voyelles. Les modifications vont dans une direction particulière : on observe à la fois des modifications articulatoires qui tendent à une augmentation de l'étirement / de l'aperture aux lèvres, quelque soit la voyelle considérée et également à un renforcement de certaines caractéristiques acoustiques propres à la voyelle considérée. Nous avons voulu savoir quelles sont les conséquences de ces modifications articulatoires et acoustiques en termes de contrastes par paires de voyelles. Le contraste entre paires de voyelles est-il maximal en position IP ? La distance entre les deux voyelles d'une paire étudiée est-elle plus forte en position IP ?

Pour cela, nous avons étudié l'interaction de la position prosodique sur les 4 contrastes phonologiques: [ $\pm$ arrondi], [ $\pm$ arrière], [ $\pm$ haut] et [ $\pm$ bas].

Suivant les contrastes, nous étudions les couples de voyelles suivants :

- [ $\pm$ arrondi] : /i-y/, /e-ø/ et /ɛ-œ/ (**contrastif**)
- [ $\pm$ arrière] : /i-u/, /e-o/ et /ɛ-ɔ/ et [ $\pm$ arrière] : /y-u/, /ø-o/ et /œ-ɔ/
- [ $\pm$ bas] : /e-ɛ/ /ø-œ/ et /o-ɔ/
- [ $\pm$ haut] : /i-e/, /y-ø/ et /u-o/

Un test ANOVA à 3 facteurs a permis de déterminer s'il existait une interaction entre les facteurs 'position prosodique', 'paires de voyelles' et 'locuteurs'. Une interaction entre les deux facteurs 'positions prosodiques' et 'paires de voyelles' montre que l'effet de la position prosodique dépend de la spécification de la voyelle dans la paire. Un test post-hoc de Tukey a été effectué et le degré de significativité a été déterminé à  $p < .05$ . Les résultats doivent être lus de la manière suivante : soit un paramètre articulatoire noté X, nous observerons une interaction entre les deux facteurs si l'effet de la position prosodique fait diminuer le paramètre X pour une voyelle de la paire et fait augmenter le même paramètre X pour l'autre voyelle ou si l'effet de la position prosodique fait augmenter/diminuer le paramètre X pour les deux voyelles mais que cette augmentation/diminution est plus importante pour l'une des deux voyelles. Nous ne trouverons aucune interaction entre les deux facteurs si le paramètre X évolue de manière similaire pour les deux voyelles en position W et IP. Les résultats de l'interaction entre 'positions prosodique' et 'voyelle' et les résultats issus du test post-hoc sont reportés sur la ligne (a) des tableaux suivants. Pour les résultats post-hoc, quand la distinction est

maximisée, le résultat est surligné en gras. Une interaction entre les 3 facteurs ‘positions prosodiques’, ‘paires de voyelles’ et ‘locuteur’ montre que l’effet de la position prosodique sur les paires de voyelles dépend du locuteur. Le résultat de cette interaction est résumé sur la ligne (b) des tableaux. Dans le cas où une interaction entre ces 3 facteurs a été trouvée, les résultats post-hoc ont été présentés sur la ligne (c), locuteur par locuteur.

## 9.1 Contraste [ $\pm$ arrondi]

**Q2 :** *Comment l'effet de la position prosodique interagit avec le contraste phonologique [ $\pm$ arrondi] en termes articulatoire et acoustique?*

**Procédure :** Quatre paramètres articulatoires et deux paramètres acoustiques ont été retenus pour rendre compte de ce contraste : l'aire aux lèvres, l'aperture, l'étirement, la protrusion, les formants F2 et F3. Les paires étudiées sont /i-y/, /e-ø/, /ε-œ/.

**Résultat :**

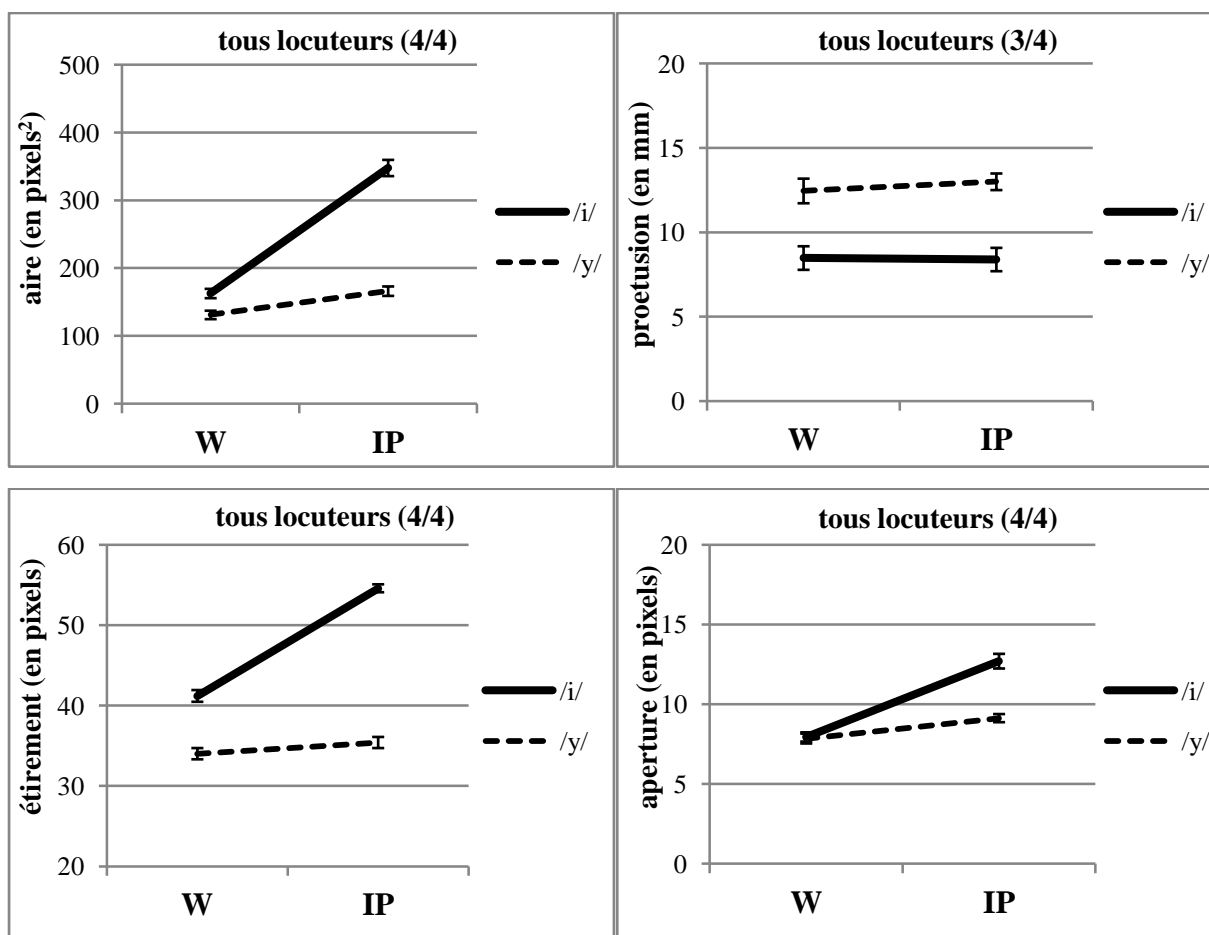
Aucune interaction entre la position prosodique et la paire de voyelles n'est observée sur les mesures de protrusion.

Par contre, les voyelles [-arrondi] sont plus distinctes des voyelles [+arrondi] en position IP, en termes d'aire aux lèvres, d'aperture et d'étirement (excepté pour /ε-ɔ/). Cette maximisation se réalise car l'augmentation de l'aire et de l'étirement est plus élevée pour les voyelles [-arrondi] que [+arrondi].

Aucune interaction entre la position prosodique et la paire de voyelles n'est observée sur le formant F2. Il existe cependant une interaction avec le locuteur, qui montre que le contraste pour la paire /e-ø/ et la paire /ε-œ/ est maximisée en position IP respectivement pour S2, S3, S4 et pour S2, S4.

Le formant F3 est un corrélant acoustique robuste qui rend compte de la maximisation des voyelles /i-y/ et /e-ø/ en position IP (tous locuteurs confondus). Cette maximisation se réalise par un renforcement phonologique des voyelles, les valeurs sont plus basses pour la voyelle [+arrondi] et plus élevées pour la voyelle [-arrondi].

En termes articulatoire, les mesures permettant de rendre compte du trait [ $\pm$ arrondi] sont : l'étirement, l'aperture, l'aire aux lèvres et la protrusion. Nous allons donc observer l'interaction du contraste [ $\pm$ arrondi] sur ces quatre paramètres pour les paires /i-y/, /e-ø/, /ε-œ/, pour lesquelles le contraste [ $\pm$ arrondi] est distinctif. La Figure 51 montre les variations de la paire /i-y/ en position W et en position IP, tous locuteurs confondus, pour ces quatre paramètres.



**Figure 51 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /i/ et /y/ sur les paramètres d'aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), de protrusion (en mm), d'étirement (en pixels) et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

		aire	étirement	aperture	protrusion
/i-y/	(a)	<i>F</i> (1,211)=204 **	<i>F</i> (1,211)=123**	<i>F</i> (1,211)=56**	<i>F</i> (1,158)=0,2 ns
		<b>IP(i) &gt;* IP(y)</b>	<b>IP(i) &gt;* IP(y)</b>	<b>IP(i) &gt;* IP(y)</b>	
		W(i) >* W(y)	W(i) >* W(y)	W(i) = W(y)	
	(b)	<i>F</i> (3,211)= 17**	<i>F</i> (3,211)= 8**	<i>F</i> (3,211)= 9**	<i>F</i> (2,158)= 0,1 ns

**Tableau 77: Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour les paires de voyelles /i-y/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

Pour la paire /i-y/, les résultats statistiques montrent qu'il existe une interaction entre la paire de voyelles /i-y/ et la position prosodique pour l'aire, l'étirement et l'aperture. Aucune interaction n'est observée entre la paire de voyelle et la position prosodique pour la protrusion.

- Pour l'aire et l'étirement : comme le montre la Figure 51, les valeurs d'aire et d'étirement sont plus élevées pour la voyelle /i/ que la voyelle /y/ en position IP et W. D'après le Tableau 77, ces différences sont significatives. De plus, la Figure 51 montre bien que l'augmentation de

l'aire et de l'étirement est plus importante en IP pour la voyelle /i/ que pour /y/, il existe donc une interaction entre les facteurs 'position prosodique' et 'paires de voyelles'. On peut donc conclure que le contraste [±arrondi] pour la paire /i-y/, observé en position W, se trouve maximisé en position IP.

- Pour l'aperture : les résultats post-hoc montrent que les valeurs d'aperture sont significativement plus élevées pour la voyelle /i/ que la voyelle /y/ en position IP uniquement. En position W, les valeurs d'aperture sont similaires entre les deux voyelles (7,94 pixels pour /i/ et 7,84 pixels pour /y/), comme observé sur Figure 51. L'augmentation de l'aperture est plus importante pour la voyelle /i/ que la voyelle /y/, comme le confirme l'interaction. Le contraste entre les deux voyelles se trouve donc maximisé en position IP.
- Pour la protrusion : La Figure 51 montre que la protrusion est plus élevée pour la voyelle arrondie /y/ que pour la voyelle non-arrondie /i/, mais l'effet de la position prosodique ne varie pas selon la voyelle considérée, il n'y a donc aucune interaction entre les deux facteurs.

Les résultats décrits sur la ligne (b) du Tableau 77, montrent qu'il existe une interaction entre la position prosodique, la paire de voyelle et le locuteur pour les paramètres d'aire, d'étirement et d'aperture. Nous avons donc relevé les résultats post-hoc de cette interaction. Les résultats sont présentés dans le Tableau 78.

(c)		aire		étirement		aperture	
S1	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)		<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns	<b>ns</b>	ns
/i-y/ S2	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)		<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns
S3	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns		<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(y) >* W(i)
S4	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns		<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	ns

**Tableau 78: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', sur les paramètres aire, étirement et aperture pour les paires de voyelles /i-y/ locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

#### Sur les variations d'aire aux lèvres :

- Pour les locuteurs S1 et S2, le contraste entre les deux voyelles de la paire /i-y/ qui existe en position W est maximisé en position IP. L'augmentation est plus forte pour la voyelle /i/ que pour la voyelle /y/ en position IP, comme le montre la Figure 52.
- Pour les locuteurs S3 et S4 : les valeurs moyennes d'aire des deux voyelles ne sont pas significatives distinctes l'une de l'autre en position W alors qu'en position IP le contraste est clairement maximisé par une augmentation plus forte des valeurs d'aire pour la voyelle non-arrondie.

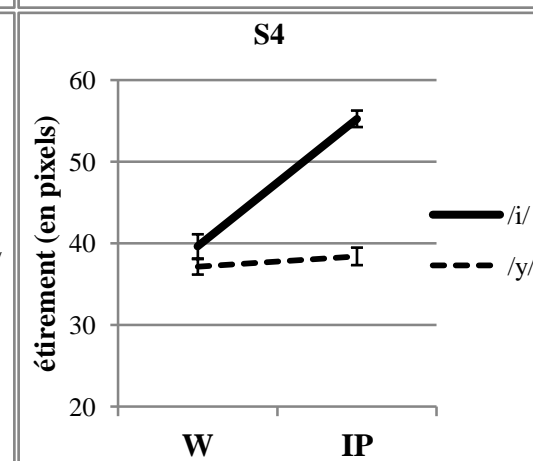
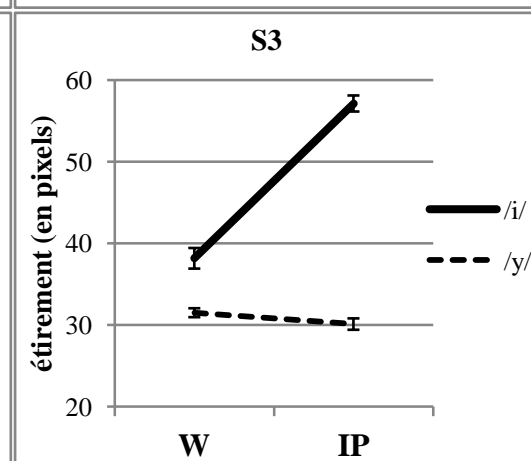
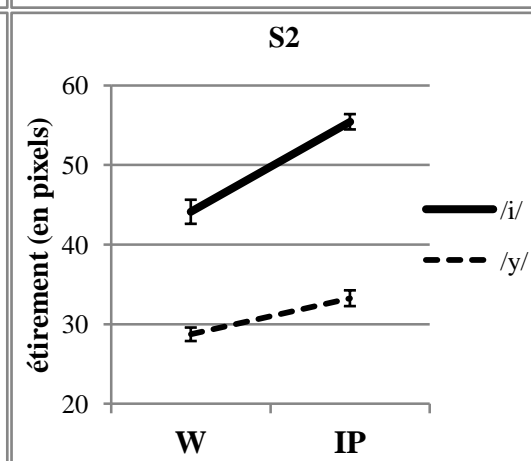
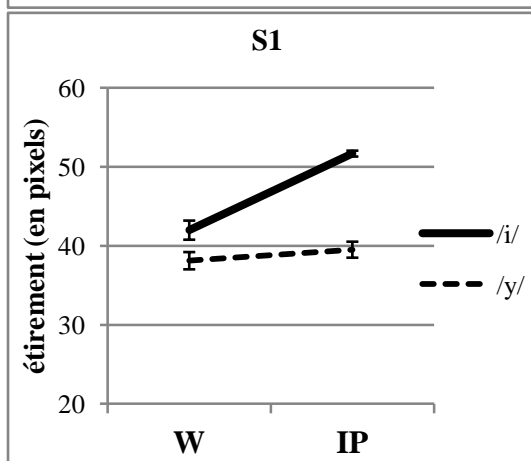
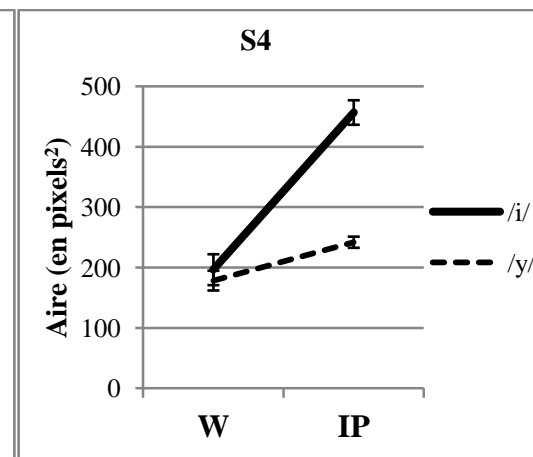
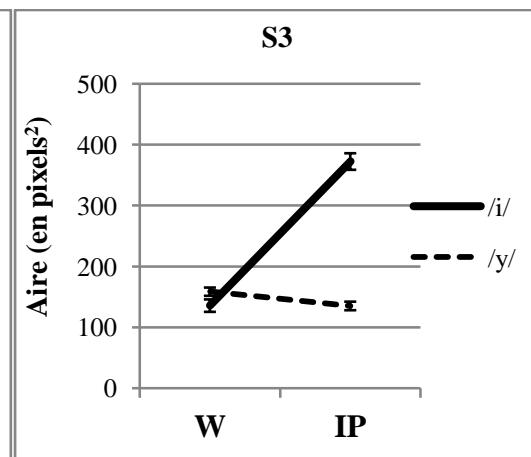
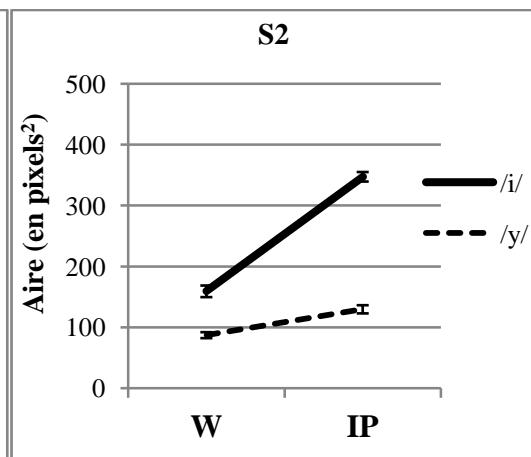
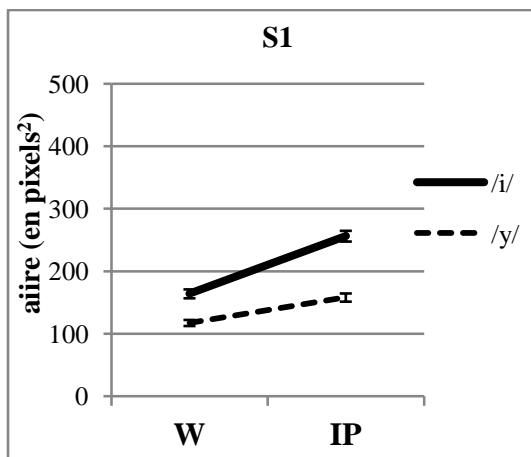
### **Sur les variations d'étirement :**

- Pour les locuteurs S2 et S3 : La distinction entre les deux voyelles est significative en position W. Cette distinction est maximisée en position IP, par l'augmentation plus forte des valeurs d'étirement pour la voyelle non-arrondie.
- Pour les locuteurs S1 et S4 : la distinction entre les deux voyelles n'est pas significative en position W. En position IP, la distinction entre les deux voyelles est maximisée car l'effet de la position prosodique est plus fort pour la voyelle non-arrondie.

### **Sur les variations d'aperture:**

- Les locuteurs S2 et S4 présentent des stratégies similaires : les valeurs moyennes d'aperture entre les deux voyelles sont telles qu'il n'existe pas de distinction significative entre les deux voyelles en position W. Cependant, on observe une augmentation d'étirement pour les deux voyelles en position IP, mais la position prosodique IP influence plus fortement la voyelle /i/ que la voyelle /y/. Le contraste entre les deux paires se trouve donc maximisé.
- Le locuteur S1 adopte une stratégie différente. La position prosodique influence avec une même amplitude la réalisation des voyelles /i/ et /y/, comme le montre la Figure 52. Pour cette raison nous n'observons qu'aucune distinction significative entre les deux voyelles en position IP ou en position W.
- Le locuteur S3 est le seul pour qui les valeurs d'aperture sont plus élevées pour la voyelle /y/ que pour la voyelle /i/ en position W. Si les mesures restent relativement stables pour la voyelle /y/ entre la position W et la position IP, les mesures d'aperture augmente fortement en position IP pour la voyelle non-arrondie /i/. En position IP, les valeurs d'aperture se trouvent donc plus élevées pour la voyelle /i/ que pour la voyelle /y/.





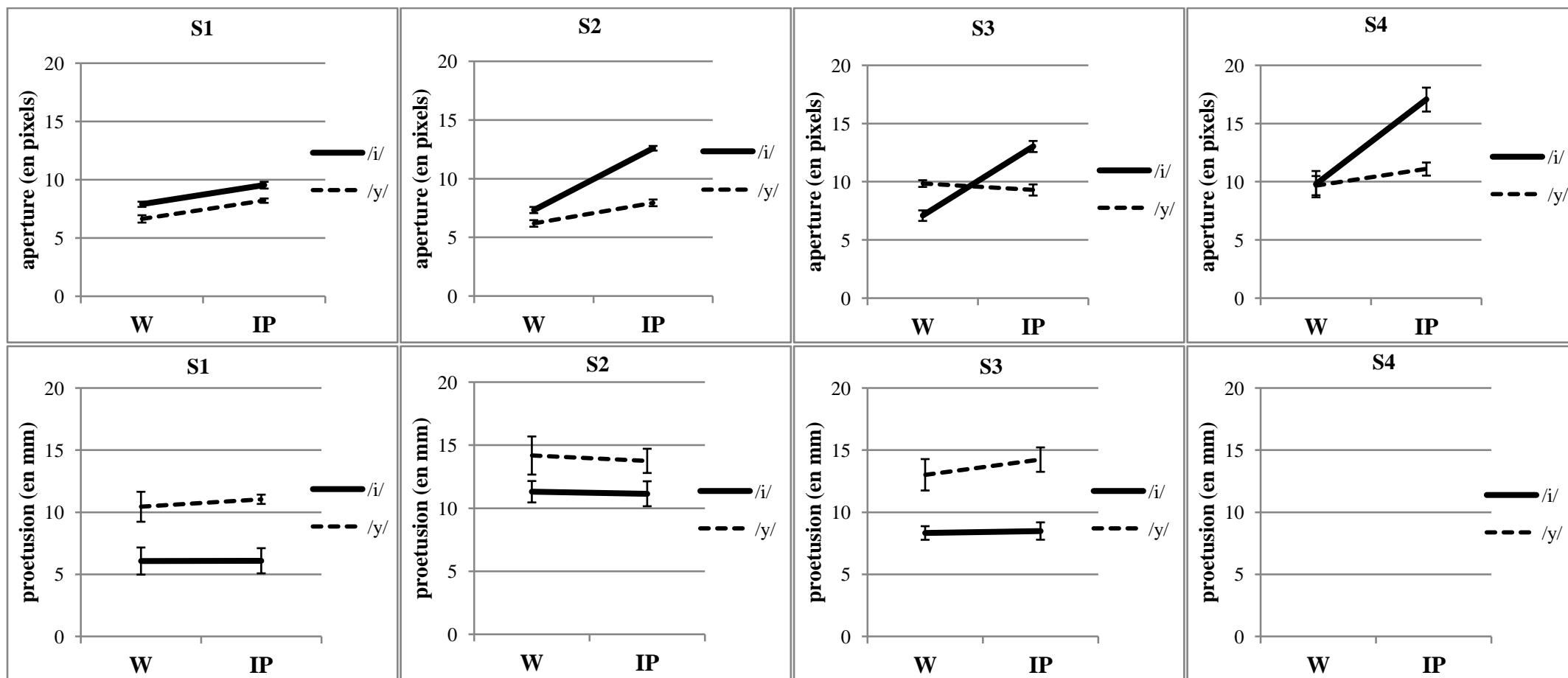
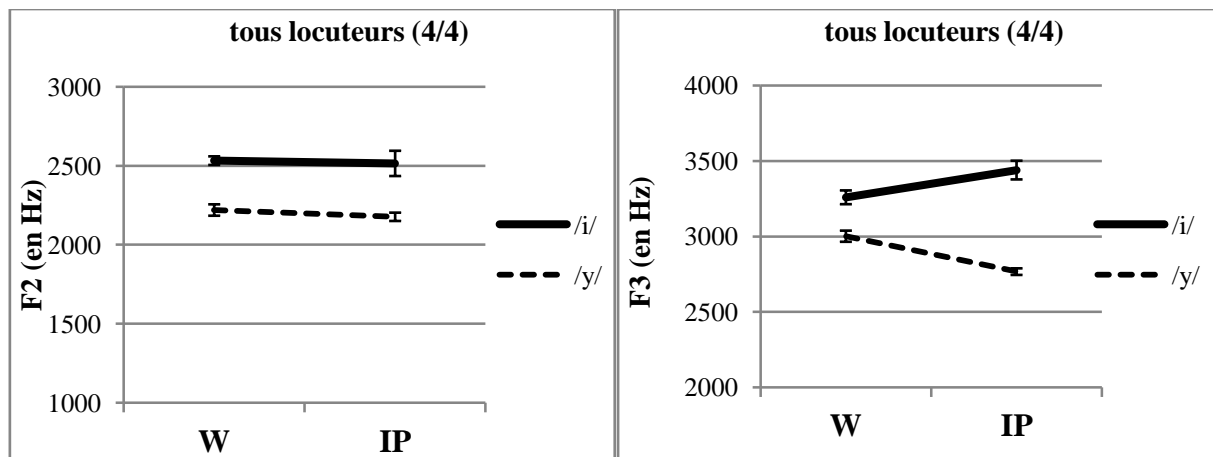


Figure 52 : variations pour la paire /i-y/ en position IP et W pour les mesures d'aire (en pixels<sup>2</sup>), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) et de protrusion (en mm) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). Les valeurs de protrusion n'ont pu être extraites pour le locuteur S4.

Nous allons à présent observer les résultats des interactions entre les facteurs ‘position prosodique’, ‘paires de voyelles’ et ‘locuteurs’ sur les paramètres acoustiques qui permettent la distinction [±arrondi] des voyelles /i-y/ : F3 et F2. La Figure 53 montre l’effet de la position prosodique sur la paire de voyelles /i-y/ pour les formants F2 et F3.



**Figure 53 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /i/ et /y/ sur les paramètres F3 (en Hz) et F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

- Pour le formant F2 : comme le montre la Figure 53, les valeurs sont plus élevées pour la voyelle /i/ que pour la voyelle /y/, et cette distinction ne varie pas selon les deux positions prosodiques IP et W : en effet, aucune interaction n’est observée entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘paire de voyelles’ pour le formant F2.
- Pour le formant F3 : les valeurs sont plus élevées pour la voyelle /i/ que pour la voyelle /y/, cette distinction est significative en position W et en position IP. De plus, en position IP, les valeurs de F3 diminuent pour la voyelle arrondie et augmentent pour la voyelle /i/, comme le confirme l’interaction entre les deux facteurs dans le Tableau 79. La distinction entre les deux voyelles se trouve donc maximisée en position IP.

Pour le paramètre F3, on observe une interaction entre les facteurs ‘position prosodique’ ‘paire de voyelles’ et ‘locuteurs’, comme le montre le Tableau 79.

		F2	F3
/i-y/	(a)	F(1,205)= 2 ns	F(1,205)=46**
			<b>IP(i) &gt;* IP(y)</b>
			W(i) >* W(y)
	(b)	F(3,205)=1 ns	F(3,205)=4*

**Tableau 79: Résultats statistiques sur les paramètres F2 et F3 pour la paire de voyelles /i-y/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

(c)	F3	
S1	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)
/i-y/ S2	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)
S3	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)
S4	<b>IP(i)&gt;*IP(y)</b>	W(i) >* W(y)

**Tableau 80: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', sur les paramètres F2 et F3 pour les paires de voyelles /i-y/ locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

**Sur les variations de F3 (voir Figure 54):**

- Les locuteurs S1 et S4 ont une stratégie similaire. La voyelle /i/ se distingue de la voyelle /y/ par une valeur moyenne de formant plus élevé. L'influence de la position prosodique dépend de la nature de la voyelle. Les valeurs de F3 de /y/ diminuent en position IP comparé à la position W alors que les valeurs de F3 de /i/ augmentent en position IP comparé à la position W. La distinction entre les deux voyelles, observée en position W, est maximisée en position IP.
- Les locuteurs S2 et S3 présentent une autre stratégie. Pour le locuteur S2, les valeurs de F3 restent assez stables pour la voyelle /y/ entre les positions IP et W, mais les valeurs augmentent en position IP pour la voyelle /i/, d'où l'interaction. A l'inverse, pour le locuteur S3, les valeurs de F2 restent assez stables pour la voyelle /i/ et les valeurs diminuent en position IP pour la voyelle /y/, d'où l'interaction. Dans les deux cas, en position IP les deux voyelles sont plus distinctes en termes de F3.

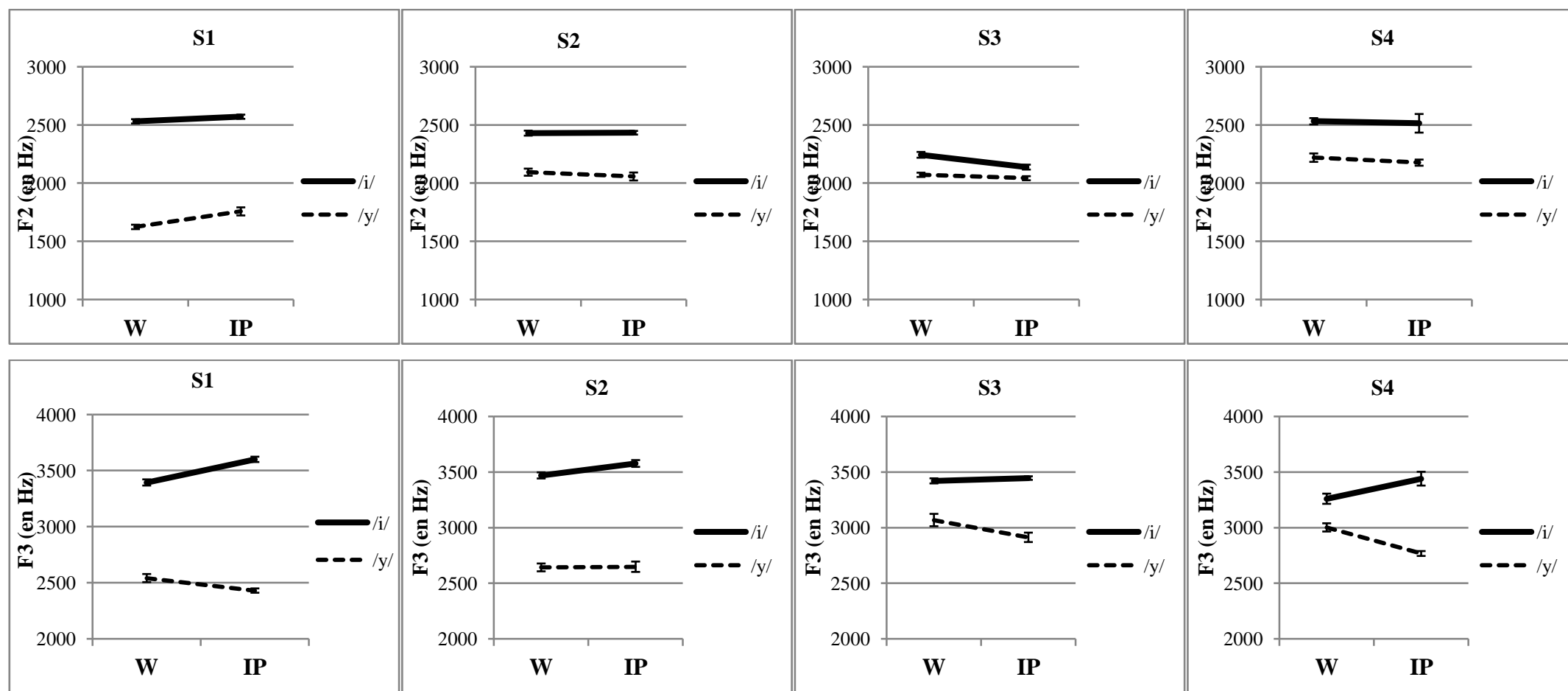


Figure 54 : Variations pour la paire /i-y/ en position IP et W pour les mesures de F2 (en Hz) et F3 (en Hz) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4).

Nous allons étudier les interactions entre la paire /e-ø/ et la position prosodique. Les variations d'aire, de protrusion, d'étirement et d'aperture pour la paire /e-ø/, en fonction de la position prosodique IP et W sont présentés dans la Tableau 81 et la Figure 55.

Comme pour la paire /i-y/, nous observons une interaction entre la position prosodique et la paire de voyelle /e-ø/ pour les paramètres d'aire, d'étirement et d'aperture. Aucune interaction n'est observée sur les mesures de protrusion.

- Pour l'aire et l'étirement : la Figure 55 montre que les valeurs d'aire et d'étirement sont plus élevées pour la voyelle /e/ que la voyelle /ø/ en position IP et W. Cette différence est significative, comme le montre le Tableau 81. Cependant, la position IP influence plus fortement la voyelle non-arrondie que la voyelle arrondie, d'où l'interaction. On peut donc conclure que le contraste [±arrondi] pour la paire /i-y/, observé en position W, se trouve maximisé en position IP.
- Pour l'aperture : les résultats post-hoc montrent que les valeurs moyennes d'aperture de la voyelle /e/ ne sont pas significativement distinctes des valeurs moyennes de la voyelle /ø/ en position W. Il existe cependant une interaction entre la position prosodique et la paire de voyelles car les valeurs moyennes de la voyelle non-arrondie augmentent plus fortement que pour les valeurs moyennes de la voyelle arrondie en position IP.

		aire	étirement	aperture	protrusion
/e-ø/	(a)	F(1,203)=217**	F(1,203)=72**	F(1,203)=26**	F(1,153)=0,1 ns
		<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	
		W(e) >* W(ø)	W(e) >* W(ø)	W(e) > W(ø)	
	(b)	F(3,203)=19**	F(3,203)=8**	F(3,203)=5 *	F(2,153)=1 ns

**Tableau 81 : Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour la paire /e-ø/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif**

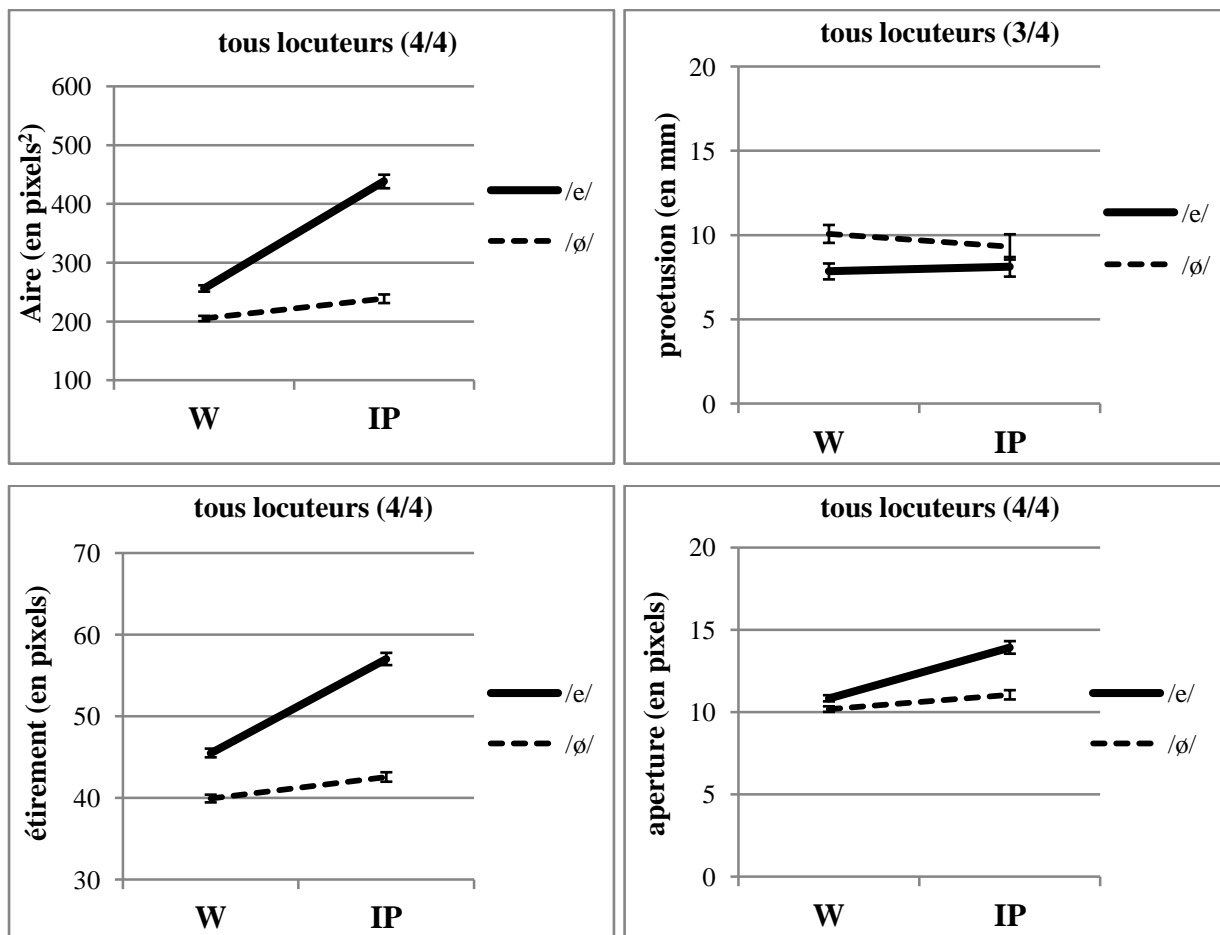


Figure 55 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /e/ et /ø/ sur les paramètres d'aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), de protrusion (en mm), d'étirement (en pixels) et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.

Nous avons également observé une interaction entre les facteurs 'position prosodique', 'paire de voyelles' et 'locuteurs', pour les paramètres d'aire, d'aperture et d'étirement. Les résultats post-hoc sont les suivants :

(c)		aire		étirement		aperture		
S1	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)		<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)	ns	ns	
/e-ø/ S2	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)	/e-ø/	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)	/e-ø/	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns
S3	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns		<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns		<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns
S4	<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns		<b>IP(e)&gt;*IP(ø)</b>	ns		ns	ns

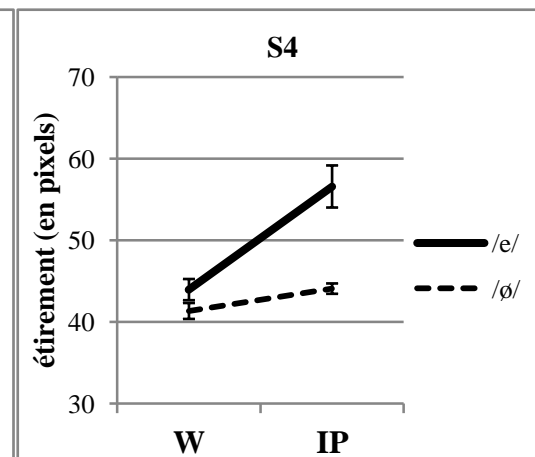
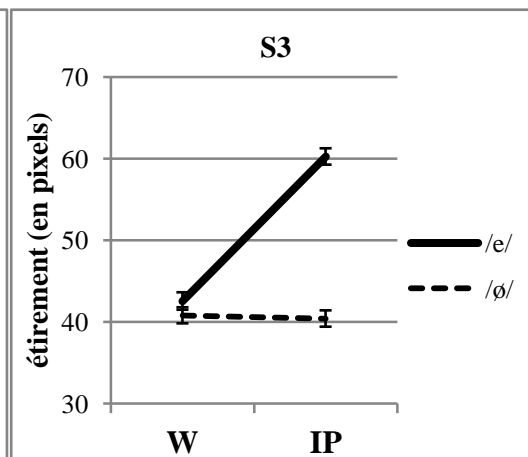
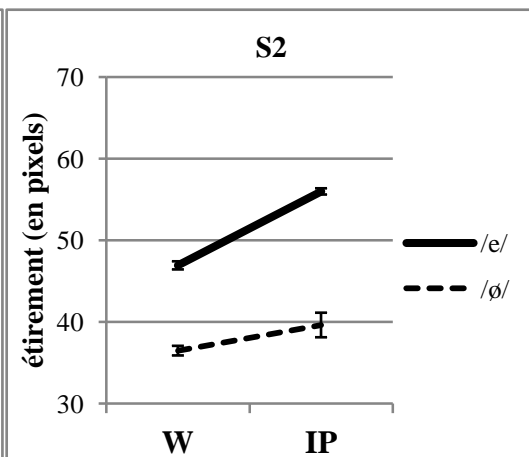
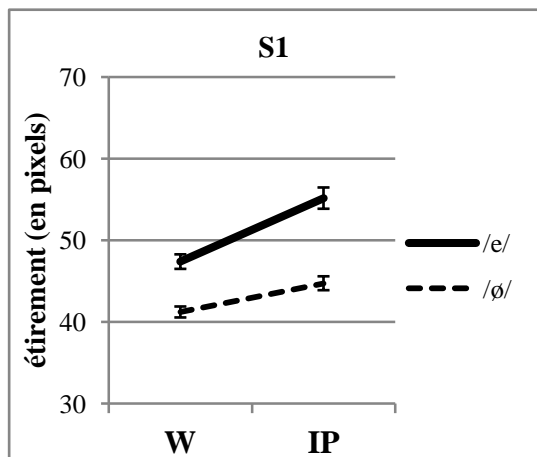
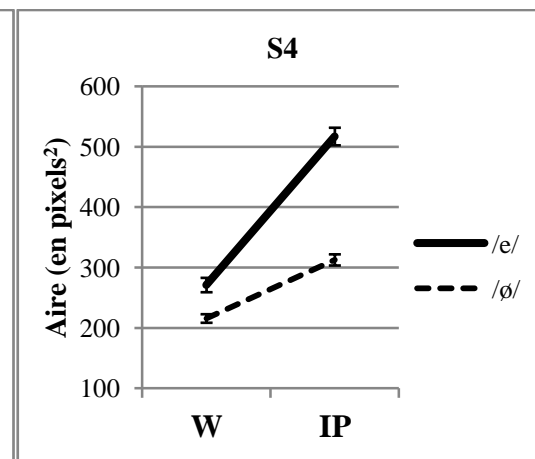
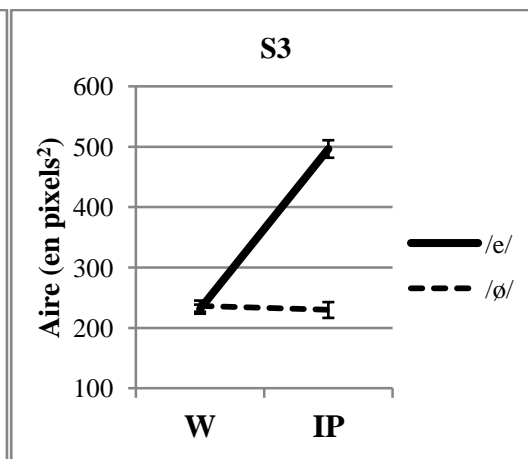
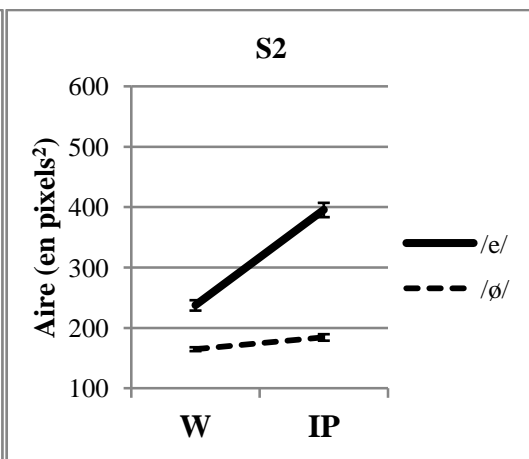
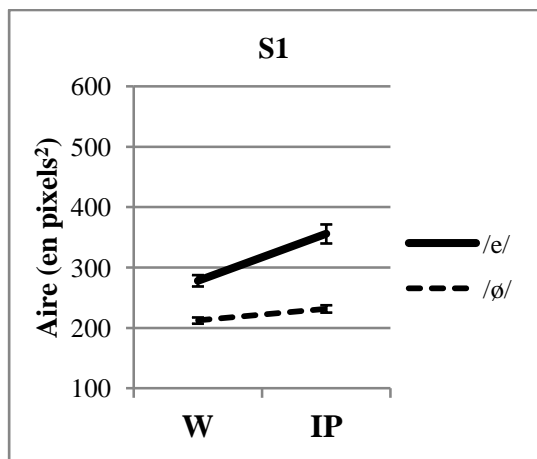
Tableau 82: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', sur les paramètres d'aire, d'étirement et d'aperture pour les paires de voyelles /e-ø/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.

Comme le montre la Figure 56, l'augmentation des paramètres, d'aire, d'étirement est plus forte en position IP pour la voyelle /e/ que la voyelle arrondie. Cette différence est significative, comme le montre le Tableau 82, pour chaque locuteur : la distinction est maximisée en position IP.

Pour les mesures d'aire et d'étirement, pour les locuteurs S1 et S2, il existe une distinction significative entre les deux voyelles [ $\pm$ arrondi] en position W, pour les deux autres (S3 et S4), les valeurs moyennes sont trop proches.

Pour l'aperture, la distinction entre les deux voyelles est maximisée pour S2 et S3, car l'augmentation des valeurs d'aperture est plus élevée que celle observée pour la voyelle arrondie en position IP. Pour les locuteurs S1 et S4, l'effet de la position prosodique ne dépend pas de la voyelle, les résultats post-hoc ne sont pas significatifs : on observe en effet une augmentation des valeurs d'aperture dont l'amplitude est similaire pour les deux voyelles.





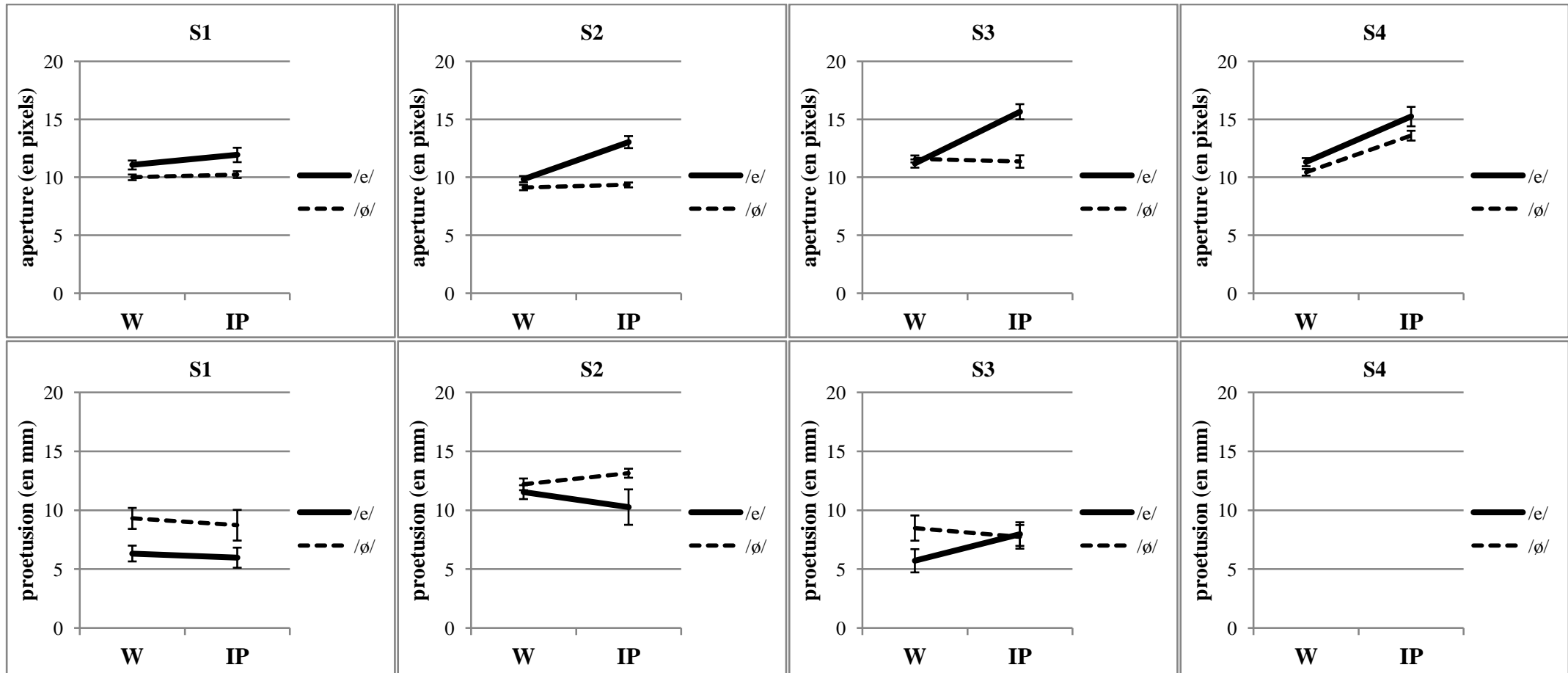
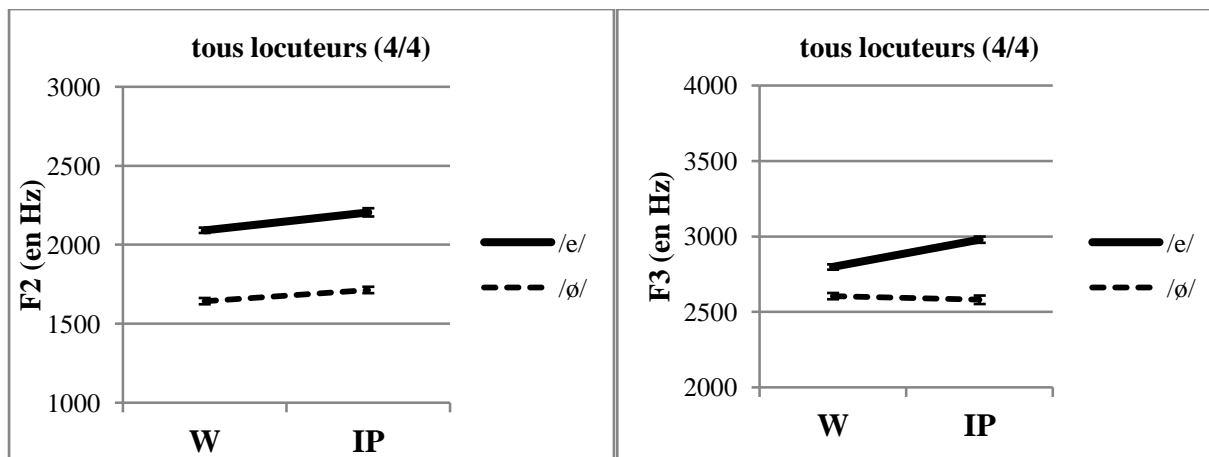


Figure 56 : variations pour la paire /e-ø/ en position IP et W pour les mesures d'aire (en pixels<sup>2</sup>), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) et de proetusion (en mm) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). Les valeurs de proetusion n'ont pu être extraites pour le locuteur S4

Nous allons à présent observer les résultats des interactions entre les facteurs ‘position prosodique’, ‘paires de voyelles’ et ‘locuteurs’ sur les paramètres acoustiques qui permettent la distinction [±arrondi] des voyelles /e-ø/ : F3 et F2. La Figure 57 représente les valeurs des formants F2 et F3 tous locuteurs confondus, pour la paire de voyelles /e-ø/ , en position IP et en position W.



**Figure 57 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /e/ et /ø/ sur les paramètres F3 (en Hz) et F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

Le Tableau 83 montre qu’il existe une interaction entre la position prosodique et la paire de voyelles pour le formant F3. En position IP, la distinction entre les deux voyelles est maximisée en termes de F3. Aucune interaction entre position prosodique et paire de voyelles n’est observée tous locuteurs confondus pour F2, mais il existe une interaction avec le locuteur. Les résultats post-hoc ainsi que la Figure 58 montre que le contraste est maximisé pour 3 locuteurs (S2, S3, S4) en position IP.

		F2	F3
/e-ø/	(a)	F(1,201)=2 ns	F(1,201)=81** <b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b> W(e) >* W(ø)
	(b)	F(3,201)=4*	F(3,203)=1 ns

**Tableau 83: Résultats statistiques sur les paramètres F2, F3 pour la paire de voyelles /e-ø/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

(c)	F2	
S1	IP(e) >* IP(ø)	<b>W(e) &gt;* W(ø)</b>
/e-ø/ S2	<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)
S3	<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)
S4	<b>IP(e) &gt;* IP(ø)</b>	W(e) >* W(ø)

**Tableau 84: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', sur le paramètre F2 pour la paire de voyelles /e-ø/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

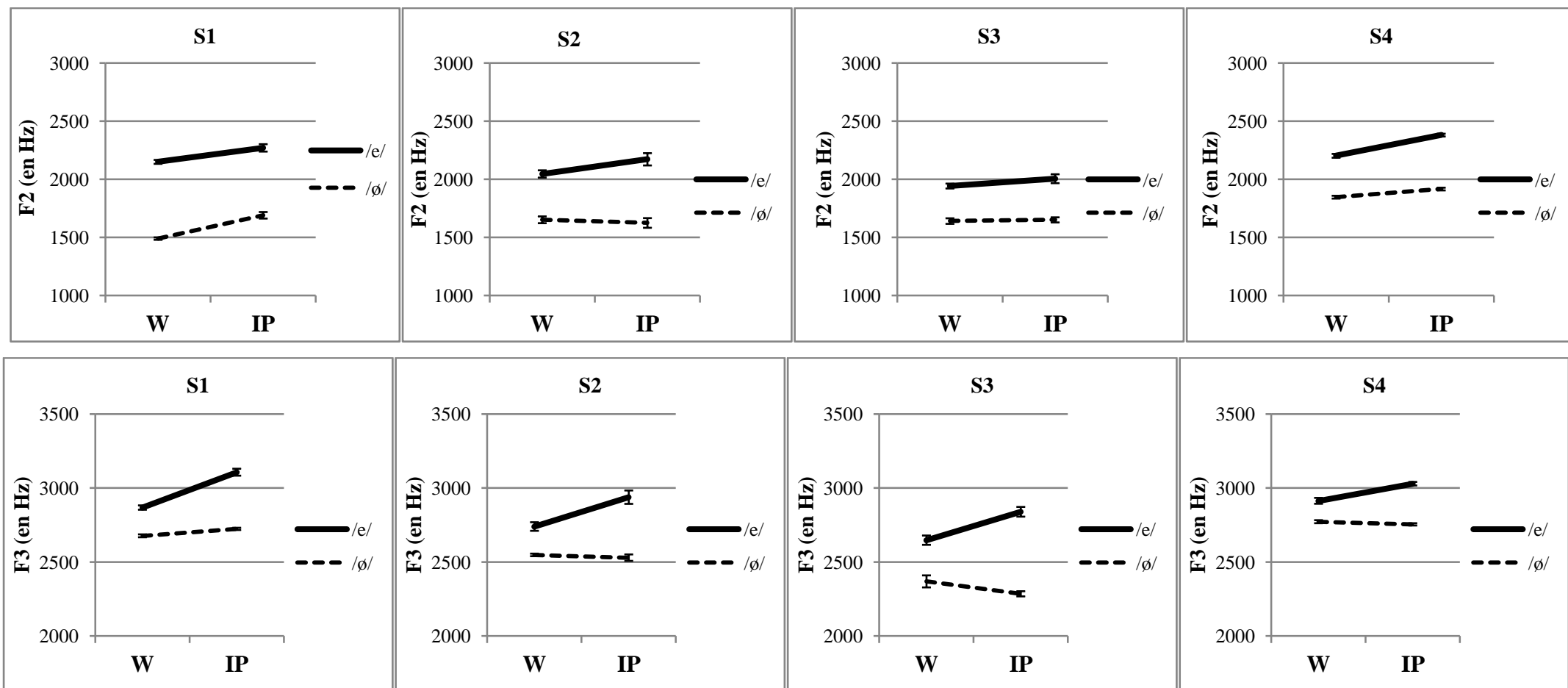


Figure 58 : Variations pour la paire /e-ø/ en position IP et W pour les mesures de F2 (en Hz) et F3 (en Hz) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4).

Nous allons enfin, présenter les résultats des interactions entre la ‘position prosodique’, la ‘paire de voyelles’ et le locuteur’ pour la paire /ε-œ/, pour les mesures articulatoires puis les mesures acoustiques.

- Pour les mesures d’aire aux lèvres et d’aperture, l’observation de la Figure 59 montre que l’augmentation de ces paramètres est plus importante pour la voyelle non-arrondie en position IP que pour la voyelle arrondie, d’où l’interaction observée sur le Tableau 85 de la ligne (a).
- Pour les mesures d’étirement, les valeurs moyennes augmentent pour les deux voyelles de manière similaire, d’où l’absence d’interaction sur le Tableau 85 de la ligne (a).
- Pour les mesures de protrusion, les valeurs de la voyelle non-arrondie diminuent en position IP. Ce changement n’est pas significatif, aucune interaction n’est observée entre la position prosodique et la paire de voyelles.

Les résultats de la ligne (b) du Tableau 85 montrent qu’il n’existe aucune interaction entre les facteurs ‘position prosodique’ ‘locuteurs’ et ‘paires de voyelles’.

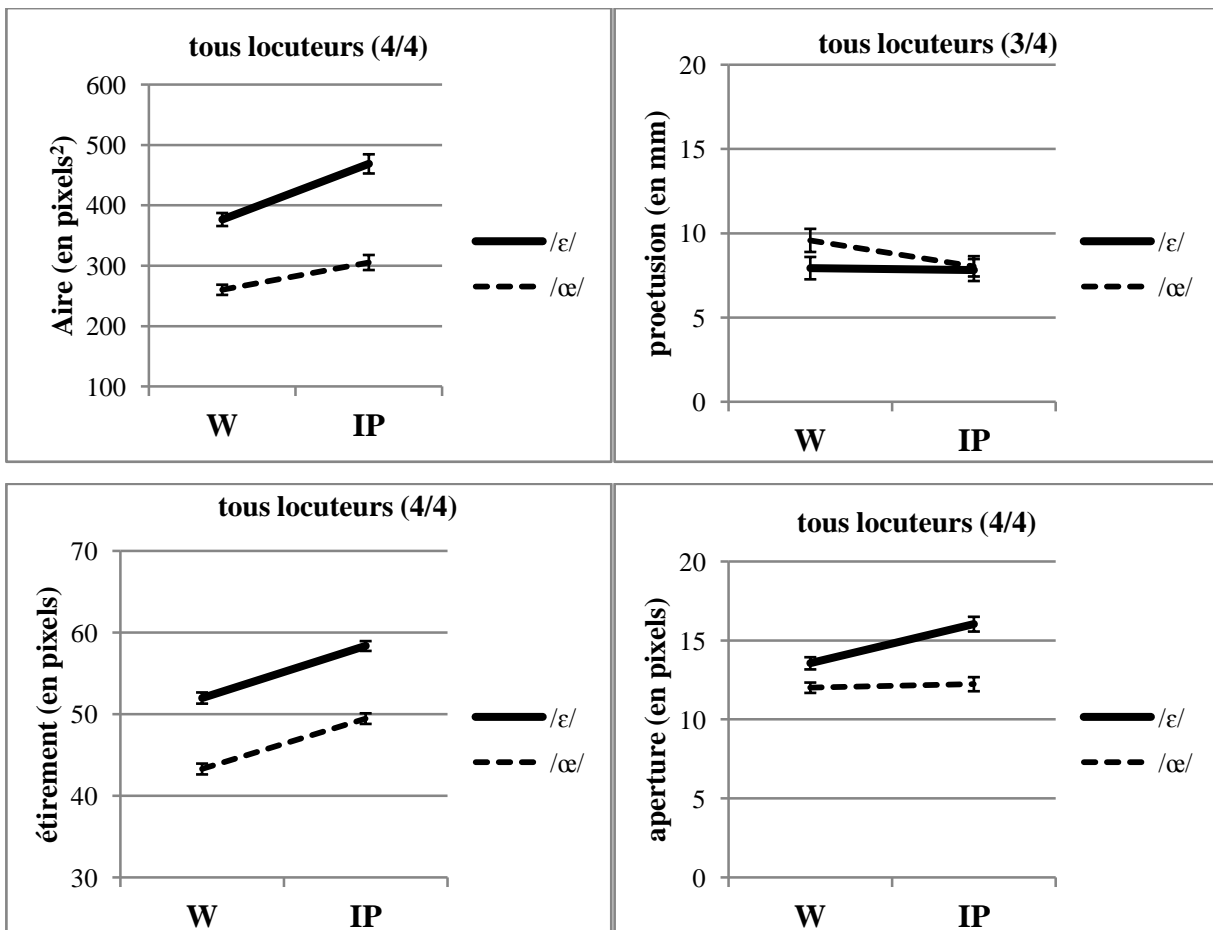


Figure 59 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /ε/ et /œ/ sur les paramètres d’aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), de protrusion (en mm), d’étirement (en pixels) et d’aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.

		aire	étirement	aperture	protrusion
/ε-œ/	(a)	F(1,213)= 9*	F(1,213)=0 ns	F(1,213)=19 **	F(1,151)=2 ns
		<b>IP(ε) &gt;* IP(œ)</b>		<b>IP(ε) &gt;* IP(œ)</b>	
		W(e) >* W(ø)		W(e) >* W(ø)	
	(b)	F(3,213)=0 ns	F(3,213)=1 ns	F(3,213)=1 ns	F(2,151)=1 ns

**Tableau 85: Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour la paire /ε-œ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

		F2	F3
/ε-œ/	(a)	F(1,212)=0 ns	F(1,212)=0 ns
	(b)	F(3,212)=3*	F(3,212)=2 ns

**Tableau 86: Résultats statistiques sur les paramètres F2, F3 pour la paire de voyelles /ε-œ/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

(c)		F2	
S1		IP(ε)>*IP(œ)	<b>W(ε) &gt;* W(œ)</b>
/ε-œ/	S2	<b>IP(ε) &gt;*IP(œ)</b>	W(ε) >* W(œ)
	S3	IP(ε) >* IP(œ)	W(ε)>*W(œ)
	S4	<b>IP(ε)&gt;* IP(œ)</b>	W(ε) >* W(œ)

**Tableau 87: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, sur le paramètre F2 pour la paire de voyelles /ε-œ/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

- Pour les mesures de F2, il n’y a pas d’interaction entre la ‘position prosodique’ et la ‘paire de voyelles’ sur le Tableau 86 de la ligne (a). D’après la ligne (b) du Tableau 86, il existe une interaction entre la ‘position prosodique’, le ‘locuteur’ et la ‘paire de voyelles’. Pour les locuteurs S2, S4, la distinction entre les deux voyelles est maximisée en position IP comme le montre la Figure 60. Pour le locuteur S1, la distinction est maximisée en position W. Pour le locuteur S3 les variations sont similaires entre les positions IP et W.
- Pour les valeurs de F3, il n’existe aucune interaction entre les facteurs ‘position prosodique’ et ‘paire de voyelles’, comme le montre le Tableau 86 à la ligne (a). Les valeurs moyennes de F3

sont telles qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux voyelles en position W et en position IP.

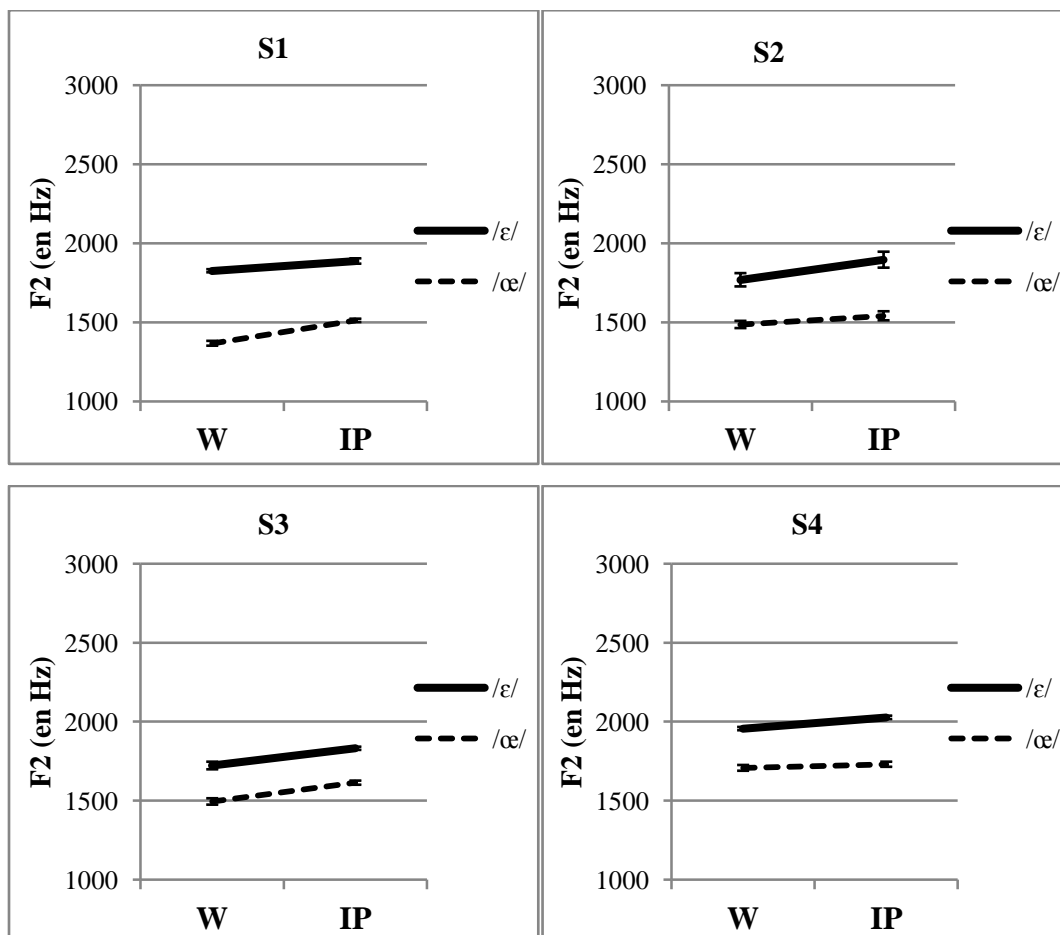


Figure 60 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /ε/ et /œ/, sur le paramètre F2 (en Hz) aux positions IP et W, pour les locuteurs S1, S2, S3 et S4.



## 9.2 Contraste [ $\pm$ arrière]

**Q2 :** *Comment l'effet de la position prosodique interagit avec le contraste phonologique [ $\pm$ arrière] en termes articulatoire et acoustique?*

**Procédure :** Un seul paramètre acoustique est étudié pour rendre compte de ce contraste : le formant F2. Les paires étudiées sont /i-u/, /e-o/, / $\epsilon$ - $\text{ɔ}$ / ainsi que /y-u/, / $\text{ø}$ -o/, / $\text{œ}$ - $\text{ɔ}$ /. Pour les paires /i-u/, /e-o/, / $\epsilon$ - $\text{ɔ}$ / nous avons également observé les variations articulatoires (aire, protrusion, étirement et aperture) car l'arrondissement est un trait redondant pour ces paires.

**Résultat :** Le contraste entre les voyelles [-arrière] et [+arrière] est maximisé en position IP pour l'ensemble des paires étudiée (sauf /i-u/) en termes de F2. Pour les paires /e-o/ et / $\text{ø}$ -o/, les valeurs de F2 diminuent pour la voyelle /o/ et augmentent pour les voyelles [-arrière], les voyelles sont maximale-ment distinctes en position IP. Pour les autres paires, un autre schéma se dessine, les variations de F2 restent stables pour l'une des deux voyelles, et augmentent/diminuent pour l'autre, dans le but de rendre les voyelles plus distinctes entre elles. Le contraste entre les voyelles [-arrière] et [+arrière] est maximisé en termes d'aire, d'étirement et d'aperture pour les paires /i-u/ et /e-o/.

Comme nous ne possédons pas d'enregistrement des contours de la langue, l'étude du contraste [ $\pm$ arrière] se limite à l'étude du formant F2. Les valeurs de F2 sont basses pour une voyelle postérieure et élevée pour une voyelle antérieure. Sur le paramètre F2, les résultats précédents ont montré une augmentation des valeurs pour les voyelles antérieures /e/, / $\epsilon$ /, / $\text{ø}$ / et / $\text{œ}$ / et une diminution des valeurs pour la voyelle /o/ (uniquement), en position IP.

Pour les trois paires /i-u/, /e-o/, / $\epsilon$ - $\text{ɔ}$ /, il existe une interaction entre les facteurs 'position prosodique' et 'paires de voyelles', comme le montre le Tableau 88.

- Pour la paire /i-u/ : aucune interaction n'est observée entre les facteurs 'position prosodique' et 'paire de voyelles' sur le formant F2.
- Pour la paire /e-o/ : la distinction est plus forte entre les deux voyelles /e/ et /o/, car le F2 augmente pour l'un (/e/) et diminue pour l'autre (/o/), comme le montre la Figure 61. Par conséquent le contraste entre les deux voyelles est maximisé, d'où l'interaction observée dans le Tableau 88.
- Pour la paire / $\epsilon$ - $\text{ɔ}$ / : la distinction entre les deux voyelles est également maximisée en position IP. Cette maximisation est essentiellement portée par la voyelle / $\epsilon$ /, qui augmente en position IP, alors que la voyelle / $\text{ɔ}$ / reste stable entre les deux positions (voir Figure 61). Il existe une

interaction entre les deux facteurs ‘position prosodique’ et ‘paires de voyelles’ (voir Tableau 88).

Pour les trois paires /y-u/, /ø-o/, /œ-ɔ/, il existe une interaction entre les facteurs ‘position prosodique’ et ‘paires de voyelles’, comme le montre le Tableau 88.

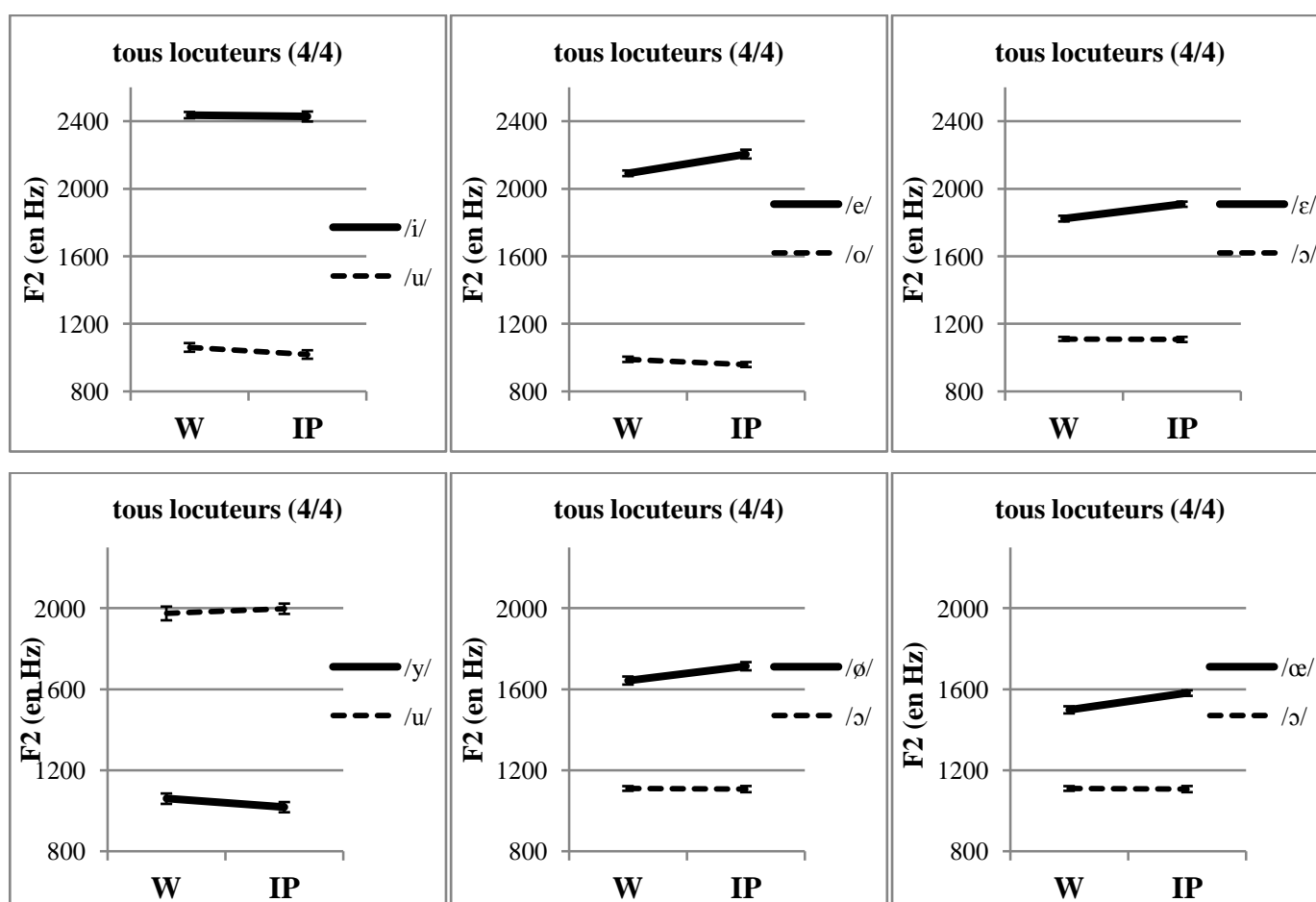
- Pour la paire /y-u/ : la voyelle [-arrière] (/y/) reste stable en termes de F2, alors que la voyelle [+arrière] (/u/) montre une diminution du formant F2, en position IP. Le contraste [ $\pm$ arrière] est maximisé en position IP entre ces voyelles.
- Pour la paire /ø-o/ : les valeurs de F2 augmentent pour /ø/ et diminuent pour /o/, les caractéristiques propres à la voyelle en termes de F2 sont renforcés en position IP : la distinction entre les voyelles est donc renforcée (voir Figure 61). Les facteurs ‘position prosodique’ et ‘paire de voyelles’ interagissent avec le facteur ‘locuteurs’. Les résultats post-hoc, résumés sur la ligne (c) du Tableau 88, montrent que pour chaque locuteur le contraste, observé en position W est maximisé en position IP en termes de F2.
- Pour la paire /œ-ɔ/ : les variations de F2 sont stables pour la voyelle /ɔ/ [+arrière] et augmentent pour la voyelle /œ/ [-arrière] en position IP : les deux voyelles sont plus distinctes l’une de l’autre en position IP. Il existe également une interaction entre les facteurs ‘position prosodique’, ‘paire de voyelles’ et ‘locuteurs’. Les résultats post-hoc, résumés sur la ligne (c) du Tableau 88, montrent une distinction entre le locuteur S3 et les autres locuteurs.

F2					
/i-u/	(a)	F(1,213)=2 ns	/y-u/	(a)	F(1,218)=4* <b>IP(y) &gt;* IP(u)</b> <b>W(y) &gt;* W(u)</b>
	(b)	F(3,213)=1 ns		(b)	F(3,218)=1 ns
/e-o/	(a)	F(1,206)=33** <b>IP(e) &gt;* IP(o)</b> <b>W(e) &gt;* W(o)</b>	/ø-o/	(a)	F(1,203)=35** <b>IP(ø) &gt;* IP(o)</b> <b>W(ø) &gt;* W(o)</b>
	(b)	F(3,206)=2 ns		(b)	F(3,203)=5*
/ɛ-ɔ/	(a)	F(1,205)=28** <b>IP(ɛ) &gt;* IP(ɔ)</b> <b>W(ɛ) &gt;* W(ɔ)</b>	/œ-ɔ/	(a)	F(1,215)=38** <b>IP(œ) &gt;* IP(ɔ)</b> <b>W(œ) &gt;* W(ɔ)</b>
	(b)	F(3,205)=1 ns		(b)	F(3,215)=5**

		(c) F2			
S1	<b>IP(ø) &gt;* IP(o)</b>	<b>W(ø) &gt;* W(o)</b>		<b>IP(œ) &gt;* IP(ɔ)</b>	<b>W(œ) &gt;* W(ɔ)</b>
/ø-o/	<b>IP(ø) &gt;* IP(o)</b>	<b>W(ø) &gt;* W(o)</b>	/œ-ɔ/	ns	<b>W(œ) &gt;* W(ɔ)</b>
S3	<b>IP(ø) &gt;* IP(o)</b>	<b>W(ø) &gt;* W(o)</b>		<b>IP(œ) &gt;* IP(ɔ)</b>	<b>W(œ) &gt;* W(ɔ)</b>
S4	<b>IP(ø) &gt;* IP(o)</b>	<b>W(ø) &gt;* W(o)</b>		<b>IP(œ) &gt;* IP(ɔ)</b>	<b>W(œ) &gt;* W(ɔ)</b>

**Tableau 88: Résultats statistiques sur le paramètre F2 pour la paire /i-u/, /e-o/ et /ɛ-ɔ/ ainsi que /y-u/, /ø-o/ et /œ-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’.**

**En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**



**Figure 61 : Représentation du contraste [±arrière] pour les paires /i-u/, /e-o/, /ɛ-ɔ/ et les paires /y-u/, /ø-o/, /œ-ɔ/ sur le paramètre F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

Aucune interaction entre la ‘position prosodique’ et la ‘paire de voyelles’ n’est observée sur le paramètre de protrusion pour les paires /i-u/, /e-o/ et /ɛ-ɔ/.

- Pour la paire /i-u/: le contraste entre les deux voyelles, observé en position W, est maximisé en position IP en termes d’étirement et d’aperture. En termes d’aire, les valeurs moyennes entre /i/ et /u/ sont telles qu’il n’existe pas de différence significative en position W. Ceci est

observé chez chacun des locuteurs, comme le montre les résultats post-hoc de l'interaction 'position prosodique, 'paire de voyelles' et 'locuteurs, présentés dans le Tableau 89 (ligne c).

- Pour la paire /e-o/ : le contraste entre les deux voyelles est maximisé en position IP en termes d'aire, d'étirement et d'aperture. L'augmentation est plus élevée pour la voyelle non-arrondie que la voyelle arrondie. Il existe une interaction entre les trois facteurs pour les paramètres d'aire et d'étirement. Les résultats résumés dans le Tableau 89 (ligne c) montrent que la distinction entre les deux voyelles /e/ et /o/ n'est pas significative en position W pour les quatre locuteurs en termes d'aire et pour trois locuteurs en termes d'étirement.
- Pour la paire /ε-ɔ/ : aucune interaction n'est observée sur les paramètres d'aire, d'étirement et d'aperture pour cette paire. Sur les paramètres d'aire et d'étirement, comme le montre la Figure 62, l'augmentation de ces paramètres en position IP est similaire pour les deux voyelles, d'où l'absence d'interaction.

		aire	étirement	aperture	protrusion
/i-u/	(a)	$F(1,217)=302^{**}$ <b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	$F(1,217)=185^{**}$ <b>IP(i) &gt;* IP(u)</b> W(i) >* W(u)	$F(1,217)=90^{**}$ <b>IP(i) &gt;* IP(u)</b> W(i) >* W(u)	$F(1,167)=1$ ns
	(b)	$F(3,217)=24^{**}$	$F(3,217)=11^{**}$	$F(3,217)=12^{**}$	$F(2,167)=1$ ns
/e-o/	(a)	$F(1,213)=177^{**}$ <b>IP(e) &gt;* IP(o)</b> W(e) >* W(o)	$F(1,213)=114^{**}$ <b>IP(e) &gt;* IP(o)</b> W(e) >* W(o)	$F(1,213)=10^{**}$ <b>IP(e) &gt;* IP(o)</b> W(e) > W(o)	$F(1,166)=0,8$ ns
	(b)	$F(3,213)=19^{**}$	$F(3,213)=8^{**}$	$F(3,213)=2$ ns	$F(2,166)=0,4$ ns
/ε-ɔ/	(a)	$F(1,213)=0$ ns	$F(1,213)=1$ ns	$F(1,213)=1$ ns	$F(1,145)=2$ ns
	(b)	$F(3,213)=6^*$	$F(3,213)=1$ ns	$F(3,213)=6^{**}$	$F(2,145)=2$ ns

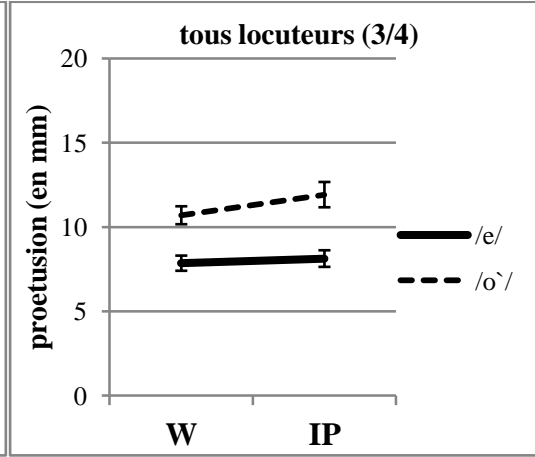
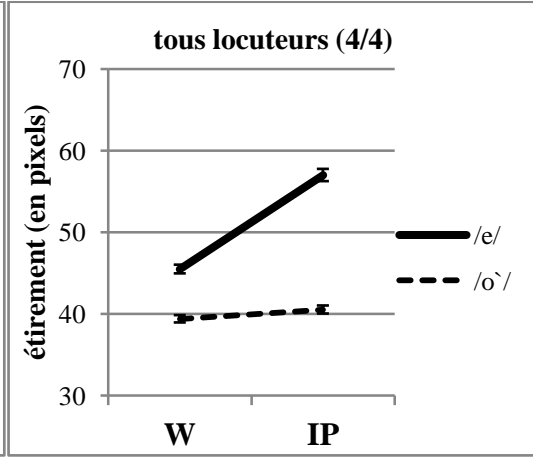
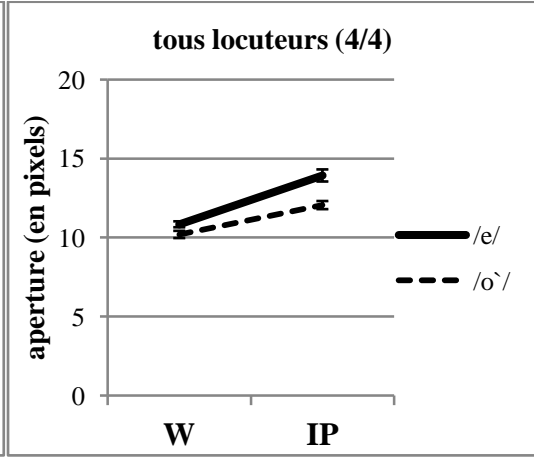
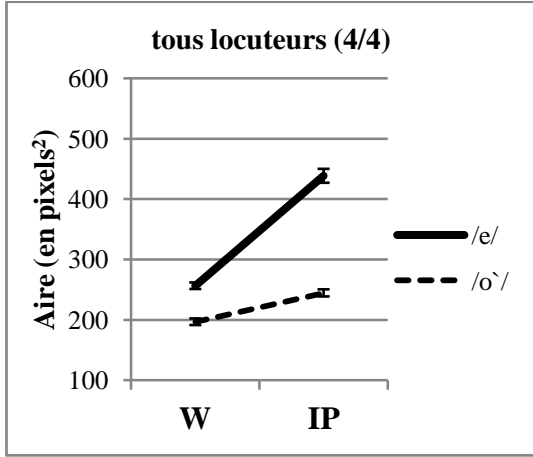
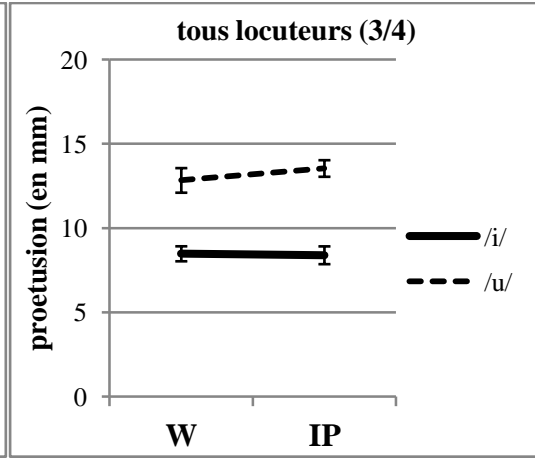
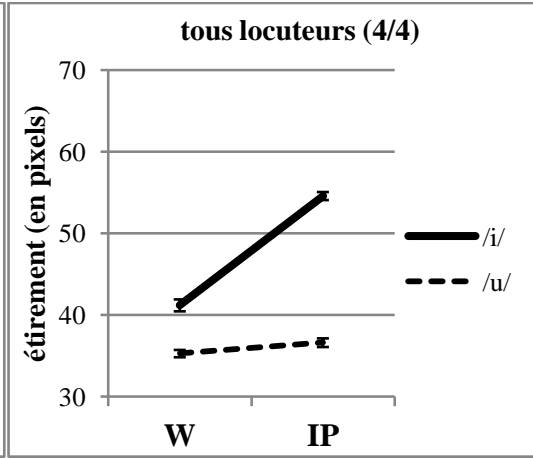
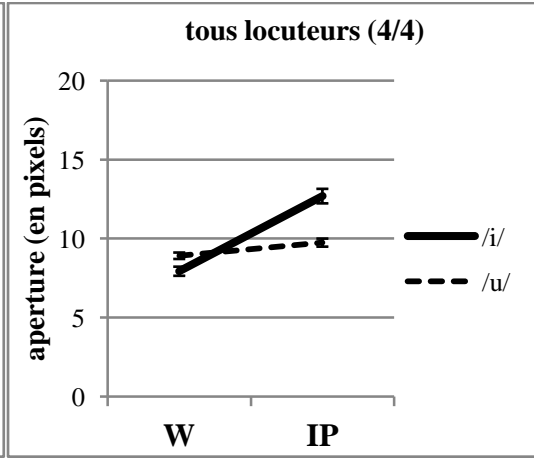
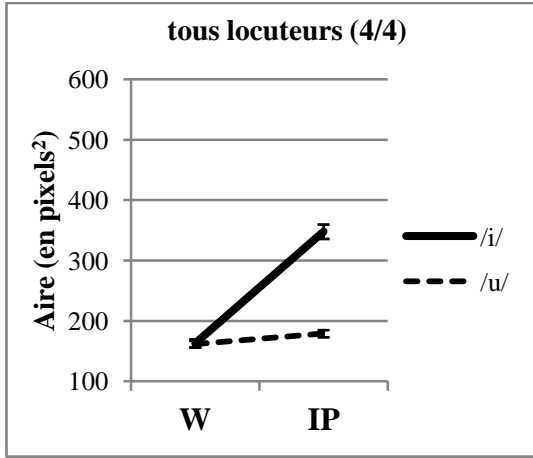
(c)		aire		étirement		aperture	
	S1	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	ns	ns
/i-u/	S2	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	/i-u/ <b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	W(i) >* W(u)	/i-u/ <b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns
	S3	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	W(i) >* W(u)
	S4	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns	<b>IP(i) &gt;* IP(u)</b>	ns

(c)		aire		étirement	
	S1	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns
/e-o/	S2	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	W(e) >* W(o)
	S3	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns
	S4	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns	<b>IP(e) &gt;* IP(o)</b>	ns

(c)		aire		aperture	
	S1	ns	ns	ns	ns
/ε-ɔ/	S2	ns	ns	ns	ns
	S3	ns	ns	ns	ns
	S4	ns	ns	ns	ns

**Tableau 89: Résultats statistiques sur les paramètres aire et étirement pour les paires de voyelles /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/** En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.



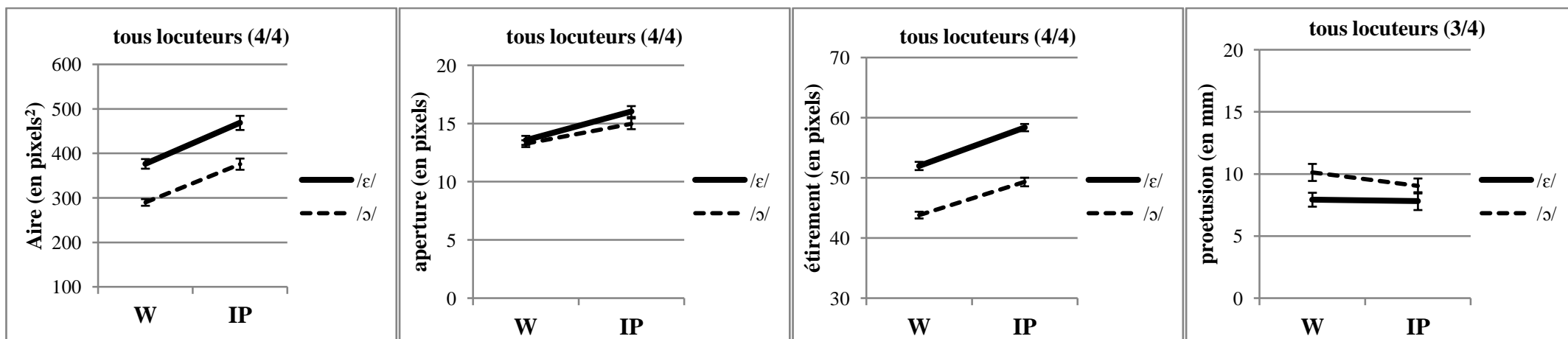


Figure 62 : Représentation du contraste [±arrondi] pour les paires /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/ sur les paramètres d'Aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) de protrusion (en mm), aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.

### 9.3 Contraste [ $\pm$ haut]

**Q2 :** *Comment l'effet de la position prosodique interagit avec le contraste phonologique [ $\pm$ haut] en termes articulatoire et acoustique?*

**Procédure :** Trois paramètres articulatoires et un paramètre acoustique : l'aire aux lèvres, l'aperture et l'abaissement du menton, ont été considérés pour rendre compte du contraste [ $\pm$ haut]. Les paires étudiées sont /i-e/, /y-ø/, /u-o/.

**Résultat :** Les résultats varient selon la paire étudiée. Pour /i-e/, les voyelles sont plus proches en position IP qu'en position W en termes d'aperture. Pour les autres paramètres, aucune interaction n'a été trouvée. Pour /y-ø/, la variabilité entre locuteurs montre que la distinction entre les deux voyelles est stable, en termes d'aire ou d'aperture, en position IP, il n'y a pas de maximisation. En termes de F1, la paire se trouve maximisée en position IP. Pour /u-o/, le contraste est maximisé en IP en termes d'aperture et d'aire, car l'augmentation de ces paramètres est plus forte en position IP pour la voyelle /o/.

Pour le contraste [ $\pm$ haut], nous avons observé les interactions entre la 'position prosodique', la 'paire de voyelles' et le 'locuteurs' sur les paramètres d'aire, d'aperture et d'abaissement du menton ainsi que sur les variations du formant F1.

Sur les paramètres articulatoires, les résultats précédents ont montré une augmentation des paramètres d'aire et d'aperture en position IP pour chaque voyelle étudiée (sauf /œ/ pour l'aperture). Sur les données de l'abaissement du menton, seules les voyelles /u/ et /o/ montrent un effet de la position prosodique, avec un abaissement plus important en position IP.

Deux possibilités sont envisagées : soit l'augmentation de ces paramètres est telle que la distinction entre les deux catégories de voyelle n'est pas maximisée en position IP, soit l'augmentation de ces paramètres est plus importante pour la voyelle [-haut], entraînant ainsi un renforcement du contraste de hauteur sur les paires étudiées en position IP.

- Pour la paire /i-e/ : Comme le montre le Tableau 90, la paire de voyelles /i-e/ interagit uniquement avec la position prosodique sur les mesures d'aperture. Sur les autres paramètres, d'aire et d'abaissement du menton aucune interaction n'est observée entre les deux facteurs 'position prosodique' et 'paire de voyelles'. L'observation de la Figure 63 montre que, comparé à ce que nous avons pu montrer précédemment pour les autres paires de voyelles, le contraste entre les deux voyelles est plus faible en position IP qu'en position W. Aucune interaction n'est observée entre les facteurs 'position prosodique', 'paire de voyelles' et 'locuteurs' sur les trois paramètres d'aire, d'aperture et d'abaissement du menton.

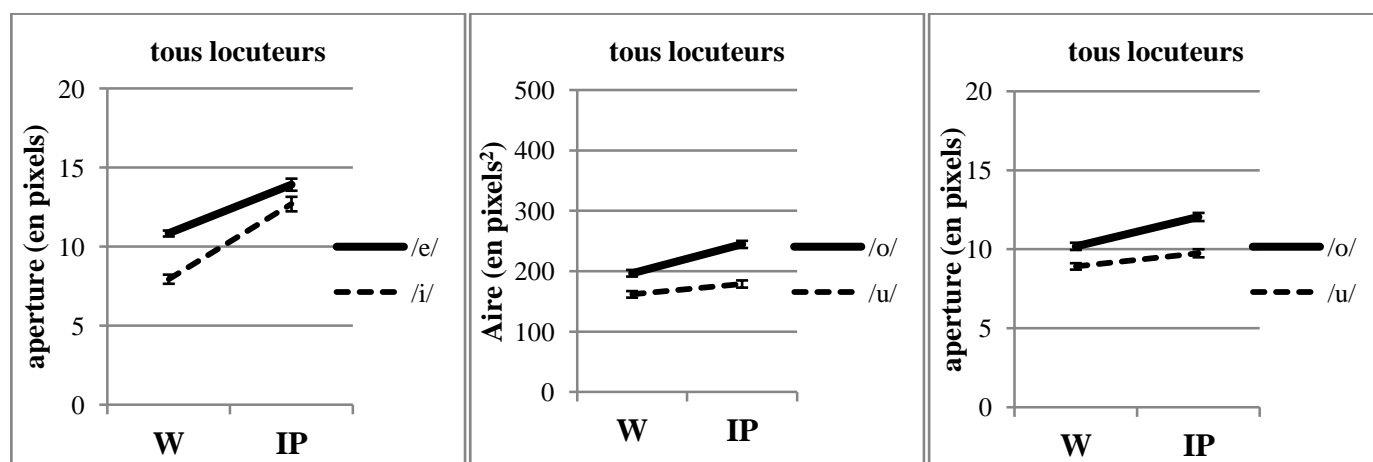


- Pour la paire /y-ø/ : Comme le montre le Tableau 90, la paire de voyelles /y-ø/ n'interagit pas avec la position prosodique : aucune interaction n'est observée sur les paramètres d'aire, d'aperture ou d'abaissement du menton. Cependant, la paire de voyelles interagit avec la position prosodique et le locuteur sur les paramètres d'aire et d'aperture. Les résultats post-hoc des interactions, présentées dans le Tableau 90 à la ligne (c) montrent que l'aire aux lèvres est significativement plus élevée pour la voyelle /ø/ et moins élevée pour la voyelle /y/, excepté S4 en position W. De même, l'aperture est significativement plus élevée pour la voyelle /ø/ et moins élevée pour la /y/ excepté S2 en IP et S3, S4 en W. Pour l'aire aux lèvres, pour les locuteurs S1 et S2, la distinction entre les deux voyelles est plus faible en position IP qu'en position W à l'inverse pour les locuteurs S3 et S4, la distinction entre les deux voyelles est plus faible en position W qu'en position IP. Pour ces deux derniers locuteurs, la distinction entre les deux voyelles est renforcée en position IP, comme le montre la Figure 64.
- Pour la paire /u-o/, les valeurs d'aire et d'aperture sont significativement plus élevées pour la voyelle /o/ que pour la voyelle /u/, en position IP. Les deux voyelles voient leur valeur moyenne augmentée en position IP, mais l'augmentation est plus forte pour la voyelle /o/. La distance séparant les deux catégories de voyelles est plus élevée en position IP. Le contraste entre les deux paires de voyelles est donc maximisé dans cette position (tous locuteurs confondus et également pour chacun d'autres eux, d'où l'interaction observée dans le Tableau 90).

		aire	aperture	menton
/i-e/	(a)	F(1,207)=0,1 ns	F(1,207)=11** IP(e)>*IP(i) <b>W(e)&gt;*W(i)</b>	F(1,158)=2 ns
	(b)	F(3,207)=1 ns	F(3,207)=1 ns	F(2,158)=2 ns
/y-ø/	(a)	F(1,207)=0 ns	F(1,207)=1 ns	F(1,153)=0,4 ns
	(b)	F(3,207)=3*	F(3,207)=4*	F(2,153)=0,1 ns
/u-o/	(a)	F(1,223)=19** <b>IP(o)&gt;*IP(u)</b> W(o)>*W(u)	F(1,223)=10* <b>IP(o)&gt;*IP(u)</b> W(o)>*W(u)	F(1,175)=0,2 ns
	(b)	F(3,223)=3*	F(3,223)=2 ns	F(2,175)=1 ns

(c)	aire		aperture		aire	
S1	IP( $\emptyset$ ) >* IP(y)	<b>W(<math>\emptyset</math>) &gt;* W(y)</b>	IP( $\emptyset$ ) >* IP(y)	<b>W(<math>\emptyset</math>) &gt;* W(y)</b>	IP(o) >* IP(u)	W(o) >* W(u)
/y- $\emptyset$ /	S2 IP( $\emptyset$ ) >* IP(y)	<b>W(<math>\emptyset</math>) &gt;* W(y)</b>	/y- $\emptyset$ / ns	<b>W(<math>\emptyset</math>) &gt;* W(y)</b>	/u-o/ IP(o) >* IP(u)	W(o) >* W(u)
S3	<b>IP(<math>\emptyset</math>) &gt;* IP(y)</b>	W( $\emptyset$ ) >* W(y)	<b>IP(<math>\emptyset</math>) &gt;* IP(y)</b>	ns	IP(o) >* IP(u)	W(o) >* W(u)
S4	<b>IP(<math>\emptyset</math>) &gt;* IP(y)</b>	ns	<b>IP(<math>\emptyset</math>) &gt;* IP(y)</b>	ns	IP(o) >* IP(u)	ns

**Tableau 90: Résultats statistiques sur le paramètre aire, aperture et menton pour la paire /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/ ainsi que /y-u/, /ø-o/ et /œ-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**



**Figure 63 : Représentation du contraste [±haut] pour la paire /i-e/ sur les paramètres d’aperture (en pixels), et pour la paire /u-o/ sur les paramètres d’Aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), et d’aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

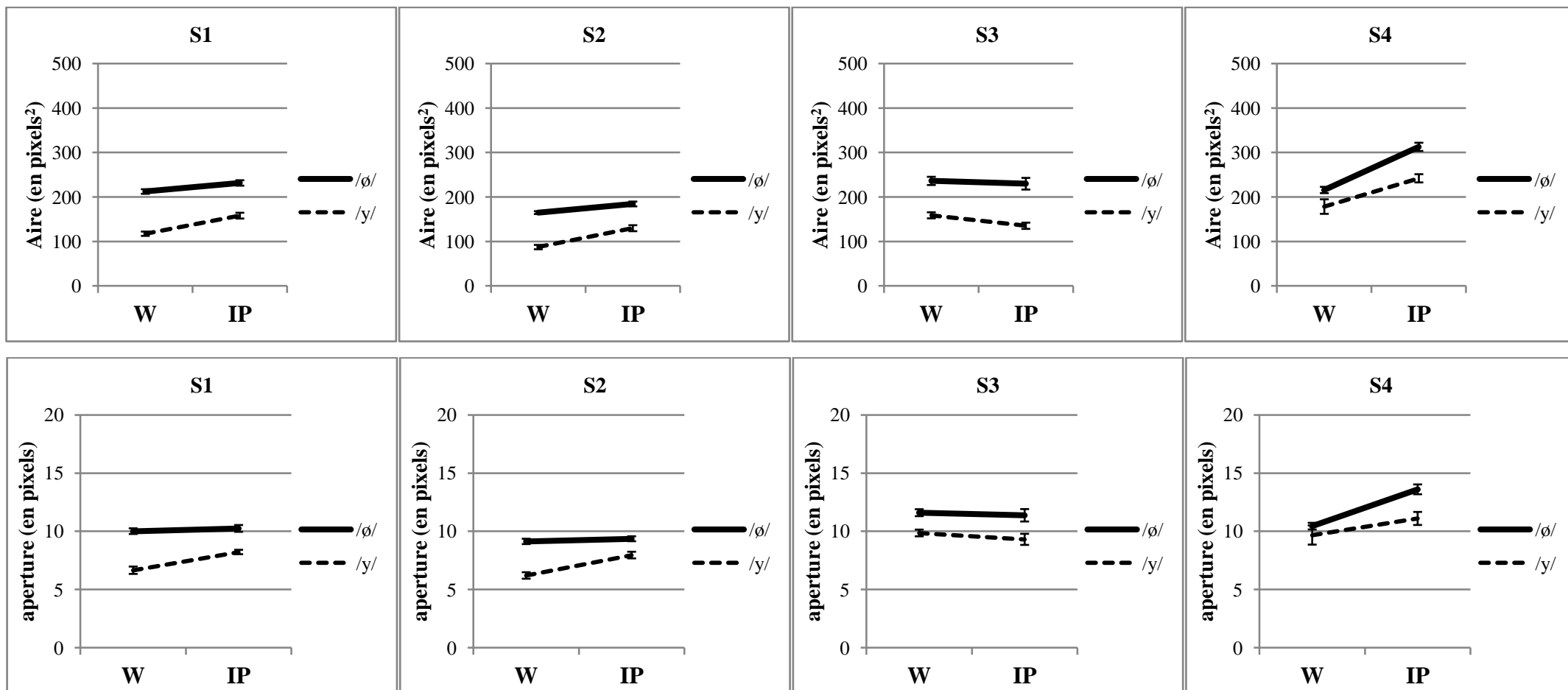


Figure 64 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /y-ø/, sur les paramètres d'Aire aux lèvres (en pixels<sup>2</sup>), et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4).

Pour les voyelles [ $\pm$ haut], les résultats testant l'effet de la position prosodique sur les variations de F1 montrent une augmentation des valeurs de F1, uniquement pour la voyelle / $\emptyset$ /. Aucun effet n'a été trouvé pour les autres voyelles. On s'attend donc à trouver uniquement une interaction entre la position prosodique et le contraste pour la paire /y- $\emptyset$ /.

- Pour la paire /i-e/: Aucune interaction n'est observée entre les facteurs 'position prosodique' et la 'paire de voyelles'. Seule une interaction avec le locuteur est observée. Les résultats post-hoc présentés dans le Tableau 91 ainsi que la figure 66 montrent que la distinction entre les deux voyelles est plus forte en position W qu'en position IP pour trois des quatre locuteurs (S1, S2, S3).
- Pour la paire /y- $\emptyset$ /: Il existe bien une interaction entre les facteurs 'position prosodique' et 'paire de voyelles'. Les voyelles sont maximales distinctes en position IP, comme le montre la Figure 66. Comme le montre la ligne (b) du Tableau 91, il existe également une interaction avec le 'locuteur'. Cette interaction montre qu'il existe de la variabilité entre les locuteurs : pour S1 et S3, le contraste entre les deux voyelles est maximisé en position IP ; pour S2, le contraste est maximisé en position W et pour S4 les résultats en sont pas significatifs (voir Figure 67).
- Pour la paire /u-o/: Aucune interaction n'est observée entre la 'position prosodique' et la 'paire de voyelles', comme le montre la ligne (a) du Tableau 91. Il existe cependant, une interaction avec le locuteur. Les résultats post-hoc résumés sur la ligne (c) du Tableau 91 et la Figure 68 montrent que le contraste entre les deux voyelles est maximisé en position IP pour S2 et en position W pour S1 et S3. Les résultats ne sont pas significatifs pour S4.

		F1
/i-e/	(a)	F(1,202)=0,3 ns
	(b)	F(3,202)=5**
/y- $\emptyset$ /	(a)	F(1,204)=4* <b>IP(y)&gt;*IP(<math>\emptyset</math>)</b> W(y)>*W( $\emptyset$ )
	(b)	F(3,204)=5*
/u-o/	(a)	F(1,217)=0,1 ns
	(b)	F(3,217)=4*

(c)	F1						
S1	IP(e) >* IP(i)	<b>W(e) &gt;* W(i)</b>		<b>IP(ø) &gt;* IP(y)</b>	W(ø) >* W(y)	IP(o) >* IP(u)	<b>W(o) &gt;* W(u)</b>
/i-e/ S2	IP(e) >* IP(i)	<b>W(e) &gt;* W(i)</b>	/y-ø/	IP(ø) >* IP(y)	<b>W(ø) &gt;* W(y)</b>	/u-o/	<b>IP(o) &gt;* IP(u)</b> W(o) >* W(u)
S3	IP(e) >* IP(i)	<b>W(e) &gt;* W(i)</b>		<b>IP(ø) &gt;* IP(y)</b>	W(ø) >* W(y)	IP(o) >* IP(u)	<b>W(o) &gt;* W(u)</b>
S4	ns	ns		ns	ns	ns	ns

**Tableau 91: Résultats statistiques sur le paramètre F1 pour la paire /i-e/, /y-ø/ et /u-o/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

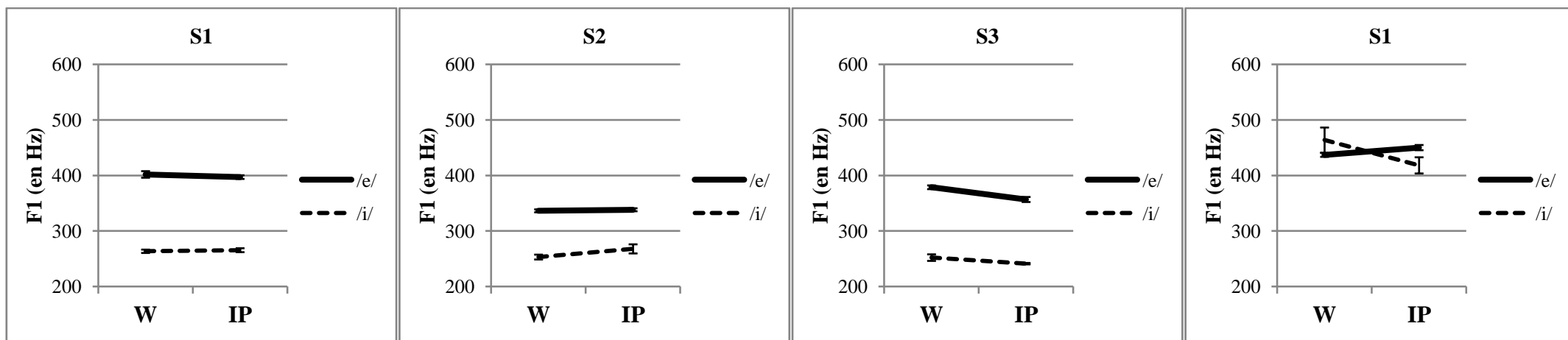


Figure 65 : Représentation du contraste [ $\pm$ haut] pour les paires /i-e/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4)

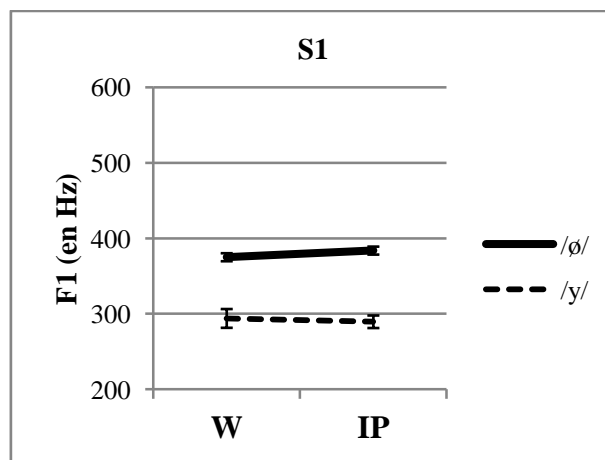


Figure 66 : Représentation du contraste [ $\pm$ haut] pour les paires /y-ø/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.

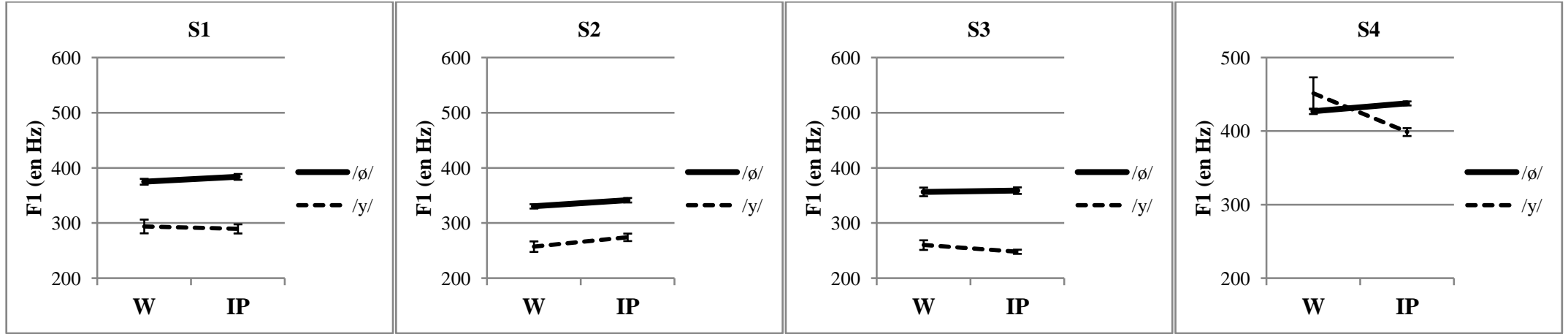


Figure 67 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /y-ø/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4).

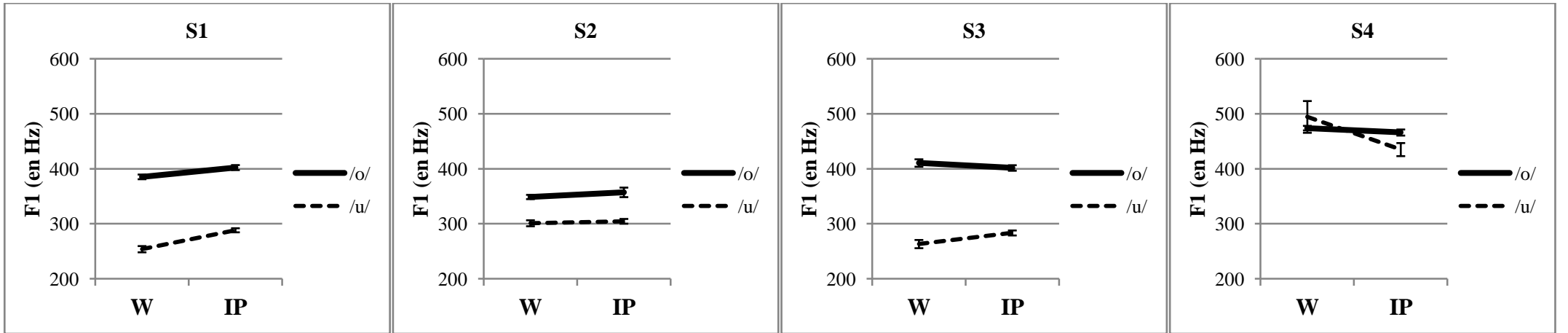


Figure 68 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /u-o/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4).

## 9.4 Contraste [ $\pm$ bas]

**Q2 :** *Comment l'effet de la position prosodique interagit avec le contraste phonologique [ $\pm$ bas] en termes articulatoire et acoustique?*

**Procédure :** Trois paramètres articulatoires et un paramètre acoustique : l'aire aux lèvres, l'aperture et l'abaissement du menton, ont été considérés pour rendre compte du contraste [ $\pm$ haut]. Les paires étudiées sont /e- $\epsilon$ /, / $\emptyset$ - $\text{\textcircled{a}}$ /, /o- $\text{\textcircled{u}}$ /.

**Résultat :** Les résultats sont les plus robustes en termes acoustique qu'en termes articulatoire avec des résultats montrant une maximisation du contraste [ $\pm$ bas] en position IP pour les trois paires /e- $\epsilon$ /, / $\emptyset$ - $\text{\textcircled{a}}$ / (sauf S2), /o- $\text{\textcircled{u}}$ /. Cette maximisation s'effectue principalement par une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [+bas], pendant que les valeurs de F1 des voyelles [-bas] restent stables en position IP. Seul le contraste entre les voyelles /o- $\text{\textcircled{u}}$ / est maximisé en position IP, en termes d'aire (S2, S3 et S4) et d'aperture (S3, S4).

Pour le contraste [ $\pm$ bas], les mêmes paramètres articulatoires et acoustiques i.e. aperture, aire aux lèvres et abaissement du menton et F1 vont être étudié pour rendre compte du contraste [ $\pm$ bas].

Pour l'ensemble des voyelles étudiées, les paramètres d'aire, d'aperture (excepté pour / $\text{\textcircled{a}}$ /) et F1 voient leurs valeurs augmentées en position IP. Aucun effet n'a été trouvé pour l'abaissement du menton. On s'attend à une maximisation du contraste [ $\pm$ bas] des voyelles en position IP si l'augmentation des paramètres est particulièrement élevée pour les voyelles [+bas].

- Pour la paire /e- $\epsilon$ / : La ligne (a) du Tableau 92 montre qu'il existe une interaction entre la 'position prosodique' et la 'paire de voyelles' pour l'aire. La Figure 69 montre que la voyelle / $\epsilon$ / montre des valeurs plus élevées en termes d'aire que la voyelle /e/. Cependant, en position IP, les deux voyelles sont moins distinctes en termes d'aire. Conclusion, le contraste n'est pas maximisé en position IP pour cette paire. Les résultats locuteur par locuteur résumés dans le tableau (c), montre que seuls deux locuteurs montrent des résultats significatifs sur les deux positions: pour chacun d'eux la distinction entre les deux voyelles est plus forte en position W.
- Pour la paire / $\emptyset$ - $\text{\textcircled{a}}$ / : seule l'interaction entre la 'position prosodique', la 'paire de voyelles' et le 'locuteur' montre un résultat significatif sur les paramètres d'aire et d'aperture. En termes d'aire, en position IP, seul le locuteur S4 montre une interaction. Les valeurs d'aire aux lèvres sont plus élevée pour la voyelle [-bas] (/ $\emptyset$ /) que pour la voyelle [+bas] (/ $\text{\textcircled{a}}$ /) en position IP, ce qui n'est pas attendu (et non observé en position W). En termes d'aperture, seul le locuteur S3 montre des résultats significatifs en position IP et W. La distinction est maximisée en position IP comme le montre la Figure 71.



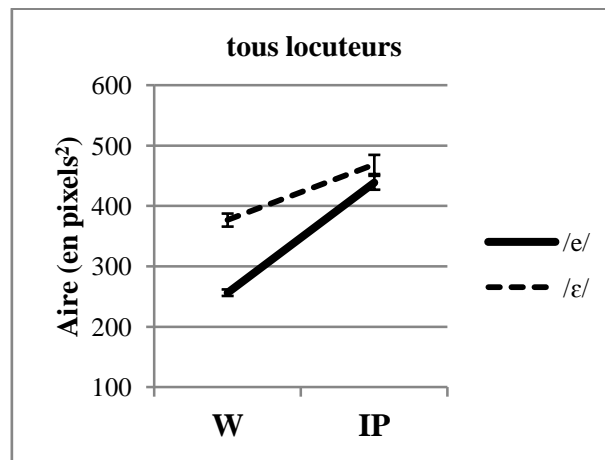
- Pour la paire /o-ɔ/: Il existe une interaction entre la ‘position prosodique’ et la ‘paire de voyelles’ sur les mesures d’aire aux lèvres, tous locuteurs confondus. La Figure 70 montre que les valeurs d’aire sont plus élevées pour la voyelle /ɔ/ et moins élevées pour la voyelle /o/. En position IP, le contraste est maximisé, la distinction entre les voyelles est plus forte. L’étude locuteur par locuteur (ligne c du Tableau 92) montre que cette tendance est observée par tous les locuteurs, excepté pour le locuteur S1 pour qui la différence entre les deux catégories est plus faible en position IP qu’en position W. On observe également une interaction entre la ‘position prosodique’, la ‘paire de voyelles’ et le ‘locuteur’ sur les mesures de l’aperture. Pour les deux locuteurs S3 et S4, la différence entre les deux catégories de voyelles est maximisée en position IP, comme le montre la Figure 72.

		aire	aperture	menton
/e-ɛ/	(a)	F(1,205)=47** IP(ɛ)>*IP(e) W(ɛ)>*W(e)	F(1,205)=1 ns	F(1,148)=0,1 ns
	(b)	F(3,205)=3*	F(3,205)=1 ns	F(2,148)=1 ns
/ø-œ/	(a)	F(1,211)=2 ns	F(1,211)=1 ns	F(1,148)=1 ns
	(b)	F(3,211)=11**	F(3,211)=6 **	F(2,148)=2 ns
/o-ɔ/	(a)	F(1,221)=18** IP(ɔ)>*IP(o) W(ɔ)>*W(o)	F(1,221)=0,2 ns	F(1,163)=2 ns
	(b)	F(3,221)=7**	F(3,221)=7**	F(2,163)=1 ns

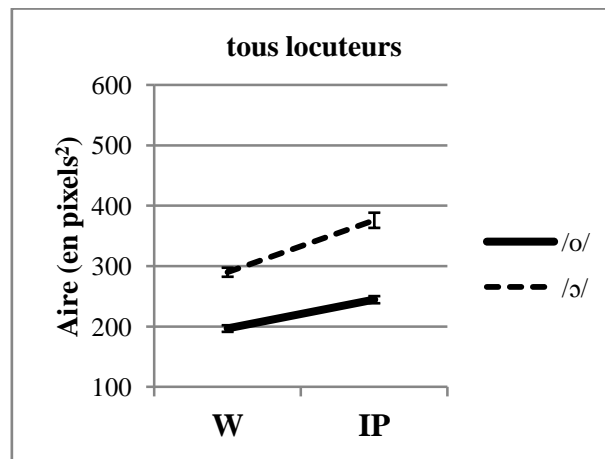
	(c)	aire		aperture	
S1	IP(ɛ) >* IP(e)	W(ɛ) >* W(e)	ns	ns	ns
/e-ɛ/ S2	ns	ns	/ø-œ/ ns	W(œ) >* W(ø)	/ɛ -œ/ ns
S3	IP(ɛ) >* IP(e)	W(ɛ) >* W(e)	ns	W(œ) >* W(ø)	IP(ɛ) >* IP(œ) W(ɛ) >* W(œ)
S4	ns	W(ɛ) >* W(e)	IP(œ) <* IP(ø)	ns	ns

(c)		aire		aperture
S1	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	$W(\vartheta) >^* W(o)$	ns	$W(\vartheta) >^* W(o)$
/o-ɔ/	S2	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	$W(\vartheta) >^* W(o)$	ns
S3	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	$W(\vartheta) >^* W(o)$	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	$W(\vartheta) >^* W(o)$
S4	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	$W(\vartheta) >^* W(o)$	$IP(\vartheta) >^* IP(o)$	ns

**Tableau 92: Résultats statistiques sur les paramètres aire, aperture et menton pour les paires /e-ɛ/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* :  $p < .001$ , \* :  $p < .05$  et ns : non significatif.**



**Figure 69 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /e-ɛ/, sur le paramètre d’aire (en pixels<sup>2</sup>) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**



**Figure 70 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /o-ɔ/, sur le paramètre d’aire (en pixels<sup>2</sup>) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.**

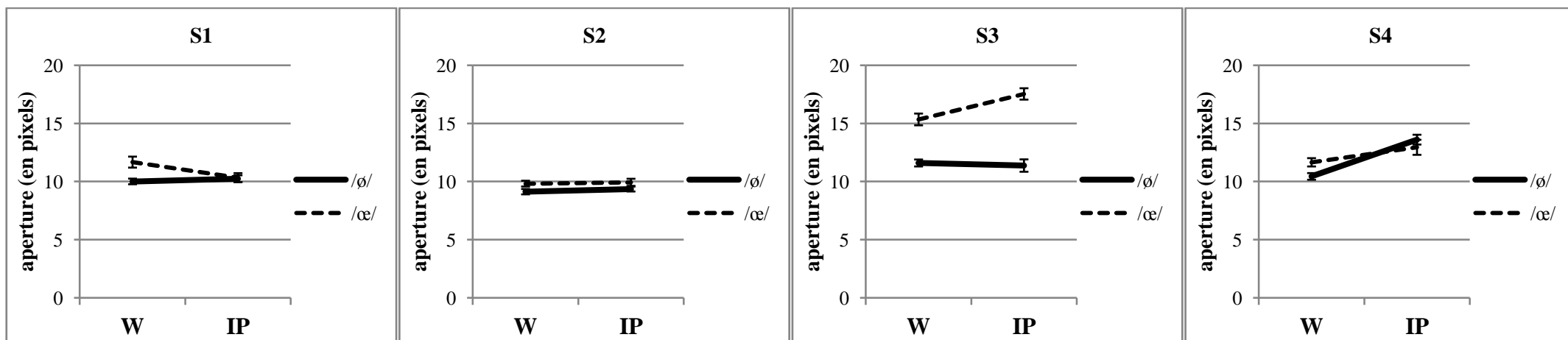


Figure 71 : Représentation du contraste [ $\pm$ bas] pour les paires /ø-œ/, sur le paramètre d'aperture aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4).

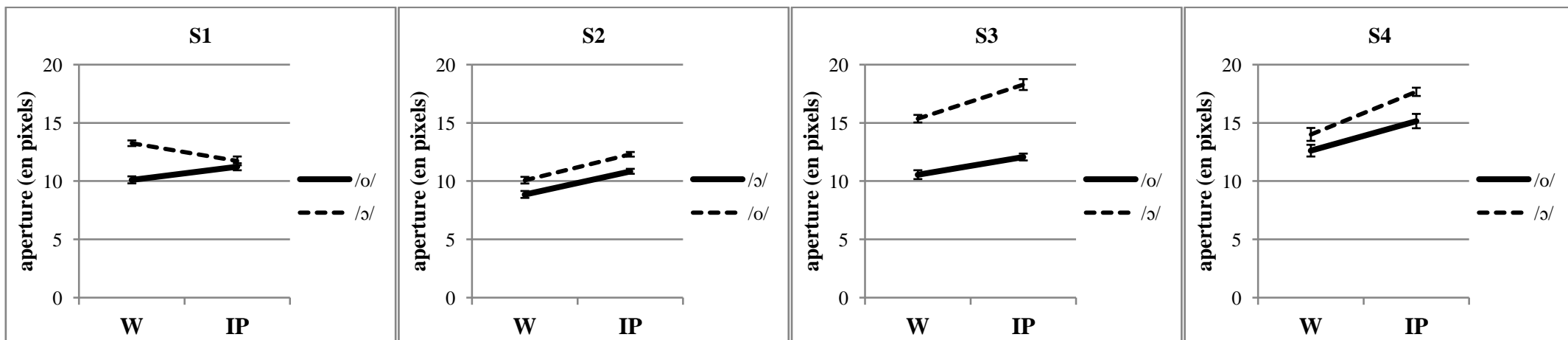


Figure 72 : Représentation du contraste [ $\pm$ bas] pour les paires /o-ɔ/, sur le paramètre d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4).

Les valeurs moyennes de F1 sont plus élevées pour la voyelle [+bas] que pour la voyelle [-bas] pour les paires /e-ɛ/, /ø-œ/ et /o-ɔ/ (voir Figure 73). De plus, la différence entre les deux catégories de voyelles est plus élevée en position IP, renforçant le contraste [ $\pm$ bas] en cette position. Il existe également une interaction entre la ‘position prosodique’, la ‘paire de voyelles’ et le ‘locuteur’ pour les paires /ø-œ/ et /o-ɔ/. Les résultats post-hoc résumés sur la ligne (c) du Tableau 93 montrent que le contraste est maximisé en position IP pour trois des quatre locuteurs pour la paire /ø-œ/ et pour quatre des locuteurs pour la paire /o-ɔ/.

		F1
/e-ɛ/	(a)	F(1,203)=17** <b>IP(ɛ)&gt;*IP(e)</b> W(ɛ)>*W(e)
	(b)	F(3,203)=2 ns
/ø-œ/	(a)	F(1,210)=45** <b>IP(œ)&gt;*IP(ø)</b> W(œ)>*W(ø)
	(b)	F(3,210)=3*
/o-ɔ/	(a)	F(1,208)=41** <b>IP(ɔ)&gt;*IP(o)</b> W(ɔ)>*W(o)
	(b)	F(3,208)=7**

(c)		F1
	S1 <b>IP(œ) &gt;* IP(ø)</b> W(œ) >* W(ø)	S1 <b>IP(ɔ) &gt;* IP(o)</b> W(ɔ) >* W(o)
/ø-œ/	S2 ns                    ns	/o-ɔ/ S2 <b>IP(ɔ) &gt;* IP(o)</b> W(ɔ) >* W(o)
	S3 <b>IP(œ) &gt;* IP(ø)</b> ns	S3 <b>IP(ɔ) &gt;* IP(o)</b> W(ɔ) >* W(o)
	S4 <b>IP(œ) &gt;* IP(ø)</b> ns	S4 <b>IP(ɔ) &gt;* IP(o)</b> W(ɔ) >* W(o)

**Tableau 93: Résultats statistiques sur le paramètre F1 pour les paires /e-ɛ/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

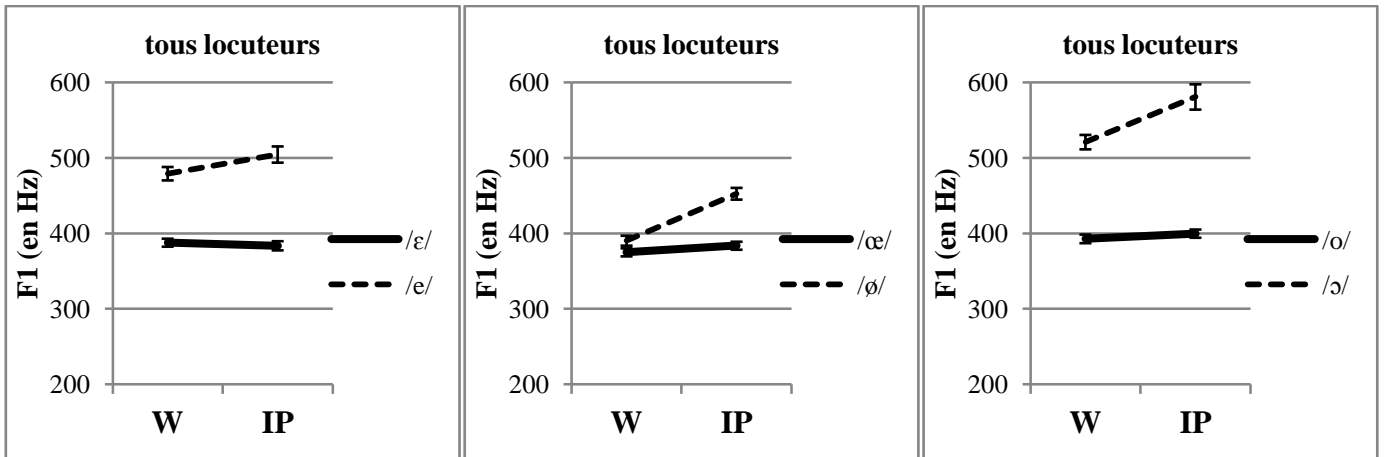


Figure 73 : Représentation du contraste [ $\pm$ bas] pour les paires /e-ε/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. Sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus.



## 10. RESUME ET INTERPRETATION DES RESULTATS

La première question posée dans cette thèse était la suivante : existe-t-il un effet de la position prosodique (IP vs W) sur les voyelles orales du français ? Nous pouvons conclure que oui, il existe bien un effet du renforcement initial sur les voyelles orales du français.

La seconde question posée dans cette thèse était la suivante : quelles propriétés acoustiques et articulatoires (lèvres, menton) des voyelles sont affectées par la position prosodique (IP vs W) et dans quelles directions vont ces modifications ? Nous allons présenter les principaux résultats dans les paragraphes suivants :

Le Tableau 94 résume les résultats de l'effet de la position initiale IP sur les paramètres articulatoires (tous locuteurs confondus):

	étirement	aperture	protrusion	aire	K2	menton
/i/					IP< *W	
/y/	IP> *W	IP> *W		IP> *W		
/u/						IP> *W
/e/						
/ø/	IP> *W	IP> *W		IP> *W		
/o/					IP< *W	IP> *W
/ɛ/		IP> *W			IP< *W	
/œ/	IP> *W		IP< *W	IP> *W	IP> *W	
/ɔ/		IP> *W				
/a/	IP> *W	IP> *W		IP> *W	IP< *W	

**Tableau 94: Tableau récapitulatif des variations articulatoires observées sur chaque voyelle, tous locuteurs confondus, sur les huit paramètres étudiés : étirement, aperture, protrusion, aire, K2 et menton. Les cellules vides correspondent aux résultats non-significatifs.**

- **Etirement et aperture**

Pour l'ensemble des voyelles, qu'elles soient arrondies, non-arrondies, antérieures, postérieures, fermées ou ouvertes, la position prosodique IP a pour conséquence d'augmenter l'étirement et l'aperture des voyelles orales du français (excepté pour l'aperture de la voyelle /œ/, où aucun effet n'a été observé). La Figure 74 présente les variations articulatoires selon les mesures d'aperture et d'étirement pour chaque locuteur : les variations globales montrent que la position IP entraîne une augmentation générale de ces deux paramètres.

- **K2 (étirement/aperture)**

Pour le facteur K2, dépendant des valeurs d'étirement et d'aperture, l'effet est moins robuste car seules quelques voyelles montrent un effet significatif. Pour les voyelles concernées (/i/, /y/, /u/, /o/, /ɛ/ et /a/), les valeurs sont moins élevées en position IP qu'en position W, ce qui signifie que l'augmentation d'étirement est plus faible que l'augmentation observée en aperture. K2 permet donc de montrer que l'expansion articuloire des lèvres pour ces voyelles est essentiellement due à l'augmentation de l'aperture. Pour la voyelle /œ/, le facteur K2 est plus élevée en IP, car l'augmentation de l'étirement est plus élevée que celle observée en aperture.

- **Aire aux lèvres**

Pour le facteur d'aire aux lèvres, les valeurs sont plus élevées en position IP, pour l'ensemble des voyelles.

- **Protrusion**

Cette étude montre également un résultat intéressant quant à l'effet de la position initiale sur les trois degrés de liberté des lèvres en français. Seuls deux de ces paramètres sont touchés par l'effet de la position : l'étirement et l'aperture. Aucun effet n'est observé sur les valeurs de protrusion excepté pour la voyelle /œ/, dont les valeurs diminuent en IP.

- **Menton**

Pour l'abaissement du menton, seules deux voyelles sont affectés par l'effet de la position IP : les voyelles /u/ et /o/. Pour ces deux voyelles, en position IP, l'abaissement du menton est plus important qu'en position W.



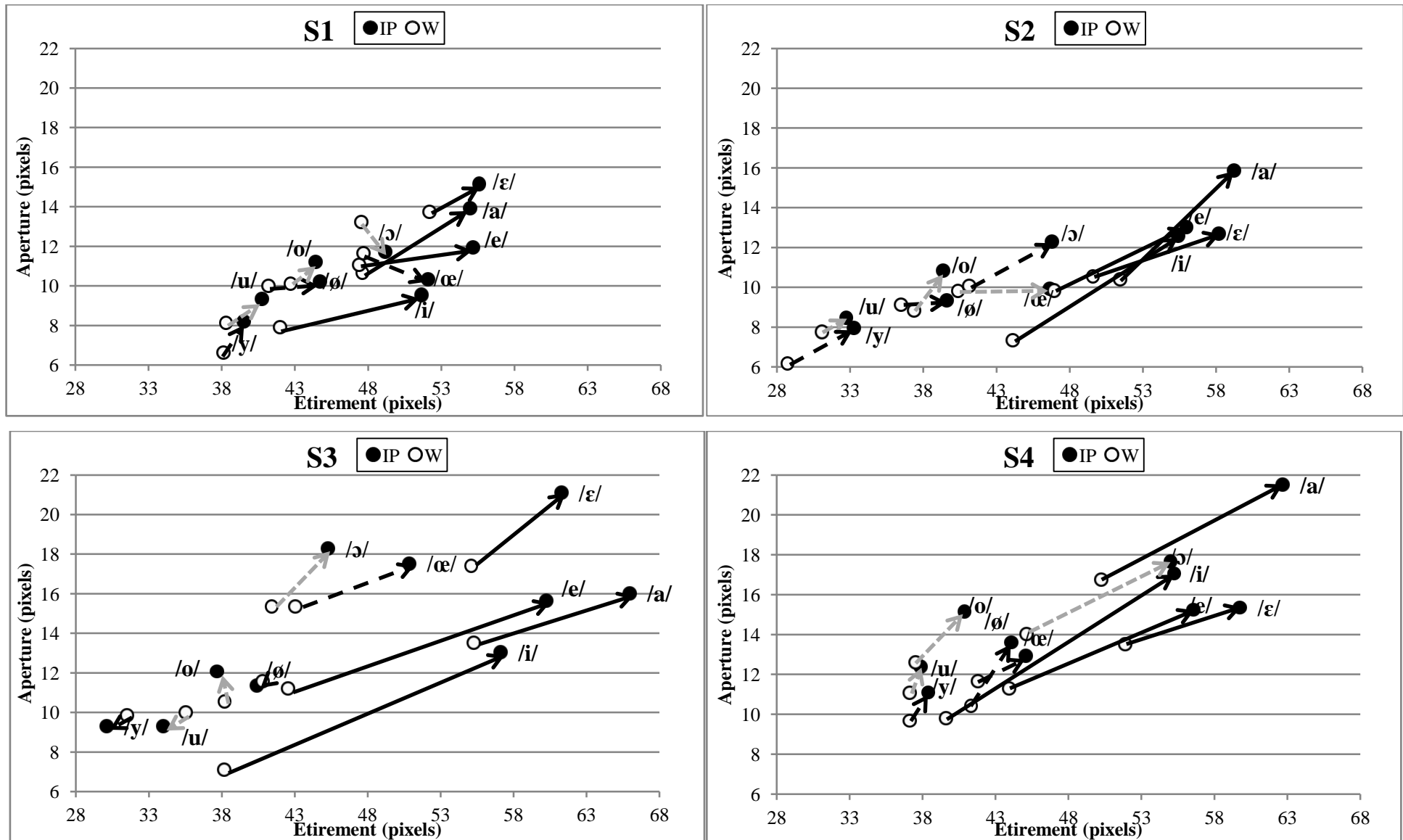


Figure 74: Mesures d'étirement et d'aperture pour les 10 voyelles par locuteur, pour chaque position prosodique. Les points blancs indiquent la position de la voyelle en position W et les points noirs en position IP pour les trois catégories de voyelles : antérieures non-arrondies (trait noir plein), antérieures arrondies (trait pointillé noir) et les postérieures (traits pointillé gris)

Le Tableau 95 résume les résultats de l'effet de la position initiale IP sur les paramètres acoustiques observés dans cette étude (tous locuteurs confondus):

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F2-F1</b>	<b>F3-F2</b>	<b>durée</b>	<b>intensité</b>
/i/	ns	ns	IP>*W	IP>*W		IP>*W	ns	IP>*W
/y/	ns	ns	IP<*W			IP<*W	ns	IP>*W
/u/	ns	ns			IP<*W		IP>*W	IP>*W
/e/	ns	IP>*W	IP>*W				ns	IP<*W
/ø/	IP>*W		IP<*W				ns	IP>*W
/o/	ns	IP<*W			IP<*W		ns	ns
/ɛ/	IP>*W	IP>*W	IP>*W				IP<*W	IP>*W
/œ/							IP>*W	IP>*W
/ɔ/		ns			IP<*W		ns	IP<*W
/a/	IP>*W	ns	IP>*W				IP<*W	IP>*W

**Tableau 95: Tableau récapitulatif des variations acoustiques observées sur chaque voyelle, tous locuteurs confondus, sur les paramètres acoustiques : F1, F2, F3, F4, F2-F1, F3-F2, durée et intensité. Les cellules vides correspondent aux données non-considérées dans cette étude et ns aux données pour lesquelles les résultats ne sont pas significatifs.**

Contrairement aux paramètres articulatoires dont les paramètres augmentent globalement pour l'ensemble des voyelles, les variations observées au niveau acoustique sont dépendantes de la nature de la voyelle.

- **F1**

La position prosodique IP entraîne une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles ouverte et mi-ouvertes /a, ɔ, œ, ε/ et pour la voyelle /ø/. Cette augmentation affecte donc les voyelles déjà caractérisées par un formant F1 élevé : les voyelles mi-ouvertes et ouvertes. La position IP va renforcer cette caractéristique en augmentant les valeurs de F1.

- **F2**

Pour les variations du formant F2, deux modifications sont observées : soit la position IP va provoquer une augmentation des valeurs de F2, soit la position IP va provoquer une diminution de ces valeurs. Ces modifications sont dépendantes de la nature de la voyelle. L'augmentation de F2 est observée pour les voyelles antérieures /e/, /ø/, /ɛ/, /œ/ qui sont des voyelles caractérisées par un F2 haut. La diminution de F2 est observée pour la voyelle postérieure /o/ qui est une voyelle caractérisée par un F2 bas. La position IP va donc provoquer un renforcement de ces caractéristiques acoustiques.

- **F3**

Pour le formant F3, une augmentation du formant est observée pour les voyelles antérieures non-arrondies /i/ et /e/ alors qu'une diminution du formant est observée sur les voyelles antérieures arrondies /y/

et /ø/. L'augmentation de F3 pour ces voyelles non-arrondies et la diminution de F3 pour les voyelles arrondies vont également dans le sens d'un renforcement des caractéristiques formantiques des voyelles.

- **F2-F1**

Les voyelles postérieures /u/, /o/ et /ɔ/ sont considérées comme des voyelles focales : elles sont caractérisées par le rapprochement des deux formants F1 et F2. En position IP, cette distance est réduite pour les voyelles /u/, /o/ et /ɔ/. Cette réduction de la distance F2-F1 peut être interprétée comme un renforcement des caractéristiques focales des voyelles postérieures.

- **F3-F2**

La voyelle /y/ est également une voyelle focale caractérisée par un rapprochement des formants F3 et F2. Sous l'effet de la position IP, la distance diminue également. De même, la voyelle /i/ est une voyelle focale caractérisée par un rapprochement des formants F3-F4 ou une distance large entre les formants F3-F2. Si aucun effet n'est observé sur la distance F4-F3, l'augmentation de F3 pour la voyelle /i/ entraîne une augmentation de la distance F3-F2. En position IP, les caractéristiques focales de ces deux voyelles sont renforcées.

- **Durée**

Sur les mesures de durée, deux patterns sont observés : soit une augmentation sur les voyelles /u/ et /œ/, soit une diminution sur les voyelles /ɛ/ et /a/. La position IP affecte peu les mesures de durée dans nos données.

- **Intensité**

Il existe un effet fort de la position IP sur l'intensité des voyelles : sous l'effet de la position prosodique, l'intensité augmente pour l'ensemble des voyelles excepté /e/ et /ɔ/ pour lesquelles les variations diminuent en position IP.

Nous avons également observé l'effet de la position IP sur les espaces acoustiques F1/F2 et F2/F3.

- **Espace acoustique F1/F2**

Sur le plan F1/F2, les voyelles /u/, /e/, /ø/, /o/, /ɛ/, /ɔ/ et /a/ sont plus éloignées du centroïde F1/F2 en position IP qu'en position W, à l'inverse /œ/ est plus centrale et se rapproche du centroïde F1/F2. L'espace acoustique F1/F2 est donc plus large en position IP.

- **Espace acoustique F2/F3**

Sur le plan F2/F3, /i/ et /e/ s'éloignent du centroïde F2/F3 et les voyelles /ø/ et /œ/, deviennent plus centrales en position IP. Les voyelles sont donc plus distinctes les unes des autres sur le plan F1/F2, en position IP.

La dernière question posée dans cette thèse était : quelles sont les conséquences des variations provoquées par la position prosodique (IP vs W) sur le contraste syntagmatique (en renforçant la sonorité de la voyelle) et sur le contraste paradigmatique (en renforçant le contraste entre voyelles) ? Pour répondre à

cette questions, nous allons à présent confronter ces résultats aux hypothèses d'étude : l'hypothèse d'expansion de sonorité et l'hypothèse d'hyperarticulation localisée.

- **Les variations sont-elles expliquées par l'hypothèse d'expansion de sonorité ?**

Pour répondre à la question de savoir si *les voyelles du français étaient plus sonores en position IP*, nous nous concentrons sur les variations des paramètres articulatoires d'aire, d'aperture, d'abaissement du menton et des paramètres acoustiques de durée, d'intensité et de F1 qui sont considérés comme des corrélats possibles de la sonorité.

**HYPOTHESE 1** : la position IP va avoir un effet sur le menton, sur les lèvres, sur les valeurs spectrales des voyelles et les modifications contribuent à renforcer le contraste syntagmatique en renforçant la sonorité de la voyelle.

H 1.a : Selon cette hypothèse, on s'attendrait donc à un abaissement du menton plus important pour l'ensemble des voyelles. La mesure d'abaissement du menton n'étant pas une mesure optimale reflétant directement les mouvements de la mâchoire, nous avons effectué une simulation avec le modèle de Maeda. Un abaissement de la mâchoire entraîne une augmentation de F1, une diminution de F2 (sauf /u/) de F3 pour l'ensemble des voyelles orales et une augmentation de F4 pour la voyelle /i/.

→ Dans nos données, seules les voyelles /u/ et /o/ montrent un abaissement du menton en position IP. Au niveau des variations formantiques, l'augmentation de F1, attendue par un abaissement de la mâchoire plus important, est observée seulement pour les voyelles mi-ouvertes et ouvertes (ainsi que /ø/). De même, la diminution de F2 attendue par un abaissement de la mâchoire est observée uniquement pour la voyelle /o/ (pour S2 et S4), et la diminution de F3 est observée pour les voyelles /y/ et /ø/ uniquement. Les variations observées sur les formants ne sont donc pas uniquement attribuables à un abaissement de la mâchoire.

L'hypothèse H 1.a n'est pas validée dans nos données. En effet, on observe un abaissement du menton pour seulement deux voyelles (/u/ et /o/) en position IP. De plus, les variations formantiques attendues (augmentation de F1, diminution de F2 et F3) d'après la simulation de l'abaissement de la mâchoire ne sont pas observées sur l'ensemble des voyelles.

H 1.b : Selon cette hypothèse, on s'attendrait également à une aperture aux lèvres plus élevée pour l'ensemble des voyelles. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, une augmentation de l'aperture aux lèvres entraîne des modifications sur les formants. On s'attendrait donc à une augmentation globale des formants F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et une diminution de F4 (pour /i/).

→ Dans nos données, tous locuteurs confondus, l'ensemble des voyelles montre une augmentation de l'aperture (sauf /œ/), ce qui est en accord avec les prédictions. Pour les variations formantiques, l'augmentation globale des trois formants F1, F2, F3 attendue d'après la simulation n'est observée que pour les deux voyelles /ɛ/ et /œ/. Pour les autres voyelles, F1 augmente pour les voyelles /a/ et /ø/, F2 augmente pour /ø/, /e/ mais diminue pour /o/, F3 augmente pour les voyelles /i/, /e/, /ɔ/ et /a/ et diminue pour les autres

voyelles /y/, /u/, /o/, /ø/. Les variations acoustiques ne sont donc pas directement attribuables à une augmentation d'aperture aux lèvres.

L'hypothèse H 1.b est validée en termes d'aperture pour l'ensemble des voyelles, cependant les variations observées sur les formants ne peuvent pas être l'unique conséquence d'une augmentation de l'aperture aux lèvres.

H 1.c : D'après cette hypothèse, on s'attendrait à une augmentation des valeurs d'intensité pour l'ensemble des voyelles

→ Dans nos données, l'intensité augmente pour /i/, /y/, /u/, /ø/, /ɛ/ /œ/ et /a/. Nous interprétons cette augmentation d'intensité comme un corrélat de la sonorité. L'augmentation de l'aperture aux lèvres, ou de l'aire aux lèvres pourrait expliquer cette augmentation de l'intensité de la voyelle.

L'hypothèse 1.e. est donc validée pour une majorité de voyelles étudiées.

H 1.d : D'après cette hypothèse, on s'attendrait à un allongement de l'ensemble des voyelles

→ Dans nos données, seules les voyelles /u/ et /œ/ voient leur durée acoustique augmentée. Dans notre étude, tous locuteurs confondus, trois patterns ont été observés : une diminution de durée pour la voyelle /ɛ/, une augmentation de durée pour les voyelles /u/, /œ/, et /a/ et aucun effet sur les autres voyelles.

L'hypothèse 1.d. n'est pas validée pour la majorité des voyelles. Les variations articulatoires et acoustiques observées ne peuvent pas être expliquées par un allongement de la durée acoustique des voyelles.

Ces résultats montrent que l'hypothèse d'expansion de sonorité est partiellement validée sur nos résultats : seules les variations d'aperture aux lèvres et d'intensité conforte cette hypothèse.

- **Les variations sont-elles expliquées par l'hypothèse d'hyperarticulation localisée?**

En contribuant à la maximisation du contraste paradigmatique, le renforcement initial maximiserait la distinction entre les voyelles par un renforcement des traits distinctifs du segment considéré (d'après les travaux de De Jong (1995) sur les segments accentués). Par conséquent, le renforcement prosodique provoquerait une maximisation de la distinctivité des voyelles par une maximisation des valeurs du trait [+F] ou [-F] caractéristique du segment considéré.

**HYPOTHESE 2** : la position IP va avoir un effet sur le menton, sur les lèvres, sur les caractéristiques acoustiques et les modifications contribueraient à renforcer le contraste paradigmatique en renforçant les caractéristiques distinctives des voyelles.

H 2.a : D'après cette hypothèse, on s'attendrait à un étirement et une aperture aux lèvres plus importants pour les voyelles non-arrondies et moins importants pour les voyelles arrondies. Dans la modélisation des conséquences acoustiques seul le paramètre d'aperture a pu être testé, car le paramètre d'étirement n'est pas présent dans le modèle de Maeda. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles

non-arrondies, l'augmentation de l'aperture aux lèvres entraîne une augmentation globale de l'ensemble des formants F1, F2, F3 pour les voyelles /i, e, ε, a/ ainsi qu'une diminution de F4 pour la voyelle /i/. Pour les voyelles arrondies, la diminution d'aperture entraîne une diminution des formants F1, F2, F3 pour les /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/.

➔ Dans nos données, pour les voyelles non-arrondies, les mesures d'étirement et d'aperture sont plus élevées en position IP. Pour les voyelles arrondies, l'étirement et l'aperture ne sont pas moins élevés mais plus élevés en position IP. Ce résultat est particulièrement intéressant car il montre que l'ensemble des variations observées dans ce travail ne confortent pas l'idée d'une hyperarticulation localisée : les caractéristiques [-arrondi] sont renforcées mais pas les caractéristiques [+arrondi]. Pour les variations acoustiques, F1 augmente pour les voyelles /a/, F2 augmente pour /e/ F3 augmente pour les voyelles /i/, /e/ mais nous n'observons pas d'augmentation globale des trois formants F1, F2, F3 pour les voyelles /i, e, ε, a/.

|| L'hypothèse H 2.a est validée pour les voyelles arrondies uniquement, en termes d'étirement et d'aperture.

H 2.b : D'après cette hypothèse, on s'attendrait à une protrusion moins élevée pour les voyelles non-arrondies et une protrusion plus élevée pour les voyelles arrondies. D'après la simulation effectuée par le modèle de Maeda, pour les voyelles non-arrondies, la diminution de la protrusion aux lèvres entraîne une augmentation globale des formants F1, F2, F3 pour les voyelles /i, e, ε, a/ ainsi que F4 pour /i/ et pour les voyelles arrondies, l'augmentation de la protrusion entraîne une diminution de tous les formants sur les voyelles /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/ et particulièrement F2 et F1.

➔ La protrusion n'est pas moins élevée pour les voyelles non-arrondies et n'est pas plus élevée pour les voyelles arrondies (la protrusion diminue uniquement pour la voyelle /œ/).

|| L'hypothèse H 2.b n'est pas validée dans nos données.

H 2.c : D'après cette hypothèse, on s'attendrait à une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [+bas] et à une diminution des valeurs de F1 pour les voyelles [-bas].

➔ Nos résultats montrent en effet, une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [+bas]. Aucun effet n'est observé sur les valeurs de F1 pour les voyelles [-bas] excepté pour la voyelle /ø/, pour laquelle les valeurs augmentent contrairement aux prédictions faites par l'hypothèse.

|| L'hypothèse H 2.c est validée pour les voyelles [+bas] uniquement.

H 2.d : une augmentation des valeurs de F1 pour les voyelles [-haut] et une diminution des valeurs de F1 pour les voyelles [+haut]

➔ Nos résultats montrent une augmentation des valeurs de F1 pour la voyelle /ø/ [-haut] uniquement. Il n'existe aucun effet sur les variations de F1 pour les voyelles [+haut].

|| L'hypothèse H 2.d n'est pas validée dans nos données

H 2.e : une augmentation des valeurs de F2 pour les voyelles [-arrière] et une diminution des valeurs de F2 pour les voyelles [+arrière]

→ Nos résultats montrent une augmentation des valeurs de F2 pour quatre voyelles [-arrière] (/e/, /ø/, /ɛ/, /œ/) et une diminution des valeurs de F2 pour une voyelle [+arrière] /o/.

|| L'hypothèse H 2.e est validée pour la plupart des voyelles [-arrière].

|| Nos résultats ne valident que partiellement l'hypothèse d'hyperarticulation. Seulement, certaines caractéristiques distinctives des voyelles sont renforcées.

En conclusion, nous observons une augmentation constante de l'aperture aux lèvres pour l'ensemble des voyelles du français entraînant une expansion de sonorité (associé à une augmentation de l'intensité). Or, nous avons vu que les variations formantiques observées sur ces voyelles ne sont pas uniquement attribuables à une ouverture plus élevée des lèvres (voir H.1.b). Les variations acoustiques tendent en effet à renforcer certaines caractéristiques propres aux voyelles : une augmentation de F1 est observée sur les voyelles basses de l'espace vocalique mais également pour la voyelle /ø/. Les variations sur les formants F2 et F3 suivent clairement un renforcement des propriétés acoustiques propres à la voyelle : en IP, les voyelles antérieures /e/, /ɛ/, /ø/, /œ/ ont un formant F2 plus élevé, la voyelle postérieure /o/ un formant F2 moins élevé, les voyelles non-arrondies /i/, /e/ et /ɛ/ un formant F3 plus élevée alors que la voyelle arrondie /y/ et /ø/ ont un F3 plus bas. Mais, contrairement au postulat de De Jong, l'ensemble des traits distinctifs des voyelles n'est pas renforcé en position IP puisque les voyelles arrondies par exemple, ne sont pas d'avantage arrondies. L'effet de la position IP ne s'explique donc pas uniquement en termes de maximisation des « traits », notre étude montre que l'effet de la position prosodique s'explique plutôt en termes de maximisation des « contrastes ».

Pour plus clarté, le Tableau 74 spécifie les paires pour lesquelles il existe une interaction entre l'effet de la position IP et les contrastes phonologique [±arrondi], [±arrière], [±haut] et [±bas] selon les paires de voyelles, Les paires pour lesquelles le renforcement initial entraîne une maximisation des voyelles étudiées sont signalées par des cases grisées.

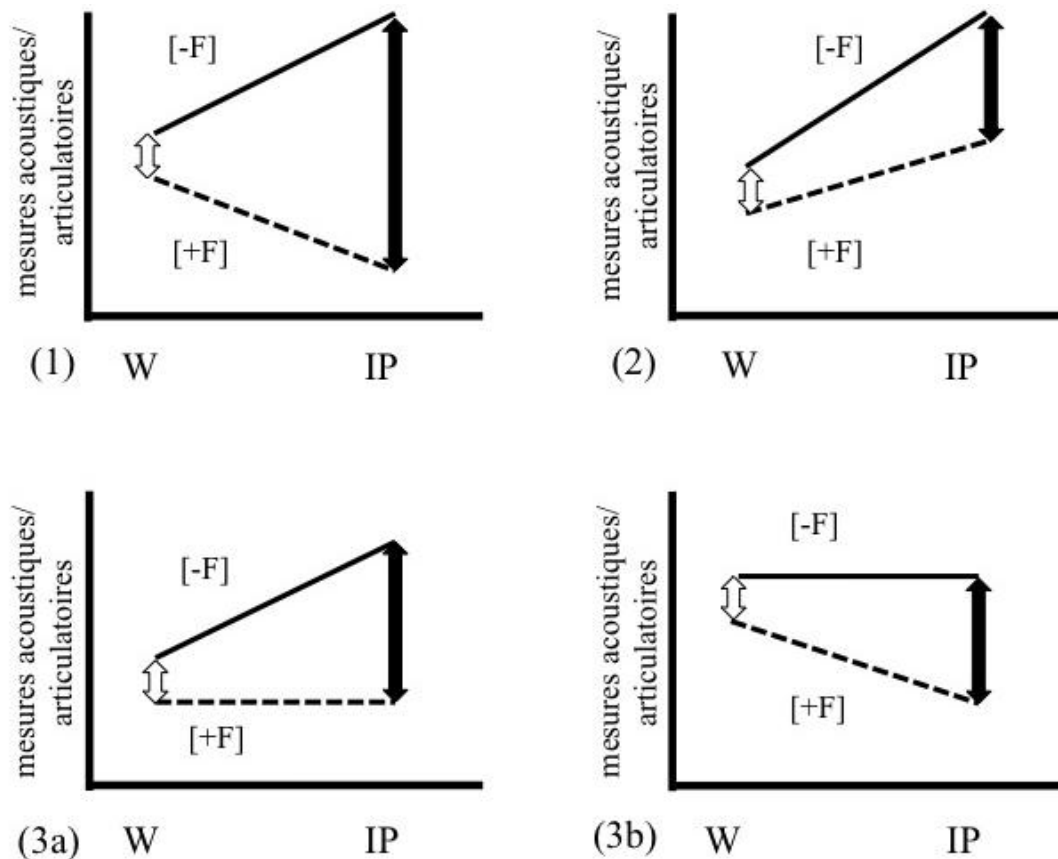
		F1	F2	F3	aire	aperture	étirement
[±arrondi]	/i-y/			x	x	x	x
	/e-ø/		x (S2, S3, S4)	x	x	x	x
	/ε-œ/		x (S2, S4)		x	x	
[±arrière]	/i-u/				x	x	x
	/e-o/		x		x	x	x
	/ε-ɔ/		x				
[±arrière]	/y-u/		x				
	/ø-o/		x				
	/œ-ɔ/		x		x		
[±haut]	/i-e/						
	/y-ø/	x (S1, S3)			x (S3, S4)	x (S3, S4)	
	/u-o/	x (S2)			x	x	
[±bas]	/e-ε/	x					
	/ø-œ/	x					
	/o-ɔ/	x			x (S2, S3, S4)	x (S3, S4)	

**Figure 75 : Résumé des résultats observés en position IP. La croix (x) montre qu'il existe une interaction entre la paire étudiée et la position IP. Les cases grisées montrent que le contraste entre la paire étudiée est maximisé en position IP.**

Nos données montre en effet que le renforcement initial sur les segments en position IP entraîne une maximisation des contrastes paradigmatiques entre voyelles. Cette maximisation s'effectue de trois manières différentes comme le montre la Figure 76:

- (1) pour une paire de voyelles [±F], le paramètre étudié augmente pour la catégorie [-F] et diminue pour la catégorie [+F]: il y a renforcement du contraste paradigmatique par maximisation de chacune des catégories [-F] et [+F]. Cette hypothèse correspond à l'hypothèse d'hyperarticulation localisée.
- (2) pour une paire de voyelles [±F], le paramètre étudié augmente pour les deux catégories de voyelles, mais l'augmentation est plus importante pour la catégorie [-F] : les deux voyelles étudiées se trouvent plus distinctes l'une de l'autre, le contraste paradigmatique entre les voyelles est maximisé.
- (3a et b) pour une paire de voyelles [±F], le paramètre étudié augmente ou diminue pour l'une des deux catégories de voyelles ([+F] ou [-F]) alors que l'autre catégorie reste stable. Ces variations ont également pour conséquence d'augmenter la distinction entre les deux catégories de voyelles étudiées, le contraste paradigmatique entre les voyelles est maximisé.





**Figure 76 : Schéma des différents patterns observés dans cette thèse entraînant une maximisation du contraste paradigmatique entre deux voyelles. La flèche blanche représente le contraste entre les deux voyelles en position W. La flèche noire représente la maximisation du contraste entre les deux voyelles en position IP. (1) : en position IP, le contraste entre les voyelles est maximisé par une maximisation des caractéristiques acoustiques et/ou articulatoires de chacune des voyelles, (2) : en position IP, il existe une augmentation des caractéristiques acoustiques et/ou articulatoires des deux voyelles : mais l'augmentation est plus forte pour la voyelle [-F], le contraste est maximisé. (3a et b) : en position IP, les caractéristiques restent stables pour l'une des deux voyelles, alors que l'autre augmente ou diminue dans le but de maximiser le contraste.**

- (1) En position IP, nous observons des paires de voyelles pour lesquelles il existe un renforcement du contraste paradigmatique par une maximisation des caractéristiques acoustiques et/ou articulatoires de chacune des voyelles composant la paire étudiée. Ces paires sont les suivantes :

- en termes de F3, pour les paires /i-y/ et /e-ø/, les valeurs diminuent pour la voyelle [+arrondi] et augmentent pour la voyelle [-arrondi] en position IP. La position IP va donc provoquer une maximisation des voyelles et un renforcement du contraste phonologique entre la voyelle arrondie et non-arrondie.
- en termes de F2, le contraste [±arrière] est maximisé pour les paires /e-o/ et /ø-o/ : F2 augmente pour les voyelles [-arrière] et diminue pour les voyelles [+arrière]. Le contraste phonologique [±arrière] est renforcé en position IP pour ces paires de voyelles.

- (2) En position IP, nous observons des paires de voyelles pour lesquelles il existe une augmentation du paramètre acoustique et/ou articulatoire sur les deux voyelles ([ -F] et [+F]) mais

l'augmentation est plus forte pour l'une des deux voyelles ([-F]). Ces modifications entraînent une maximisation du contraste paradigmatique. Ces paires sont les suivantes :

- le contraste [±arrondi] en termes d'aire d'aperture et d'étirement est renforcé en position IP pour les paires /i-y/, /e-ø/, /i-u/ et /e-o/. La paire /ε-œ/ est également maximisée en position IP en termes d'aire et d'aperture.

- (3) En position IP, nous observons des paires de voyelles pour lesquelles les variations du paramètre étudié sont stables pour une catégorie de voyelles alors que les variations du même paramètre augmentent ou diminuent pour l'autre catégorie de voyelles. Ces paires sont les suivantes :

- pour le contraste [±bas], les voyelles [+bas] sont caractérisées par une augmentation forte de F1 en position IP, alors que les variations restent stables pour les voyelles [-bas], par conséquent la distinction entre les deux catégories de voyelles est maximisée en position IP.
- Pour le contraste [±arrière], pour les paires /ε-ɔ/, /y-u/ et /œ-ɔ/, la maximisation entre les deux voyelles considérées en position IP, s'effectue par l'augmentation de F2 pour les voyelles /ε/ et /œ/ [-arrière] alors que la voyelle /ɔ/ [+arrière] reste stable, et par la diminution de F2 pour /u/ [+arrière] alors que la voyelle /y/ [-arrière] reste stable.

En conclusion, il semblerait que les variations observées en position IP peuvent contribuer à renforcer le contraste syntagmatique et le contraste paradigmatique, comme montré dans les travaux de Cho sur l'accent (2001) p. 176 « The two effects appear to be compatible. It is possible that phonetic clarity arising from strengthening can render the segment in prosodically strong locations more prominent than neighboring segments and at the same time, make the segment maximally distinctive among contrastive sound.

Nous allons à présent discuter dans la dernière partie de cette thèse de nos questions de recherche afin de proposer une définition originale pour le renforcement initial des voyelles orales du français.





# DERNIERE PARTIE

## Discussion des questions de recherche

---

L'objectif principal de notre étude était de rendre compte du processus de renforcement prosodique en position initiale de constituants prosodiques sur les voyelles orales du français, afin de mieux définir et comprendre le phénomène de renforcement initial lui-même.

Dans cette thèse, nous avons répondu à trois questions principales:

- Existe-t-il un effet de la position prosodique (IP vs W) sur les voyelles orales du français ?
- Quelles propriétés acoustiques et articulatoires (au niveau des lèvres et du menton) des voyelles sont affectées en position initiale d'un constituant prosodique important et dans quelles directions vont ces modifications et dans quelles directions vont ces modifications ?
- Quelles sont les conséquences des variations provoquées par la position initiale de constituants prosodiques sur le contraste syntagmatique (en renforçant la sonorité de la voyelle) et sur les contrastes paradigmatiques (en renforçant les contrastes entre paires de voyelles) ?

Nous avons étudié la réalisation des 10 voyelles orales du français /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/ placées en position strictement initiale de Groupe Intonatif (position que nous avons appelé IP, pour Intonation Phrase) et en position médiane de Groupe Intonatif (position que nous avons appelé W, pour Word). Ces voyelles sont toutes précédées d'un /i/ et suivies de la consonne bilabiale /p/, excepté pour les voyelles mi-ouvertes pour lesquelles la consonne suivante est /f/ pour la voyelle /œ/, /β/ pour la voyelle ɔ/ et /v/ pour la voyelle /ɛ/. Les principaux résultats de l'étude de ce corpus sont schématisés dans les Tableau 96 à Tableau 99 pour les différents paramètres étudiés, la direction des flèches montrant la direction des variations entre la position IP et la position W :

	/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ɛ/	/œ/	/ɔ/	/a/
étirement	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
aperture	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗		↗	↗
protrusion									↘	
abaissement menton			↗			↗				

Tableau 96 : Principales variations sur les mesures d'étirement, d'aperture, de protrusion et d'abaissement du menton relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée. Une flèche montante correspond au résultat  $IP > *W$  (\* :  $p < .05$ ) et une flèche descendante correspond au résultat  $IP < *W$  (\* :  $p < .05$ ), tous locuteurs confondus.

	/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ɛ/	/œ/	/ɔ/	/a/
[±haut]	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
[±bas]	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
F1					↗		↗	↗	↗	↗
[±arrière]	-	-	+	-	-	+	-	-	+	
F2				↘	↘	↗	↘	↘		
[±arrondi]	-	+		-	+		-	+		
F3	↗	↘		↗	↘		↗	↗		

Tableau 97 : Principales variations acoustiques sur les formants F1, F2, F3 relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée (en Hz). Une flèche montante correspond au résultat  $IP > *W$  (\* :  $p < .05$ ) et une flèche descendante correspond au résultat  $IP < *W$  (\* :  $p < .05$ ), tous locuteurs confondus.

	/i/	/y/	/u/	/e/	/ø/	/o/	/ɛ/	/œ/	/ɔ/	/a/
intensité	↗	↗	↗	↘	↗		↗	↗	↘	↗
durée			↗				↘	↗		↘

Tableau 98 : Principales variations sur les valeurs d'intensité et de durée relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée. Une flèche montante représente le résultat  $IP >^*W$  (\* :  $p < .05$ ) et une flèche descendante représente le résultat  $IP <^*W$  (\* :  $p < .05$ ), tous locuteurs confondus.

	/i/	/y/	/u/	/o/	/ɔ/
F2-F1			↘	↘	↘
F3-F2	↗	↘			

Tableau 99 : Principales variations sur les valeurs de distance entre les formants F2-F1 et F3-F2 relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées sur chaque voyelle focale. Une flèche montante représente le résultat  $IP >^*W$  (\* :  $p < .05$ ) et une flèche descendante représente le résultat  $IP <^*W$  (\* :  $p < .05$ ), tous locuteurs confondus.

L'observation des différents résultats acoustiques et articulatoires nous permet de proposer une approche originale pour expliquer les mécanismes de réalisation du renforcement initial sur les voyelles orales du français. Notre proposition pour expliquer le renforcement initial observé en position initiale de constituants IP vs. W est la suivante :

1) En position IP, il existe bien **une expansion de sonorité** par rapport à la position W. Cette expansion de sonorité est essentiellement portée par l'augmentation de l'aperture et de l'étirement aux lèvres pour l'ensemble des voyelles du français et par leur augmentation d'intensité acoustique observée pour 7 des 10 voyelles étudiées.

a) Dans nos données, l'augmentation de l'aperture et de l'étirement aux lèvres en position IP ne peut être expliquée par un allongement de la durée acoustique de la voyelle. En effet, dans notre étude, tous locuteurs confondus, trois patterns ont été observés : une diminution significative de durée pour les voyelles /ɛ/, /a/, une augmentation de durée pour les voyelles /u/, /œ/ et aucun effet sur les autres voyelles. Cependant, comme effectué dans l'étude de Fougeron (1998), la durée des périodes de glottalisation de nos données acoustiques n'a pas été incluse dans la durée de la voyelle. Or ces périodes de glottalisation sont plus fréquentes en position IP, qu'en position W. Ceci pourrait influencer l'interprétation de nos résultats et la distinction trouvée avec les résultats de Gendrot et Gerdes, (2009), qui observent un allongement de durée pour l'ensemble des voyelles orales du français en position initiale de groupe intonatif (IP) par rapport à une position dans le mot. De plus, nous n'avons regardé que la durée acoustique des voyelles et non la durée des gestes

articulatoires pour la production de ces voyelles. Nos conclusions sur les relations entre variations spectrales et spatiales, d'une part, et variations temporelles, d'autre part, en position initiale demeurent donc limitées.

- b) Cette augmentation des paramètres d'aperture et d'étirement pourrait s'expliquer par la présence de la pause qui précède la production de la voyelle cible dans la majorité des productions de la condition IP. En effet, en position initiale de constituant IP, la voyelle est le plus souvent précédée d'une pause : entre un minimum de 91% des cas pour S1 et un maximum de 98% des cas pour S3. La pause offre donc un intervalle temporel supplémentaire à la voyelle pour réaliser une articulation plus extrême en position IP. Nous postulons également que la pause permet à la voyelle d'être plus saillante comme le montre les valeurs d'intensité qui augmentent pour la plupart des voyelles étudiées.
- c) Cette augmentation des paramètres d'aperture et d'étirement peut également s'expliquer par le fait qu'il existe un chevauchement moins fort, en position IP par rapport à la position W, entre la voyelle cible et les segments adjacents. En effet, en position IP, la présence de la pause située avant la voyelle cible, diminue le chevauchement de cette voyelle avec l'occlusive /p/ qui précède. A l'inverse, en position W, il est possible qu'il existe un chevauchement plus fort entre la voyelle cible et les consonnes labiales adjacentes, et donc que celles-ci perturbent l'ouverture pour la cible vocalique. Des données articulatoires permettant de mesurer les propriétés dynamiques des gestes articulatoires seraient nécessaires pour tester les propositions avancées en a, b, c.
- d) Il est aussi possible que cette augmentation d'aperture aux lèvres soit en partie expliquée par une augmentation de l'abaissement de la mâchoire. D'après l'hypothèse d'expansion de sonorité (Beckman et al. 1992), la mâchoire est considérée comme l'articulateur de la prosodie (Erickson, 2002). Un mouvement de la mâchoire d'abaissement plus important en position IP entraînerait un abaissement de la lèvre inférieure et pourrait donc expliquer l'augmentation de l'aperture aux lèvres dans nos données. Nous avons essayé dans notre étude de mesurer les mouvements de la mâchoire par une mesure indirecte à l'aide d'un marqueur posé sur le menton. Il s'avère que ces mesures n'ont pas montré de différences entre conditions prosodiques. Mais ces résultats sont à prendre avec précaution car on sait que les mesures sur le menton ne capturent que partiellement les mouvements de la mandibule. Une mesure plus directe avec une autre technique d'investigation reste donc à effectuer.
- e) Enfin, comme proposé par Beckman et al. (1992) nous faisons l'hypothèse que ces variations phonétiques au niveau de l'aperture aux lèvres et de l'intensité acoustique contribuent à rendre la voyelle plus distincte des autres segments qui l'entourent en **renforçant le contraste sur l'axe syntagmatique entre la voyelle cible et les consonnes adjacentes.**



2) Outre cette expansion de sonorité il existe aussi **un renforcement de certaines caractéristiques phonétiques spécifiques à chaque voyelle des voyelles du français.**

- a) Contrairement à la proposition de De Jong (1995), il n'est pas question ici d'un renforcement de l'ensemble des traits distinctifs de la voyelle. Les variations acoustiques tendent en effet à renforcer seulement **certaines caractéristiques acoustiques propres à chaque voyelle** : comme observé dans le chapitre 7, en position IP, le formant F1 augmente pour les voyelles [+bas] /a, ε, œ, ɔ/; le formant F2 augmente pour les voyelles [-arrière] /e, ø, ε, œ/ et diminue pour la voyelle [+arrière] /o/; le formant F3 augmente pour les voyelles [-arrondi] /i, e/, et diminue pour les voyelles [+arrondi] /y, ø/. Au niveau articuloire, également, les caractéristiques articuloires des voyelles non-arrondies sont renforcées (en termes d'aperture et d'étirement) en position IP par rapport à la position W: les voyelles non-arrondies sont bien [-arrondi]. Alors que les voyelles arrondies ne sont pas plus arrondies en position IP par rapport à la position W. Nous ne relevons ni diminution de l'aire aux lèvres (excepté pour un locuteur pour les voyelles /y/ et /u/, S3) ni augmentation de protrusion. Il n'y a donc pas d'augmentation du trait [+arrondi] pour les voyelles arrondies quand on regarde les données articuloires alors qu'il existe une augmentation du trait [+arrondi] sur les données acoustiques (diminution de F3). En ce qui concerne l'absence d'effet du renforcement initial sur la protrusion des lèvres, il faut rappeler comme vu en introduction que les effets sur le mouvement de protrusion ne sont pas homogènes dans les travaux s'intéressant aux modifications induites par la prosodie sur la géométrie des lèvres, notamment la position de focus. Par exemple, les travaux de Ménard, Loevenbruck & Savariaux (2006), Ménard & al. (2013) et Dohen, Loevenbruck & Hill (2009) montrent une augmentation de l'aire aux lèvres sous l'effet du focus. Cette augmentation est bien associée à une augmentation de la protrusion dans les études de Dohen et collègues (2006, 2009), alors que Ménard et al. (2013) ne trouvent pas de variations de la protrusion sur la lèvre supérieure des voyelles focalisées (/a, i, y, u/).
- b) L'originalité de ce travail est d'avoir montré que ces propriétés affectées par le renforcement initiale et qui sont propres à chaque voyelle contribuent à augmenter les contrastes paradigmatiques entre les voyelles du système. L'analyse du système par paires de voyelles montre en effet que les modifications acoustiques et articuloires permettent de renforcer les contrastes paradigmatiques entre voyelles. Ce renforcement s'effectue soit par la maximisation de chaque valeur du contraste ([+F] et [-F]) (a), soit par la maximisation d'une des valeurs du contraste ([+F] ou [-F]) (b).
- a. Dans nos données, on observe un renforcement de chacune des valeurs du contraste :
- en termes de F3, pour les paires /i-y/ et /e-ø/, les valeurs diminuent pour la voyelle [+arrondi] et augmentent pour la voyelle [-arrondi] en position IP ;
  - en termes de F2, pour les paires /e-o/ et /ø-o/, les valeurs diminuent pour la voyelle [+arrière] et augmentent pour la voyelle [-arrière] en position IP.

b. Dans nos données, on observe une maximisation d'une des valeurs du contraste entre les voyelles :

- pour le contraste [±bas], les voyelles [+bas] sont caractérisées par une augmentation forte de F1 en position IP, alors que les variations restent stables pour les voyelles [-bas], par conséquent la distinction entre les deux catégories de voyelles est renforcée en position IP.
- Pour le contraste [±arrière] (paires /ε-ɔ/, /y-u/ et /œ-ɔ/), la maximisation entre les deux voyelles en position IP s'effectue par l'augmentation de F2 pour les voyelles /ε/ et /œ/ alors que la voyelle /ɔ/ reste stable, et par la diminution de F2 pour /u/ alors que la voyelle /y/ reste stable.
- Pour le contraste [±arrondi] (/i-y/, /i-u/, /e- ø/ /e-o/ et /ε-œ/), les voyelles [+arrondi] et [-arrondi] sont caractérisées par une augmentation d'aperture et d'étirement, la maximisation entre les voyelles se réalise parce que l'augmentation des paramètres est plus forte pour les voyelles [-arrondi].

3) Compte tenu des propositions 1 et 2, le renforcement initial entraîne une expansion de la sonorité qui s'associe à un renforcement de certaines caractéristiques propres à chaque voyelle. Nous pensons que cette expansion de sonorité est soumise à des contraintes de production dues à l'implémentation articuloire et acoustique des voyelles dans le système vocalique du français. De plus, nous postulons également que les caractéristiques phonétiques qui sont affectées par le renforcement initial sont celles qui permettent de renforcer la distinctivité acoustique de chaque voyelle et de maximiser les différences acoustiques entre les segments du système vocalique. Nous allons tout d'abord montrer qu'il existe bien une expansion de sonorité mais qu'elle est limitée par des contraintes de production. Nous allons ensuite montrer qu'il existe, pour la compréhension du message, un renforcement de certaines propriétés articuloires et acoustiques particulières. Ces propositions rejoignent les prédictions du modèle H&H de Lindblom (1990) qui postule que le locuteur adopte une stratégie de variabilité adaptative en essayant de trouver un compromis entre coût articuloire et préservation de l'intelligibilité pour des exigences de compréhension.

Les arguments qui montrent que le renforcement initial entraîne une expansion de sonorité mais limité par des contraintes de production (contraintes physiologiques et contraintes phonologiques) sont les suivants :

- a) L'observation de nos données articuloires, particulièrement nos données labiales, montrent que les variations conditionnées par le renforcement initial sur les paramètres d'étirement et d'aperture sont physiologiquement contraintes par l'implémentation articuloire de voyelles. Les modifications observées en position initiale de constituant IP sont, en effet, gouvernées par des contraintes physiologiques liées à la nécessité d'arrondissement. L'examen de l'augmentation des

paramètres d'aperture et d'étirement des voyelles montre que cette augmentation est plus large pour les voyelles /i, e, ε, a/ que pour les voyelles /ɔ, œ/ ou encore /y, u, o, ø/. On retrouve ici les trois catégories de voyelles introduites par Zerling (1990) : les voyelles fortement labialisées /y, u, o, ø/, labialisées /ɔ, œ/ et peu labialisées /i, e, ε, a/. L'articulation des voyelles [++lab] /y, u, o, ø/ est plus contrainte par la nécessité d'arrondissement des lèvres d'un point de vue physiologique que les deux autres catégories [+lab] /ɔ, œ/ et [-lab] /i, e, ε, a/. Une augmentation forte de l'aperture aux lèvres pourrait mettre en péril la nature de la voyelle arrondie.

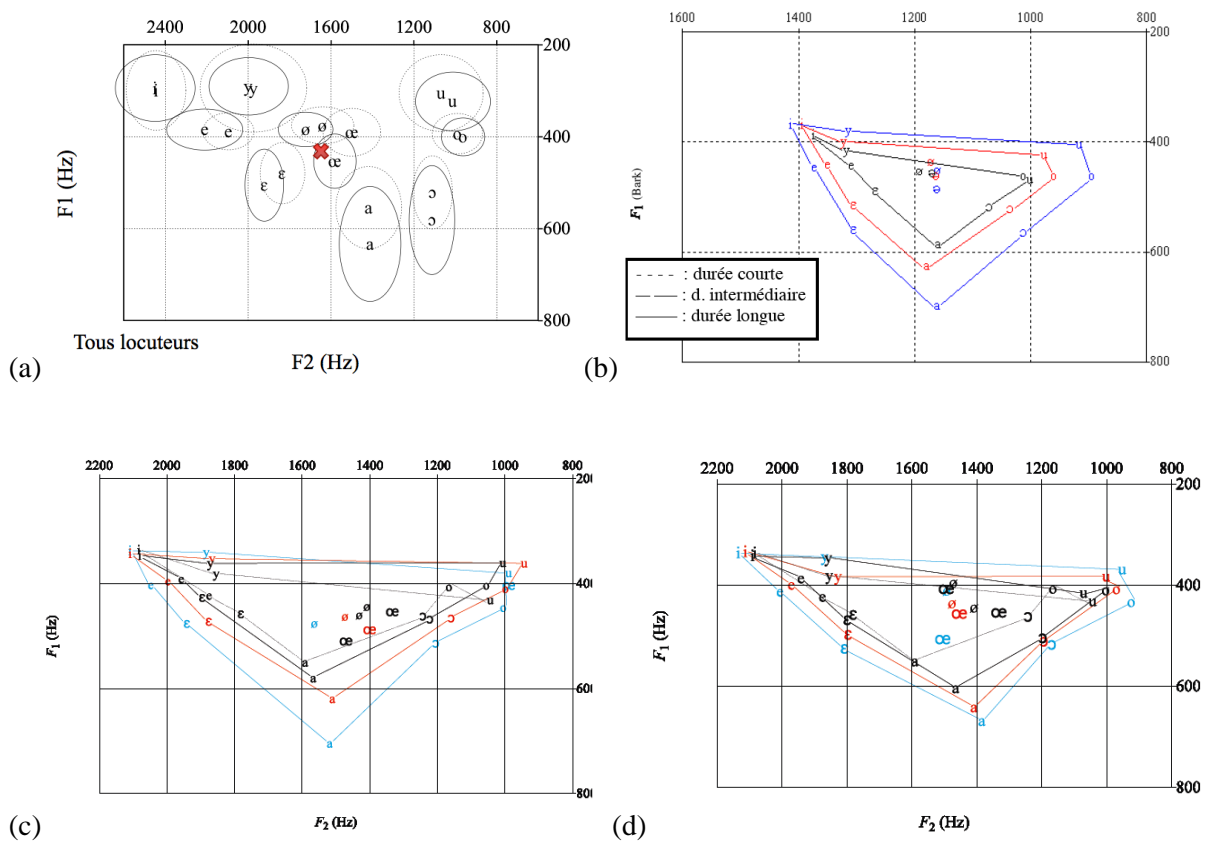
- b) Cette expansion de sonorité provoque également une absence de protrusion pour les voyelles labiales ([+lab] et [++lab]). Nous expliquons cette absence d'effet sur la protrusion par le principe d'économie motrice, interprétable comme un principe de moindre coût énergétique (Lindblom, 1983 :233) : « speech movements are strikingly effortless and highly automatized so are others movements. ». En effet, le système articulaire génère des mouvements qui tendent par défaut à une économie motrice et une facilité de production ; il s'agit d'une contrainte interne au processus moteur de la production articulaire. Dans cette perspective, en position initiale de constituant prosodique IP, seuls deux degrés de liberté physiologiques sont sujets à variations : les paramètres d'aperture et d'étirement. Pour le troisième degré : la protrusion, aucun effet n'est observé (sauf /œ/). Pour compenser cette économie motrice au niveau des lèvres et dans le but d'atteindre des cibles acoustiques précises, une compensation articulaire possible serait un mouvement au niveau de la langue. C'est l'examen de la voyelle /y/ qui nous permet de faire cette hypothèse. Nous observons un abaissement des valeurs du formant F3 en position IP, caractéristique de la voyelle arrondie /y/ par rapport à /i/. Quand la langue est massée vers l'avant de la cavité buccale, la manœuvre articulaire la plus efficace pour abaisser le formant F3 est de réduire l'aire aux lèvres ou d'allonger la cavité antérieure par une protrusion plus importante. Or, nous n'observons aucun effet sur les mesures de protrusion et les paramètres d'aperture et d'étirement ne sont pas moins élevées en position IP (excepté pour S3). Au contraire, on observe une augmentation des paramètres d'aperture et d'étirement. Une compensation est possible au niveau lingual pour produire une voyelle /y/ avec un formant F3 plus bas. Nous avons vérifié cette hypothèse avec le modèle de Maeda, pour la voyelle /y/, l'augmentation de l'aperture entraîne une augmentation du formant F2 et dans une moindre mesure du formant F3. Une manœuvre articulaire permettant de faire baisser le F3 est une constriction plus en avant de la langue dans la cavité buccale. Cette constriction entraînerait une augmentation de la longueur de la cavité postérieure affiliée au F3 de la voyelle /y/ ainsi qu'une diminution de la cavité antérieure, et donc une augmentation des valeurs des formants affiliées à cette cavité : F2 essentiellement (F1 dans une moindre mesure). C'est ce que nous constatons dans nos données, F3 diminue (pour 3 des 4 locuteurs) et F2 augmente (pour un locuteur) et la distance entre F3 et F2 diminue pour /y/ en position IP.
- c) Cependant, si le renforcement initial entraîne une augmentation des paramètres d'aperture et d'étirement, les variations articulaires sont telles que le contraste entre les voyelles [±arrondi] est

renforcé en position IP. Les variations articulatoires sont donc également contraintes par des exigences phonologiques. En effet, l'augmentation des valeurs moyennes d'aire aux lèvres (paramètre prenant en compte l'étirement et l'aperture) est plus élevée pour les deux catégories en position IP, mais parce que l'augmentation est particulièrement élevée pour les voyelles [-arrondi], le contraste [ $\pm$ arrondi] est renforcé en position IP.

Nous allons à présent montrer qu'il existe des exigences de saillance acoustique qui entraînent un renforcement dans le signal de parole de certaines propriétés acoustiques distinctives :

- a) Tout d'abord, l'examen des résultats montrent une tendance pour les voyelles à se disperser les unes des autres, afin d'être acoustiquement plus distinctes. Les caractéristiques acoustiques affectées par le renforcement initial amènent une distinctivité acoustique plus importante entre les segments. Les voyelles les plus ouvertes /a,  $\epsilon$ ,  $\text{œ}$ ,  $\text{ɔ}$ / se distinguent des autres voyelles en augmentant les valeurs de F1, les voyelles antérieures /e,  $\text{ø}$ ,  $\text{ɛ}$ ,  $\text{œ}$ / s'éloignent des voyelles postérieures en augmentant les valeurs de F2 et les voyelles non-arrondie /i, e,  $\text{ɛ}$ / s'écartent des voyelles arrondies par une augmentation des valeurs de F3. Cette expansion est également observée sur les espaces F1/F2 et F2/F3. Sur le premier plan (F1/F2), les voyelles /u/, /e/, / $\text{ø}$ /, /o/, / $\text{ɛ}$ /, / $\text{ɔ}$ / et /a/ sont plus éloignées du centroïde F1/F2 en position IP qu'en position W. Sur le plan F2/F3, /i/ et /e/ s'éloignent du centroïde.
- b) Outre cette dispersion des voyelles, il existe également un renforcement des propriétés focales des voyelles focales /i/, /y/, /u/, /o/ et / $\text{ɔ}$ /. La distance F2-F1 diminue pour les voyelles postérieures, et la distance F3-F2 diminue pour la voyelle /y/. Ce rapprochement des deux formants renforce les propriétés focales des voyelles. Dans notre étude, si nous ne trouvons pas d'effet significatif de la position prosodique sur les valeurs de F4-F3 pour /i/, l'augmentation de la distance F3-F2 pour cette même voyelle va également dans le sens d'un renforcement des propriétés focales des voyelles. Notre résultat rejoint les travaux de Tabain et Perrier (2005) qui montrent que la différence F4-F3 n'est pas significative sur la voyelle /i/ en position finale de constituant de Groupe intonatif par rapport à des constituants prosodiques moins élevées hiérarchiquement. Les auteurs expliquent que le but acoustique d'un /i/ serait de maintenir une distance plus importante entre les deux formants F2 et F3 « French /i/ is a very peripheral vowel in auditory terms (...) French /i/ must be higher and more forward in order to maximally distinguish it from /y/. » (Tabain & Perrier, 2005 : 23)
- c) Les directions acoustiques prises par les voyelles en position IP correspondent à des variations acoustiques attendues pour des voyelles hyper-articulées, non-réduites. C'est la comparaison de nos résultats avec ceux des études relevant d'une parole décrite comme hyperarticulée qui nous permet de faire cette proposition. La figure 1(a) représente nos données dans un plan F1/F2 tous locuteurs confondus, les traits pleins représentant la position IP, les traits pointillés la position W. Si nous comparons ces données avec la figure 1(b), qui représente la réalisation

formantique dans un plan F1/F2 des voyelles orales du français selon une durée acoustique de plus en plus longue, nous constatons que les variations formantiques sont similaires, particulièrement pour les voyelles antérieures non-arrondies. De la même manière, la réalisation des voyelles issues de la position initiale et finale de constituants prosodiques sur un corpus radiophonique (Gendrot et Gerdes, 2009) (figure 1 (c) et (d)) montre également des variations similaires. Ces résultats montrent bien que toutes les propriétés acoustiques ne sont pas modifiées et qu'en français, les propriétés acoustiques affectées par la position initiale de constituant prosodique IP sont similaires aux propriétés acoustiques des voyelles plus longues non-réduites, où la cible acoustique est pleinement atteinte. Dans notre étude, le renforcement initial entraîne une atteinte des cibles acoustiques mais sans allongement acoustique.



**Figure 77 :** (a) Valeurs moyennes des voyelles orales du français en position IP et W, résultats de notre étude, réalisation des voyelles en position IP (ligne pleine) et réalisation des voyelles en position W (ligne pointillée), croix rouge représente le centroïde F1/F2. (b) valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles orales du français selon leur durée. (en noir : de 30-50 ms, en rouge : de 60 à 80 msec, en bleu de 90 à 110 msec), extrait de Gendrot et Gerdes 2009 (c) Valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles en position initiale de constituants prosodiques (noir pointillé: position interne de mot, noir : position initiale de mot, rouge : Groupe accentuel et bleu : Groupe intonatif), extrait de Gendrot et Gerdes 2009, (d) Valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles en position finale de constituants prosodiques (noir pointillé: position interne de mot, noir : position initiale de mot, rouge : Groupe accentuel et bleu : Groupe intonatif), extrait de Gendrot et Gerdes 2009.

Notre étude montre que les variations gouvernées par le renforcement initial ont un but principalement acoustique et que les manipulations articulatoires mises en place pour atteindre ce but ne sont pas aléatoires ; leurs orientations dépendent de deux buts : 1) celui d'ouvrir la cavité buccale pour augmenter la sonorité de la voyelle et la rendre plus distincte par rapport aux segments voisins 2) de compenser cette ouverture plus importante pour une articulation efficace permettant le renforcement de certaines propriétés distinctives. Ces manœuvres ont pour but de maximiser les contrastes aussi bien syntagmatique que paradigmatique entre les segments. Cette étude montre donc que le renforcement initial renforce le contraste paradigmatique et le contraste syntagmatique dans la chaîne parlée.







# Conclusion

Cette thèse s'inscrit dans le domaine de la prosodie articulatoire. Son but était de mieux comprendre et de mieux définir le phénomène de renforcement initial sur les voyelles orales du français. Le renforcement initial était en effet un phénomène mal connu pour les voyelles, et cette étude a l'intérêt d'apporter des éléments originaux permettant d'enrichir les connaissances sur l'aspect segmental et suprasegmental de la parole. Pour cela, nous avons examiné l'articulation des voyelles orales du français en position strictement initiale de groupe intonatif (#V) comparé à une position médiane de groupe intonatif. L'originalité de notre étude est d'avoir étudié un système vocalique riche opposant 10 voyelles orales selon plusieurs dimensions phonologiques [ $\pm$ arrondi], [ $\pm$ arrière], [ $\pm$ haut], [ $\pm$ bas]. Nous avons pour objectif de répondre aux trois questions suivantes :

- (1) Existe-t-il un effet de la position prosodique (IP vs W) sur les voyelles orales du français ?
- (2) Quelles propriétés acoustiques et articulatoires (au niveau des lèvres et du menton) des voyelles sont affectées en position initiale d'un constituant prosodique important et dans quelles directions vont ces modifications et dans quelles directions vont ces modifications ?
- (3) Quelles sont les conséquences des variations provoquées par le renforcement initial sur le contraste syntagmatique (en renforçant la sonorité de la voyelle) et sur le contraste paradigmatique (en renforçant les propriétés phonétiques contrastives entre voyelles) ?

Tout d'abord, notre étude a montré (1) que plusieurs des paramètres acoustiques (formants, intensité, durée) et articulatoires (étirement, apertures) étaient affectés par le renforcement initial. Il existe donc bien un effet de la position initiale en frontière de constituants prosodiques sur les voyelles orales du français. Ensuite, nous avons montré que (2) l'effet du renforcement initial se réalise par une augmentation de l'aperture, de l'étirement et de l'aire aux lèvres pour l'ensemble des voyelles, que les voyelles soient arrondies (sauf pour la voyelle /œ/, en termes d'aperture) ou non-arrondies. La protrusion, geste essentiel dans le contraste d'arrondissement des voyelles du français n'est pas affecté par le renforcement (sauf pour la voyelle /œ/ qui présente une diminution de protrusion). De même, le renforcement initial n'affecte pas l'abaissement du menton sauf pour deux voyelles (/u/ et /o/). En ce qui concerne les formants, l'effet du renforcement initial dépend de la spécificité de la voyelle et se réalise par des modifications de certains paramètres acoustiques liés aux traits distinctifs de la voyelle. Sur les mesures d'intensité, le renforcement initial affecte la plupart des voyelles. Peu d'effet a été trouvé sur les mesures de durée. (2) Confrontant nos résultats aux hypothèses d'expansion de sonorité (Straka, 1963, Beckman et al, 1992) et de renforcement des traits distinctifs (De Jong 1993, 1995), nous avons montré qu'il existe un renforcement du contraste syntagmatique par l'augmentation de la sonorité des voyelles en termes d'intensité (i.e. augmentation pour 7 voyelles) et par l'augmentation de l'aperture aux lèvres. Et qu'il existe également un renforcement de certains caractéristiques des voyelles : l'augmentation des paramètres articulatoires des voyelles nécessaires

à leur spécification [-arrondie], l'augmentation de F1 pour les voyelles [+bas] /ε, œ, ɔ, a/, l'augmentation de F2 pour les voyelles [-arrière] /e, ε, ø, œ/, la diminution de F2 pour la voyelle [+arrière] pour /o/ et enfin la diminution de F3 pour les voyelles [+arrondi] /y, ø/, et l'augmentation de F3 pour les voyelles [-arrondi] /i, e/. Ces modifications acoustiques et articulatoires ont des conséquences sur la maximisation du contraste paradigmatique entre voyelles. En effet, nous observons également une maximisation du contraste entre paires de voyelles et un élargissement de l'espace acoustique de tout le système. Notre étude montre que cette maximisation du contraste paradigmatique peut se réaliser à la fois par un renforcement de chacune des valeurs du contraste (renforcement phonologique comme proposé par de Jong, [+F] et [-F]), mais également par un renforcement d'une des valeurs du contraste ([+F] ou [-F]).

Compte tenu de ces résultats sur les voyelles orales du français, nous pouvons donc dire que le renforcement initial renforce les contrastes syntagmatique et paradigmatique.

Toutefois, ce travail laisse quelques questions en suspens, auxquelles nous tenterons de répondre dans de futurs projets de recherche :

- Il nous semble important d'observer comment le renforcement initial s'exerce sur un autre articulateur : la langue. Nous avons commencé cette recherche dans une étude récente sur l'effet du renforcement initial sur la hauteur de la langue sur les voyelles antérieures non-arrondies /i, e, ε, a/, voir Georgeton, Kocjancic, Fougeron 2014a et b annexe 2). Dans cette étude, trois des quatre locuteurs sont ceux également présents dans ce travail de thèse. Nous supposons donc qu'elle produise les voyelles antérieures non-arrondies avec une aperture et un étirement aux lèvres plus importants en position IP qu'en position W. Nous avons observé la langue (ultrason) et avons pris comme mesure le point le plus haut de la langue sur le contour de la langue pour estimer le degré de constriction à partir de la hauteur de cette partie de la langue et le lieu d'articulation à partir de la position de ce point dans l'axe antéro-postérieur. Nous avons observé l'effet du renforcement prosodique sur ce point le plus haut (en position IP et W). Les résultats montrent que pour la voyelle /i/, la constriction est plus étroite pour 3 des locuteurs et plus arrière pour le dernier locuteur. Pour les voyelles /e/ et /ε/, la position de la langue est plus haute, plus proche du palais pour quatre locuteurs, et plus antérieure pour deux des quatre locuteurs (/e/) et pour trois des quatre locuteurs pour /ε/. Pour la voyelle /a/, la constriction est plus large en position IP pour 3 des quatre locuteurs et également plus postérieure pour trois des quatre locuteurs.
- Il nous semble également essentiel d'observer les variations de la mâchoire pour les voyelles orales du français, car la mesure d'abaissement du menton n'a été une mesure que partielle des véritables variations mandibulaires.

- Nous souhaitons également mener à bien une étude perceptive pour comprendre si et comment les variations phonétiques observées et la maximisation des contrastes paradigmatic et syntagmatic qui résulte du renforcement initial sont utilisées en perception.



# Bibliographie

- Abercrombie, D. (1967). *Elements of General Phonetics*. Edinburgh University Press. Brief and excellent, without technicalities.
- Abry, C & Boë L-J. (1986). Laws for lips. *Speech Communication*, **5(1)**: 97-104.
- Abry, C. & Boë L-J. (1980). A la recherche de corrélats géométriques discriminants pour l'opposition d'arrondissement vocalique en français. In *Labialité et phonétique: données fondamentales et études expérimentales sur la géométrie et la motricité labiales*. Publications de l'Université des langues et lettres de Grenoble.
- Beckman, M. & J. Edwards (1994). Articulatory evidence for differentiating stress categories. In P. Keating (ed.), *Papers in Laboratory Phonology III: Phonological Structure and Phonetic Form*, Cambridge : Cambridge University Press, 7-33.
- Beckman, M. & J. Edwards (1992). Intonational categories and the articulatory control of duration. In Y. Tohkura, E. Vatikiotis-Bateson & Y. Sagisaka (eds), *Speech Perception Production and Linguistic Structure*,. Tokyo: IOS Press, 359-375.
- Beckman, M. & J. Edwards (1990). Lengthenings and shortenings and the nature of prosodic constituency. In J. Kingston & M. Beckman (eds), *Papers in Laboratory Phonology I: Between the Grammar and the Physics of Speech*, Cambridge: Cambridge University Press, 152-177.
- Beckman, M. & Pierrehumbert, J. (1986). Intonational structure in Japanese and English. *Phonology Yearbook*, **3**, 255-309.
- Beckman, M., Edwards J. & J. Fletcher (1992). Prosodic structure and tempo in a sonority model of articulatory dynamics. In G. Docherty & D. Ladd (eds), *Papers in Laboratory Phonology II: Gesture Segment and Prosody*, Cambridge: Cambridge University Press, 68-86.
- Beddor P. S. (1991). Predicting the structure of phonological systems. *Phonetica* **48** : 83-107.
- Benguereel A.P. & Cowan H.A. (1974). Coarticulation of Upper lip protrusion in French. *Phonetica* **30**, 41-55.
- Benguereel P. (1973). Corrélats physiologiques de l'accent en français, *Phonetica*, **27(1)**, 21-35.
- Boersma, P., & Weenink D. (2009). Praat: doing phonetics by computer (Version 5.1.22) [Computer program]. Retrieved September 15, 2009; from <http://www.praat.org/>.
- Bombien, L., Mooshammer C., Hoole P., Rathcke T., & Kühnert B. (2007). Articulatory strengthening in initial German /kl/ clusters under prosodic variation. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Congress of Phonetic Sciences*, 457-460. Saarbrücken, Germany.
- Bonneau, A., Busset, J., Wrobel-Dautcourt, B. (2009). Contextual effects on protrusion and lip opening for /i,y/. In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> of the International Speech Communication Association*. Brighton, Royaume-Uni.
- Brandao de Carvalho, J., N. Nguyen & S. Wauquier (2010). *Comprendre la phonologie*. Paris : Presses

Universitaires de France.

- Brunot, F. & Bruneau, C. (1937). *Précis de grammaire historique de la langue française*. Paris: Masson.
- Byrd, D. (2000). Articulatory vowel lengthening and coordination at phrasal junctures. *Phonetica*, **57** (1), 3–16.
- Byrd, D. (2002). Commentary: Relating prosody and dynamic action units. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Laboratory Phonology*. New Haven, Connecticut.
- Byrd, D., Kaun, A., Narayanan, S. & Saltzman, E. (1996). Phrasal signatures in articulation. In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Laboratory of Phonology*, Evanston, USA.
- Byrd, D., Saltzman, E. (1998). Intra-gestural dynamics of multiple phrasal boundaries. *Journal of Phonetics*, **26**: 173–199.
- Carré, R. (2002). Emergence des systèmes phonologiques, *Langages* **146**, 70-79.
- Cho, T. (2006). Manifestation of Prosodic Structure in Articulation: Evidence from Lip Kinematics in English. In *Laboratory Phonology 8*. (Berlin/New York: Mouton de Gruyter), 519-548.
- Cho, T. (2001). *Effects of Prosody on Articulation in English*. UCLA Dissertation in linguistics. University of California.
- Cho T. (2005). Prosodic strengthening and featural enhancement: Evidence from acoustic and articulatory realizations of /a, i/ in English. *Journal of Acoustical Society of America*, **11:6**, 3867-3878.
- Cho, T. (1998). Domain-initial strengthening in the prosodic hierarchy: an EPG study. In *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Korean Linguistics (ICKL 11)*, University of Hawaii at Manoa.
- Cho, T., & Jun, S.-A. (2000). Domain-initial strengthening as featural enhancement: Aerodynamic evidence from Korean. *Chicago Linguistics Society*, **36**, 31–44 (Also appeared in *UCLA Working Papers in Phonetics*, **99**, 57–70).
- Cho, T., & Keating, P. A. (2001). Articulatory and acoustic studies on domain-initial strengthening in Korean. *Journal of Phonetics*, **29(2)**, 155–190.
- Cho, T., & Keating P. (1999). Articulatory and acoustic studies of domain-initial strengthening in Korean. *UCLA Working Papers in Phonetics*, **97**, 100-138.
- Cho, T., & McQueen J. (2005). Prosodic influences on consonant production in Dutch: Effects of prosodic boundaries, phrasal accent and lexical stress. *Journal of Phonetics*, **33(2)** 121-157.
- Chomsky, N. & M. Halle (1968). *The Sound Pattern of English*. New York : Harper & Row.
- Clements, G. N. (1988). Toward a substantive theory of feature specification. In *Proceedings of NELS 18(1)*, 79-89.
- Cole, J., Kim, H., Choi, H. and Hasegawa-Johnson, M. 2007. Prosodic effects on acoustic cues to stop voicing and place of articulation : Evidence from Radio News speech. *Journal of Phonetics* **35**, 180-209.
- De Jong, K. J. (1995). The supraglottal articulation of prominence in English: Linguistic stress as localized hyperarticulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, **97(1)**, 491–504.
- De Jong, K., Beckman, M. & J. Edwards (1993). The interplay between prosodic structure and coarticulation. *Language and Speech*, **36(2-3)**, 197-212.

- Delais-Roussarie, E. (1995). *Pour une approche parallèle de la structure prosodique*. Thèse de doctorat, U. Toulouse-le Mirail.
- Delattre, P. (1966). Les dix intonations de base du français. *The French Review*, **40(1)**, 1-14.
- Dell, F. (1985). *Les règles et les sons : Introduction à la phonologie générative*. Paris : Hermann.
- Di Cristo, A. & D. Hirst (1996). Vers une typologie des unités intonatives du français. In *Actes des 21<sup>è</sup> Journées d'Etude sur la Parole*, Avignon, 219-222.
- Di Cristo, A. & D. Hirst (1993). Rythme syllabique, rythme mélodique et représentation hiérarchique de la prosodie du français. *Travaux de l'Institut de Phonétique d'Aix*, 15, 9-24.
- Disner S. F. (1983). Vowel quality : the relation between universal and language-specific factors. *UCLA Working Papers in Phonetics*. **58**.
- Dohen M. (2005). *Deixis prosodique multisensorielle: production et perception audiovisuelle de focalisation contrastive en français*. Thèse de l'Institut National de Polytechnique, Grenoble.
- Dohen M., Loevenbruck H. & Hill H. (2009). Recognizing prosody from the lips: is it possible to extract prosodic focus from lip features? In Alan Wee-Chung Liew & Shilin Wang (Eds.), *Visual Speech Recognition: Lip Segmentation and Mapping*, Medical Information Science Reference, Hershey, New York.
- Dohen, M., Loevenbruck, H., Hill, H. (2006). Visual correlates of prosodic contrastive focus in French: Description and inter-speaker variabilities. In *Proceedings of Speech Prosody 2006*, Dresden, Germany, 221-224.
- Durand M. (1930). *Etude sur les phonèmes postérieurs dans une articulation parisienne*, Petite collection de l'institut de phonétique et du musée de la parole et du geste, H. Didier.
- Edwards, J. & Beckman, M. (1988). Articulatory timing and the prosodic interpretation of syllable duration. *Phonetica*, **45**, 156-174.
- Edwards, J., Beckman, M. & J. Fletcher (1991). The articulation kinematics of final lengthening. *Journal of the Acoustical Society of America*, **89(1)**, 369-382.
- Engstrand, O. (1988). Articulatory correlates of stress and speaking rate in Swedish VCV utterances. *Journal of the Acoustical Society of America*, **83(5)**, 1863-1875.
- Erickson D. & Fujimura O. (1996). Maximum jaw displacement in contrastive emphasis, In *Proceedings of ICSLP 1996*, Philadelphie, USA, **1**, 141-144.
- Erickson D. & Honda K. (1996). Jaw displacement and F0 in contrastive emphasis, *Journal of the Acoustical Society of America*, **99(4)**, p. 2494.
- Erickson D. & Lehiste I. (1995). Contrastive emphasis in elicited dialogue: durational compensation, In *Proceedings of International Congress of Phonetic Sciences 1995*, Stockholm, Suède, **4**, 352-355.
- Erickson D., Lenzo K. & Fujimura O. (1994). Manifestations of contrastive emphasis in jaw movement, *Journal of the Acoustical Society of America*, **95(5)**, 2822.

- Erickson D., Maekawa K., Hashi M. & Dang J. (2000). Some articulatory and acoustic changes associated with emphasis in spoken English, *In Proceedings of ICSLP 2000*, Pékin, Chine, **3**, 247-250.
- Fant, G. (1960). *Acoustic Theory of Speech Production*. The Hague, Mouton.
- Farnetani, E. & Vayra. M. (1996). The role of prosody in the shaping of articulation in Italian CV syllables. *Proceedings of the 1st ESCA Workshop on Speech Production Modeling, 4th Speech Production Seminar*, 9-12. Autrans, France.
- Fletcher, J., Beckman, M. & J. Harrington (1996). Accentual-prominence-enhancing strategies in Australian English. *Proceeding of the 6th Australian International Conference on Speech Science and Technology*, Adelaide, 577-580.
- Fougeron, C. (2001). Articulatory properties of initial segments in several prosodic constituents in French. *Journal of Phonetics*, **29**, 109–135.
- Fougeron, C. (1998). *Variations articulatoires en début de constituants prosodiques de différents niveaux en français*. Thèse de doctorat de phonétique, Université Paris 3.
- Fougeron, C. & Jun S.-A. (1998). Rate effects on French Intonation: Phonetic Realization and Prosodic Organization. *Journal of Phonetics* **26**, 45-70.
- Fougeron, C., & Keating, P.A. (1997). Articulatory strengthening at edges of prosodic domains. *Journal of the Acoustical Society of America*, **101(6)**, 3728–3740.
- Fougeron, C. & Keating, P.A. (1995) Demarcating prosodic groups with articulation. , *Journal of the Acoustical Society of America*, **97**, 3384.
- Fromkin V. (1964). Lip positions in American English vowels. *Language and Speech*, **7(3)**, 215-225.
- Fujimura, O. (1961) Bilabial stop and nasal consonants: a motion picture study and its acoustical implications. *J.S.H.R.*, **4**, 233-247.
- Gendrot, C. & Gerdes, K. (2009). Prosodic hierarchy and spectral realization of vowels in French. In : Yoo, H-Y & Delais-Roussarie, E. (eds), *In Actes IDP 2009*, Paris, Septembre 2009, 191-205.
- Georgeton, L. & Audibert N. (2014). Mesures de protrusion par capture optique de mouvements : quelle métrique est la plus représentative de l'opposition d'arrondissement en français ? *In Actes des 30ièmes Journées d'Etudes sur la Parole*, Le Mans, France.
- Georgeton, L. & Audibert, N. (2012). Variations de la configuration labiale des voyelles /i, y, a/: effets de la position prosodique et du locuteur. *In Actes des 19ièmes Journées d'Etude sur la Parole*, Grenoble, France.
- Georgeton L., Audibert N., & Fougeron C. (2011). Rounding and height contrasts at the beginning of different prosodic constituents in French. *In Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of Phonetic sciences (739-742)*, Hong-Kong, China.
- Georgeton L. & Fougeron C. (2014). Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: evidence from lip articulation and spectral variation. *Dynamics of Articulation and Prosodic Structure. Journal of phonetics*, **44**, 83-95.



- Georgeton L., Kocjančič Antolík T. & Fougeron C (2014a). Acoustic and lingual variation within the 4-way contrast of vowel height in French. *The 14th conference on Laboratory Phonology*, Tokyo, Japan.
- Georgeton L., Kocjančič Antolík T. & Fougeron C (2014b). Domain initial strengthening and height contrast in French: acoustic and ultrasound data. *In 10th International Seminar on Speech Production*, Cologne, Germany.
- Giot J. (1977). Etude comparative de syllabes accentuées et prétoniques du français sur les plans articulatoire et acoustique. *Travaux de l'Institut de Phonétique. de Strasbourg*, **9**, 89-169.
- Gussenhoven, C. & Rietveld A. (1992). Intonation contours, prosodic structure and preboundary lengthening. *Journal of Phonetics* **20**, 283-303.
- Harrington, J., Fletcher J. & M. Beckman (2000). Manner and place conflicts in the articulation of accent in Australian English. In M. B. Broe & J. B. Pierrehumbert (eds), *Papers in Laboratory Phonology V: Aquisition and the Lexicon*, Cambridge: Cambridge University Press, 40-51.
- Harrington, J., Fletcher, J. & C. Roberts (1995). Coarticulation and the accented/unaccented distinction: evidence from jaw movement data. *Journal of Phonetics*, **23**, 305-322.
- Hayes, B. (1989). The prosodic Hierarchy in meter. In P. Kiparsky & G. Youmans (eds.) *Phonetics and Phonology, vol. I: Rythm and meter*, 47-96. New York: Academic Press.
- Hirst, D. & Di Cristo, A. (1996) Y-a-t-il des unités tonales en français ?, *In Actes des XXIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Avignon, 223-226.
- Hirst, D., & Di Cristo, A. (1984). French intonation: A parametric approach. *Die Neuren Sprach*, **83(5)**, 554–569.
- Hsu, C-S. & S-A. Jun (1997). Prosodic strengthening in Taiwanese: syntagmatic or paradigmatic? *UCLA Phonetics Laboratory Group: manuscript*.
- Jackson, M. T. T. (1988). Phonetic theory and cross\_linguistic variations in vowel articulation. *UCLA Working Papers Phonetics*. **71**.
- Jakobson, R. & M. Halle (1956). *Fundamentals of Language*. The Hague : Mouton.
- Jakobson, R., G. Fant & M. Halle (1952). *Preliminaries to Speech Analysis*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Jones, D. (1918), *An Outline of English Phonetics*, Leipzig: Teubner.
- Jun S-A, & Fougeron, C. 2002. Realizations of Accentual Phrase in French Intonation, *Probus* **14**, 147-172.
- Jun, S.-A. & C. Fougeron (2000). A phonological model of French intonation. In A. Botinis (ed.) *Intonation: Models and Technology*, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 209-242.
- Jun, S.-A. & Fougeron C. (1995). The accentual phrase and prosodic structure of French. *In Proceedings of the 13th International Congress of Phonetic Sciences*, Stockholm, **2**, 722-725.
- Keating, P.A., Cho, T., Fougeron, C., & Hsu, C. (2003). Domain-initial strengthening in four languages. In J. Local, R. Ogden, & R. Temple (Eds.), *Laboratory phonology IV: Phonetic interpretation* (145–163). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Keating, P. A. (1984). Phonetic and phonological representation of stop consonant voicing. *Language*, **60**, 286–319.
- Kelso, J., Vatikiotis-Bateson, E., Saltzman, E. & B. Kay (1985). A qualitative dynamic analysis of reiterant speech production: phase portraits, kinematics, and modeling. *Journal of Acoustical Society of America*, **77**, 266-280.
- Keyser, S. J. and Stevens, K.N. (2006). Enhancement and overlap in the speech chain. *Language* **82(1)**, 33-63.
- Kim, S. & Cho T. (2012). Prosodic strengthening in the articulation of English /æ/. *Studies in Phonetics, Phonology and Morphology*, **18(2)**, 321-337.
- Kim, S. & Cho T. (2011) Articulatory manifestation of prosodic strengthening in English /i/ and /I/. *Journal of the Korean Society of Speech Sciences, Phonetics and Speech Sciences*, **3(4)**, 13-21.
- Kingston J. (1991). Integrating Articulations in the Perception of Vowel height. *Phonetica* **48**, 149-179.
- Kingston, J., & Diehl, R. L. (1994). Phonetic knowledge. *Language*, **70**, 419–454.
- Kuzla, C., & Ernestus, M. (2011). Prosodic conditioning of phonetic detail in German plosives. *Journal of Phonetics*, **39**, 143-155
- Kuzla, C., Cho, T., & Ernestus, M. (2007). Prosodic strengthening of German fricatives in duration and assimilatory devoicing. *Journal of Phonetics*, **35**, 301–320.
- Ladd, D. R. (1996). *Intonational Phonology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ladefoged, P. (1980). What are linguistic sounds made of? *Language* **56**, 485-502.
- Ladefoged P., (1963), Some physiological parameters in speech, *Language and Speech*, **6**, 109-119.
- Ladefoged P. (1979). Articulatory parameters. Status report. In *Proceedings International Congress of Phonetic Science*, Copenhagen, Danmark, 41-47.
- Ladefoged, P. (1993). *A course in phonetics*. Harcourt Brace Jovanovich. New-York. (ré-édition 1975)
- Ladefoged, P., Harshman R. & DeClerk J. (1972). The control of the tongue in vowels. In *Proceedings of the 7th International Congress of Phonetic Sciences*, ed. A. Rigault & R. Charbonneau, 349-354. The Hague: Mouton.
- Lauret. B. (1998). *Aspect de Phonétique Expérimentale Contrastive : l'accent anglo-américain en français*. Thèse de doctorat de phonétique, Université de la Sorbonne Nouvelle.
- Lavoie, L. (2001) *Consonant strength: Phonological patterns and phonetic manifestations*, New York: Garland.
- Lehnert-LeHouillier H., McDonough J. & McAleavey S. (2010). Prosodic Strengthening in American English Domain-initial vowels. In *Proceedings of Speech Prosody*, Chicago.
- Lieberman, M. & Prince, A. (1977). On stress and linguistic rhythm. *Linguistic Inquiry*, **8**, 249-336.
- Lindau, M. (1978). Vowels features. *Language* **54**, 541-563.
- Lindau, M. (1975). Features for vowels. *UCLA Working Papers Phonetics*. **30**.
- Lindblom, B. (1990). Explaining phonetic variation : a sketch of the H&H theory. In W. J. Hardcastle & A. Marchal (eds), *Speech Production and Speech Modelling*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 403-

- Lindblom B. (1983). Economy of speech gestures, in *The production of speech*, P. F. MacNeilage, New York, Springer-Verlag, 217-246.
- Lindblom, B. (1968). Studies of labial articulation, *Z. Phonetik Sprachwiss. Kommunikationforsch*, **21**, 171-172.
- Lindblom, B. (1965) Analysis of labial movement, *QPSR RIT*, **2**, 20-22.
- Lindblom, B. & Sundberg, J. (1971): Acoustical consequences of lip, tongue, jaw and larynx movement. *Journal of the Acoustical of Society of America*, **50**, 1166–1179
- Linker, W. (1982). Articulatory and acoustic correlated of labial activity in vowels : a cross-linguistic study. *UCLA Working Papers Phonetics*, **56**.
- Loevenbruck, H. (2000). Effects articulatoires de l'emphase contrastive sur la Phrase Accentuelle en français. In *Actes des 23è Journées d'Etude sur la Parole*, Aussois, 165-168.
- Loevenbruck, H. (1999). An investigation of articulatory correlates of the accentual phrase in French. In *Proceedings of 14th Congress of Phonetic Sciences*, San Francisco, 667-670.
- Macchi, M. (1985) *Segmental and suprasegmental features and lip and jaw articulators*. PhD dissertation, New York U.
- Maeda S. and Carré R. (1996). Modèles de production. In *Fondements et perspectives en reconnaissance automatique de la parole*, 51-72.
- Maeda, S., (1990) Compensatory articulation during speech: evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model, in W. J. Hardcastle and A. Marchal (ed.). *Speech Production and Speech Modelling*, 1990, Dordrecht: Kluwer Academic: 131-149.
- Maeda, S. (1979). Un modèle de la langue avec des composantes linéaires. In *Actes 10ièmes Journées d'Etude sur la Parole*, Lannion, France, 152-162.
- Maeda, S. (1978). Une analyse statistique sur les positions de la langue : Etude préliminaire sur les voyelles françaises. In *actes des 9ièmes Journées d'Etude sur la Parole*, pages 191-199, Lannion, France.
- Martinet, A. (1955). *Economie des changements phonétiques : traité de phonologie diachronique*. Berne: Francke SA.
- Ménard L., Leclerc A., Tiede M., Prémont A., Turgeon C., Trudeau-Fisette P. & Côté D. (2013). Correlates of contrastive focus in congenitally blind adults and sighted adults. In *Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Lyon, France.
- Ménard L., Lœvenbruck H. & Savariaux C. (2006). Articulatory and acoustic correlates of contrastive focus in French : a developmental study, in Harrington, J. & Tabain, M. (eds), *Speech Production : Models, Phonetic Processes and Techniques*, Psychology Press : New York, 227-251.
- Mertens, P. (1993). Intonational grouping, boundaries and syntactic structure in French. In *Proceedings of the ESCA Workshop on Prosody, Lund Working Papers*, **41**, 155-159.

- Mertens, P. (1987). *L'intonation du français, de la description linguistique à la reconnaissance automatique*. Thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain.
- Meynadier, Yohann (2003). *Interaction entre prosodie et (co)articulation linguopalatale en français*. Thèse de Doctorat en Phonétique : Université Aix-Marseille I.
- Nespor, M. & Vogel, I. (1986). *Prosodic Phonology*. Dordrecht: Foris Publications
- Onaka, A. (2003). Domain-initial strengthening in Japanese: An acoustic and articulatory study. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> international congress of phonetic sciences*. Barcelona, Spain, 2091–2094.
- Onaka, A., Palethorpe, S., Watson, C., Harrington, J., (2003). An acoustic and articulatory analysis of domain-initial strengthening in Japanese. In *the 6th International Seminar on Speech Production* (Coltheart, M, Croot, K, Fletcher, J., Harrington, J., Mendes, S, Palethorpe, S. and Tabain M, editors). Macquarie Centre for Cognitive Science: Sydney.
- Peterson, G. E. & Barney H. L. (1952). Control methods used in a study of vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, **24**, 175-184.
- Post, B. (1993) *A Phonological Analysis of French Intonation*, MA thesis, U. Nijmegen.
- Potard, B. & Laprie Y. (2005) Using phonetic constraints in acoustic-to-articulatory inversion. *Proceedings of Interspeech, 9th European Conference on Speech Communication and Technology*, 3217- 3220.
- Qualisys : motion capture <http://www.qualisys.com/>
- Rietveld, T. & P. van Lieshout (1995). Articulation and accentuation: preliminary results. *Proceedings of the Department of Language and Speech of University of Nijmegen*, 19, 99-104.
- Rousselot P. J., 1897-1908, *Principes de phonétique expérimentale*, Seconde édition en 1924, Paris.
- Saltzman, E. & K. G. Munhall (1989). A dynamical approach to gestural patterning in speech production. *Ecological Psychology*, 1, 333-382.
- Schwartz, J.-L., Boë, L.-J., Vallée, N. & Abry, C. (1997). The dispersion-Focalization theory of vowel systems. *Journal of Phonetics*, **25(3)**, 255-286.
- Selkirk, E. (1980) : Prosodic Domains in Phonology: Sanskrit Revisited, in Mark Aronoff and Mary-Louise Kean (eds.), *Juncture*, Anma Libri, Saratoga, CA.
- Selkirk, E. (1984) : *Phonology and Syntax. The Relation Between Sound and Structure*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Selkirk, E. (1986) On derived domains in sentence phonology. *Phonology Yearbook*, 3:371-405.
- Shattuck-Huffnagel, S. & Turk, A.E. (1996). A prosody tutorial for investigators of auditory sentence processing. *Journal of Psycholinguistic Research*, **25(2)**, 193-247.
- Silverman, K. and J. Pierrehumbert (1990) The Timing of Prenuclear High Accents in English, *Papers in Laboratory Phonology I*, Cambridge University Press, Cambridge UK. 72-106.
- Steriade, D. (1987). Redundant values. In A. Bosch, B. Need & E. Schiller (eds.), *Papers from the 23rd Annual Regional Meeting of the Chicago Linguistic Society*. Part Two : Parasession on Autosegmental and Metrical Phonology., 339–362. Chicago : Chicago Linguistic Society.

- Steriade, D. (1995). Underspecification and markedness. In J. A. Goldsmith (ed.), *The Handbook of Phonological Theory*, 114–174. Oxford : Blackwell
- Stevens, K., & Keyser, J. (2010). Quantal theory, enhancement and overlap. *Journal of Phonetics*, **38**, 10-19.
- Stevens, K. N. & Keyser, S. J. (1989). Primary features and their enhancement in consonants. *Language*, **65**, 81–106.
- Stevens, S., Keyser, S.J., & Kawasaki H. (1986). Toward a phonetic and phonological theory of redundant features. *Invariance and variability in speech processes*, ed. by Joseph S. Perkell and Dennis H. Klatt, 429-49. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Straka, G. (1963). La division des sons du langage entre voyelles et consonnes peut-elle être justifiée ? *Travaux de Linguistique et de Littérature de Strasbourg*, **1**, 17-99.
- Straka, G. (1964). L'évolution phonétique du latin au français sous l'effet de l'énergie et de la faiblesse articulaires. *Travaux de Linguistique et de Littérature de Strasbourg*, **2**, 17-98.
- Summers, van W. (1987). Effects of stress and final-consonant voicing on vowel production: articulatory and acoustic analyses. *Journal of the Acoustical Society of America*, **82**(3), 847-863.
- Tabain, M., & Perrier, P. (2007). An articulatory and acoustic study of /u/ pre-boundary position in French: the interaction of compensatory articulation, neutralization avoidance and featural enhancement. *Journal of Phonetics* **35**, 135-161.
- Tabain, M. & Perrier, P. (2005). Articulation and acoustics of /i/ in pre-boundary position in French. *Journal of Phonetics* **33**, 77-100.
- Tabain, M. (2003a). Effects of prosodic boundary on /aC/ sequences: articulatory results. *Journal of the Acoustical Society of America*, **113**, 2834-2849.
- Tabain, M. (2003b). Effects of prosodic boundary on /aC/ sequences: acoustic results. *Journal of the Acoustical Society of America*, **113**, 516-531.
- Tubach, J.-P. (1989). *La parole et son traitement automatique*, Calliope. Masson, Paris.
- Umeda, N. (1978). Occurrence of glottal stops in fluent speech. *Journal of the Acoustical Society of America*, **64**, 81-94.
- Vaissière J. (2011). On the acoustic and perceptual characterization of reference vowels in a cross-language perspective. In *Proceedings of the 17<sup>th</sup> international congress of phonetic sciences*. (52–59). Hong-Kong, China.
- Vaissière, J., (2009). Articulatory modeling and the definition of acoustic-perceptual targets for reference vowels, *The Chinese Phonetics Journal*, **2**, 22-33.
- Vaissière, J. (2008). On acoustic salience of vowels and consonants predicted from articulatory models, Keynote paper, *In the 8th Phonetic Conference of China and the International Symposium on Phonetic frontiers*, Pékin, Chine, 18<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>.
- Vaissière, J., (1999). Utilisation de la prosodie dans les systèmes automatiques : un problème d'intégration des différentes composantes, *Faits de Langues, Oral écrit: Formes et théories*, Ophys, 9-16.

- Vaissière, J. (1996). From Latin to modern French: on diachronic changes and synchronic variations. *Arbeitsberichte, U. Kiel*, **31**, 61-74.
- Vaissière, J. (1988). Prediction of velum movement from phonological specifications. *Phonetica*, **45**, 122-139.
- Vallée, N. (1994). *Systèmes vocaliques : de la typologie aux prédictions*, Thèse de Doctorat en Sciences du Langage, Université Stendhal, Grenoble.
- Van Lieshout, P., Starweaker C. W., Hulstijn W., & Peters H.F.M. (1995). Effects of linguistic correlates of stuttering on Emg activities in nonstuttering speakers. *JSHR*, **38**, 360-372
- Vatikiotis-Bateson, E. & J. Kelso (1993). Rhythm type and articulation dynamics in English, French and Japanese. *Journal of Phonetics*, **21**, 231-265.
- Westbury J. R. & Fujimura Osamu, (1989). An articulatory characterization of contrastive emphasis in correcting answers, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **85**, S98.
- Wightman, C. W., Shattuck-Hufnagel, S., Ostendorf, M., Price, P.J. (1992). Segmental durations in the vicinity of prosodic phrase boundaries. *Journal of the Acoustical Society of America*, **91** (3), 1707-1717
- Zerling, J.-P. (1990). *Aspects articulatoires de la labialité vocalique en français. Contribution à la modélisation à partir de labio-photographies, labiofilms et films radiologiques. Etude statique, dynamique et contrastive*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg II.
- Zink, G. (1986). *Phonétique historique du français*. Paris: Presses Universitaires de France.

# Annexes

## Annexe 1 : Composition segmentale du corpus

IP : Pour le roi Philippe, Ipicaz et Larsen se battent comme des dieux.

W : Dalida et Lippe-Ipicaz sortent un tube d'enfer.

GA : Oupoulo, Philippe, Ipicaz et David sont comme ses frères.

IP : Avec Jean-Philippe, Epéli et Daniel marchaient dans la forêt.

W : Jean-Marie et Lippe-Epéli s'entendaient vraiment bien.

GA : Dalida, Philippe, Epéli et Paulo n'aimaient pas leurs prénoms.

IP : Pour le roi Philippe, Eve-Marie et Martin se battent comme des dieux.

W : Dalida et Lippe-Eve-Marie sont deux sopranos en vogue.

GA : A chaque fois, Philippe, Eve-Marie et Jean-Charles cherchent la solution.

IP : Après Jean-Philippe, Apala et Paulo se sont rencontrés.

W : Tommy-Lee et Rippe-Apala sont deux super bassistes.

GA : Tommy, Philippe, Apala et Paulo sont toujours ensemble.

IP : Avec Saint Philippe, Upulé et Jo attaquèrent les géants.

W : Dalida et Deep-Upulé sortent un duo terrible.

GA : Ses amis, Philippe, Upulé et Dani sont comme ses frères.

IP : D'après Philippe, Eupidine et Marie ont beaucoup voyagé.

W : Dalida et Lippe-Eupidine sortent un tube d'enfer.

GA : Oupoulo, Philippe, Eupidine et David sont comme ses frères.

IP : D'après Philippe, Cefali et Jean-Charles s'entendent vraiment bien.

W : Dalida et Rippe-Cefali dansent tous les soirs.

GA : Dalida, Philippe, Cefali et Paulo aiment jouer ensemble.

IP : D'après Philippe, Oupoulo et Marie ont beaucoup dansé.

W : Pétros, Philippe, Oupoulo et Gillou sont toujours ensemble.

GA : Tommy-Lee et Deep-Oupoulo sont deux grands pianistes.

IP : Face à Philippe, Opalie et Jeanne ne faisaient pas le poids.

W : Marie-Lou et Fippe-Opalie sont deux petites sorcières.

GA : Eva, Philippe, Opalie et Tommy n'aimaient pas leurs prénoms.

IP : D'après Philippe, Orgeat et Camille sont deux petites pestes.

W : Sheila et Deep-Orgeat sortent un tube chaque été.

GA : Marie, Philippe, Orgeat et Daniel sont leurs quatre enfants.

## Annexe 2 : Résultats statistiques

Effet de la position prosodique (IP vs W) sur les paramètres articulatoires (aire, étirement, aperture, K2, protrusion et abaissement du menton) et sur les paramètres acoustiques F1, F2, F3, F4 (pour /i/), F2-F1, F3-F2, distance aux centroïdes F1/F2 et F2/F3, durée, intensité pour chaque locuteur.

S1	aire	étirement	aperture	K2	S1	protrusion	menton
<b>voy /i/</b>					<b>voy /i/</b>		
<b>F(1,32)</b>	69.53 **	53.07 **	20.4 **	0.1011 ns	<b>F(1,32)</b>	0.001 ns	2.893 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy/e/</b>					<b>voy/e/</b>		
<b>F(1,30)</b>	19.66 **	25.9 **	1.529 0.226	2.4509 ns	<b>F(1,28)</b>	0.221 ns	2.261 ns
	IP > W	IP > W					
<b>voy /ε/</b>					<b>voy /ε/</b>		
<b>F(1,32)</b>	5.858 *	3.129 ns	5.817 *	0.4948 ns	<b>F(1,27)</b>	0.514 ns	1.651 ns
	IP > W		IP > W				
<b>voy /a/</b>					<b>voy /a/</b>		
<b>F(1,28)</b>	74.26 **	117.7 **	53.74 **	10.587 **	<b>F(1,26)</b>	1.33 ns	2.815 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy /y/</b>					<b>voy /y/</b>		
<b>F(1,31)</b>	25.94 **	0.847 ns	16.37 0**	5.6972 *	<b>F(1,28)</b>	0.288 ns	2.001 ns
	IP > W		IP > W				
<b>voy /ø/</b>					<b>voy /ø/</b>		
<b>F(1,34)</b>	5.831 *	10.53 **	0.382 0.54	1.8649 ns	<b>F(1,34)</b>	0.351 ns	0.1 ns
	IP > W	IP > W					



<b>S1</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>	<b>S1</b>	<b>protrusion</b>	<b>menton</b>
<b>voy /œ/</b>					<b>voy /œ/</b>		
<b>F(1,39)</b>	0.402 ns	6.345 *	4.845 *	17.365 **	<b>F(1,31)</b>	3.353 ns	0.032 ns
		IP > W	IP > W				
<b>voy /u/</b>					<b>voy /u/</b>		
<b>F(1,36)</b>	19.32 **	8.908 **	17.08 **	3.3864 ns	<b>F(1,33)</b>	5.852 *	1.596 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy /o/</b>					<b>voy /o/</b>		
<b>F(1,34)</b>	11.36 **	3.904 ns	6.807 *	2.0774 ns	<b>F(1,32)</b>	1.613 ns	0.043 ns
	IP > W		IP > W				
<b>voy /ɔ/</b>					<b>voy /ɔ/</b>		
<b>F(1,28)</b>	0.457 ns	2.188 ns	12.54 **	17.140 **	<b>F(1,26)</b>	1.021 ns	1.082 ns
			IP > W				

<b>S2</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>	<b>S2</b>	<b>protrusion</b>	<b>menton</b>
<b>voy /i/</b>				<b>voy /i/</b>			
<b>F(1,27)</b>	219.1 1**	35.73 **	237.9 **	32.917 **	<b>F(1,27)</b>	0.032 ns	0.089 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy/e/</b>				<b>voy/e/</b>			
<b>F(1,27)</b>	119 **	205 3**	31.14 **	3.523 ns	<b>F(1,26)</b>	1.357 ns	0.02 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy /ɛ/</b>				<b>voy /ɛ/</b>			
<b>F(1,24)</b>	42.72 **	37.79 **	14.23 **	0.685 ns	<b>F(1,24)</b>	0.097 ns	1.689 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy /a/</b>				<b>voy /a/</b>			
<b>F(1,28)</b>	506.1 **	56.3 **	169 2**	89.428 **	<b>F(1,28)</b>	0.002 ns	4.878 *
	IP > W	IP > W	IP > W				IP>W
<b>voy /y/</b>				<b>voy /y/</b>			
<b>F(1,28)</b>	26.88 **	12.21 **	19.2 **	3.3724 ns	<b>F(1,28)</b>	0.293 ns	5.859 *
	IP > W	IP > W	IP > W				IP>W

<b>S2</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>	<b>S2</b>	<b>protrusion</b>	<b>menton</b>
<b>voy /ø/</b>					<b>voy /ø/</b>		
<b>F(1,22)</b>	11.04 ** IP > W	5.183 * IP > W	0.451 ns	0.939 ns	<b>F(1,20)</b>	0.471 ns	1.176 ns
<b>voy /œ/</b>					<b>voy /œ/</b>		
<b>F(1,27)</b>	13.83 ** IP > W	17.88 ** IP > W	0.079 ns	6.3018 *	<b>F(1,26)</b>	0.421 ns	0.998 ns
<b>voy /u/</b>					<b>voy /u/</b>		
<b>F(1,33)</b>	6.792 * IP > W	6.579 * IP > W	3.346 ns	0.5413 ns	<b>F(1,30)</b>	0.039 ns	1.293 ns
<b>voy /o/</b>					<b>voy /o/</b>		
<b>F(1,30)</b>	51.7 ** IP > W	3.738 nd	28.27 ** IP > W	13.605 **	<b>F(1,29)</b>	0.039 ns	5.338 * IP < W
<b>voy /ɔ/</b>					<b>voy /ɔ/</b>		
<b>F(1,27)</b>	67.57 ** IP > W	24.03 ** IP > W	37.17 ** IP > W	2.8697 ns	<b>F(1,26)</b>	0.169 ns	0.472 ns

<b>S3</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>	<b>S3</b>	<b>protrusion</b>	<b>menton</b>
<b>voy /i/</b>					<b>voy /i/</b>		
<b>F(1,23)</b>	202.1 ** IP > W	128.3 ** IP > W	80 ** IP > W	6.1363 *	<b>F(1,21)</b>	0.004 ns	0.158 ns
<b>voy /e/</b>					<b>voy /e/</b>		
<b>F(1,24)</b>	238.4 ** IP > W	145.7 ** IP > W	32.67 ** IP > W	0.1781 ns	<b>F(1,24)</b>	0.946 ns	1.332 ns
<b>voy /ε/</b>					<b>voy /ε/</b>		
<b>F(1,21)</b>	27.93 ** IP > W	18.91 ** IP > W	16.7 ** IP > W	2.675 ns	<b>F(1,19)</b>	0.712 ns	0.143 ns
<b>voy /a/</b>					<b>voy /a/</b>		
<b>F(1,23)</b>	55.8 ** IP > W	41.1 ** IP > W	18.98 ** IP > W	0.001 ns	<b>F(1,22)</b>	0.458 ns	0.269 ns
<b>voy /y/</b>					<b>voy /y/</b>		
<b>F(1,24)</b>	5.637 * IP < W	2.342 ns	0.893 ns	0.3036 ns	<b>F(1,28)</b>	0.351 ns	0.816 ns

<b>S3</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>	<b>S3</b>	<b>protrusion</b>	<b>menton</b>
<b>voy /ø/</b>					<b>voy /ø/</b>		
<b>F(1,22)</b>	0.146 ns	0.076 ns	0.119 ns	0.22 ns	<b>F(1,20)</b>	0.121 ns	1.444 ns
<b>voy /œ/</b>					<b>voy /œ/</b>		
<b>F(1,25)</b>	23.34 **	38.31 **	9.388 **	0.2409 ns	<b>F(1,26)</b>	0.557 ns	0.002 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				
<b>voy /u/</b>					<b>voy /u/</b>		
<b>F(1,24)</b>	7.05 *	3.925 ns	2.086 ns	0.6288 ns	<b>F(1,30)</b>	0.152 ns	4.239 ns
	IP < W						
<b>voy /o/</b>					<b>voy /o/</b>		
<b>F(1,29)</b>	5.195 *	0.344 ns	10.25 **	13.342 **	<b>F(1,29)</b>	0.634 ns	7.3 *
	IP > W		IP > W				IP > W
<b>voy /ɔ/</b>					<b>voy /ɔ/</b>		
<b>F(1,28)</b>	38.04 **	12.24 **	27.9 **	3.6605 ns	<b>F(1,26)</b>	2.251 ns	0.912 ns
	IP > W	IP > W	IP > W				

<b>S4</b>				
<b>voy /i/</b>	<b>aire</b>	<b>étirement</b>	<b>aperture</b>	<b>K2</b>
<b>F(1,21)</b>	61.9 ** IP > W	80.08 ** IP > W	22.36 ** IP > W	3.4371 ns
<b>voy/e/</b>				
<b>F(1,23)</b>	173.3 ** IP > W	20.07 ** IP > W	19.81 ** IP > W	0.5443 ns
<b>voy /ε/</b>				
<b>F(1,24)</b>	12.74 ** IP > W	21.68 ** IP > W	7.49 * IP > W	0.0682 ns
<b>voy /a/</b>				
<b>F(1,20)</b>	115.5 ** IP > W	65.32 ** IP > W	37.86 ** IP > W	0.4838 ns
<b>voy /y/</b>				
<b>F(1,25)</b>	11.93 ** IP > W	0.787 ns	2.088 ns	2.0624 ns

<b>voy /ø/</b>				
<b>F(1,21)</b>	71.82 **	4.809 *	41.25 **	17.663 **
	IP > W	IP > W	IP > W	
<b>voy /œ/</b>				
<b>F(1,21)</b>	12.51 **	6.398 *	3.191 ns	0.2598 ns
	IP > W	IP > W		
<b>voy /u/</b>				
<b>F(1,21)</b>	0.353 ns	1.054 ns	4.124 ns	3.2795 ns
<b>voy /o/</b>				
<b>F(1,16)</b>	8.436 *	7.933 *	9.452 **	6.6592 *
	IP > W	IP > W	IP > W	
<b>voy /ɔ/</b>				
<b>F(1,29)</b>	57.57 **	26.51 **	27.88 **	1.0876 ns
	IP > W	IP > W	IP > W	

**Tableau 100 : Résultats statistiques sur les paramètres d'aire, d'étirement, d'aperture, K2 (étirement/aperture), protrusion, abaissement du menton de l'effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W, locuteur par locuteur et voyelle par voyelle. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**

S1	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
voy /i/										
F(1,32)	0.1652 ns	2.21 ns	29.727 **	23.718 **	0.6974 ns	0.389 ns	2.222 ns	22.876 **		60.91**
			IP > W					IP > W		IP > W
voy/e/										
F(1,30)	0.4323 ns	12.114 **	79.006 **		0.005 ns	1.474 ns	12.03 **	41.066 **		
		IP > W	IP > W				IP > W	IP > W		
voy /ɛ/										
F(1,32)	2.621 ns	9.4638 **	5.947 *		0.6275 ns	7.469 *	10.39 **	5.5833 *		
		IP > W	IP > W			IP < W	IP > W	IP > W		
voy /a/										
F(1,28)	96.12 **	0.526 ns	1.474 ns		12.007 **	7.224 *	59.15 **	0.5214 ns		
	IP > W					IP < W	IP > W			
voy /y/										
F(1,31)	9.4 **	12.33 **	6.574 *		2.7288 ns	0.761 ns	12.78 **	2.9202 ns		21.72**
	IP > W	IP > W	IP < W				IP > W			IP > W



<b>S1</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>intensité</b>	<b>Durée</b>	<b>centr_F1F2</b>	<b>centr_F2F3</b>	<b>F2-F1</b>	<b>F2-F3</b>
voy /ø/										
F(1,34)	1.156 ns	45.01 **	14.49 **		0.1724 ns	2.601 ns	7.229 *	81.72 **		
		IP > W	IP > W				IP > W			
voy /œ/										
F(1,39)	25.82 **	62.8 **	19.62 **		0.8848 ns	6.478 *	36.83 **	74.758 **		
	IP > W	IP > W	IP > W			IP > W	IP < W	IP < W		
voy /u/										
F(1,36)	23.54 **	1.077 ns	41.34 **		37.708 **	3.788 ns	0.55 ns	1.3655 ns	5.103*	
	IP > W		IP < W						IP < W	
voy /o/										
F(1,34)	6.767 *	1.31 ns	2.719 ns		2.7397 ns	4.513 *	1.382 ns	1.3589 ns	0 ns	
	IP > W					IP > W				
voy /ɔ/										
F(1,28)	14.35 **	2.583 ns	2.83 ns		7.4665 *	0.201 ns	6.538 *	2.6299 ns	2.039 ns	
	IP > W						IP > W			

S2	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
<b>voy /i/</b>										
<b>F(1,27)</b>	2.656 ns	0.0132 ns	6.609 *	3.9144 ns	0.004 ns	0.122 ns	0.004 ns	4.4808 *		3.45 ns
			IP > W							
<b>voy/e/</b>										
<b>F(1,27)</b>	0.271 ns	4.347 *	13.99 **		0.1001 ns	3.087 ns	4.336 *	6.5157 *		
		IP > W	IP > W				IP > W	IP > W		
<b>voy /ɛ/</b>										
<b>F(1,24)</b>	2.211 ns	3.779 ns	1.422 ns		0.01 ns	21.6 **	3.805 ns	0.7259 ns		
						IP < W				
<b>voy /a/</b>										
<b>F(1,28)</b>	49.45 **	0.644 ns	19.69 **		6.0992 *	16.07 **	0.003 ns	1.1708 ns		
	IP > W		IP > W			IP < W				
<b>voy /y/</b>										
<b>F(1,28)</b>	1.969 ns	0.659 ns	0.011 ns		5.3233 *	1.577 ns	0.755 ns	0.0765 ns		0.433 ns

S2	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
<b>voy /ø/</b>										
<b>F(1,22)</b>	3.468 ns	0.299 ns	0.858 ns		4.0613 ns	5.171 *	0.008 ns	1.2182 ns		
						IP < W				
<b>voy /œ/</b>										
<b>F(1,27)</b>	4.731 *	2.225 ns	0.01 ns		3.7138 ns	4.167 ns	1.779 ns	1.6052 ns		
	IP > W									
<b>voy /u/</b>										
<b>F(1,33)</b>	0.237 ns	1.765 ns	0.359 ns		2.3718 ns	0 ns	1.74 ns	1.8413 ns	1.836 ns	
<b>voy /o/</b>										
<b>F(1,30)</b>	0.838 ns	4.212 *	0.538 ns		27.717***	0.014 ns	4.442 *	3.956 ns	1.391 ns	
		IP < W					IP > W			
<b>voy /ɔ/</b>										
<b>F(1,27)</b>	3.084 ns	1.163 ns	1.129 ns		4.6092 *	24.03 **	1.554 ns	1.1713 ns	3.402 ns	
						IP < W				

<b>S3</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>intensité</b>	<b>Durée</b>	<b>centr_F1F2</b>	<b>centr_F2F3</b>	<b>F2-F1</b>	<b>F3-F2</b>
<b>voy /i/</b>										
<b>F(1,23)</b>	2.572 ns	9.8107 **	0.7359 ns	1.2675 ns	5.0156 *	0.691 ns	9.469 **	0.7126 ns		14.4 **
		IP < W					IP < W			IP > W
<b>voy /e/</b>										
<b>F(1,24)</b>	14.09 **	1.866 ns	16.94 **		17.778 **	0.01 ns	1.915 ns	4.1964 ns		
	IP < W		IP > W							
<b>voy /ɛ/</b>										
<b>F(1,21)</b>	1.591 ns	18.55 **	3.779 ns		5.7571 *	7.271 *	20.21 **	4.6712 *		
		IP > W				IP < W	IP > W	IP < W		
<b>voy /a/</b>										
<b>F(1,23)</b>	8.524 **	4.871 *	34.96 **		1.0234 ns	44.43 **	10.17 **	0.2821 ns		
	IP > W	IP < W				IP < W	IP > W			
<b>voy /y/</b>										
<b>F(1,23)</b>	1.678 ns	1.295 ns	4.878 *		5.8898 *	1.117 ns	1.146 ns	5.5855 *		3.32 *
			IP < W					IP < W		IP < W

S3	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
<b>voy /ø/</b>										
<b>F(1,22)</b>	0.056 ns	0.104 ns	4.028 ns		2.215 ns	1.136 ns	0.726 ns	2.7513 ns		
<b>voy /œ/</b>										
<b>F(1,25)</b>	56.09 **	21.85 **	6.703 *		10.732 **	8.4 **	0.499 ns	24.235 **		
	IP > W	IP > W	IP > W			IP > W		IP < W		
<b>voy /u/</b>										
<b>F(1,24)</b>	4.9067 *	0.5753 ns	1.794 ns		1.3434 ns	0.356 ns	0.26 ns	0.01 ns	1.47 ns	
	IP > W									
<b>voy /o/</b>										
<b>F(1,29)</b>	1.199 ns	1.238 ns	19.79 **		2.9129 ns	0.587 ns	1.199 ns	0.0905 ns	0.538 ns	
			IP > W							
<b>voy /ɔ/</b>										
<b>F(1,28)</b>	3.031 ns	1.727 ns	6.805 *		0.001 ns	4.193 ns	2.491 ns	0.5544 ns	6.813 *	
			IP > W						IP < W	

S4	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
<b>voy /i/</b>										
<b>F(1,21)</b>	2.743 ns	0.046 ns	5.614 *	9.5707 **	13.779 **	0.077 ns	0.016 ns	4.4728 *		14.79 **
			IP > W							IP > W
<b>voy/e/</b>										
<b>F(1,23)</b>	5.072 *	74.38 **	23.91 **		5.8907 *	6.034 *	74.01 **	71.478 **		
	IP > W	IP > W	IP > W			IP > W	IP > W	IP > W		
<b>voy /ɛ/</b>										
<b>F(1,24)</b>	13.34 **	22.39 **	1.172 ns		9.0812 **	2.581 ns	23.12 **	2.9553 ns		
	IP > W	IP > W					IP > W			
<b>voy /a/</b>										
<b>F(1,20)</b>	286.8 **	3.085 ns	18.06 **		19.187 **	13.94 **	137.6 **	11.092 **		
	IP > W		IP < W			IP < W	IP > W	IP > W		
<b>voy /y/</b>										
<b>F(1,21)</b>	5.071 *	0.85 ns	27.64 **		22.555 **	13.53 **	0.693 ns	0.0825 ns		17,87 **
	IP < W		IP < W			IP > W				IP < W

S4	F1	F2	F3	F4	intensité	Durée	centr_F1F2	centr_F2F3	F2-F1	F3-F2
<b>voy /ø/</b>										
<b>F(1,21)</b>	4.982 *	16.37 **	1.744 ns		5.7699 *	19.99 **	10.81 **	5.417 *		
	IP > W	IP > W				IP > W	IP > W	IP > W		
<b>voy /œ/</b>										
<b>F(1,21)</b>	9.805 **	0.86 ns	13.45 **		22.604 **	8.328 **	4.177 ns	0.0026 ns		
	IP > W		IP < W			IP > W				
<b>voy /u/</b>										
<b>F(1,21)</b>	3.852 ns	4.57 *	16.62 **		24.221 **	40.72 **	4.455 *	1.0783 ns	0.4 ns	
		IP < W	IP < W			IP > W	IP > W			
<b>voy /o/</b>										
<b>F(1,14)</b>	1.155 ns	17.86 **	28.19 **		0.1273 ns	1.44 ns	17.82 **	19.495 **	15.64 **	
		IP < W	IP < W				IP > W	IP > W	IP < W	
<b>voy /ɔ/</b>										
<b>F(1,23)</b>	97.2 **	0.472 ns	14.46 **		25.477 **	0.641 ns	2.119 ns	0.3759 ns	25.5 **	
	IP > W		IP < W						IP < W	

**Tableau 101 : Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3, F4, intensité, durée, centroïde F1/F2 et centroïde F2/F3 de l'effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W, locuteur par locuteur et voyelle par voyelle. Niveaux de significativité : \*\* : p<.001, \* : p<.05 et ns : non significatif.**





### **Annexe 3 : Statistiques modèles mixtes**

Dans cette partie, nous avons voulu répondre à notre question d'étude (existe-t-il un effet de la position prosodique sur les paramètres acoustiques et articulatoires des voyelles orales du français ?) en confrontant nos données à un test statistique différent de l'ANOVA simple : les modèles mixtes (voir 4.4 pour la motivation de ce choix). Nous rappelons que le nombre réduit de répétitions dans nos données ainsi que le nombre restreint de locuteurs nous empêche de mener une étude locuteur par locuteur et voyelle par voyelle, comme nous avons pu le faire dans le chapitre 7 de ce travail. L'étude statistique en utilisant les modèles mixtes se limite donc à une étude tous locuteurs confondus.

Pour répondre à notre question d'étude, nous avons testé

- a) l'effet de la position prosodique sur les paramètres acoustiques (F1, F2, F3, durée, intensité) et les paramètres articulatoires (étirement, apertures et aire aux lèvres) des voyelles orales du français
- b) l'interaction entre la position prosodique et les phonèmes étudiés.

Les résultats des tests sont présentés en considérant d'abord les paramètres acoustiques (F1, F2, F3, durée et intensité) et ensuite les paramètres articulatoires (étirement, apertures, aire aux lèvres et K2). De plus, nous soulignons le fait que pour les modèles mixtes, la question du calcul des degrés de liberté pour ces modèles est encore sujette à controverse dans la littérature. Dans ce travail, les p-values sont calculées par un test « likelihood ratio tests » pour lequel une valeur de  $\chi^2$  est donnée. Des p-values ont également été calculées par simulation numérique selon la procédure de Kenward-Roger (valeur ajoutée entre parenthèses KRmodcomp), qui est une procédure plus stricte que la première utilisée.

Une comparaison des résultats statistiques obtenus par les modèles mixtes et par une ANOVA simple est proposée en conclusion.

#### **Paramètres acoustiques**

##### **F1**

##### **Effet de la position prosodique sur les valeurs de F1 des voyelles orales du français**

- a) **Oui**, la position prosodique affecte les variations de F1 sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

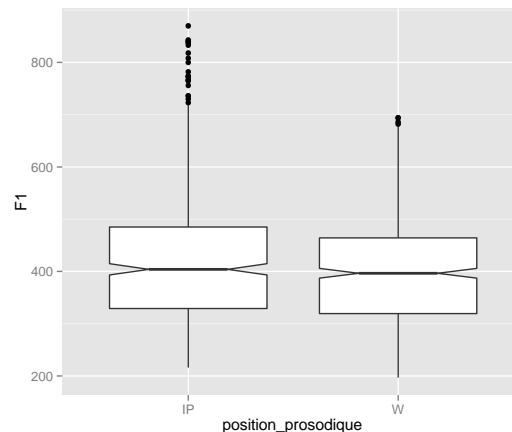
modelF1.zero: F1 ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF1: F1 ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique affecte les variations de F1 en effet :

$\chi^2(1) = 5,77, p = 0,016^* (p = 0,029^* \text{ avec KRmodcomp})$
--

D'après ce test statistique, les valeurs de F1 en position W sont inférieures à  $21,17 \text{ Hz} \pm 8,7$  (standard errors) des valeurs de F1 en position IP, comme le montre la Figure 78).



**Figure 78 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs de F1 des voyelles orales du français**

b) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F1

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

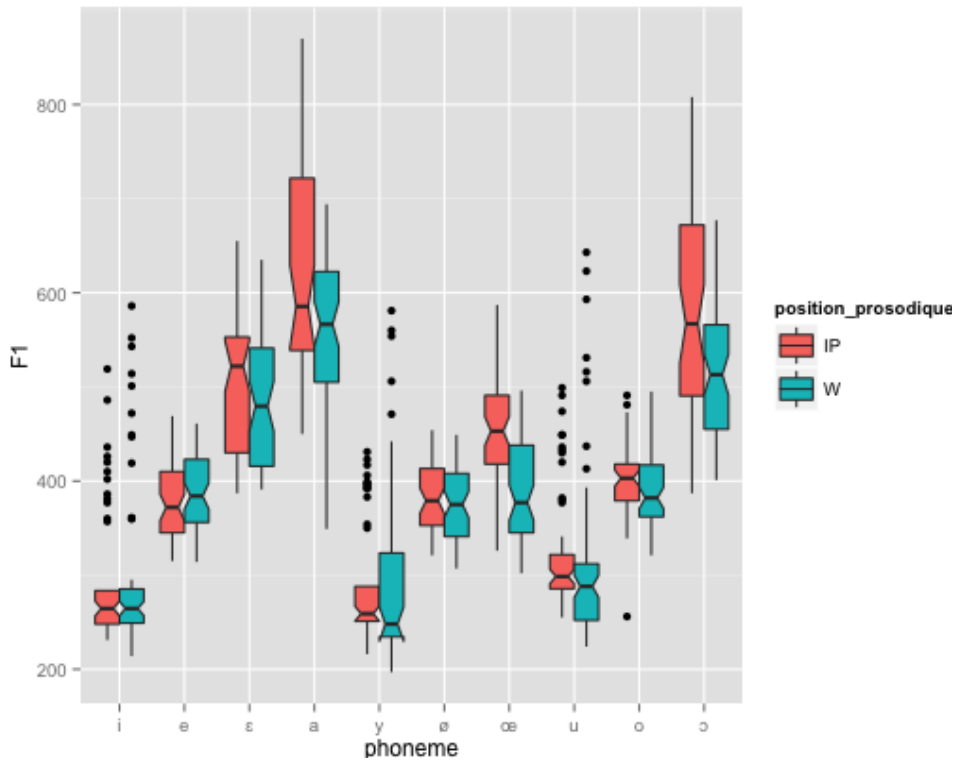
modelF1.inter:  $F1 \sim \text{phoneme} * \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

modelF1:  $F1 \sim \text{phoneme} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F1 en effet

$$\chi^2 (9) = 15,82, p = 0,07 \quad (p = 0,2 \text{ avec KRmodcomp})$$

Cependant, l'observation de la Figure 79 suggère des différences entre la position IP et la position W pour les voyelles ouvertes /a/, /ɛ/, /œ/, /ɔ/ (tous locuteurs confondus).



**Figure 79 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour chaque voyelle étudiée (/i/, /e/, /ε/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/), tous locuteurs confondus (S1, S2, S3, S4), en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

Par conséquent, nous avons divisé l'ensemble des voyelles orales étudiées en deux groupes : un groupe 'ouvert' (/a/, /ε/, /œ/, /ɔ/) et un groupe 'autre' (/i/, /e/, /y/, /ø/, /u/, /o/), et nous avons testé l'effet de la position prosodique sur le facteur nommé 'semio' qui est composé des deux groupes cités.

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de F1 des groupes 'ouvert' (/a/, /ε/, /œ/, /ɔ/) vs 'autre' (/i/, /e/, /y/, /ø/, /u/, /o/).**

- a) **Non**, la position prosodique n'affecte les variations de F1 sur le facteur 'semio' (2 niveaux : groupe 'ouvert' et 'fermé')

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

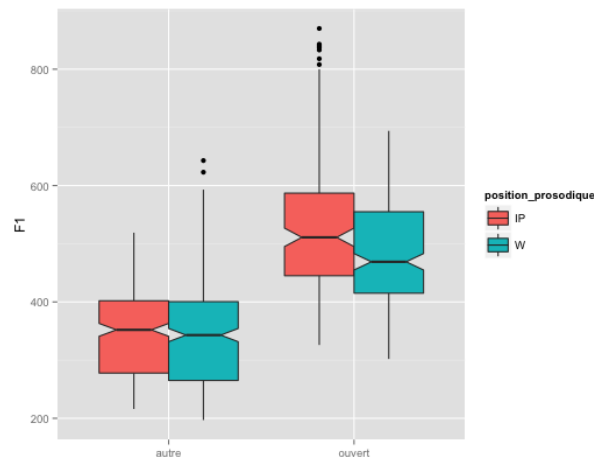
modelF1.semio.zero:  $F1 \sim \text{phoneme} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

modelF1.semio:  $F1 \sim \text{phoneme} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas d'effet de la position prosodique sur les valeurs de F1 en effet :

$\chi^2(1) = 2, p = 0,16 \text{ (} p = 0,18 \text{ avec KRmodcomp)}$

L'observation de la Figure 80 pouvait cependant présager un effet.



**Figure 80 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour le groupe de voyelles « ouvert » (/a/, /ɛ/, /œ/, /ɔ/) et le groupe de voyelles « autre » (/i/, /e/, /y/, /ø/, /u/, /o/), tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).**

**Interaction entre la position prosodique et les groupes 'ouvert' (/a/, /ɛ/, /œ/, /ɔ/) et 'autre' (/i/, /e/, /y/, /ø/, /u/, /o/).**

- a) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et les groupes 'ouvert' et 'autre' sur les valeurs de F1

Nous avons testé les modèles suivants :

modelF1.semio: F1 ~ semio + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF1.semio.inter: F1 ~ semio \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F1 en effet :

$$\chi^2(1) = 15,82, p = 0,06 \text{ (} p = 0,07 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**F2**

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de F2 des voyelles orales du français**

- a) **Non**, la position prosodique n'affecte pas les variations de F2 sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

ModelF2.zero: F2 ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF2: F2 ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n'affecte pas les variations de F2 en effet :

$$\chi^2(1) = 1,2, p = 0,3 \text{ (} p = 0,3 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs de F2 des voyelles orales du français**

- a) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F2

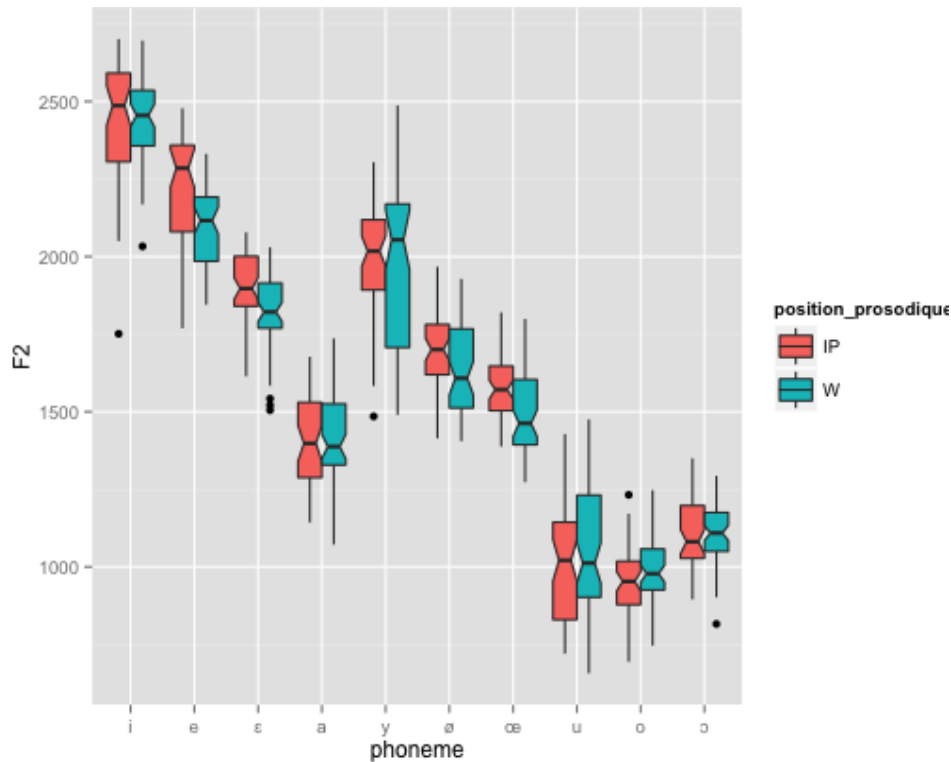
Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelF2.post: F2 ~ post + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF2.post.inter: F2 ~ post \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F2 en effet

$$\chi^2(9) = 7,9, p = 0,5 \quad (p = 0,7 \text{ avec KRmodcomp})$$



**Figure 81 : Représentations des valeurs de F2 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour chaque voyelle, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

L'observation des variations de F2 sur la Figure 81 montre que les valeurs de F2 augmentent pour les voyelles antérieures en IP (voir les variations de F2 pour les voyelles /i/, /e/, /ε/, /y/, /ø/, /œ/ par exemple) et les valeurs de F2 diminuent pour voyelles postérieures en IP (voir les variations de F2 pour les voyelles /u/, /o/, /ɔ/).

Nous avons regroupé les voyelles postérieures entre elles et les voyelles antérieures entre elles et nous avons testé l'interaction entre la position prosodique et le facteur « antériorité/postériorité » qui comprend 2 niveaux : les « voyelles antérieures » (/i/, /e/, /ε/, /y/, /ø/, /œ/) et les « voyelles postérieures » (/u/, /o/, /ɔ/).

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de F2 des groupes 'antérieur' (/i/, /e/, /ε/, /y/, /ø/, /œ/) vs 'autre' (/u/, /o/, /ɔ/).**

- a) **Non**, la position prosodique n'affecte pas les variations de F2 sur les groupes 'antérieur' vs 'postérieur'

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelF2.post.zero:  $F2 \sim \text{post} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

modelF2.post:  $F2 \sim \text{post} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n'affecte pas les variations de F2 en effet :

$$\chi^2(1) = 0,13, p=0,7 \text{ (} p=0,7 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Interaction entre la position prosodique et les groupes ‘antérieur’ (/i/, /e/, /ɛ/, /y/, /ø/, /œ/) vs ‘autre’ (/u/, /o/, /ɔ/) sur les valeurs de F2.**

- b) **Non**, il n’y a pas d’interaction entre la position prosodique et les groupes ‘antérieur’ et ‘postérieur’ sur les valeurs de F2

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

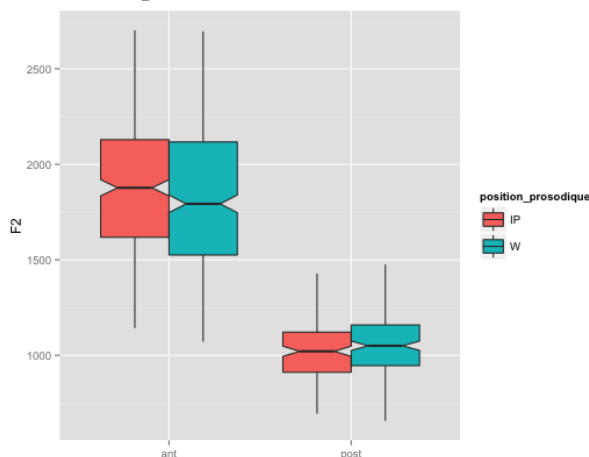
modelF2.post: F2 ~ post + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF2.post.inter: F2 ~ post \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent qu’il n’existe aucune interaction entre les deux facteurs pour les valeurs de F2 en effet :

$$\chi^2(1) = 0,4, p=0,5 \text{ (} p=0,6 \text{ avec KRmodcomp)},$$

Cependant, les résultats observés sur la Figure 82 pouvaient présager un effet de la position prosodique et une interaction, car les valeurs de F2 tendent à être plus élevées pour les voyelles antérieures et moins élevées pour les voyelles postérieures en position IP.



**Figure 82 : Représentations des valeurs de F2 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l’étendue des données, pour les catégories voyelles antérieures (ant) et voyelles postérieures (post) tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

**F3**

On sait que le formant F3 permet de distinguer les voyelles antérieures arrondies des non-arrondies. Nous avons donc testé l’effet de la position prosodique sur les voyelles antérieures (/i/, /e/, /ɛ/, /y/, /ø/, /œ/). Nous avons retiré la voyelle /a/ de l’échantillon car elle n’a pas de contrepartie arrondie.

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de F3 des voyelles antérieures du français**

- a) **Non**, la position prosodique n’affecte pas les variations de F3 sur les voyelles antérieures

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

large : F3 ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

small : F3 ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n’affecte pas les variations de F3 sur les phonèmes en effet

$$\chi^2 (1) = 1, p = 0,3 \text{ (} p = 0,4 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs de F3 des voyelles antérieures**

- b) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et les voyelles antérieures sur les valeurs de F3

Nous avons testé les 2 modèles ci-dessous :

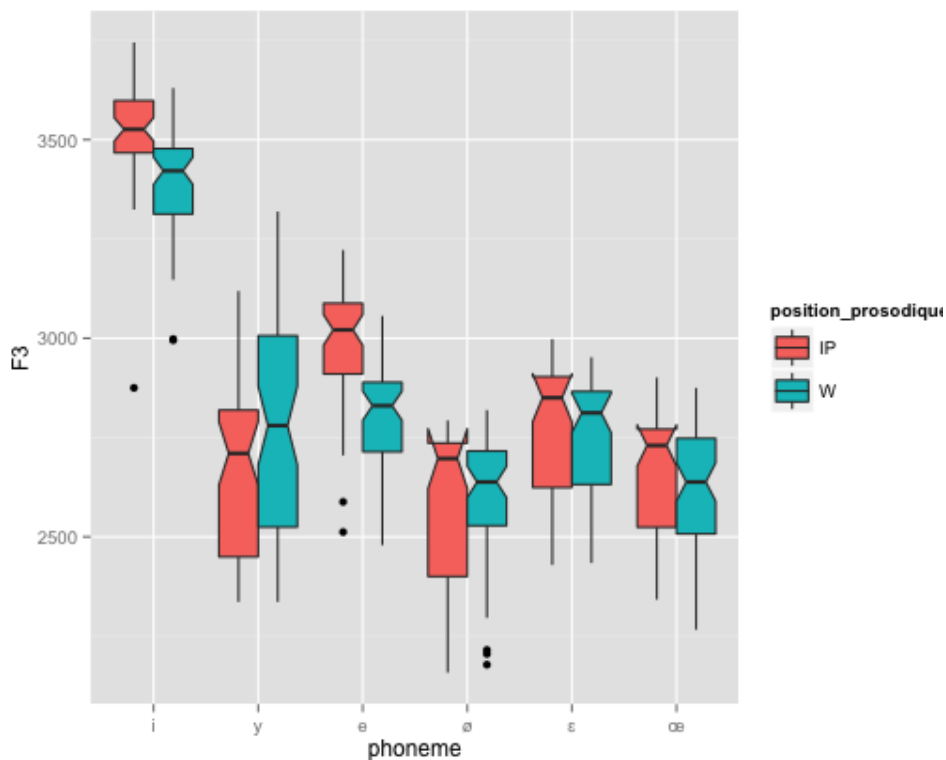
modelF3: F3 ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF3.inter: F3 ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent qu'il n'existe pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F3 en effet

$$\chi^2 (1) = (5) = 7, p = 0,2 \text{ (} p = 0,4 \text{ avec KRmodcomp)}$$

Cependant, l'observation de la Figure 83 montre que la position prosodique influence la réalisation des voyelles antérieures en termes de F3, particulièrement la paire /i-y/. En effet, pour la voyelle /i/ les valeurs de F3 augmentent alors qu'elles diminuent pour la voyelle /y/. La position prosodique influence donc différemment les valeurs de F3 suivant l'arrondissement de la voyelle étudiée (arrondie vs non-arrondie). Nous allons donc tester l'interaction entre la position prosodique et l'arrondissement des voyelles antérieures (deux niveaux « arrondies » (/y/, /ø/, /œ/) et « non-arrondies » (/i/, /e/, /ɛ/)).



**Figure 83 : Représentations des valeurs de F3 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour les voyelles antérieures (excepté /a/) tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de F3 des groupes ‘non-arrondi’ (/i/, /e/, /ɛ/) vs ‘arrondi’ (/y/, /ø/, /œ/)**

- a) **Non**, la position prosodique n’affecte pas les variations de F3 sur les groupes ‘arrondi’ vs ‘non-arrondi’

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelF2.post.zero: F2 ~ post + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF2.post: F2 ~ post + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent qu’il n’existe pas d’effet de la position prosodique sur la catégorie arrondie vs non-arrondie sur les valeurs de F3 en effet

$$\chi^2 (1) = 0,3, p = 0,6 \text{ (} p = 0,6 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Interaction entre la position prosodique et les groupes ‘non-arrondi’ (/i/, /e/, /ɛ/) vs ‘arrondi’ (/y/, /ø/, /œ/) sur les valeurs de F3.**

- a) **Non**, il n’y a pas d’interaction entre la position prosodique et les groupes ‘non-arrondi’ et ‘arrondi’ sur les valeurs de F3

Nous avons comparé les deux modèles suivants :

modelF3.unrdd: F3 ~ unrdd + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelF3.unrdd.inter: F3 ~ unrdd \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent qu’il n’existe pas d’interaction entre la position prosodique et la catégorie arrondie vs non-arrondie sur les valeurs de F3 en effet

$$\chi^2 (1) = 1, p = 0,3 \text{ (} p = 0,3 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Durée**

**Effet de la position prosodique sur les valeurs de durée des voyelles orales du français**

- a) **Non**, la position prosodique n’affecte pas les variations de durée des voyelles orales du français.

Pour cela, nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelduration.zero: duration ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelduration: duration ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n’affecte pas les variations de durée avec

$$\chi^2 (1) = 0,7, p = 0,4 \text{ (} p = 0,5 \text{ avec KRmodcomp)}$$

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs de durée des voyelles orales du français**

- b) **Oui**, il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de durée

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelduration: duration ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelduration.inter: duration ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent qu’il existe bien une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de durée en effet

$$\chi^2 (9) = 35,7, p = 0,001^{**} \text{ (} p = 0,001 \text{ avec KRmodcomp)}$$



L'observation de la Figure 84 montre en effet que la position prosodique affecte le phonème soit par un allongement (/u/, /o/, /y/, /œ/, par exemple) soit par une réduction (/ɛ/, /ø/ et /ɔ/ par exemple).

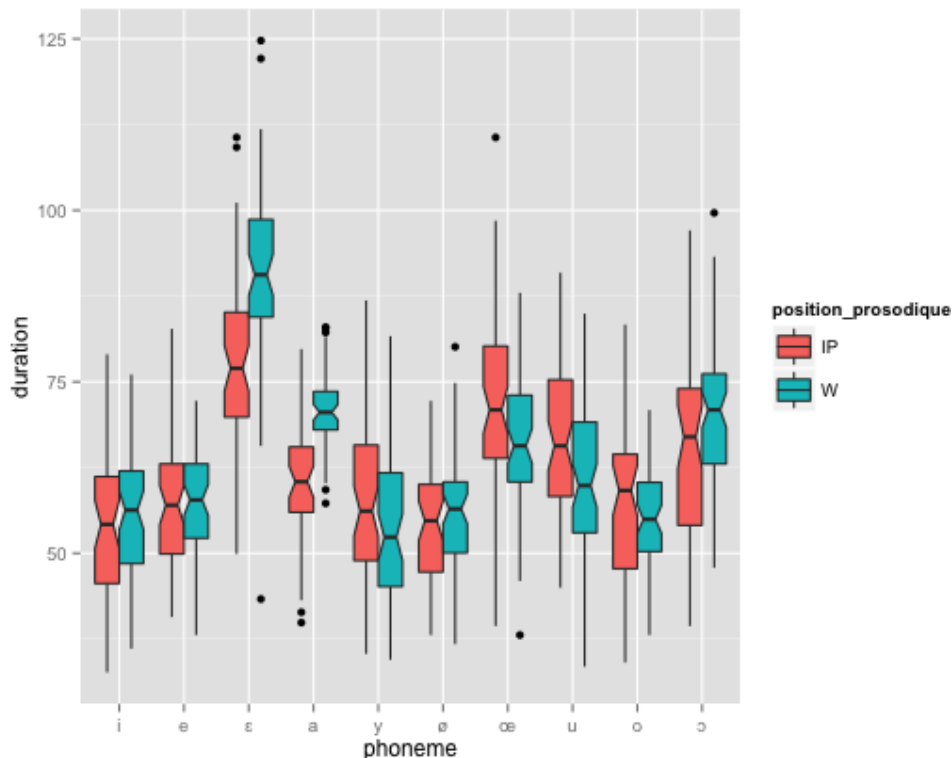


Figure 84 : Représentations des valeurs de durée selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)

## Intensité

### Effet de la position prosodique sur les valeurs d'intensité des voyelles orales du français

- a) **Oui**, la position prosodique n'affecte pas les variations d'intensité des voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelintensite.zero: intensite ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelintensite: intensite ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique affecte les variations d'intensité des voyelles orales du français en effet

$$\chi^2 (1) = 6,2, p = 0,01 (p = 0,02 \text{ avec KRmodcomp})$$

### Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs d'intensité des voyelles orales du français

- a) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'intensité des voyelles orales du français

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelintensite: intensite ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelintensite.inter: intensite ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que l'interaction n'est pas significative entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'intensité en effet

$\chi^2 (9) = 10,8, p = 0,3$  ( $p = 0,5$  avec KRmodcomp).

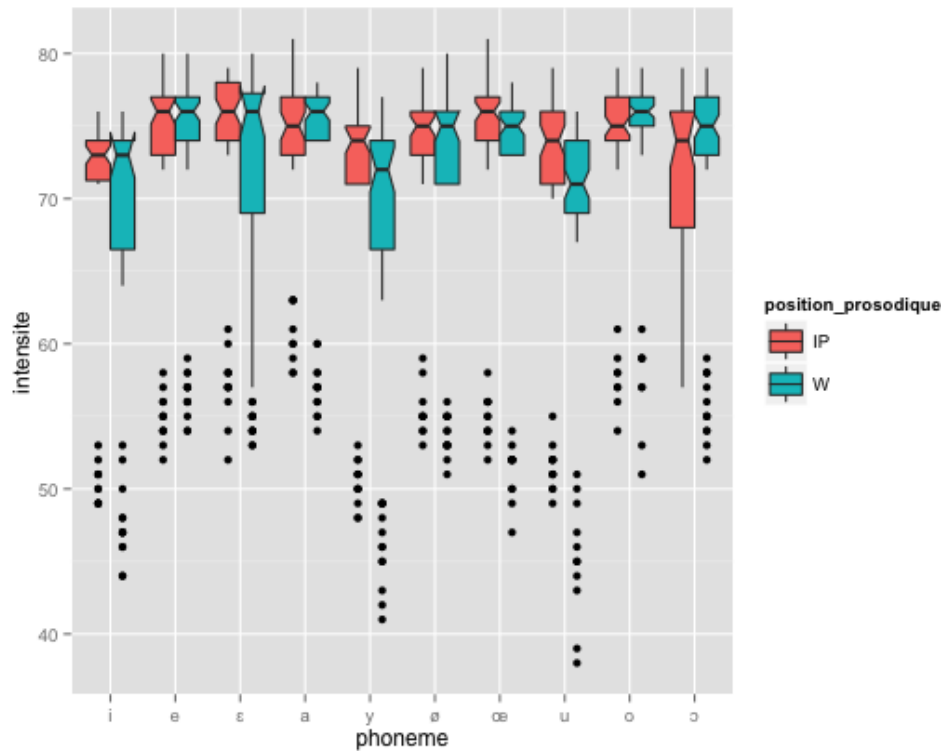


Figure 85 : Représentations des valeurs d'intensité selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)

### Paramètres articulatoires

#### Aperture aux lèvres

#### Effet de la position prosodique sur les valeurs d'aperture aux lèvres des voyelles orales du français

- a) **Oui**, la position prosodique affecte les variations d'aperture aux lèvres sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

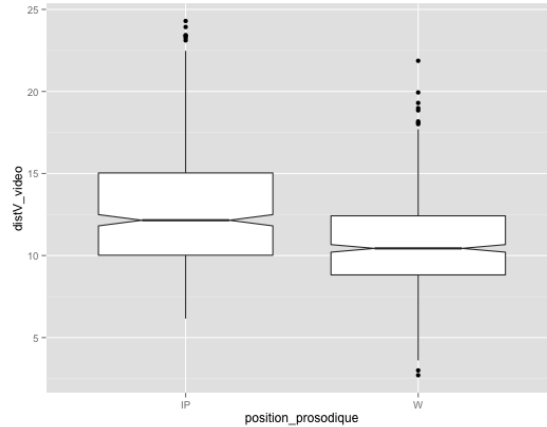
modelV.zero:  $\text{distV\_video} \sim \text{phoneme} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

modelV:  $\text{distV\_video} \sim \text{phoneme} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 \mid \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique affecte les variations d'aperture des voyelles orales du français en effet :

$\chi^2 (1) = 31, p = 0,001$  ( $p = 0,001$  avec KRmodcomp)

Les valeurs d'aperture sont moins élevées de  $-2.1 \text{ pixels} \pm 0,34 \text{ pixels}$  (standard deviation), en position W qu'en position IP, comme le montre la Figure 86.



**Figure 86 : Représentations des valeurs d'aperture selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs d'aperture aux lèvres des voyelles orales du français**

b) **Oui**, il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'aperture aux lèvres

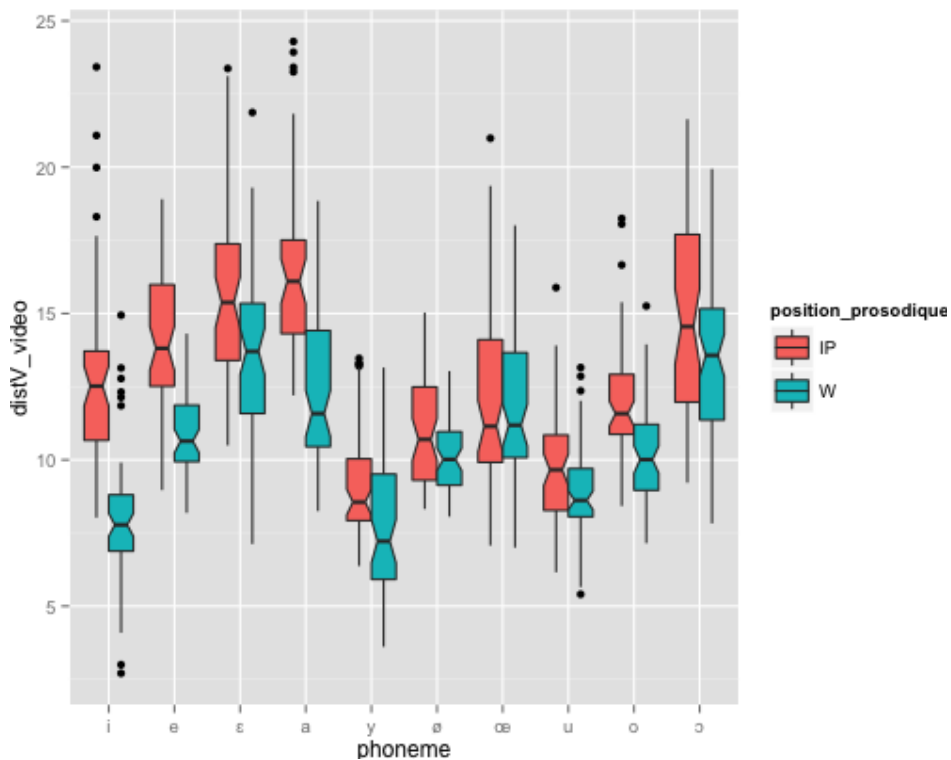
Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelV: distV\_video ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelV.inter: distV\_video ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il existe bien une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'aperture en effet

$$\chi^2 (9) = 20, p = 0,02 \text{ (} p = 0,1 \text{ avec KRmodcomp)}$$



**Figure 87 : Représentations des valeurs d'aperture aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

L'observation de la Figure 87 montre en effet que l'effet de la position prosodique semble plus élevé pour les voyelles antérieures (particulièrement /i/ et /e/) que les autres voyelles.

### Étirement

#### Effet de la position prosodique sur les valeurs d'étirement aux lèvres des voyelles orales du français

- a) **Oui**, la position prosodique affecte les variations d'étirement aux lèvres sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

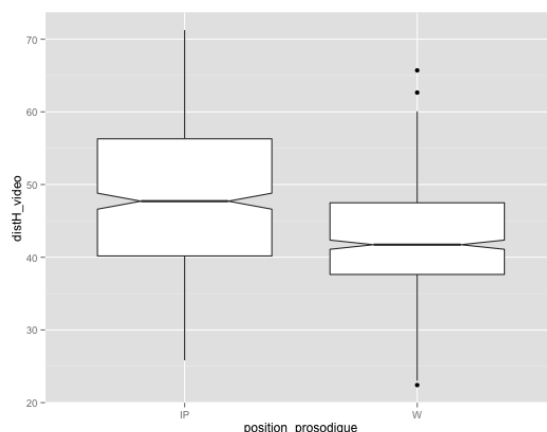
modelH.zero:  $\text{distH\_video} \sim \text{phoneme} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

modelH:  $\text{distH\_video} \sim \text{phoneme} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique affecte les variations d'étirement des voyelles orales du français en effet

$$\chi^2(1) = 45,6, p = 0,001 \text{ (} p = 0,001 \text{ avec KRmodcomp)}$$

Les valeurs d'aperture sont moins élevées de  $-5,9 \text{ pixels} \pm 0,75 \text{ pixels}$  (standard deviation) en position W qu'en position IP, comme le montre



**Figure 88: Représentations des valeurs d'étirement selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

#### Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs d'étirement des voyelles orales du français

- a) **Oui**, il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'étirement aux lèvres

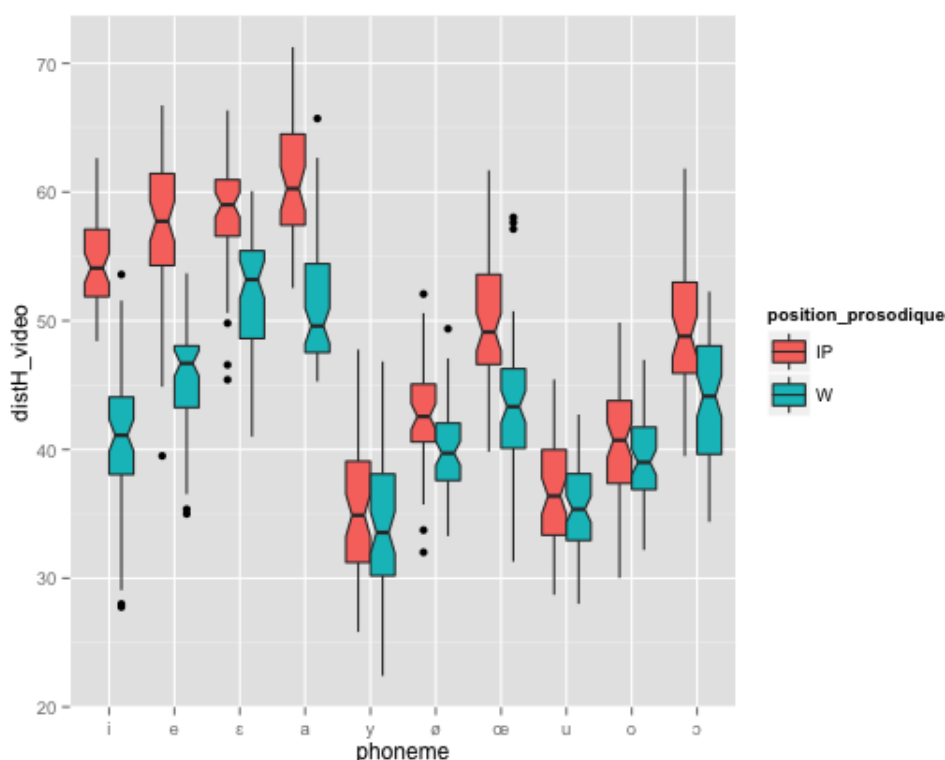
Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelH:  $\text{distH\_video} \sim \text{phoneme} + \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

modelH.inter:  $\text{distH\_video} \sim \text{phoneme} * \text{position\_prosodique} + \text{locuteurs} + (1 | \text{locuteurs:phrase})$

Les résultats statistiques montrent qu'il existe bien une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'étirement en effet

$$\chi^2(9) = 43,8, p=0,001 \text{ (} p=0,001 \text{ avec KRmodcomp)}$$



**Figure 89: Représentations des valeurs d'étirement aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

L'observation de la Figure 89 montre en effet que la position prosodique entraîne une augmentation des valeurs d'étirement pour l'ensemble des voyelles orales du français. Cette augmentation semble plus élevée pour les voyelles non-arrondies que les voyelles arrondies.

### Aire aux lèvres

#### Effet de la position prosodique sur les valeurs d'aire aux lèvres des voyelles orales du français

- a) **Oui**, la position prosodique affecte les variations d'aire aux lèvres sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

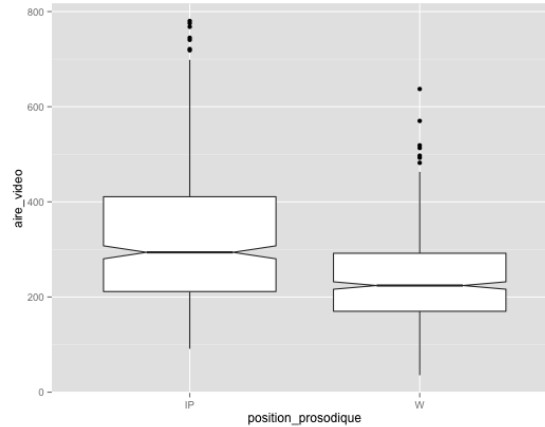
modelaire.zero: aire\_video ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelaire: aire\_video ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique affecte les variations d'aire aux lèvres des voyelles orales du français en effet

$$\chi^2(1) = 40,7, p=0,001 \text{ (} p=0,001 \text{ avec KRmodcomp)}$$

Les valeurs d'aire aux lèvres sont moins élevées de  $-91,6 \text{ pixels} \pm 12,6 \text{ pixels}$  (standard deviation) en position W qu'en position IP, comme le montre la Figure 90.



**Figure 90: Représentations des valeurs d'étirement selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs d'aire aux lèvres des voyelles orales du français**

- a) **Oui**, il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'aire aux lèvres

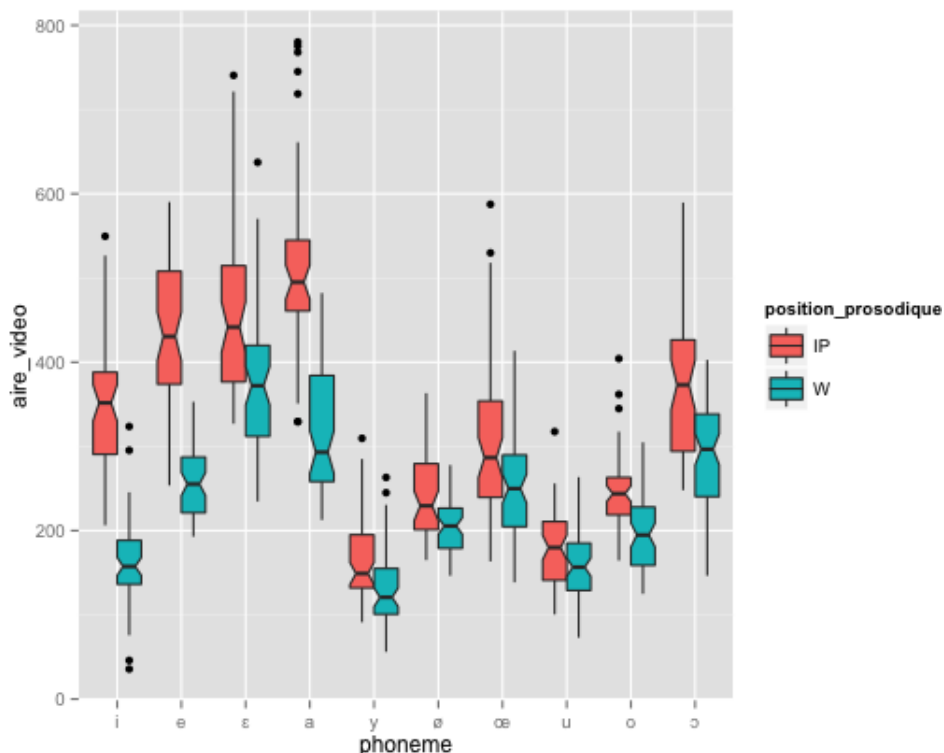
Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelaire: aire\_video ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelaire.inter: aire\_video ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il existe bien une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'aire aux lèvres en effet

$\chi^2 (9) = 36,7, p=0,001 (p=0,001 \text{ avec KRmodcomp}).$
--



**Figure 91: Représentations des valeurs d'aire aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

L'observation de la Figure 91 montre que l'augmentation des valeurs combinées d'étirement et d'aperture (aire aux lèvres) est plus élevée pour les voyelles antérieures.

### Protrusion

#### Effet de la position prosodique sur les valeurs de protrusion des voyelles orales du français

- a) **Non**, la position prosodique n'affecte pas les variations de protrusion sur les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelprotrusion.zero: protrusion ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelprotrusion: protrusion ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n'affecte pas les variations de protrusion des voyelles orales du français en effet

$$\chi^2 (1) = 0,09, p = 0,8 \text{ (} p = 0,8 \text{ avec KRmodcomp)}$$

#### Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs de protrusion des voyelles orales du français

- a) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de F2

Pour cela, nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelprotrusion: protrusion ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelprotrusion.inter: protrusion ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de protrusion en effet

$$\chi^2 (9) = 8,8, p = 0,45 \text{ (} p = 0,74 \text{ avec KRmodcomp)}$$

Cette absence d'interaction est observable sur la Figure 92, peu de différence entre la position IP et W sont observables excepté pour la voyelle /œ/ pour laquelle la protrusion diminue en IP et dans une moindre mesure la voyelle /ɔ/.

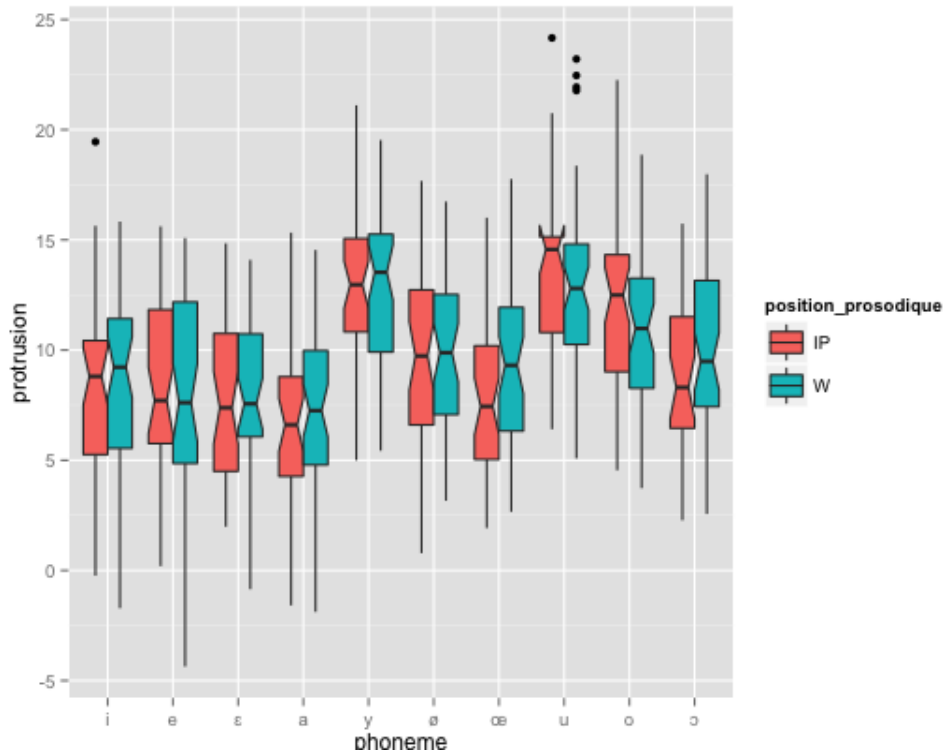


Figure 92: Représentations des valeurs de protrusion selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)

### Mâchoire

#### Effet de la position prosodique sur les valeurs d'abaissement de la mâchoire pour les voyelles orales du français

- a) **Non**, la position prosodique n'affecte pas les variations d'abaissement de la mâchoire pour les voyelles orales du français.

Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelmchoire.zero: machoire ~ phoneme + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelmchoire: machoire ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montrent que la position prosodique n'affecte pas les variations d'abaissement de la mâchoire des voyelles orales du français en effet

$$\chi^2 (1) = 1,35, p = 0,24 \text{ (} p = 0,31 \text{ avec KRmodcomp)}$$



**Interaction entre la position prosodique et les phonèmes sur les valeurs d'abaissement de la mâchoire pour les voyelles orales du français**

a) **Non**, il n'y a pas d'interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs d'abaissement de la mâchoire

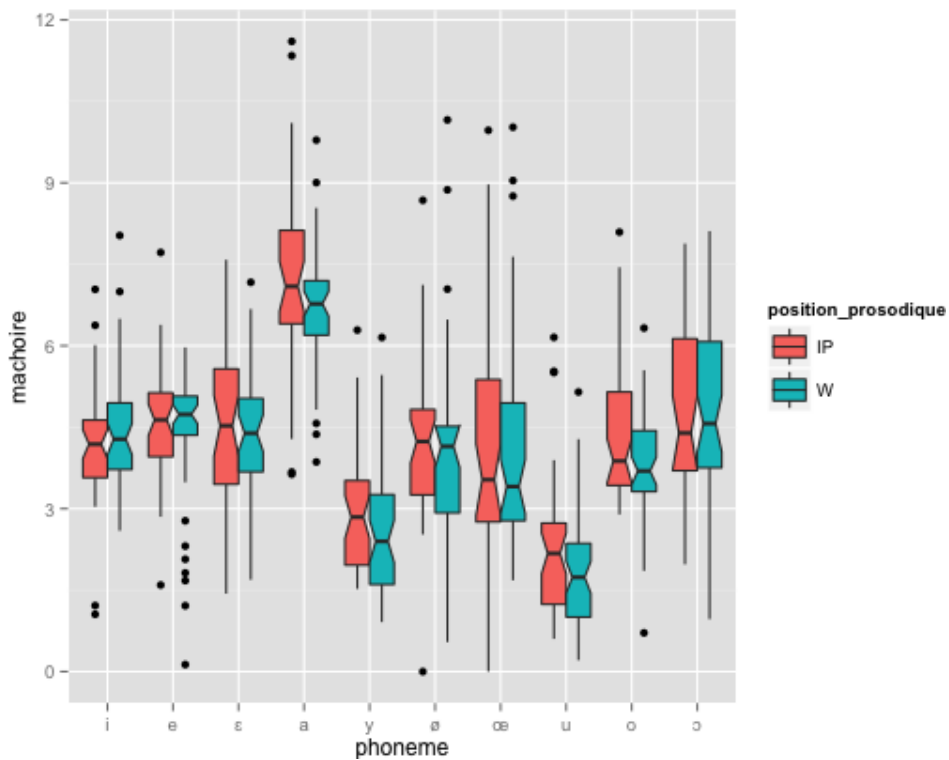
Nous avons comparé les 2 modèles suivants :

modelmchoire: machoire ~ phoneme + position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

modelmchoire.inter: machoire ~ phoneme \* position\_prosodique + locuteurs + (1 | locuteurs:phrase)

Les résultats statistiques montre qu'il n'existe pas une interaction entre la position prosodique et le phonème sur les valeurs de protrusion en effet

$\chi^2(9) = 4,7, p = 0,85$  ( $p = 0,95$  avec KRmodcomp)



**Figure 93: Représentations des valeurs d'abaissement de la mâchoire selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

L'observation de la Figure 93 montre en effet que la position prosodique affecte peu les variations d'abaissement de la mâchoire.

### Conclusion sur les tests statistiques avec modèles mixtes

Dans le Tableau 102, nous présentons pour les paramètres acoustiques (F1, F2, F3, durée, intensité) et les paramètres articulatoires (aperture, étirement, aire, protrusion, mâchoire) :

- Ligne (a), le résumé des résultats statistiques de l'effet de la position prosodique sur ces paramètres et de l'interaction entre la position prosodique et le phonème obtenus avec des **modèles mixtes**.
- Ligne (b), le résumé des résultats statistiques de l'effet de la position prosodique sur ces paramètres et de l'interaction entre la position prosodique et le phonème obtenus avec des **ANOVA simples**. Les tests statistiques ont été menés tous locuteurs confondus et toutes voyelles confondues. Ce résumé correspond aux résultats présentés dans l'analyse préliminaire du chapitre 6 de cette thèse.
- Ligne (c), le résumé des principales conclusions observées avec des **ANOVA simples**, voyelle par voyelle, tous locuteurs confondus. Ce résumé correspond aux résultats présentés dans l'analyse par voyelle du chapitre 7 de cette thèse.

		F1	F2	F3	durée	intensité
(a) Modèles mixtes	effet de la pp	IP>*W	ns	ns	ns	IP>*W
	pp*phoneme	significatif <sup>26</sup>	ns	ns	significatif	ns
(b) Anova (toutes voy et tous locuteurs confondus)	effet de la pp	IP>*W	IP>*W	IP>*W	IP<*W	IP>*W
	pp*phoneme	significatif	significatif	significatif	significatif	significatif
(c) Anova (analyse voy par voy, tous locuteurs confondus)	effet de la pp	IP>*W (/a, ɔ, œ, ε, ø/)	IP>*W (/e, ø, ε, œ/)	IP>*W (/i,e,ε,œ,a/)	IP>*W (/u,œ/)	IP>*W (/i,y,u,ø,ε,œ,a/)
			IP<*W (/o/)	IP<*W (/y, ø/)	IP<*W (/ε, a/)	IP<*W (/e,ɔ/)

		aperture	étirement	aire	protrusion	mâchoire
(a) Modèles mixtes	effet de la pp	IP>*W	IP>*W	IP>*W	ns	ns
	pp*phoneme	significatif	significatif	significatif	ns	ns
(b) Anova (toutes voyelles et tous locuteurs confondus)	effet de la pp	IP>*W	IP>*W	IP>*W	ns	ns
	pp*phoneme	significatif	significatif	significatif	ns	ns
(c) Anova (analyse voy par voy, tous locuteurs confondus)	effet de la pp	IP>*W (ttes voy)	IP>*W (ttes voy sauf /œ/)	IP>*W (ttes voy)	IP<*W (/œ/)	IP>*W (/u,o/)
		augmentation des paramètres plus large sur les voyelles non-arrondies				

**Tableau 102 : Tableau récapitulatif des résultats statistiques effectués par les modèles mixtes et l'ANOVA simple sur les paramètres acoustiques (F1, F2, F3, durée intensité) et sur les paramètres articulatoires (aperture, étirement, aire, protrusion et mâchoire), toutes voyelles confondues (a, b) et voyelle par voyelle (c).**

<sup>26</sup>Pour F1, nous considérons qu'il existe une interaction entre position prosodique et le facteur « semio » qui est composé de 2 groupes 'ouvert' vs 'fermé'. La valeur de p n'est pas égale à 0,05 mais 0,06. Comme proposé par Cho (2001), « In addition, in some cases, one or two speakers out of five or six speakers showed quite a noticeable different pattern from the rest of the speakers. In such a case, p-values were generally slightly higher than 0,05, i.e. non significant. I will report cases when p-values are less than or equal to 0,075 as non-significant trends, in order to make note of tendencies for a majority of the subjects. » on peut considérer que des valeurs de p à 0,06 sont très proches de la significativité et qu'il représente une tendance qu'il nous faut souligner.

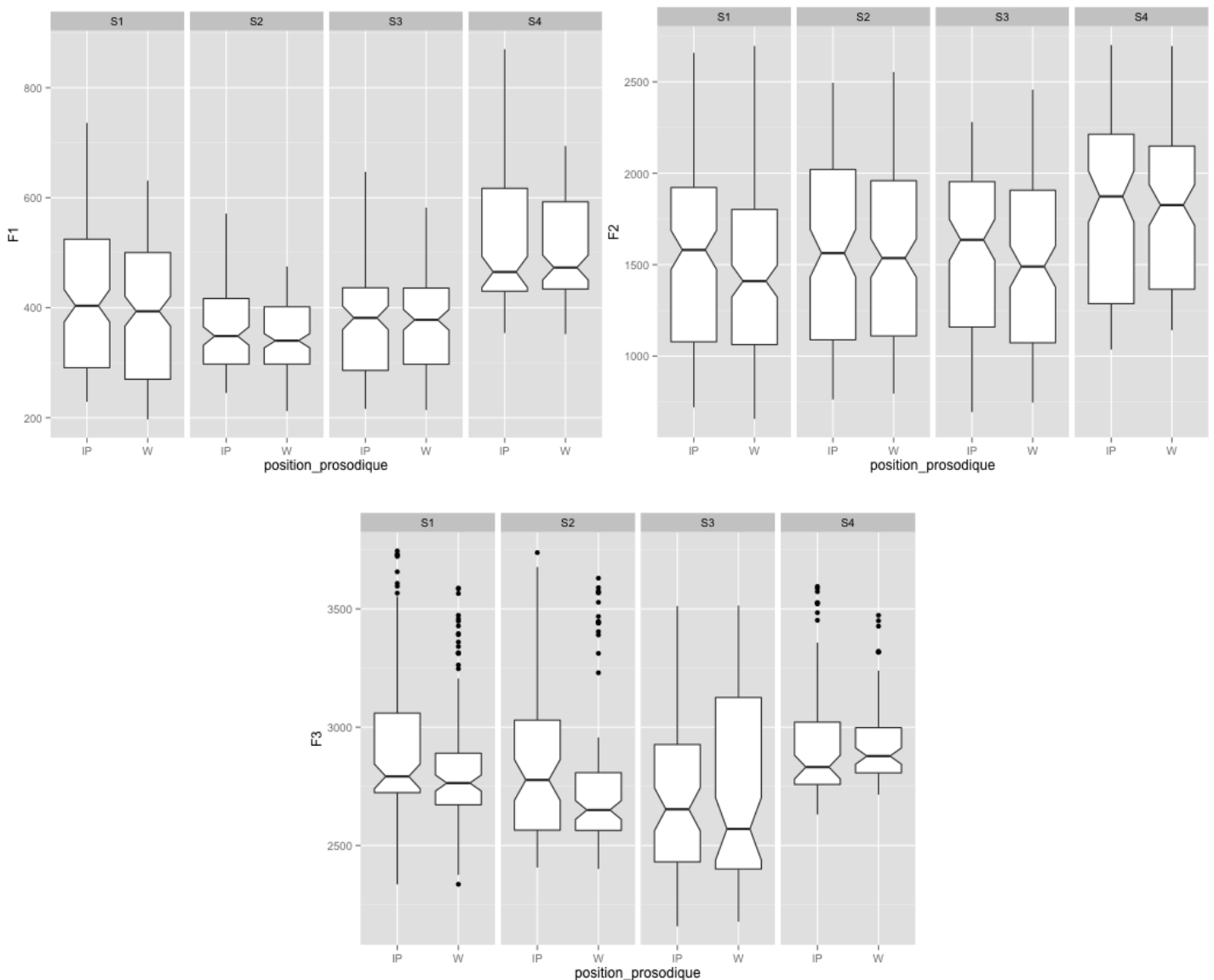
Dans les paragraphes suivants, nous proposons une comparaison des résultats statistiques obtenus avec des modèles mixtes (a) et avec des ANOVA simples menées toutes voyelles et tous locuteurs confondus (b) et menées voyelle par voyelle, tous locuteurs confondus (c).

Au regard du Tableau 102, nous pouvons apporter les conclusions suivantes :

#### Sur les paramètres acoustiques :

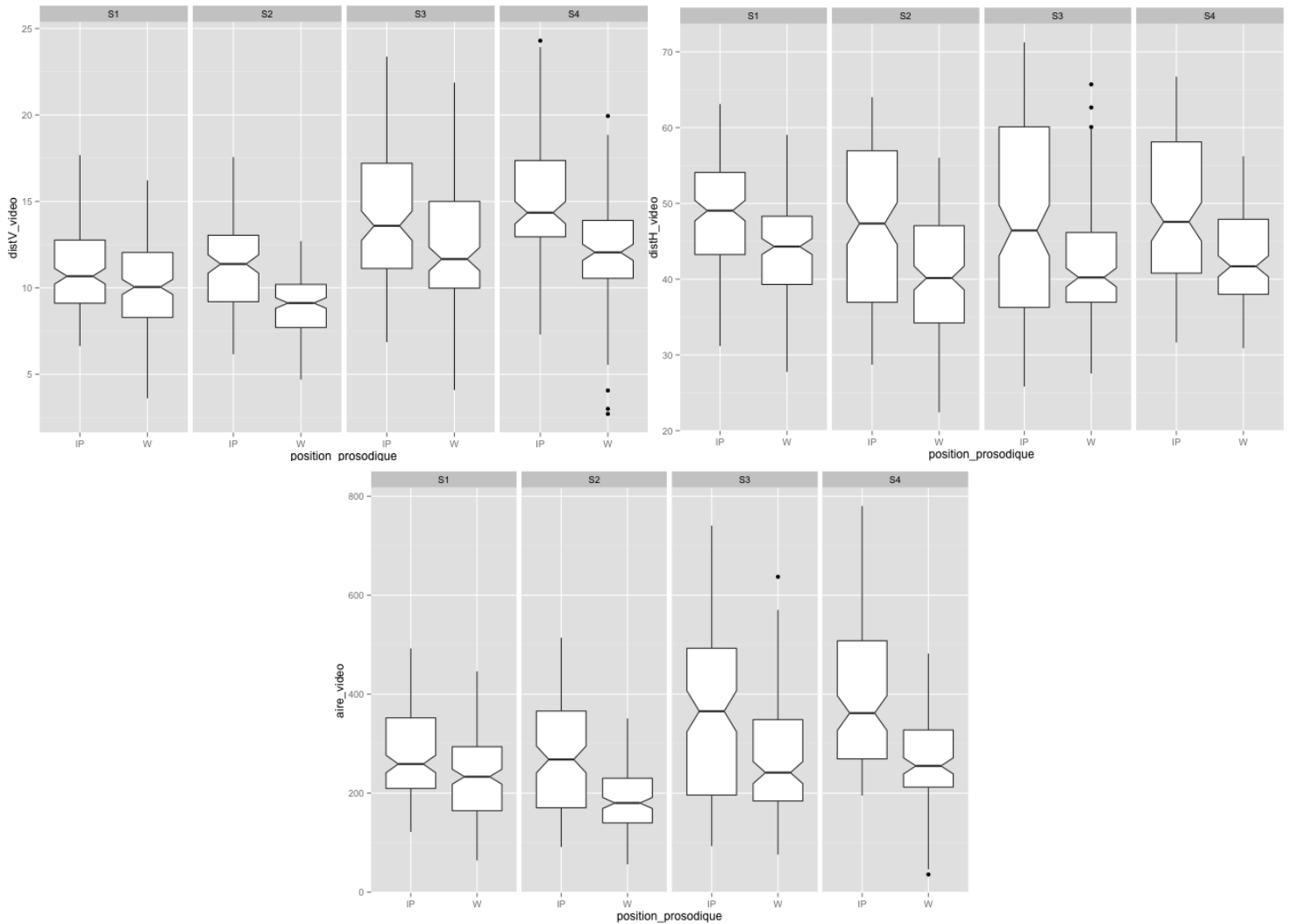
- Les analyses statistiques avec modèles mixtes (a) et ANOVA simple (b) mettent en lumière **l'existence** d'un effet de la position prosodique et/ou d'une interaction entre la position prosodique et le phonème, sur les paramètres acoustiques suivants : **le formant F1, la durée et l'intensité**. Les deux tests statistiques nous amènent donc aux mêmes conclusions.
  - **Pour le formant F1**, les tests statistiques avec modèles mixtes (a) et ANOVA simple (b) montrent un effet uniforme de la position prosodique, toutes voyelles confondues. De plus, les résultats menés avec les modèles mixtes (a) montrent qu'il existe une interaction entre le facteur 'semio' (deux niveaux : voyelles ouvertes vs voyelles fermées) et le facteur 'position prosodique' (deux niveaux : IP et W). Ce résultat est en accord avec ceux observés dans l'analyse voyelle par voyelle (c) : en effet, on observe une augmentation de des valeurs de F1 en position IP comparé à la position W pour les voyelles ouvertes : /a, ɔ, œ, ε/.
  - **Pour la durée**, les résultats menés avec les modèles mixtes (a) et avec une ANOVA simple (b) montrent qu'il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème. Les deux tests statistiques nous amènent donc aux mêmes conclusions. Cette interaction s'explique par l'effet non-uniforme de la position prosodique sur la durée des voyelles. En effet, les résultats observés voyelle par voyelle montrent que la durée augmente pour deux voyelles (/u, œ/), diminue pour deux autres (/ε, a/) alors que qu'aucun effet significatif n'est observé pour les autres voyelles.
  - **Pour l'intensité**, les résultats menés avec les modèles mixtes (a) et avec une ANOVA simple (b) montrent qu'il existe un effet global de la position prosodique sur les voyelles orales du français. Les deux tests statistiques nous amènent donc aux mêmes conclusions : l'intensité est plus élevée en position IP pour les voyelles orales du français. Ce résultat est également observé dans une analyse voyelle par voyelle en effet sept voyelles sur dix montrent une augmentation de l'intensité en position IP comparé à la position W.
  - **Pour les valeurs de F2 et F3**, le test ANOVA montre des résultats significatifs sur l'effet de la position prosodique et sur l'interaction entre position prosodique et phonème, ce qui n'est pas le cas avec les tests avec modèles mixtes. Nous proposons deux interprétations pour expliquer cette différence statistique.
    - L'absence d'effet sur les valeurs de F2 et F3 est en accord avec notre hypothèse qui postule que l'effet de la position prosodique n'affecte pas toutes les voyelles de manière uniforme mais que l'effet est dépend de la voyelle. En effet, les résultats menés voyelle par voyelle montrent que l'effet de la position prosodique entraîne une augmentation des valeurs de F2 pour la plupart des voyelles antérieures (/e, ø, ε, œ/) et une diminution des valeurs de F2 pour la voyelle postérieure /o/. Egalement, les valeurs de F3 augmentent en position IP comparé à la position W pour les voyelles non-arrondies (/i, e, ε, a/) et diminuent pour les voyelles antérieures arrondies /y, ø/.
    - Pour expliquer cette absence de significativité sur les valeurs de F2 et F3, nous postulons également que le test statistique mené avec des modèles mixtes est plus strict que celui des ANOVA, et que la variabilité entre les locuteurs, plus large pour les valeurs F2 et F3 que pour les valeurs F1, comme nous allons le montrer ci-dessous, entraîne cette absence de résultats significatif. C'est la Figure 94

(regroupant les valeurs de F1, F2, F3) qui nous permet d'émettre cette hypothèse. En effet, l'observation des médianes montre que pour F1 les valeurs sont légèrement plus élevées en position IP qu'en position W pour chaque locuteur (excepté S4, qui montre une diminution des valeurs) alors que pour les valeurs médianes de F2 et F3, nous observons plus de variabilités entre les locuteurs. Pour F2, les valeurs de données se chevauchent plus largement entre locuteurs et les valeurs de F2 varient selon le locuteur considéré : si l'augmentation est nette en position IP pour les locuteurs S1 et S3, elle l'est moins pour les locuteurs S2 et S4. Pour F3, les valeurs de F3 varient selon le locuteur considéré : on observe une augmentation des valeurs médianes de F3 pour les deux locuteurs S2 et S3, alors que les valeurs médianes de F1 restent stables pour S1, et diminuent pour S4.



**Figure 94 : Représentations des valeurs de F1 (haut, gauche), F2 (haut, droite), F3 (bas) selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

A titre de comparaison, nous présentons également les valeurs d'aperture, d'étirement et d'aire aux lèvres dans la Figure 95. Nous pouvons constater que contrairement aux paramètres acoustiques, les valeurs des paramètres articulatoires se chevauchent très peu, et le sens des variations est similaire entre les quatre locuteurs.



**Figure 95 : Représentations des valeurs de l'aperture (haut, gauche), l'étirement (haut, droite) et l'aire aux lèvres (bas) selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W)**

### Sur les paramètres articulatoires :

- Les analyses statistiques avec modèles mixtes (a) et ANOVA simple (b) mettent en lumière **l'existence** d'un effet de la position prosodique et d'une interaction entre la position prosodique et le phonème, sur les paramètres articulatoires suivants : **l'aperture, l'étirement et l'aire aux lèvres**. D'après les deux tests statistiques, il existe une augmentation de ces trois paramètres en position IP comparé à la position W : les conclusions vont dans le même sens. L'interaction observée entre la position prosodique et le phonème montre que la position prosodique peut influencer différemment les paramètres articulatoires des voyelles. Cette interaction est confirmée dans nos résultats de l'analyse (c) voyelle par voyelle. L'augmentation générale des paramètres pour l'ensemble des voyelles orales du français est en effet plus large pour les voyelles non-arrondies qu'arrondies.

- Les deux types d'analyse statistiques modèles mixtes (a) et ANOVA simple (b) mettent en lumière **l'absence** d'un effet de la position prosodique et d'une interaction entre la position prosodique et le phonème, sur les paramètres articulatoires suivants : **la protrusion et l'abaissement de la mâchoire**. Les deux analyses statistiques nous amènent donc aux mêmes conclusions. L'analyse (c) voyelle par voyelle montre qu'il existe néanmoins un effet de la position prosodique sur une seule voyelle pour la protrusion (/œ/) et sur deux voyelles pour la mâchoire (/u/, /o/). Il semble donc cohérent que ces différences relevées sur quelques phonèmes ne soient pas observées dans une analyse toutes voyelles confondues (comme menée dans a et b).

Dans cette annexe, nous avons pris le parti de mener une étude statistique différente de celle menée dans la partie résultat de cette thèse (voir 4.4) : une analyse avec des modèles mixtes. La comparaison globale des résultats obtenus par modèles mixtes et ceux obtenus par ANOVA simple montre que les résultats sont sensiblement similaires entre les deux tests. Nous pouvons en effet retrouver les mêmes conclusions que dans notre analyse menée voyelle par voyelle :

- **l'hypothèse d'expansion de sonorité** postulée dans cette thèse est en accord avec les résultats observés **sur le formant F1, sur l'intensité, sur la durée, sur l'aperture, l'étirement et l'aire aux lèvres et sur l'abaissement de la mâchoire**.

- En effet, l'analyse avec modèles mixtes montre un effet uniforme de la position prosodique sur toutes les voyelles confondues. Cette augmentation de F1 et d'intensité a donc pour conséquence de rendre la voyelle plus distincte des autres segments qui l'entourent en renforçant le contraste sur l'axe syntagmatique entre la voyelle cible et les consonnes adjacentes.
- De plus, cette expansion de sonorité ne peut être expliquée par une augmentation de la durée des voyelles. En effet, les tests avec modèles mixtes montrent qu'il existe une interaction entre la position prosodique et le phonème. Ce résultat montre que différents patterns peuvent être observés sur la durée des voyelles : une diminution, une augmentation ou aucun effet.
- L'augmentation générale des paramètres d'aperture, d'étirement et d'aire aux lèvres en position IP aura également pour conséquence d'augmenter la sonorité de la voyelle en position IP.
- Cette augmentation de la sonorité n'est pas associée à un abaissement de la mâchoire. En effet, aucun effet et aucune interaction n'est observée sur les mesures prises sur l'abaissement de la mâchoire.
- Ces différentes conclusions sont en accord avec celles mises en valeur dans cette thèse, avec une procédure statistique d'ANOVA simple.

- **l'hypothèse d'un renforcement de certaines caractéristiques phonétiques spécifiques à la voyelle** postulée dans cette thèse est en accord avec les résultats observés **sur les mesures de protrusion, d'aperture et d'étirement aux lèvres**.

- Nous observons une augmentation globale des paramètres d'aperture et d'étirement toutes voyelles confondues. Les caractéristiques articulatoires des voyelles non-arrondies se trouvent donc renforcés (en termes d'aperture et d'étirement) en position IP par rapport à la position W. Alors que les caractéristiques des voyelles arrondies ne le sont pas.
- De même, aucun effet de la position prosodique n'est observé dans l'étude avec modèles mixtes. Les voyelles arrondies ne sont donc pas caractérisées par une augmentation de la protrusion.
- Ces différentes conclusions sont en accord avec celles mises en valeur dans cette thèse, avec une procédure statistique d'ANOVA simple.

Enfin, les résultats avec modèles mixtes observés sur les variations des formants F2 et F3 montrent qu'il n'existe aucun effet de la position prosodique et aucune interaction entre le phonème et la position prosodique. Ces résultats peuvent être expliqués par la diversité de stratégie des locuteurs, et par le fait que la position prosodique ne va pas affecter de manière uniforme les valeurs de F2 et F3 des voyelles orales du français.

Ces résultats montrent que l'analyse statistique avec modèles mixtes rend compte des principales conclusions de la thèse : **les hypothèses d'expansion de sonorité et du renforcement de certaines caractéristiques phonétiques des voyelles sont validées**. L'analyse avec modèles mixtes fait donc émerger les grandes tendances de l'effet de la position prosodique sur les voyelles orales du français. Elle est néanmoins une analyse statistique plus stricte qu'une ANOVA simple et ne permet pas de rendre compte de variations phonétiques fines observées voyelle par voyelle ou sur des contrastes de voyelle, comme le montrent les résultats observés sur les valeurs de formants F2 et F3. Comme nous l'avons expliqué dans la partie 4.4, l'objectif de cette thèse est de rendre compte du renforcement initial sur les voyelles orales du français dans une approche fine et descriptive. Cette étude menée avec des modèles mixtes n'atteint que partiellement cet objectif. C'est notamment pour cette raison que le test statistique avec ANOVA simple a été privilégié dans ce travail.





## **Annexe 4 : Articles**

Liste non-exhaustive (articles cités dans la thèse)

- **Georgeton L.**, Audibert N. & Fougeron C. (2011) Rounding and height contrast at the beginning of different prosodic constituents in French. *Proceedings of the 17th International Congress of Phonetic Science*, 739- 742 Hong-Kong, Chine.
- **Georgeton L.** & Audibert N. (2012) : Variations de la configuration labiale des voyelles /i, y, a/ : effets de la position prosodique et du locuteur. Actes des 29e Journées d'Etudes sur la Parole, Grenoble, France
- **Georgeton L.** & Audibert N. (2014). Mesures de protrusion par capture optique de mouvements: quelle métrique est la plus représentative de l'opposition d'arrondissement en français? XXXe Journées d'Etudes sur la Parole, Le Mans, France.
- **Georgeton L.** & Fougeron C. (2014). Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: evidence from lip articulation and spectral variation. Dynamics of Articulation and Prosodic Structure. *Journal of phonetics*, 44, 83-95.
- **Georgeton L.**, Kocjančič Antolík T. & Fougeron C (2014). Domain initial strengthening and height contrast in French: acoustic and ultrasound data. *10th International Smeinar on Speech Production*, Cologne, Germany.
- **Georgeton L.**, Kocjančič Antolík T. & Fougeron C (2014). Acoustic and lingual variation within the 4-way contrast of vowel height in French. *14th conference on Laboratory Phonology*, Tokyo, Japan,

# ROUNDING AND HEIGHT CONTRASTS AT THE BEGINNING OF DIFFERENT PROSODIC CONSTITUENTS IN FRENCH

[1] Laurianne Georgeton, Nicolas Audibert and Cécile Fougeron

Laboratoire de Phonétique et de Phonologie UMR 7018 CNRS/ Univ. Sorbonne Nouvelle Paris 3  
{laurianne.georgeton; cecile.fougeron}@univ-paris3.fr; nicolas.audibert@gmail.com

## ABSTRACT

Variations in the acoustic manifestations of the rounding and height contrasts in French vowels are investigated in different prosodic positions. Four speakers produced sentences containing the vowels /i, e, a, y, ø/ at the beginning of different prosodic constituents: Intonational Phrase, Accentual Phrase and Word. Acoustic cues for the rounding contrast (F2, F3, F3-F2) and for the vowel height contrast (F1) are found to be enhanced in Intonational Phrase initial positions.

**Keywords:** segmental contrast, prosody, French.

## 1. INTRODUCTION

This study investigates the influence of prosodic positions on the acoustic realization of speech sounds. Variation depending on prosodic position has been described in different languages and for different types of segments. So far, variation at the left edge of a constituent (so-called initial strengthening) has been observed mostly on consonants for lingual, glottal or jaw articulation [3], [8]. Variation in the realization of vowels located close to prosodic boundaries has mainly been studied for domain-final vowels, or for vowels in CV initial syllables of prosodic constituents to question the domain of initial strengthening [4], [5], [8].

In the present study, acoustic properties of vowels in absolute initial position (post-boundary) are compared in different prosodic domains. The question of the nature of the strengthening process is addressed by testing whether variation affects the acoustic cues of the phonological contrast between round and unrounded vowels and between vowels of different height in French. Fougeron [9] showed that the vowel /i/ in the /p#ip/ sequence (where # stands for a prosodic boundary) has more linguopalatal contact (i.e. is more closed) following higher prosodic boundaries. This result challenges the view that prosodically-driven

variations increase the sonority of vowels (*sonority expansion hypothesis* [2], [4], [7]). It rather supports an enhancement of contrastive attributes in strong positions, as predicted by the *local hyperarticulation hypothesis* (e.g. [5], [7]). Predictions of these two competing hypotheses will be further compared here by testing vowels contrasting in rounding (/i-y/, /e- ø/) and in vowel height (/i-e-a/).

## MATERIAL AND METHODS

### 1.1 Speech material and speakers

Acoustic realization of the vowels /i, e, a, y, ø/ are studied in sentences cueing different prosodic phrasing. As illustrated in **Table 1**, the test vowels ( $V_2$ ) appear in a  $V_1C_1\#V_2C_2$  sequence where  $V_2C_2$  are the beginning of a (fake) first name, and # holds for either an Intonational Phrase (IP), an Accentual Phrase (AP), or a Word (Wd) boundary. Pre-boundary context ( $V_1C_1$ ) and following consonant ( $C_2$ ) are kept constant ( $V_1=/i/$ ,  $C_1$  &  $C_2=/p/$ ). Four native French female speakers (aged 25 to 40 years, with no identifiable regional accent) read the sentences in a random order. Each sentence was read twice consecutively at a comfortable speech rate and the entire list was read eight times, for a total of 1075 repetitions. The first author coded prosodic phrasing of each rendition, and for 180 utterances for which the phrasing was not obvious, the judgment of 3 expert phoneticians was used. 50 sentences were discarded due to lack of inter-judge agreement, leaving 1025 tokens to be considered in this study.

**Table 1:** Sample sentences containing the sequence  $V_1C_1\#V_2C_2$  with different prosodic boundaries (#: Intonational Phrase, Accentual Phrase, Word)

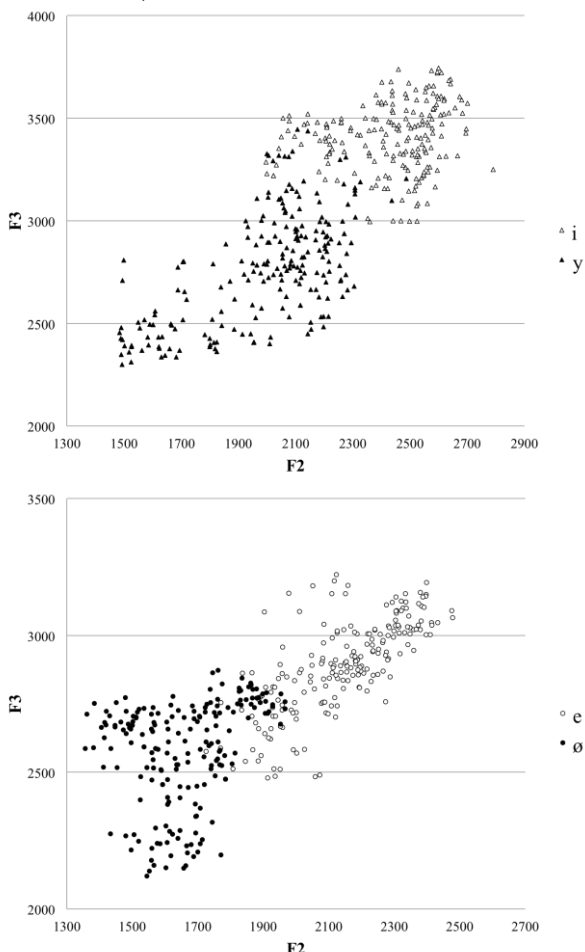
IP	Pour le roi Philippe, Ipicaz et Larsen se battent comme des dieux. ( <i>For king P., Ipicaz and Larsen fight as gods</i> ).
AP	Oupoulo, Philippe, Ipicaz et David sont comme des frères. ( <i>Oupoulo, Philippe, Ipicaz and David are like brothers</i> ).

Wd	Dalida et Lippe-Ipicaz sortent un tube d'enfer. <i>Dalida and Lippe-Ipicaz launch a hell of a hit.</i>
----	---

## 2. Rounding contrast

### 2.1 Acoustic cues of the rounding contrast

As expected and illustrated in Figure 1, acoustic differences between front rounded /y, ø/ and unrounded /i, e/ vowels are found in F3 and F2.



**Figure 1:** Distribution of the vowels /i, y/ (top), /e, ø/ (bottom) in the F2/F3 dimensions (all speakers and all prosodic conditions confounded).

All prosodic positions and all speakers pooled, the contrast between /i/ and /y/ is cued by a lower F2 ( $F(1,398)=1125$ ,  $p<.0001$ ) and a lower F3 ( $F(1,398)=1483$ ,  $p<.0001$ ) for the rounded vowel /y/. Similarly, the contrast between /e/ and /ø/ is also cued by a lower F2 ( $F(1,401)=1527$ ,  $p<.0001$ ), a lower F3 ( $F(1,401)=737$ ,  $p<.0001$ ) for /ø/. In terms of F3-F2 distance, /y/ show more compacity than /i/ ( $F(1,398)=1483$ ,  $p<.0001$ ). This compacity between F3-F2 is not found for the other rounded vowel /ø/, which has a rather central F2 and thus a

larger F3-F2 distance than /e/ ( $F(1,401)=190$ ,  $p<.0001$ ).

These acoustic differences are found to be all speaker-dependent (all interactions between vowel type and speakers at  $p<.0001$ ). Subsequent analyses by speaker show that effect sizes vary, but that all speakers mark the distinctions found for F2 and F3. However, for the F3-F2 dimension, the distinction between /i/ and /y/ holds for 2 speakers only (S2, S3) and the distinction between /e/ and /ø/ holds for 3 speakers (all except S3).

### 2.2 Effect of prosodic position

The effect of 'Prosodic Position' is tested for each vowel (all speakers pooled) on the three acoustic dimensions found to be linked to the rounding contrast (F2, F3, F3-F2) with an ANOVA with the prosodic position as fixed factor. Results are presented in Table 2 and illustrated in Figure 2 for each speaker individually.

**Table 2:** Main effect of 'prosodic position' and Fisher post-hoc comparisons on F2, F3 and F2-F3 values for each vowel. Significance levels: \*\* $p<.0001$ , \* $p<.05$ , ns:non significant.

	F2	F3	F3-F2
/i/	$F(2,182)=4$ ns ns	$F(2,182)=32$ ** IP>*AP,Wd	$F(2,182)=36$ ** IP>*AP,Wd
/e/	$F(2,195)=13$ * IP>*AP,W	$F(2,195)=38$ ** IP>*AP>*Wd	$F(2,195)=6$ * IP>*AP,Wd
/y/	$F(2,200)=1$ ns ns	$F(2,200)=11$ ** IP<*AP,Wd	$F(2,200)=13$ ** IP<*AP,Wd
/ø/	$F(2,190)=0$ ns IP>*AP,W	$F(2,190)=3$ ns ns	$F(2,190)=7$ ** IP,AP<*Wd

Over all speakers, the effect of prosodic position on the realization of domain initial vowels varies according to the vowel, the acoustic dimensions affected and the number of position distinguished.

Distinctions are found to be more frequent and systematic between the IP initial position and the two lowest positions in the hierarchy, AP and Wd (except for F3-F2, for /ø/ where IP=AP). Vowels in AP initial position are generally similar to that in Wd initial position (except for F3 /e/ where the only 3 way distinction is found IP>AP>Wd).

Variations can be observed according to vowel category. Recall that the unrounded vowels /i/ and /e/ differ from their rounded counterparts by a

higher F2 and a higher F3. Prosodic position is found to have an effect on these dimensions. Compared to AP and Wd-initial positions, IP-initial /i/s have a higher F3; and IP-initial /e/s have a higher F2 and F3. In terms of F3-F2, both unrounded vowels have a larger F3-F2 distance in IP initial position (the increase in F3 being greater than the change in F2).

These effects of prosodic positions on the realization of the two unrounded vowels vary according to speaker (all speaker\*position interactions significant at  $p < .01$ ). As illustrated on, for /i/ the effects on F3 and F3-F2 hold for all speakers except S2. S3 also shows a higher F2 in IP-initial position than in AP/Wd. For /e/, higher F2 and F3 in IP-initial position is found for all speakers, while a larger F3-F2 distance holds for all speaker except S2.

As far as the rounded vowels are concerned, the effects of prosodic position are less consistent. All speakers pooled, /y/ is found to have a lower F3 and a smaller F3-F2 distance when initial in IP compared to AP/Wd. /ø/ has a higher F2 in IP initial position compared to AP/Wd and a smaller F3-F2 distances when initial in IP and AP compared to Wd. No effect is found on F3. Variation in F2 for this vowel could be linked to rounding but also to variation in tongue fronting.

For the rounded vowels, interactions between the factors position and speaker are also found (all at  $p < .01$ ). Examination of the patterns by speakers (see Figure 1) shows that prosodic position effects on rounded vowels are less systematic across speakers, and are shown principally by speakers S1 and S4. For /y/, the effect on F3 holds only for S4, and the effect on F3-F2 holds for S1 and S4. For /ø/, the effects on F2 and F3-F2 hold for S1 and S4 (S3 showing also a distinction AP < \*Wd for F3-F2)

### 3. Vowel Height Contrast

#### 3.1 Acoustic differences between /i, e, a/

As expected, all speakers and all positions pooled, the vowel height contrast between /i, e, a/ is cued by variation in F1 ( $F(2,599)=1976$ ,  $p < .0001$ ). Post-hoc comparisons (Fisher's test) show a three-way distinction with an increase of F1 from /i/ to /e/ to /a/ ( $p < .0001$ ). While the size of the differences vary according to speaker (all interactions at  $p < .0001$ ), all speakers show the same patterns, except for S4 who do not distinguish /i/ and /e/ in terms of F1.

### 3.2 Effect of prosodic position

The effect of the prosodic position was tested for each vowel on F1 values. All speakers pooled, an effect of position is found only for the open vowel /a/ ( $F(2,198)=82$ ,  $p < .0001$ ). Both all speakers confounded, and for all speaker tested individually, /a/ in IP-initial position have a higher F1 than in both AP and Wd initial positions.

An effect of position is also found for speaker S4 for /e/ ( $F(2,41)=4$ ,  $p=0.02$ ), with IP-initial /e/ having a higher F1 (vs. AP/Wd). A surprising effect is observed for speaker S3 for /i/ with a higher F1 in IP and Wd initial positions compared to AP ( $F(2,42)=9$ ,  $p < .001$ ). However, as illustrated in Figure 2 on differences in Hz are rather small.

### 4. Conclusions

In this study, the effect of prosodic position on the realization of initial vowels is tested on acoustic features related to vowel contrasts in French. For rounded and unrounded vowels, variations in F2, F3, and F3-F2 are observed. For vowels contrasting in three degrees of aperture, variations in F1 are tested.

Results show that the prosodic position of the vowels can affect these acoustic dimensions. However, as observed previously in the literature (e.g. [3][8]), among the positions tested distinctions are more frequent and follow a more regular trend between the highest prosodic domain (here Intonational Phrase) on one side, and the lowest domains (here Accentual Phrase and Word) on the other side. Speaker differences are also frequently observed, some speakers showing more effects (e.g. S1 and S4 in 0) than others (e.g. S2 in 0).

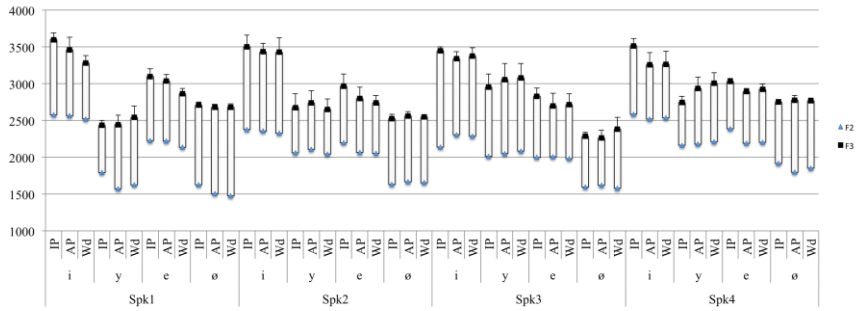
Interestingly, our results show that the direction of the variations observed in IP initial positions compared to AP and Wd initial positions depend on vowel category. For the unrounded vowels /i/ and /e/, acoustic cues marking the contrast with their rounded counterparts are enhanced. These effects hold for at least three, if not all four speakers, depending on the comparisons. For the rounded vowels, there is also a global trend for an enhancement of the acoustic manifestation of rounding in IP initial position, but two speakers mainly support these effects. For the open vowel /a/, there is also an enhancement of the acoustic cue of vowel height (F1).

Globally, when an effect of prosodic position is found, /i, e/ are acoustically more ‘unrounded-like’, /y, ø/ are more ‘rounded-like’, and /a/ is more ‘open-like’ when they are in initial position of the the highest prosodic domain (IP). These results can be discussed in the light of the two hypotheses proposed in the literature to explain the nature of the influence of prosody on segmental realization. According to the *sonority expansion hypothesis* [2], segments in strong positions are expected to display an increase in their intrinsic sonority. The variations we observed in F2, F3, and F3-F2 can not be related to a sonority expansion. They rather support the predictions of *local hyperarticulation hypothesis* [5], according to which the contrastive characteristics of the unrounded and rounded vowels are enhanced by a local hyperarticulation of the gestures toward their presumed targets.

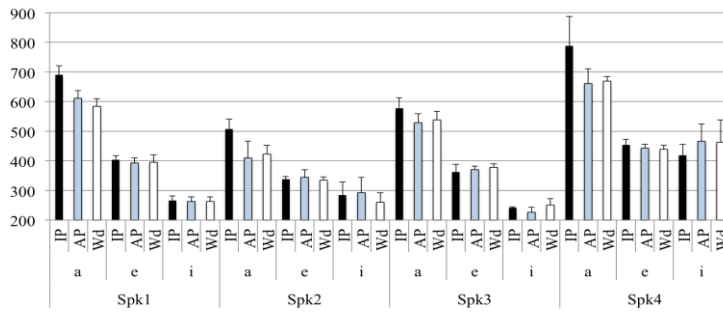
Concerning the effects found for /a/, the increase of F1 in IP initial position found for all speakers can be interpreted either as an increase of sonority, or as a hyperarticulation of the low target of the tongue. In order to distinguish these two interpretations, we were expected to find an effect on the F1 of the closed vowel /i/ or of the mid-closed vowel /e/. Only one of the four speaker shows an effect for /i/, but the trend does not follow the prosodic hierarchy (IP,Wd>AP) and is hard to interpret. An effect is also found for one speaker for /e/, suggesting an increase in sonority. Further interpretation of these last results is not reasonable at this stage. This study needs to be completed by the observation of other French vowels (examination of the mid-open vowel /ɛ/ and back vowels is underway).

## 5. REFERENCES

- [2] Beckman, M. et al. 1992. *Prosodic structure and tempo in a sonority model of articulatory dynamics*. IN G. Docherty and D. R. Ladd (eds) *Papers in Laboratory Phonology II: Gesture, Segment, Prosody* (pp 68-86). Cambridge, U;K: Cambridge University Press.
- [3] Cho, T. 2001. *Effects of prosody on articulation in English*. PhD dissertation, University of California, Los Angeles. (Distributed as UCLA Dissertations in Linguistics, number 22)
- [4] Cho, T. 2008. *Prosodic strengthening in transboundary V-to-V lingual movement in American English*. *Phonetica*, 65, 45-61
- [5] De Jong, K. 1995. *On the status of redundant features: the case of backing and rounding in American English* in *Phonology and Phonetic Evidence: Papers in Laboratory Phonology IV*, edited by B. Connell and A. Arvaniti (Cambridge University Press, Cambridge, UK), pp 68-86
- [6] Farnetani, E. & Vayra, M. 1996. *The role of prosody in the shaping of articulation in Italian CV syllables*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> ESCA Workshop on Speech Production Modeling, 4<sup>th</sup> Speech Production Seminar, Autrans, France, pp 9-12.
- [7] Fougeron C. & Keating P., 1997, *Articulatory strengthening at edges of prosodic domains*, *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 3728-3740.
- [8] Fougeron, C. 1998. *Variations articulatoires en début de constituants prosodiques de différents niveaux en français*. PhD dissertation, Université de Paris 3.
- [9] Fougeron, C. 2001. *Articulatory properties of initial segments in several prosodic constituents in French*. *Journal of phonetics*, 26, 45-69.



**Figure 1:** F2, F3 and F3-F2 values for /i/, /y/, /e/ and /ø/ for each speakers in IP, AP and Wd prosodic conditions (Hz).



**Figure 2:** F1 values for /a/, /e/ and /i/ for all speakers in IP, AP and Wd prosodic conditions (Hz).

# Variations de la configuration labiale des voyelles /i, y, a/ : effets de la position prosodique et du locuteur

Laurianne Georgeton<sup>1</sup> Nicolas Audibert<sup>1,2</sup>

(1) LPP, UMR 7018, 75005 Paris

(2) LIMSI, UPR3251, 91403 Orsay Cedex

laurianne.georgeton@univ-paris3.fr, nicolas.audibert@gmail.com

## RESUME

---

L'objectif de cette étude est d'observer la configuration labiale des voyelles /i, y, a/ à partir de mesures prises sur les contours interne et externe des lèvres. Les variations de configuration labiale en fonction des voyelles, des locuteurs et de la position prosodique de la voyelle sont aussi bien capturées par les contours internes et externes pour les mesures d'aire et le facteur K2 (forme du contour), alors que les distances verticale et horizontale dépendent du contour étudié. Les variations entre locuteurs s'observent d'avantage sur le contour externe comme attendu et les variations induites par la position prosodique sont reflétées avec une plus grande précision sur le contour interne.

## ABSTRACT

---

Variations in the labial configuration of the French vowels /i, y, a/ are observed on measurements derived from the external and internal contour of the lips. Articulatory variations according to vowel type, speakers and prosodic position of the vowel are equally captured by the internal and external contours for area measures and K2 factor (shape), but not for vertical and horizontal distances. Inter-speakers differences are best captured by measurements on the external contour as expected, while prosodically induced variations are reflected with more precisions on the internal contour.

MOTS-CLES : voyelles, articulation labiale, variabilités

KEYWORDS : vowels, labial articulation, variability

---

## 1 Introduction

Les lèvres et leurs configurations ont été largement étudiées en français et dans d'autres langues, car elles constituent un des articulateurs de la parole les plus accessibles à la mesure (Fromkin, 1964, Abry et Boë, 1980, Reveret 1999). Les différentes études sur la labialité montrent que les paramètres les plus déterminants pour mesurer les variations d'articulation labiale correspondent aux trois degrés de liberté physiologique des lèvres : l'écartement horizontal, l'espace vertical et la protrusion (Fromkin, 64, Ladefoged 79, Abry et Boe, 1980). L'étude du contour des lèvres (interne ou externe) permet d'étudier les contrastes entre voyelles. Pour le contraste d'arrondissement en français des paires /i, y/ et /e, ø/, l'aire aux lèvres sépare à 100% les voyelles arrondies des non-arrondies (Grailliot et al 1980). L'écartement horizontal (distance H) est également un bon discriminant alors que l'espace vertical (distance V) permet la distinction des voyelles /i/-/y/ et /e, ø/ mais son pouvoir discriminant dépend du locuteur (Abry et Boe, 1980). Le facteur K2, rapport de l'écartement horizontal sur l'espace vertical, est également considéré comme pertinent et permet d'évaluer la forme du contour inter-labial (plus ou moins arrondi) indépendamment de sa taille globale. Quand la valeur du facteur de

forme K2 est élevée, l'orifice labial est étiré (l'écartement horizontal est relativement important comparé à l'espace vertical), et quand il est faible, l'orifice labial est arrondi (Descout et al. 1980). En ce qui concerne la distinction entre voyelles non-arrondies d'aperture différente comme le couple /i, a/, les différences de configurations labiales n'impliquent pas uniquement une augmentation de l'espace vertical mais aussi un resserrement sur le plan horizontal. Ces études se sont avant tout intéressées aux paramètres inter-labiaux, d'autres se sont basées sur des mesures prises sur le contour externe des lèvres. C'est le cas de l'étude de Robert et al. (2005) sur les stratégies de coarticulation labiale. Les auteurs montrent que la distance entre les 2 commissures externes est directement liée aux mouvements d'étirement des lèvres permettant une distinction entre les voyelles /i, a/ sans distinction de la paire /a, y/.

A notre connaissance, aucune étude n'a directement comparé les informations recueillies sur le contour externe par rapport au contour interne des lèvres. C'est l'objectif de notre étude. Outre la distinction entre voyelles présentant des configurations différentes, les qualités des informations recueillies sur les deux contours interne et externe seront comparées quant à leur potentiel à rendre compte de variations entre locuteurs et de variations d'articulation labiale liées à la prosodie (position prosodique).

Dans son étude sur les variations individuelles, Zerling (1990) conclut que les paramètres labiaux varient fortement en fonction du locuteur, du sexe, probablement de la langue parlée, du son émis et de son contexte. Sur la production d'un ensemble de phrases par 4 locuteurs, il montre qu'« une même suite phonémique peut être articulée par 3 ou 4 séquences articulatoires différentes ». Pour un locuteur, la coarticulation se manifeste surtout par l'enchaînement des sons avec une grande mobilité des articulateurs labiaux. Chez un autre, l'amplitude des variations peut s'avérer plus faible, voir parfois nulle pour certains paramètres (distances H et V). La diversité articulatoire individuelle peut concerner également la forme de l'espace inter-labial (représenté par l'aire inter-labial ou le facteur K2). La présence de stratégies individuelles dans le mouvement des lèvres pour la réalisation de voyelles dans des syllabes initiales de mot apparaît également dans l'étude de Gendrot (2005). Il a, de plus, observé une influence de la position prosodique sur les paramètres labiaux (contour interne), mais sans trouver de distinction hiérarchique des constituants prosodiques. Une distinction entre positions est par contre observée dans l'étude acoustique de Georgeton et al. 2011, où la position prosodique influence les caractéristiques acoustiques du contraste d'arrondissement (F2, F3, F3-F2) et du contraste d'ouverture (F1) des voyelles, avec un renforcement en position prosodique haute.

Compte tenu de ces observations, notre question ici est de savoir si les contours interne et externe permettent de rendre compte des mêmes variations de configuration labiale entre voyelles, locuteurs et positions prosodiques.

## **2 Matériel et méthode**

### **2.1 Mesures articulatoires**

Les données sur les contours interne et externe des lèvres ont été acquises avec deux types de matériels. Pour le contour externe, un système de capture de mouvements



(Qualisys) a permis à l'aide de 4 caméras infrarouge de détecter et d'enregistrer (fréquence d'échantillonnage de 100Hz) la position de marqueurs réfléchissants. Quatre marqueurs de 4mm ont été placés sur le contour externe des lèvres comme illustré sur l'image 1 (en rouge) aux commissures droite et gauche et au milieu des lèvres supérieures et inférieures en projection de l'arc de cupidon. Le logiciel QTM, dédié à l'analyse des données Qualisys, permet de faciliter l'identification des différents marqueurs et d'exporter les données prétraitées pour leur analyse dans Matlab. Un enregistrement audio effectué avec un micro-casque Shure SM 10A a été couplé à l'acquisition de la position des marqueurs. Pour le contour interne, un enregistrement vidéo a été effectué simultanément à l'acquisition Qualisys à l'aide d'une caméra Sony DCR PC8 (fréquence d'échantillonnage de 25Hz), placée en face du locuteur à la hauteur de son visage. Les données Qualisys et vidéo ont été alignées a posteriori par l'appariement du signal audio issu du microphone interne de la caméra vidéo et du signal audio issu de Qualisys. Pour cela, un point de synchronisation a été repéré sur les enregistrements audio issus de la vidéo et de Qualisys. Les images extraites de la vidéo ont ensuite été sélectionnées et annotées manuellement à l'aide de Matlab. Quatre points ont été annotés manuellement sur chacune des trames vidéo sur la surface interne des lèvres : aux commissures des lèvres gauche et droite, au milieu des lèvres inférieure et supérieure. Comme illustré sur l'image 1, ces 2 derniers points, moins évidents à spécifier que les commissures, ont été repérés en suivant une ligne passant par les marqueurs du Qualisys. Un script Praat a ensuite permis d'extraire l'aire du polygone, la distance horizontale (distance H) et verticale (distance V) à partir des points mesurés sur la vidéo pour les mesures du contour interne des lèvres (exprimés en pixels) et à partir des coordonnées des marqueurs Qualisys pour le contour externe des lèvres (exprimés en millimètres). Ces mesures ont été prises au milieu acoustique de la voyelle.

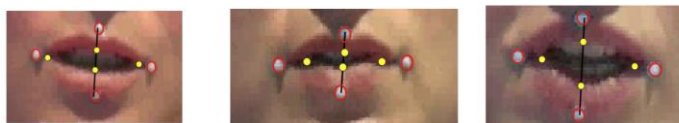


Image 1: Positions des marqueurs Qualisys en rouge et points annotés de la vidéo, pour l'ensemble des locuteurs (loca à gauche, loccf au milieu et loccv à droite).

## 2.2 Corpus

La réalisation de trois voyelles /i, y, a/ est étudiée dans trois positions prosodiques différentes et pour 3 locuteurs. Les voyelles cibles (V2) apparaissent dans des séquences V1C1#V2C2 où la voyelle V2 /i, a, y/ est insérée dans des phrases de façon à être en position initiale absolue dans trois types de constituants prosodiques différents : groupe intonatif, groupe accentuel et mot. La voyelle V1 est toujours une voyelle /i/ et les consonnes C1 et C2 sont des consonnes /p/. Chaque phrase a été prononcée 2 fois de façon consécutive dans un débit normal lors de huit répétitions. Trois locutrices âgées de 25 à 40 ans (sans accent régional identifiable) ont lu ces phrases dans un ordre aléatoire.

Nous avons exclu de l'analyse des répétitions pour lesquelles des problèmes d'enregistrement ont provoqués un alignement non fiable entre les 2 systèmes. Un total de 306 voyelles a été étudié (104 /a/, 100 /i/ et 102 /y/). 16 répétitions ambiguës d'un

point de vue prosodique ont été exclues. Des ANOVAs à un facteur ('voyelle', 'locuteur', et 'position prosodique') ont été effectués pour cette étude. Dans les sections 3 et 5, seuls les résultats des tests effectués tous locuteurs confondus seront présentés en détail, mais les distinctions notables entre locuteurs (issus des tests par locuteur) seront mentionnées.

### 3 Distinctions entre voyelles /i, y, a/ en fonction des contours labiaux

Le tableau 1 présente l'effet du facteur « voyelle » sur les 4 mesures effectuées (tous locuteurs et positions confondus) pour l'analyse du contour externe (données Qualisys, CE) et l'analyse du contour interne (données vidéo, CI) :

aire (CE)	distance H (CE)	distance V (CE)	K2 (CE)
F (2,287) = 78 **	F (2,287) = 151 **	F (2,287) = 53 **	F (2,287) = 48,5 **
/a/ > /i/ > /y/ **	/i/ > /a/ > /y/ **	/a/ > /y/ > /i/ **	/i/ > /y/ > /a/ **
aire (CI)	distance H (CI)	distance V (CI)	K2 (CI)
F (2,287) = 113 **	F (2,287) = 166 **	F (2,287) = 79 **	F (2,287) = 18 **
/a/ > /i/ > /y/ **			/i/ > /y/, /a/ **

Tableau 1 : Effet du facteur « voyelle » sur les valeurs de l'aire, les distances H, V et le facteur K pour les analyses du contour externe CE et contour interne CI. Test post-hoc de Fisher (\*\* :  $p < 0,001$ , \* :  $p < 0,05$ )

Nous observons un effet de la voyelle sur toutes les mesures du contour interne et externe et une même tendance hiérarchique entre voyelles pour les valeurs d'aire et K2. Pour les deux contours, le contraste entre les 3 voyelles est caractérisé par une valeur d'aire décroissante entre /a/, /i/ et /y/. Pour le facteur K2, les valeurs sont plus élevées pour la voyelle /i/ que pour les autres voyelles /y/ et /a/, mais la distinction entre /y/ et /a/ est perdue sur le contour interne (et un des locuteurs (locf) ne différencie que /i/ > /y/). Cette valeur élevée du facteur de forme K2 reflète l'éirement de /i/ avec un écartement horizontal plus important que l'espace vertical. Le facteur K2 ne distingue pas les voyelles /a/ (K2=4.4) et /y/ (K2=4.5). Ce facteur demeure intéressant à observer, mais il doit être appréhendé avec précaution car il peut adopter en fonction de l'écartement horizontal des valeurs absolument identiques pour des arrondies telle que /y/ et des non-arrondies comme /a/. La distinction phonologique [+/- rond] s'observe par une plus grande distance horizontale pour les voyelles non-arrondies, mais surtout par le facteur K2.

L'observation des distances horizontales et verticales des deux contours montre une organisation différente des voyelles comme l'illustre la figure 1. Sur le contour interne, les distances H et V suivent les mêmes tendances que l'aire (/a/ > /i/ > /y/) alors que sur le contour externe, la voyelle /i/ montre une distance horizontale plus élevée et une distance verticale moins élevée que les autres voyelles.

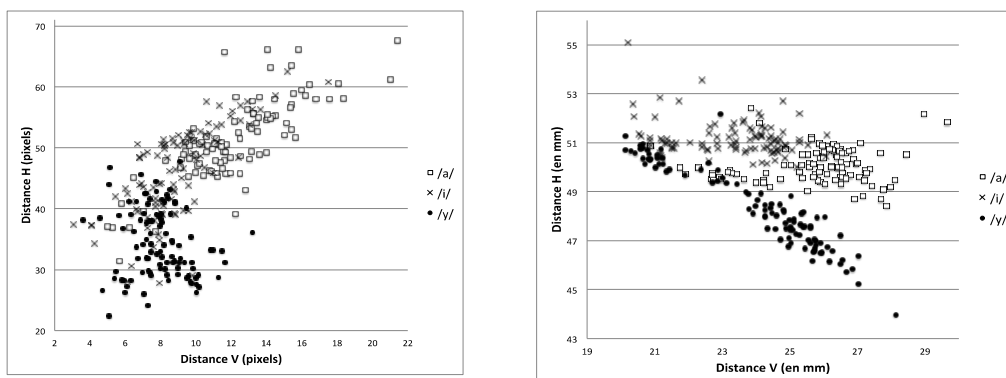


Figure 1 : Distribution des voyelles /a, i, y/ dans un plan distance H/ distance V, pour les mesures du contour interne à gauche et du contour externe à droite (tous locuteurs et positions prosodiques confondus).

#### 4 Variations entre locuteurs en fonction des contours labiaux

aire (CE)	distance H (CE)	distance V (CE)	K2 (CE)
F (2,287)= 94 **	F (2,287)= 7 **	F (2,287)= 102 **	F (2,287)= 87 **
loccf ≠ loca, loccv	loccf ≠ loca	loccf ≠ loca ≠ loccv	
aire (CI)	distance H (CI)	distance V (CI)	K2 (CI)
F (2,287)= 8 **	F (2,287)= 2 ns	F (2,287)= 17 **	F (2,303)= 20 **
loccv ≠ loccf, loca	ns	loccf ≠ loca, loccv	

Tableau 2 : Effet du facteur « locuteur » sur les valeurs de l'aire, les distances H, V et le facteur K2 du contour externe (CE) et du contour interne (CI). Test post-hoc de fisher.

Niveau de significativité \*\*  $p < 0,001$ , \*  $p < 0,05$ , ns = non-significatif.

Nous observons un effet du « locuteur » sur l'ensemble des mesures des deux contours, excepté pour la distance horizontale du contour interne. Ces différences individuelles sont généralement portées par un locuteur qui se distingue de l'un ou des deux autres. Le locuteur loccf est celui qui semble le plus se distinguer des deux autres sur les deux contours. Mais le locuteur loccv se distingue également des autres locuteurs sur l'aire du contour interne. La distance horizontale ne semble pas être un bon discriminant pour distinguer les contours labiaux des locuteurs. L'aire et le facteur K2 étant également liés à la distance V, il est probable que ces effets soient portés par les variations de distance verticale entre locuteurs comme le montre la figure 2. Nous pouvons y voir que l'étendue de réalisation de la voyelle /a/ suivant les locuteurs est plus large pour le contour externe (à droite) qu'interne (à gauche), avec une variabilité inter-locuteurs importante sur la distance verticale.

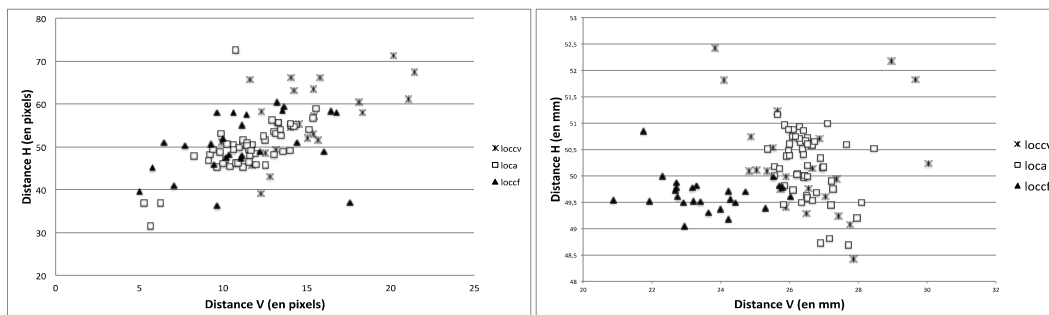


Figure 2 : Distribution des réalisations de la voyelle /a/ par les 3 locuteurs dans un plan distance H/ distance V, pour les mesures du contour interne à gauche et du contour externe à droite (toutes positions prosodiques confondues).

## 5 Variations prosodiques en fonction des contours labiaux

Le tableau 4 présente l'effet de la « position prosodique » sur l'articulation labiale des voyelles tous locuteurs et voyelles confondues. L'hypothèse est que la position prosodique influence l'articulation labiale des segments. Nous cherchons donc à vérifier si les contours internes et externes reflètent les mêmes variations en fonction de la position prosodique, et éventuellement si les variations suivent la hiérarchie prosodique (comme observé acoustiquement par Georgeton et al., 2011).

aire (CE)	distance H (CE)	distance V (CE)	K2 (CE)
F (2,287)= 4 *	F (2,287)= 0,4 ns	F (2,287)= 4 **	F (2,287)= 4 **
GI > W *	ns	GI > GA, W **	GI > GA, W **
aire (CI)	distance H (CI)	distance V (CI)	K2 (CI)
F (2,287)= 25 **	F (2,287)= 15 **	F (2,287)= 23 **	F (2,287)= 6 **
GI > GA, W **	GI > GA, W **	GI > GA > W **	GI, GA < W *

Tableau 3 : Effet du facteur « position prosodique » sur les valeurs de l'aire, les distances H, V et le facteur K du contour externe (CE) et du contour interne (CI). Test post-hoc de Fisher. Niveau de significativité \*\*  $p < 0,001$ , \*  $p < 0,05$ , ns = non-significatif.

Les mesures prises sur le contour interne et sur le contour externe des lèvres mettent en évidence un effet de la position prosodique sur l'articulation des voyelles, avec des variations articulatoires qui suivent la hiérarchie prosodique, et ceci pour tous les paramètres mesurés (aire, distances H et V, facteur K2). Pour autant, il apparaît que les mesures prises sur le contour interne des lèvres permettent plus de distinctions entre positions prosodiques. En effet, les trois positions GI, GA, W se distinguent entre elles (en 2 ou 3 catégories) sur les 4 mesures prises sur le contour interne, alors que sur le contour externe l'aire aux lèvres ne distingue que GI de W, et aucune distinction n'apparaît pour la distance H. Les variations articulatoires observées en position GA, qui sont proches des positions GI ou W en fonction des mesures, ne sont pas capturées pour les mesures de distance H et d'aire pour le contour externe.

## 6 Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux variations de la configuration labiale des voyelles /i, y, a/ telles qu'elles peuvent être capturées par des mesures effectuées sur le contour interne et le contour externe des lèvres. L'observation des résultats nous montre que la variation d'aire aux lèvres et de K2 liée à la nature de la voyelle (/a, i, y/) est aussi bien capturée sur le contour externe qu'interne. En revanche, les mesures extraites du contour externe ne rendent compte que partiellement de la variation entre locuteurs et entre positions prosodiques, comparativement à celles prises sur le contour interne.

Les observations du contour des lèvres ont été le plus souvent faites sur des comparaisons par paires de voyelle. Comme dans les études de Graillot et al. (1980) et Abry et Boë (1980), nous avons montré que l'aire et la distance H permettent de bien distinguer les voyelles /i-y/ et cette distinction a été montrée à la fois sur le contour interne et externe. Cependant, nous observons une incongruité entre les deux contours pour la distance verticale où /i/ > /y/ pour CI et /i/ < /y/ pour CE. Cette différence entre les contours peut être le reflet des variations individuelles montrées dans l'étude de Descout et al. (1980), faisant de la distance V un mauvais discriminant pour la distinction des voyelles arrondies et non arrondies. Pour le couple /i, a/, nous retrouvons les mêmes conclusions que Descout et al. (1980) avec une augmentation de l'espace vertical (pour les deux contours) et une diminution sur le plan horizontal lors du passage de /i/ à /a/ (pour le contour externe). Mais sur le contour interne, nous observons des valeurs plus élevées de la distance H pour la voyelle /a/. Cette différence peut être expliquée par la relative stabilité de la distance H sur ces voyelles. En effet, l'étude de Zerling (1990) a montré que l'écartement horizontal du contour interne bien qu'en partie fonction de l'espace vertical, est trois fois plus stable pour tous les locuteurs, reflétant ainsi plus fidèlement la configuration réelle de l'orifice. Cette stabilité est également observable dans nos données, puisque nous ne trouvons pas de différences entre les locuteurs pour la distance H (sur le contour interne). Enfin, contrairement à Robert et al. (2005) nous observons une distinction entre les voyelles /a/ et /y/ ( $p < 0,001$ ) sur la distance H. La voyelle /y/ montre toujours le plus petit étirement/resserrement, pour les deux types de contours.

Cette étude confirme également qu'il existe une variabilité entre locuteurs, particulièrement sur les mesures d'aire, de K2 et de distance V, sur les deux contours. Ces différences individuelles sont portées par un locuteur qui se distingue des 2 autres excepté sur la distance V et K2 du contour externe où chaque locuteur se distingue l'un de l'autre. Ces dernières mesures semblent donc mieux refléter les différences individuelles comme la forme des lèvres (sur la figure 1, les locuteurs loca et loccf montrent des lèvres plus fines que loccv), ou comme la position des marqueurs (sur la figure 1, le marqueur Qualisys placé sur l'arc de cupidon du locuteur loccf semble assez proche de l'annotation faite sur le contour interne, or ce n'est pas le cas pour les deux autres locuteurs). Ces éléments soulignent également l'importance d'effectuer une normalisation des paramètres labiaux sur des facteurs robustes comme K2 et l'aire interlabial (Boë et Abry, 1980).

Enfin, nous observons un effet de la position prosodique sur les contours interne et

externe. Le contour interne semble distinguer l'ensemble des positions prosodiques, ce qui n'est pas le cas du contour externe. Si le traitement de la vidéo est un traitement coûteux car manuel et effectué a posteriori (contrairement à l'utilisation des marqueurs Qualisys dont les coordonnées sont extraites de façon automatique), il permet donc d'obtenir des mesures labiales qui s'avèrent plus à même de rendre compte de phénomènes articulatoires fins comme la distinction entre positions prosodiques.

## Remerciements

Merci à Cécile Fougeron pour ses relectures et conseils avisés. Merci également à nos gentils locuteurs qui ont permis de mener à bien cette étude.

## Références

ABRY C., BOE L-J. (1980) : *Labialité et Phonétique. Données fondamentales et études expérimentales sur la géométrie et la motricité labiales*, Publications de l'Université des langues et lettre de Grenoble.

ABRY C., BOE L-J. (1980) : À la recherche de corrélats géométriques discriminants pour l'opposition d'arrondissement vocalique en français. In (Abry et Boe 1980), pages 217-238

BOE L-J., ABRY C. et CORSI P. (1980) : Les problèmes de normalisation interlocuteurs. Application à la géométrie des lèvres. In (Abry et Boe 1980), pages 161-180

DESCOUT R., BOË J-L, ABRY C. (1980) : Labialité vocalique et labialité consonantique. Un jeu des lèvres au féminin : l'idiolecte D.L. In (Abry et Boe 1980), pages 111-126

FROMKIN V. (1964). Lip positions in American English Vowels. *Language and Speech*, 7, 215-225.

GENDROT C. (2005) : *Aspects perceptifs, physiologiques et acoustiques de différentes catégories prosodiques en français*. Thèse d'état Université Paris 3/ Sorbonne Nouvelle.

GEORGETON L., AUDIBERT N., FOUGERON C. (2011). Rounding and height contrast at the beginning of different prosodic constituents in French. In *Actes ICPhS 2011*, Hong-Kong.

GRAILLOT P., BOE L-J., GENTIL M. (1980): Analyse des correspondances de paramètres descriptifs du jeu des lèvres en français. In (Abry et Boe 1980), pages 127-146.

LADEFOGED P. (1979). Articulatory parameters. Status Report. In *Actes 9<sup>th</sup> ICPhS*, Copenhagen, Danmark, 41-47.

ZERLING J-P. (1990) : *Aspects articulatoires de la labialité vocalique en français. Contribution à la modélisation à partir de labio-photographies, labiofilms et films radiologiques. Étude statique, dynamique et contrastive*. Thèse d'état. Strasbourg.

REVERET L. (1999) : *Conception et évaluation d'un système de suivi automatique des gestes labiaux en parole*. Thèse de l'INPG, Grenoble, France.

ROBERT V., WROBEL-DAUTCOURT B., LAPRIE Y., BONNEAU A. (2005). Strategies of labial coarticulation. In *Actes Interspeech 2005*, Lisbonne, Portugal.

# Mesures de protrusion par capture optique de mouvements : quelle métrique est la plus représentative de l'opposition d'arrondissement en français ?

Georgeton Laurianne<sup>1</sup> Audibert Nicolas<sup>1</sup>

(1) Laboratoire de Phonétique et de Phonologie (UMR 7018)  
19 rue des Bernardins - 75005 Paris

{laurianne.georgeton, nicolas.audibert}@univ-paris3.fr

---

## RESUME

Le but de cette étude est d'évaluer laquelle des trois mesures de protrusion relevées dans la littérature (l'avancement de la lèvre inférieure, celui de la lèvre supérieure ou celui des commissures) rend le mieux compte de l'implémentation du trait d'arrondissement en français. 491 voyelles orales antérieures arrondies et non-arrondies ont été produites en contexte par 3 locutrices du français standard équipées du dispositif sans fil de capture optique de mouvements Qualisys pour l'obtention de mesures d'articulation labiale. La comparaison des voyelles antérieures arrondies vs. non-arrondies sur ces 3 mesures et leur mise en correspondance avec les variations des formants F3 et F2 montrent que l'avancement des commissures est la mesure la plus représentative de l'opposition d'arrondissement, mais qu'aucune mesure de protrusion ne discrimine l'opposition [±arrondi] des voyelles /ɛ/ et /œ/.

---

## ABSTRACT

**Protrusion measurements using optical motion capture: which metric is the most representative of the rounding feature in French?**

The aim of this study is to evaluate which of the three protrusion measurements used in the literature (forwarding of the lower lip, the upper lip or the lips corners) better accounts for the implementation of the rounding feature in French. 491 front rounded and unrounded vowels were produced in context by 3 female speakers of standard French, equipped with the wireless optical motion capture system Qualisys to get labial articulation measurements. The comparison of rounded vs. unrounded front vowels using the 3 possible measurements and their link with variations of formants F3 and F2 show that the forwarding of lip corners best accounts for the rounding opposition. However, no protrusion measure accounts for the [±round] opposition in vowels /ɛ/ and /œ/.

---

MOTS-CLES : labialité, protrusion, capture de mouvements, voyelles, arrondissement  
KEYWORDS: labiality, protrusion, motion capture, vowels, rounding

---

## 1 Introduction

Les études qui se sont intéressées à la distinction des voyelles selon les mesures labiales ont mis en évidence trois paramètres essentiels, correspondant aux trois degrés de liberté physiologiques des lèvres proposés par Ladefoged (1979) : l'aperture, l'étirement et la protrusion. Cette étude s'intéresse particulièrement à la protrusion et à sa mesure. Ce paramètre peut être définie comme « *une poussée des lèvres vers l'avant, se traduisant par le rapprochement à la fois du milieu des lèvres (plan vertical) et des commissures (plan horizontal)* » (Abry et al. 1980, p 44). Dans la littérature, trois mesures ont le plus souvent été considérées: (i) le déplacement en avant de la lèvre supérieure (Upper Lip : UL), (ii) le déplacement en avant de la lèvre inférieure (Lower Lip : LL) et (iii) le déplacement en avant de la commissure des lèvres (mesure similaire à la distance C utilisée dans Abry et Boë, 1980). Après les travaux pionniers sur l'anglais américain, de nombreux travaux ont porté sur des langues dans lesquelles certaines voyelles ne s'opposent que par l'arrondissement, telles que le français et le suédois (Lubker & Gay, 1982). Dans cette étude, nous cherchons à comparer la capacité de ces mesures à rendre compte du contraste d'arrondissement en français pour les voyelles antérieures. Nous esquissons ci-dessous un tableau des principaux usages de ces trois mesures de protrusion dans la littérature.

(LL) Fromkin (1964) conclut que la protrusion est principalement réalisée par l'avancement de la lèvre inférieure, à partir de mesures des distances entre dents et lèvres extraites de données radiographiques et de moulages labiaux. En effet, la variabilité de ces mesures est plus importante pour la lèvre inférieure que pour la lèvre supérieure. L'auteur souligne également que, bien que l'avancement de la lèvre inférieure résulte fréquemment du rapprochement des lèvres ou du mouvement mandibulaire (comme montré également par Folkins & Abbs, 1975), il est également possible de projeter les lèvres vers l'avant indépendamment de l'aperture.

(C) L'étude d'Abry et Boë (1980) montre que seule la mesure liée au mouvement de la commissure permet de séparer les voyelles non-arrondies (/i-e/) des voyelles arrondies (/y-ø/). Cependant, cette distinction n'est observée pour un locuteur sur cinq testés. Les auteurs soulignent également que pour opérer une séparation complète entre l'espace de réalisation des voyelles arrondies vs. non-arrondies, il est nécessaire de prendre en compte l'écartement labial en complément de la protrusion. À partir de résultats d'une analyse en composante principale, Robert et al. (2007) concluent que le mouvement de protrusion est dans une aussi large mesure associé aux mouvements des commissures qu'à ceux des lèvres inférieure et supérieure, et choisissent d'intégrer la position des commissures ainsi que celle de LL et UL dans la mesure de protrusion qu'ils retiennent pour étudier la coarticulation labiale.

(UL) L'avancement de la lèvre supérieure a été retenu comme mesure de protrusion dans diverses études cherchant à caractériser des mouvements articuloire fins comme ceux induits par la prosodie articuloire ou l'expression émotionnelle. Les résultats ne sont pas uniformes. En position finale de frontière prosodique, la voyelle /u/ montre une protrusion plus élevée (Tabain et Perrier, 2007). Pour les études portant sur l'articulation des syllabes focalisées, les résultats de Dohen et al. (2006, 2009) montrent un effet fort de la protrusion alors qu'aucun effet n'est observé dans



les travaux de Ménard et al. (2013). Nordstrand et al. (2004), montrent dans leur étude des modification articulaires induite par des expressions émotionnelles en suédois que la mesure d'avancement de la lèvre supérieure permet de regrouper les voyelles arrondies d'une part et les voyelles non-arrondies d'autre part.

Les données analysées dans cette étude s'inscrivent dans un cadre de recherche doctorale sur l'influence de la position initiale de constituants prosodiques sur la réalisation (labiale et acoustique) des voyelles du français (Georgeton & Fougeron, sous presse). Pour observer l'effet de la position prosodique sur la protrusion des voyelles du français, nous avons cherché à établir quelle mesure permettait de refléter le plus fidèlement les mouvements de protrusion. Constatant une certaine hétérogénéité dans la littérature, nous avons alors cherché à déterminer laquelle des trois mesures possibles de protrusion labiale rend le mieux compte de l'opposition d'arrondissement dans nos données. A notre connaissance, seule l'étude d'Abry et Boë a directement comparé la capacité de discrimination des voyelles antérieures arrondies vs. non-arrondies de ces trois mesures, sans toutefois inclure la paire / $\epsilon$ - $\text{œ}$ /.

Nous comparons tout d'abord le potentiel de discrimination entre voyelles antérieures des différentes métriques proposées. Nous évaluons ensuite dans quelle proportion ces mesures de protrusion rendent compte des corrélats acoustiques des différences articulaires entre voyelles antérieures non-arrondies et arrondies.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Corpus

Afin de pouvoir étudier les variations de protrusion par paire de voyelles, les séries de voyelles suivantes ont été considérées /i, e,  $\epsilon$ / et /y, o,  $\text{œ}$ /. Les voyelles cibles Vc apparaissent dans des séquences VC<sub>1</sub>#V<sub>c</sub>C<sub>2</sub> où V<sub>c</sub>= /i, e,  $\epsilon$ / /y, o,  $\text{œ}$ /, V= /i/, C<sub>1</sub>= /p/ et C<sub>2</sub>= /p/ excepté pour les voyelles mi-ouvertes / $\epsilon$ /, / $\text{œ}$ / et / $\text{o}$ / pour lesquelles la consonne suivante C<sub>2</sub> est respectivement /v/, /f/ et /ʁ/ afin de respecter les contraintes phonotactiques du français (Georgeton & Fougeron, sous presse).

Quatre locutrices de 25 à 40 ans sans accent régional identifiable ont lu un total de 16 exemplaires de chaque énoncé dans un ordre aléatoire. Suite à un dysfonctionnement du système d'acquisition, les données de l'une des locutrices, en quantité trop faible, ont été éliminées de l'analyse. Toutes locutrices confondues, nous obtenons un ensemble de 491 énoncés répartis comme indiqué dans la Table 1.

	/i/	/e/	/ $\epsilon$ /	/y/	/o/	/ $\text{œ}$ /	Total
S1	32	29	29	30	36	32	188
S2	28	28	26	30	22	28	162
S3	23	25	21	23	23	26	141
Total	83	82	76	83	81	86	491

Table 1 : Nombre de répétitions analysées par voyelle, en fonction de la locutrice.

## 2.2 Acquisition des données

Le système Qualisys a été utilisé pour suivre les trajectoires d'un total de 13 marqueurs, au moyen de 4 émetteurs/récepteurs infra-rouge disposés autour de la locutrice. Comme illustré sur la figure 1, les quatre marqueurs retenus dans cette étude sont les suivants : les commissures des lèvres (droite et gauche), sur la lèvre supérieure au niveau de l'arc de cupidon sur le bord vermillon et à l'opposé sur la lèvre inférieure. Les marqueurs de référence positionnés en des points fixes (casque et arête du nez) permettent de compenser les mouvements de la tête du locuteur. Afin d'extraire le déplacement des marqueurs situés sur les lèvres, l'ensemble des données a été normalisé par rapport à ces six points de référence.

Un enregistrement audio effectué avec un micro-casque Shure SM 10A a été couplé à l'acquisition de la position des marqueurs. Afin de permettre la mise en correspondance de ces données, le système Qualisys enregistre de façon synchrone au flux audio un signal de synchronisation (trigger) présentant un front descendant à chaque instant correspondant à l'acquisition d'une mesure Qualisys.

## 2.3 Segmentation et analyse acoustique des voyelles analysées

Les voyelles cibles  $V_C$  (/i, e, ε, y, o, œ/) ont été segmentées avec Praat à partir du signal audio. Les limites acoustiques des voyelles ont été fixées d'après le début et la fin du second formant sur les spectrogrammes. Les valeurs des formants représentent la valeur moyenne entre le premier et le deuxième tiers de la voyelle. La détection a été effectuée grâce à l'algorithme de Burg implémenté dans le logiciel Praat (Boersma & Weenink, 2013). Les valeurs aberrantes des formants ont ensuite été corrigées en déterminant les valeurs correctes par inspection visuelle des spectrogrammes.

### 2.4 Extraction des mesures de protrusion $P_{UL}$ , $P_{LL}$ et $P_C$

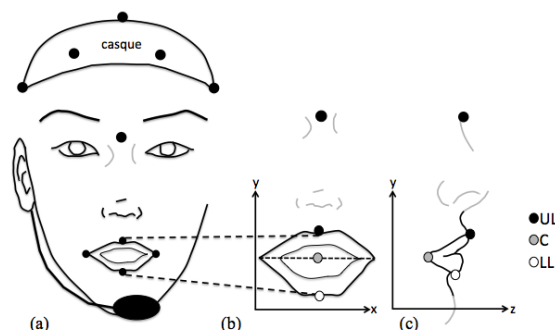


Figure 1 : En (a), schéma de la disposition des marqueurs Qualisys sur le contour externe des lèvres. En (b), représentation de face et en (c), représentation de profil des marqueurs situés sur la lèvre supérieure (UL, en noir), sur la lèvre inférieure (LL, en blanc) et sur la commissure (C, en gris).

Comme illustré sur la figure 2, les trois mesures considérées sont calculées comme l'avancement respectif par rapport à un plan de référence perpendiculaire au plan sagittal et passant par l'arête du nez de trois marqueurs : UL situé sur la lèvre

supérieure, LL situé sur la lèvre inférieure, et le point C situé à équidistance des commissures gauche et droite. Les mesures  $P_{UL}$ ,  $P_{LL}$  et  $P_C$  correspondent donc à la distance sur l'axe z entre la référence et le point UL, LL ou C.

### 3 Résultats

Compte tenu de l'importante variabilité inter-locuteur relevée dans les analyses articulatoires précédemment réalisées sur nos données (Georgeton & Fougeron, sous presse), ainsi que dans les mesures de protrusion relevées dans la littérature (voir par exemple Abry et Boë, 1980, Dohen, 2005), nous présentons des analyses séparées par locuteur. En accord avec les résultats de Robert et al. (2007), les mesures de protrusion sont inter-corrélées pour tous les locuteurs, la corrélation la moins importante étant observée pour S3 entre les mesures PLL et PC ( $r=.9$ ).

#### 3.1 Distinction des voyelles antérieures selon les mesures de protrusion

Afin de prendre en compte les différences d'aperture entre les voyelles antérieures en complément des différences d'arrondissement, nous avons effectué pour chaque mesure de protrusion un test ANOVA à deux facteurs : arrondissement (2 niveaux : arrondies vs. non-arrondies) et aperture (3 niveaux : fermé, mi-fermé et mi-ouvert). La taille de l'effet mesurée par  $\eta^2$  donne une estimation de l'amplitude des différences entre groupes indépendamment de la taille de l'échantillon, et permet de comparer les différentes mesures et effets testés. Les résultats sont récapitulés dans la table 2.

Pour les trois paramètres de protrusion, les voyelles arrondies se distinguent des non-arrondies par une protrusion significativement plus élevée pour les locutrices S1 et S2. Cependant, pour la locutrice S3, seul l'avancement des commissures  $P_C$  distingue significativement les arrondies des non-arrondies. Pour les trois locutrices, la mesure  $P_C$  est celle pour laquelle l'amplitude des différences entre voyelles antérieures arrondies et non-arrondies est la plus importante, comme l'indique la comparaison des tailles d'effet pour le facteur arrondissement. L'avancement des commissures apparaît ainsi comme la mesure de protrusion la mieux à même de rendre compte de l'opposition entre voyelles antérieures arrondies et non-arrondies.

L'effet de l'aperture de la voyelle n'est significatif pour les trois locutrices qu'avec la mesure  $P_C$ . La comparaison de la taille de l'effet du degré d'aperture et de la taille de l'effet de l'arrondissement permet d'estimer pour chaque mesure de protrusion la proportion de la variabilité totale expliquée par chaque dimension articulatoire. Pour les trois locutrices, la mesure  $P_C$  est ainsi la moins sensible aux différences de degré d'aperture. Pour la locutrice S3, les trois mesures de protrusion se révèlent toutefois plus sensibles au degré d'aperture qu'à l'arrondissement.

L'interaction entre le degré d'aperture et l'arrondissement n'est significative que pour les mesures de protrusion  $P_{UL}$  et  $P_C$ , et uniquement pour la locutrice S1. Les comparaisons entre paires de voyelle de même aperture montrent que pour cette locutrice, ces deux mesures distinguent les voyelles non-arrondies /i/ et /e/ de leurs contreparties arrondies /y/ et /ø/ mais ne permettent pas de discriminer la paire / $\epsilon$ - $\alpha$ /. Les comparaisons par paire de voyelles de même aperture pour chaque locutrice,

indiquent que pour les locutrices S2 et S3, seule la mesure Pc distingue la seule paire /i-y/. Ces comparaisons sont illustrées par la figure 2 pour la mesure de protrusion Pc

		arrondissement	aperture	arr.*ap.
S1	P <sub>LL</sub>	F(1,182)=14 ** $\eta^2 = 7,2\%$	F(2,182)=0,1 ns $\eta^2 = 0,1\%$	F(2,182)=1 ns $\eta^2 = 1\%$
	P <sub>UL</sub>	F(1,182)=22 ** $\eta^2 = 9,5\%$	F(2,182)=8 ** $\eta^2 = 6,8\%$	F(2,182)=4 * $\eta^2 = 3,8\%$
	P <sub>C</sub>	F(1,182)=60 ** $\eta^2 = 23\%$	F(2,182)=5 * $\eta^2 = 3,8\%$	F(2,182)=5 * $\eta^2 = 3,7\%$
S2	P <sub>LL</sub>	F(1,156)=5 * $\eta^2 = 2,8\%$	F(2,156)=2 ns $\eta^2 = 2,6\%$	F(2,156)=1 ns $\eta^2 = 0,8\%$
	P <sub>UL</sub>	F(1,156)=7 * $\eta^2 = 4,3\%$	F(2,156)=3 ns $\eta^2 = 3,3\%$	F(2,156)=1 ns $\eta^2 = 1\%$
	P <sub>C</sub>	F(1,156)=17 ** $\eta^2 = 9,1\%$	F(2,156)=7 * $\eta^2 = 7\%$	F(2,156)=2 ns $\eta^2 = 2\%$
S3	P <sub>LL</sub>	F(1,135)=0,4 ns $\eta^2 = 0,2\%$	F(2,135)=10 ** $\eta^2 = 12,4\%$	F(2,135)=0,3 ns $\eta^2 = 0,4\%$
	P <sub>UL</sub>	F(1,135)=3 ns $\eta^2 = 1,8\%$	F(2,135)=7 ** $\eta^2 = 9,5\%$	F(2,135)=1 ns $\eta^2 = 1\%$
	P <sub>C</sub>	F(1,135)=7 * $\eta^2 = 4,2\%$	F(2,135)=7 * $\eta^2 = 8,9\%$	F(2,135)=2 ns $\eta^2 = 3\%$

Table 2 : Résultats des ANOVAs avec les facteurs 'arrondissement' et 'aperture', pour chaque locuteur et chaque mesure de protrusion : avancement de la lèvre supérieure (P<sub>UL</sub>), de la lèvre inférieure (P<sub>LL</sub>) et la commissure (P<sub>C</sub>). arr.\*ap. : interaction entre les facteurs. \* : p<.05 ; \*\* : p<.001 ; ns : non significatif.  $\eta^2$  : taille d'effet.

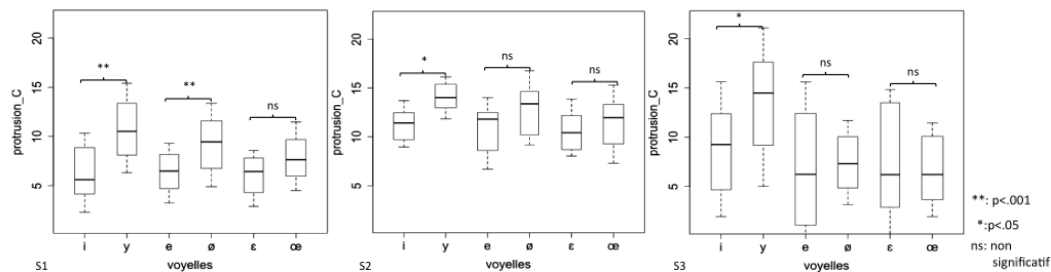


Figure 2 : Distribution des valeurs de protrusion P<sub>C</sub>, pour les paires /i-y/, /e-ø/ et /ɛ-œ/, et résultats des comparaisons post-hoc pour les locuteurs S1, S2 et S3.

### 3.2 Relation entre mesures de protrusion et formants pour le contraste [±arrondi]

Pour les voyelles antérieures, le mouvement de protrusion implique une baisse des

formants associés à la cavité antérieure, c'est-à-dire F2 mais également F3 (Vaissière, 2011). Les voyelles /i/ et /y/ sont également considérées comme des voyelles focales caractérisées par un rapprochement de formants (Vallée, 1994, Schwartz et al., 1997). Entre ces deux voyelles, la distance entre F3 et F2 sera maximale pour /y/ et maximale élevée pour /i/.

Les corrélations entre chaque mesure de protrusion et les mesures acoustiques F3, F2 et F3-F2 sont présentées dans la table 3, séparément pour chaque paire de voyelles antérieures de même aperture.

		P <sub>LL</sub>			P <sub>UL</sub>			P <sub>C</sub>		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
/i-y/	F2	-.3*	ns	ns	-.4**	ns	ns	-.6**	-.3*	-.3*
	F3	-.4*	-.3*	ns	-.5**	-.3*	ns	-.6**	-.5**	-.4*
	F3-F2	ns	-.3*	ns	ns	-.3*	ns	-.2**	-.5**	ns
/e-ø/	F2	-.3*	ns	ns	-.4*	ns	ns	-.5**	ns	ns
	F3	ns	ns	ns	-.3*	ns	ns	-.4*	ns	ns
/ε-œ/	F2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-.4*	ns	-.4*
	F3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-.3*	ns	.2*

Table 3 : Résultats des corrélations par paire de voyelles de même aperture entre les paramètres acoustiques F2, F3, F3-F2 et chacune des mesures articulaires : protrusion de la lèvre supérieure (P<sub>UL</sub>) de la lèvre inférieure (P<sub>LL</sub>) et de la commissure (P<sub>C</sub>) pour les paires /i-y/, /e-ø/ et /ε-œ/. \* : p<.05 ; \*\* : p<.001 ; ns (case grisée) : corrélation non-significative.

Les mesures acoustiques et les mesures de protrusion sont corrélées négativement montrant que, comme attendu, l'augmentation de la protrusion est associée à une diminution des valeurs de F2 et F3 (et de l'écart entre F2 et F3 pour la paire /i-y/) et vice-versa. Pour la paire /i-y/, les formants F2 et F3 sont significativement corrélés à la mesure P<sub>C</sub> pour les 3 locutrices (de -.3 à -.6 suivant la locutrice, comme indiqué dans la table 3). La mesure de protrusion la plus corrélée à F3-F2 pour la paire /i-y/ est P<sub>C</sub>, pour deux des locutrices. Pour la paire /e-ø/, les formants F2 et F3 ne sont significativement corrélés aux mesures de protrusion que pour la locutrice S1. Pour la paire /ε-œ/, seule P<sub>C</sub> est significativement corrélée à F2 et F3 pour deux des locutrices. De plus, quelque soit la locutrice et la mesure acoustique considérée, les corrélations les plus importantes sont observées pour la mesure P<sub>C</sub>.

## 4 Conclusions

Cette étude montre que parmi les trois mesures de protrusion (i) le déplacement en avant de la lèvre supérieure, (ii) le déplacement en avant de la lèvre inférieure et (iii) le déplacement en avant des commissures des lèvres, la mesure la plus à même de

rendre compte de la différence entre voyelles antérieures arrondies et non-arrondies du français dans nos données est l'avancement de la commissure des lèvres :  $P_C$ . Cette mesure est en effet la seule parmi les trois évaluées à permettre la distinction des voyelles [±arrondi] pour les trois locutrices, l'influence du degré d'aperture sur la protrusion étant moindre pour cette mesure que pour les deux autres mesures de protrusion testées. Pour expliquer la meilleure séparation entre voyelles arrondies et non-arrondies également opérée par la mesure  $P_C$  sur leurs données, Abry et Boë (1980) considèrent que le déplacement en avant de la commissure des lèvres reflète plus fidèlement le mouvement de protrusion que les autres mesures, en prenant mieux en compte la composante de rétraction. Notre étude montre que cette mesure permet également de mieux rendre compte des changements acoustiques attendus, c'est-à-dire l'abaissement des formants F3 et F2 dans les voyelles arrondies vs. non-arrondies (ainsi que la réduction de la distance focale F3-F2 dans le cas de la paire /i-y/), suggérant une meilleure prise en compte de l'allongement de la cavité antérieure.

Comme observé dans la plupart des études multi-locuteurs de l'articulation labiale (voir par exemple Abry et Boë, 1980, Dohen, 2005, ou sur les mêmes données Georgeton & Fougeron, sous presse), des différences interindividuelles de stratégies d'articulation labiale sont également observées dans cette étude : les mesures de protrusion  $P_{UL}$  et  $P_C$  ne distinguent /i/ de /y/ et /e/ de /ø/ que pour un locuteur sur trois. Ce résultat peut probablement s'expliquer largement par des différences anatomiques entre nos locutrices, susceptibles d'être amplifiées par le positionnement des marqueurs à l'extérieur du contour labial, qui pourraient ainsi lors de la réalisation du geste de protrusion ne refléter que partiellement les mouvements des lèvres et commissures elles-mêmes. L'analyse de données pour un plus grand nombre de locuteurs serait nécessaire avant de généraliser l'emploi de cette mesure. On ne peut toutefois exclure a priori que l'ampleur de la variabilité anatomique interindividuelle soit telle qu'elle ne permette pas de définir une mesure unique qui serait la plus représentative tous locuteurs confondus.

Notre étude a cherché à caractériser la mesure de protrusion la plus représentative du contraste d'arrondissement en français, en considérant l'ensemble des voyelles orales antérieures arrondies et leurs correspondantes non arrondies, tandis que la plupart des études s'intéressant à la protrusion se sont limitées à la paire /i-y/, parfois complétée par /e-ø/. Le contraste d'arrondissement apparaît comme variable selon le degré d'aperture, la protrusion labiale ne permettant pas de discriminer la paire /ε-œ/. Zerling (1990) classe les voyelles selon les paramètres d'aperture aux lèvres et d'étirement des lèvres à partir de données de 105 locuteurs et identifie trois groupes de voyelles du français, sans toutefois prendre en compte la protrusion : les voyelles /i, e, ε/ non-labialisées, la voyelle /œ/ labialisée et /y, ø/ fortement labialisées. Nos résultats suggèrent que seules les voyelles fortement labialisées dans la classification de Zerling (1990) se distinguent des autres voyelles antérieures par le geste de protrusion, avec un degré de labialisation intermédiaire pour la voyelle /ø/.

## Remerciements

Merci à Cécile Fougeron pour ses conseils avisés. Merci à nos gentilles locutrices.

## Références

- Abry, C. & Boë, L.-J. (1980). *A la recherche de corrélats géométriques discriminants pour l'opposition d'arrondissement vocalique en français*. In Abry, C., Boë, L.-J., Corsi, P., Descout, R., Gentil, M., & Graillot, P. *Labialité et phonétique. Données fondamentales et études expérimentales sur la géométrie et la motricité labiales*, 217-237. Publication de l'Université des Langues et Lettres de Grenoble.
- Boersma, P., & Weenink D. (2013). Praat: doing phonetics by computer (Version 5.3.56) [Téléchargé le 25 septembre 2013 depuis <http://www.praat.org/>].
- Dohen, M. (2005). *Deixis prosodique multisensorielle: production et perception audiovisuelle de focalisation contrastive en français*. Thèse de l'INP Grenoble.
- Folkins J. W. & Abbs J. H. (1975). Lip and jaw motor control during speech: responses to resistive loading of the jaw. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* (18), 207-220.
- Fromkin, V. (1964). Lip positions in American English vowels. *Language and Speech*, 7(3), 215-225.
- Georgeton L. & Fougeron C. (sous presse). Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: evidence from lip articulation and spectral variation. Special Issue: Dynamics of Articulation. *Journal of phonetics*.
- Ladefoged P. (1979). Articulatory parameters. Status report. In *Proceedings International Congress of Phonetic Science*, Copenhagen, Denmark, 41-47.
- Lubker, J. & Gay, T. (1982). Anticipatory labial coarticulation: experimental, biological and linguistic variables. *Journal of Acoustical Society of America*, 71(2), 437-448.
- Ménard L., Leclerc A., Tiede M., Prémont A., Turgeon C., Trudeau-Fisette P. & Côté D. (2013). Correlates of contrastive focus in congenitally blind adults and sighted adults. *14th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Lyon, France.
- Nordstrand M., Svanfeldt G., Granström B. & House D. (2004). Measurements of articulatory variation in expressive speech for a set of Swedish vowels. *Speech Communication* 44, 187-196.
- Robert V., Bonneau A., Wrobel-Dautcourt B. & Laprie Y. (2007). Prédiction phonétique de la coarticulation labiale. *Perturbations et réajustements: langue et langage*. Publications de L'université Marc Bloch, Strasbourg, 155-167.
- Schwartz, J.-L., Boë, L.-J., Vallée, N. & Abry C. (1997). The Dispersion-Focalization Theory of vowel systems. *Journal of Phonetics*, 25, 255-286.
- Vallée, N. (1994). *Systèmes vocaliques : de la typologie aux prédictions*, Thèse de l'Université Stendhal – Grenoble III.
- Vaissière J. (2011). On the acoustic and perceptual characterization of reference vowels in a crosslanguage perspective. In *Proceedings of the 17th international congress of phonetic sciences*, Hong-Kong, China. 52–59
- Zerling, J.-P. (1990). *Aspects articulatoires de la labialité vocalique en français. Contribution à la modélisation à partir de labio-photographies, labiofilms et films radiologiques. Etude statique, dynamique et contrastive*. Thèse de l'Université de Strasbourg II.







Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Phonetics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/phonetics](http://www.elsevier.com/locate/phonetics)

## Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation

L. Georgeton, C. Fougeron\*

Laboratoire de Phonétique et de Phonologie, UMR 7018, CNRS/Université Sorbonne Nouvelle - Paris 3, 19 rue des Bernardins, 75005 Paris, France

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 5 April 2013  
 Received in revised form  
 7 February 2014  
 Accepted 19 February 2014

## Keywords:

Initial strengthening  
 French  
 Vowel contrast  
 Labial articulation

## ABSTRACT

Domain-initial strengthening has primarily been studied for consonants. This paper examines whether vowels also undergo boundary-induced phonetic variation and questions how this effect interacts with phonological contrast in a dense vowel system such as that of French. The labial articulation and the acoustic properties of the 10 French oral vowels /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ are examined in Intonational Phrase-initial vs. Word-initial position. The vowels' phonetic properties are found to be affected by position but not in a uniform way. First, while all vowels are found to have a larger lip opening and width in IP-initial position, the effect is larger and more robust for unrounded vowels than rounded vowels leading to an enhanced distinction between vowels contrasting in rounding. No effect is found on lip protrusion. The distinction between these vowels is also found to be increased in IP-initial position by the enhancement of the spectral characteristics making unrounded vowels more 'unrounded-like' and – to a lesser degree – by the enhancement of the properties making rounded vowels more 'rounded-like'. The contrast between front and back vowels is also maximized by a tendency toward a higher  $F_2$  for front vowels and a lower  $F_2$  and  $F_2-F_1$  for back vowels. Open and mid-open vowels also tend toward a higher  $F_1$ . These results suggest that initial strengthening indeed contributes to maximizing phonetic contrasts between vowels in IP-initial position.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Over the years, many studies have shown that the prosodic organization of an utterance may affect the articulatory and acoustic realization of its segmental content (see Cho, 2011, for a recent review). Among the loci of prosodically driven segmental variations, we find edges of prosodic domains, initial and final positions, and prominent syllables, such as syllables under focus, phrasal accent or stress. The term "(prosodic) strengthening" has been used quite extensively in the literature to refer either to the phenomenon per se, i.e. the interaction between prosody and the segmental realization of sounds, and/or to the specific phonetic manifestations of the phenomenon. In this latter use, prosodic strengthening refers to the spatial and/or temporal expansion of articulatory gestures observed for segments in strong prosodic positions (pre- or post-boundary, or under prominence) reflecting the prosodic strength of the location. Two seminal examples of this strengthening effect are (i) the cumulative lengthening of domain-final segments reflecting the prosodic level of the domain/following boundary (Wightman, Shattuck-Hufnagel, Ostendorf, & Price, 1992); and (ii) the cumulative increase in linguopalatal contact observed for English /n/ when initial in domains of increasingly higher levels in the prosodic hierarchy (Fougeron & Keating, 1997). This latter case is an example of domain-initial strengthening. The present paper focuses on this type of boundary effect, affecting the phonetic realization of segments in *initial position* in a prosodic domain according to the strength of the preceding prosodic boundary.

Variations in the articulatory or acoustic properties of domain initial segments have been studied in a large variety of languages, but these variations are mostly reported for consonants (Byrd, 2000; Byrd & Saltzman, 1998; Cho, Jun, & Ladefoged, 2002; Cho & Keating, 2001; Fougeron & Keating, 1997; Fougeron, 2001; Onaka, 2003; Kuzla, Cho, & Ernestus, 2007; Kuzla & Ernestus, 2011; Bombien, Mooshammer, Hoole, Rathcke & Kühnert, 2007; Cho, Lee, & Kim, 2011). Observations of the lingual, glottal, velum, or jaw articulation of domain-initial consonants (#C) have supported the idea that it is the *consonantal* properties of the consonants that are reinforced according to the strength of the preceding boundary (see Fougeron, 1999; Cole, Kim, Choi, & Hasegawa-Johnson, 2007, or Cho, 2011 for reviews). For example, when initial in higher prosodic domains, stops have been found to be more constricted in English (Fougeron & Keating, 1997; Cho, 2001), Korean (Cho, 1998; Cho & Keating, 1999), French (Fougeron, 2001), and Japanese (Onaka, 2003), and nasal consonants have been found to be less sonorous with reduced nasal airflow in French (Fougeron, 2001) and reduced nasal energy in English (Cho & Keating, 2009).

\* Corresponding author. Tel.: +33 143265717; fax: +33 144320573.

E-mail addresses: laurianne.georgeton@univ-paris3.fr (L. Georgeton), cecile.fougeron@univ-paris3.fr (C. Fougeron).

The first objective of our study is to investigate prosodic strengthening on domain initial vowels. The question is whether the articulatory and acoustic properties of vowels immediately following a prosodic boundary, are also modified according to the strength of the boundary, which properties are affected, and what is the direction of the modifications. Several studies have looked at boundary effects on vowels, which are not strictly domain-initial, but are the nucleus of the initial syllable of a domain (#CV). In these studies, the interest is whether initial strengthening goes beyond the edge of a domain and extends to segments past the first consonant (Barnes, 2002; Byrd, 2002; Byrd & Choi, 2006; Cho, 2006, 2008; Cho & Keating, 2001, 2009; Cho & McQueen, 2005; Fougeron & Keating, 1997; Keating, Cho, Fougeron & Hsu, 2003; Krivokapic, 2007). In Cho et al. (2011) for example, boundary effect is reported in Korean on the acoustic cues (i.e.  $F1$  and  $F2$  values) of the vowel following an initial /pʰ/ (/a/, /i/ and /u/ in #pʰV). Very little is known however about vowels immediately following a prosodic boundary (i.e. absolute initial vowel, #V). Fougeron (1998, 2001) studied the lingual articulation of /i/ (with EPG, two speakers) and the nasal articulation of /ɑ̃/ (with nasal flow, four speakers), in Intonational Phrase-, Accentual Phrase- and Word-initial positions in French (IPi, APi and Wi). Similar to what was found for initial consonants, /i/ had more linguopalatal contact after stronger boundaries (IP and AP) compared to W-initial position for the two speakers. Moreover, /i/ was more frequently glottalized (after AP boundary for one speaker and after IP boundary for the other) while no effect was found on its acoustic duration. Spectrally, no effect of boundary type was found on  $F1$ , while  $F2$  was higher for one speaker in AP and IP-initial positions, and a cumulative increase of  $F3$  (W < AP < IP) was found for the two speakers. For the nasal vowel /ɑ̃/, an effect of boundary was found for two of the four speakers, showing a decrease of nasal air flow in IP-initial position compared to W-initial position (with a three way distinction W > AP > IP found for one speaker). Note that this decrease in nasal airflow was also found for the consonant /n/ in IPi for three out of four speakers. In a large scale study of over 30 h of broadcasted speech, Gendrot, Gerdes, and Adda-Decker (2011) also found boundary effects on the acoustic realization of French and German vowels. Even though the distribution of the vowels forced them to collapse absolute initial vowels and vowels in initial CV syllables, their results are worth mentioning here. In both languages, they observed an expansion of the acoustic space formed by the peripheral vowels in IP-initial position, accompanied by a lengthening of the vowels, especially in German. Moreover, their analysis of specific vowels in French showed that some of the distinctive properties of the vowels, such as the merging of  $F3$ – $F2$  typical for /y/ or  $F4$ – $F3$  typical for /i/, were reinforced after stronger boundaries. Two other recent studies in English have provided further evidence that domain-initial vowels are also affected by initial strengthening. In their ultrasound study, Lehnert-LeHouillier, McDonough, and McAleavey (2010) analysed differences in tongue contours (at the most advanced position of the tongue body) for English /ɛ/ and /ɔ/ between IP-, AP-, and W-initial positions. They report an effect of boundary type on the lingual articulation of the vowels and larger differences in tongue contour between the two extreme positions (IPi and Wi). Unfortunately, no indication is given on the direction of the changes (horizontal or vertical tongue position) linked to the effect observed for each vowel. More recently, Kim and Cho (2012) looked at the effect of boundary on the lip and tongue kinematics of English /æ/. They observed a larger and longer opening movement of the lips in IP-initial position but no effect on either the vertical or horizontal dimensions for the tongue dorsum.

Considering these results, it appears that domain-initial strengthening may affect vowels as well as consonants, but it is unclear what properties of the vowels are subject to variation when initial in higher prosodic domains. This leads us to the second objective of our study. As pointed out some time ago by Fougeron and Keating (1997) and discussed more extensively in the recent review by Cho (2011), despite the substantial amount of data collected in the literature, the nature of the prosodic strengthening phenomenon is still an open question. What is the mechanism governing the observed phonetic variations and, do these variations have a linguistic function? The present paper tackles this latter question by asking whether the properties affected by boundary strength and the direction of the variation observed relate to phonological contrast.

Two hypotheses have been put forward in the literature to explain how boundary-related phonetic variations could be linguistically driven in order to maximize the contrast between segments. According to the first hypothesis, domain-initial strengthening contributes to an enhancement of the syntagmatic contrast between the initial segment and its neighbours. As stated earlier, the variations found for consonants following a strong prosodic boundary could be interpreted as a reinforcement of their consonantal nature. As proposed by Fougeron and Keating (1997) for example, within a V#CV sequence, the increased constriction of the consonant, accompanied by a larger opening of the pre-boundary (final) vowel, could be interpreted as an enhancement of the contrast between the segments straddling the prosodic boundary. According to the second hypothesis, boundary effects would contribute to reinforce the paradigmatic contrast between segments. Following De Jong (1995) proposal for accented vowels, prosodic strengthening could be viewed as a local hyperarticulation leading to an enhancement of the distinctive properties of the segment. Cho and Jun (2000) tested these hypotheses on the three-way contrast between lenis, fortis, and aspirated stops in Korean. Their results showed that boundary effects differed according to the stop type as predicted by the paradigmatic contrast enhancement hypothesis. Fortis and aspirated stops showed VOT and airflow variations in IP-initial positions that were consistent with an enhancement of their distinctive laryngeal specifications: [+constricted glottis] and [+spread glottis] respectively. However, for the lenis stops, the variation was similar to that observed for the aspirated stop (longer VOT and more airflow). This lack of contrast maximization between the aspirated and lenis categories was explained by the fact that lenis stops are unspecified for both [spread glottis] and [constricted glottis]. The variation found for the lenis stop was thus interpreted as a syntagmatic enhancement of the contrast between the more 'consonantal' lenis stops and the surrounding vowels.

Vowels offer another interesting test case to determine what is strengthened domain-initially and how this effect interacts with linguistic contrast. To address these issues in the present study, we investigate boundary effects on the 10 oral vowels of the French vowel system /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/. We test whether the effects of boundary strength affects all vowels in the same ways or whether differential effects apply in the system according to the distinctive properties of the vowels. In such a rich system, height (with 4 levels of aperture), backness, and roundedness are at play in an intricate way and degrees of freedom are relatively reduced. Both acoustic and articulatory data will be examined. From an acoustic point of view, we investigate which of the spectral dimensions, defined by  $F1$ – $F2$ – $F3$  and used to mark contrasts within the oral French vowel system, are affected by boundary effects. Most studies looking at prosodic effects on vowels (often concerned with variation under accent or in final position) are restricted to a few vowel categories. In order to address the question of the relationship between prosodically induced variation and paradigmatic contrast, it is however necessary in our view to investigate a full system of contrast (although excluding here nasal vowels). If one considers peripheral vowels only, predictions on how spectral changes relate to the vague notions of 'hyperarticulation', 'distinctiveness' or 'clarity' are rather straightforward: one would expect vowels to be more peripheral. As far as mid vowels are concerned, however, it is unclear what to expect from an 'extreme' realization. In the present study the effect of boundary on the acoustic properties of vowels is therefore examined first from a systemic point of view by looking at the degree of dispersion of the vowels in the  $F1/F2$  and  $F2/F3$  acoustic spaces defined by the vowel system. Then, the effect of boundary on the defining spectral and durational characteristics of each vowel is analysed. The realization of focal vowels of French (that is /i, y, u, o, ɔ/) is also investigated to test whether boundary effects target their focal properties.

From an articulatory point of view, we examine the effect of prosodic boundary on the labial configuration (lip aperture, lip width and lip protrusion, i.e. the three degrees of freedom of the lips as proposed by Ladefoged, 1979) of the 10 French vowels according to their rounding specifications.

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

In French, only front vowels contrast for the feature [±round]: /i, e, ε/ are [−round], while /y, ø, œ/ are [+round]. For the back vowels /u, o, ɔ/, lip rounding can be considered as an unspecified feature (Clements, 1987; Steriade, 1987) or as a redundant feature (Stevens, Keyser, & Kawasaki, 1986), introduced to enhance the difference between back and front vowels by increasing their difference in F2 frequency. Our objective here is to test whether boundary effects are of the same nature for the three vowel sets (front rounded, front unrounded and back rounded) or if they depend on the [±round] specification of the vowel, and on the linguistic value of the feature in the system (contrastive or redundant). Finally, we specifically address the question of whether the paradigmatic contrast within the [±round] front vowel pairs is enhanced after strong prosodic boundary, by looking at how boundary effect interacts with contrast within these pairs, in terms of articulatory and acoustic properties.

## 2. Method

### 2.1. Speech material and speakers

Acoustic and articulatory properties of the 10 oral French vowels /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ are compared in sentences cueing two different prosodic phrasings. The sentences presented in Table 1 are based on the types developed in Fougeron (1998, 2001), also used in Tabain and Perrier (2005, 2007) and are meant to cue either an Intonational Phrase boundary (IP) or a simple Word boundary (W) before the test vowel. The W boundary corresponds to the IP-medial condition used in Cho's studies: the vowel is at the beginning of a word within a kind of compound name. The test vowels (V) appear in an [ip#VC] sequence where V is the initial segment of a (fake) first name. The two consonants flanking the test vowels are chosen to give an articulatory landmark with a narrowing at the lips: the pre-boundary consonant is always a /p/, and the consonant following V is also a /p/ for all but the three mid-open vowels. In order to avoid the neutralization between mid-open and mid-closed vowels linked to syllable structure and vowel harmony in French, the sequences with /ε/, /œ/, /ɔ/ have been constructed as to favour their pronunciation as mid-open, within the (fake) names: Eve-Marie [εv.ma.ʁi], Orgeat [ɔʁ.ʒa], and Oefalie [œ.fa.li]. Thus only /ε/ and /ɔ/, in this corpus, are tautosyllabic with the following consonant, and only /ɔ/ is followed by a non-labial consonant.

The 20 sentences (2 prosodic boundaries × 10 vowels types) were read in a random order by four native French female speakers (S1-4, aged from 25 to 40 years, with no identifiable regional accent) and 16 repetitions of each were collected for analysis. Because of technical difficulties in the pre-processing of some of the recordings some repetitions were simply discarded. The final counts of renditions analysed in the articulatory and acoustic studies per vowels and prosodic position are given in Table 1.

Prosodic phrasing of each rendition was coded by the first author according to prosodic characteristics described for French (e.g., Hirst & Di Cristo, 1984; Pasdeloup, 1990; Fougeron & Jun, 1998). Vowels in IP-initial condition are preceded by a major continuation rise or a major final fall (H% or a L% tone) accompanied by a pre-boundary final lengthening of the /ip#/ syllable. They are frequently preceded by a pause (in 91% (S1) to 98% (S3) of the IPI sentences) and are sometimes produced with an initial accent (in 12% of the IPI sentences for S1, 2% for S2, 33% for S3, 4% for S4).

### 2.2. Articulatory data acquisition and analysis

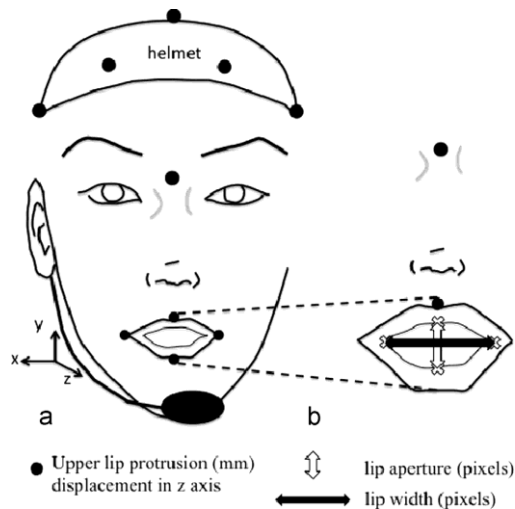
The articulatory data studied were acquired with two different systems simultaneously. An optical motion capture system (Qualisys) was used to acquire the 3D position of reflecting markers at a frequency of 100 Hz. As shown in Image 1, four markers were positioned on the external contour of the speaker's lips: one at each lip corner, one on the upper lip and one on the lower lip at the level of the cupid arch. Six reference markers were located at stable positions (on the nasal bridge and on a helmet worn by the speaker) to enable automatic correction for head movements. A rotation of the Qualisys markers was done using a Matlab routine to compensate the speaker's head movements and to enable the analysis of movements in a stable plane. In order to extract lip's markers in the unique set of reference points, all data were normalized relative to these six reference markers. Lip aperture, lip width and protrusion were meant to be extracted with this technique but the motion of the two markers placed on the external contour of the upper and lower lips were not reflecting adequately the aperture of the labial orifice: they were placed in a way not to hamper articulation but were probably too external of the vermilion contour (see Georgeton & Audibert, 2012). Moreover, the data for one of the speaker were not exploitable.

Table 1

Speech material used to elicit the IP- and W-boundary conditions for each vowel. Numbers on the right of sentences indicate the number of renditions analysed for the acoustic analysis/for lip aperture and width/for protrusion. Note that 'Philippe' is pronounced as [filip] in standard French.

	IP-boundary		W-boundary	
/i/	Pour le roi Philippe, Ipicaz et Larsen se battent comme des dieux. <i>For the king Philippe, Ipicaz et Larsen fight as gods.</i>	50/51/40	Dalida et Lippe-Ipicaz sortent un tube d'enfer. <i>Dalida and Lippe-Ipicaz launch a hell of a hit.</i>	58/60/46
/e/	Avec Jean-Philippe, Epélie et Daniel marchaient dans la forêt. <i>With Jean-Philippe, Epélie and Daniel walked into the forest.</i>	53/54/41	Jean-Marie et Lippe-Epélie s'entendaient vraiment bien. <i>Jean-Marie and Lippe-Epélie got along really well.</i>	57/58/43
/ε/	Pour le roi Philippe, Eve-Marie et Martin se battent comme des dieux. <i>For the king Philippe, Eve-Marie and Martin fights as gods.</i>	53/53/36	Dalida et Lippe-Eve-Marie sont deux sopranos en vogue. <i>Dalida and Lipp-Eve-Marie are two sopranos in vogue.</i>	56/56/40
/a/	Après Jean-Philippe, Apala et Paulo se sont rencontrés. <i>After Jean-Philippe, Apala and Paulo met.</i>	44/44/35	Tommy-Lee et Rippe-Apala sont deux super bassistes. <i>Tommy-Lee and Rippe-Apala are two great bassists.</i>	62/63/47
/y/	Avec Saint Philippe, Upulé et Jo attaquèrent les géants. <i>With Saint Philippe, Upulé and Jo attacked the giants.</i>	54/57/39	Dalida et Deep-Upulé sortent un duo terrible. <i>Dalida and Deep-Upulé launch a great duo.</i>	59/59/45
/ø/	D'après Philippe, Eupidine et Marie ont beaucoup voyagé. <i>According to Philippe, Eupidine and Marie have traveled extensively.</i>	50/50/39	Dalida et Lippe-Eupidine sortent un tube d'enfer. <i>Dalida and Lippe-Eupidine launch a hell of a hit.</i>	57/57/42
/œ/	D'après Philippe, Céfali et Jean-Charles s'entendent vraiment bien. <i>According to Philippe, Céfali and Jean-Charles get along really well.</i>	57/58/40	Dalida et Rippe-Céfali dansent tous les soirs. <i>Dalida and Rippe-Céfali dance every night.</i>	62/62/47
/u/	D'après Philippe, Oupoulo et Marie ont beaucoup dansé. <i>According to Philippe, Oupoulo and Marie have danced a lot.</i>	56/57/40	Pétros, Philippe, Oupoulo et Gillou sont toujours ensemble. <i>Pétros, Philippe, Oupoulo and Gillou are still together.</i>	65/65/53
/o/	Face à Philippe, Opalie et Jeanne ne faisaient pas le poids. <i>Facing Philippe, Opalie and Jeanne could not challenge.</i>	53/58/45	Marie-Lou et Fippe-Opalie sont deux petites sorcières. <i>Marie-Lou and Fippe-Opalie are two little witches.</i>	59/59/49
/ɔ/	D'après Philippe, Orgeat et Camille sont deux petites pestes. <i>According to Philippe, Orgeat and Camille are two small pests.</i>	47/50/32	Sheila et Deep-Orgeat sortent un tube chaque été. <i>Sheila and Deep-Orgeat launch a hit every summer.</i>	65/70/49

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>



**Image 1.** Summary of lip parameters extracted from video and Qualisys data: upper lip protrusion measured as the displacement in the z dimension of the UL Qualisys marker relative to the 6 reference markers; internal lip aperture and lip width measured on the video data.

Lip aperture and lip width measurements were therefore analysed for all four speakers from the video data acquired simultaneously with a DCR PC8 Sony camera (25 i/s) set up at about 1 m from the speaker's face. Protrusion data on the other hand were extracted from the motion capture recordings for the three speakers available. Acoustic data were recorded with a head-mounted Shure SM10A microphone (44.1 kHz) and a Roland Edirol UA 25 sound card, and was launched at the Qualisys-generated trigger signal. Post-synchronization between the audio/Qualisys data and video data (digitized as JPEG sequences) was done through the alignment of the audio recording and the audio signal captured by the internal camera's microphone. Synchronization between these signals was facilitated by the production of a clap made by the speaker at the beginning of each recording.

The ip#VC sequences were segmented and labelled in Praat using the audio signal (Boersma & Weenink, 2009). A Matlab procedure was used to extract the video frames corresponding to the audio signal of the vowel. On average, five frames were available for each vowel and were annotated. On each frame, four points were marked manually on the internal contour of the speaker's lips: at the right and left inner corner of the lips, and in the middle of upper and lower lip's inner contours at the level of Cupidon's arch, as shown on the right of Image 1.

Lip width and lip aperture (from the video data) and lip protrusion (from the Qualisys data) were measured in the middle of the acoustic portion of the vowel:

- (i) *lip width* (in pixels) corresponds to the horizontal distance between the points placed at the right and left corners,
- (ii) *lip aperture* (in pixels) corresponds to the vertical distance between the points in the middle of the lower and upper lip.

Different estimations of protrusion, measured at the corner of the lips, on the upper lip or on the lower lip, have been described in the literature (Abry, Boë, Descout, Gentil, & Graillot, 1980; Fromkin, 1964; Ladefoged, 1979). These three measurements have been computed on our data and show the same pattern. We will thus report here only on Upper Lip protrusion since this measurement has been found to vary according to prosodic prominence in French (Dohen, Loevenbruck, & Hill, 2006, 2009; Ménard et al., 2013).

- (iii) *Upper lip (UL) protrusion* (in mm) corresponds to the displacement in the sagittal plane of the Qualisys marker located on the upper lip. Protrusion values have been normalized by subtracting the minimal value measured for each speaker, in order to obtain positive values more directly interpretable.

### 2.3. Acoustic data analysis

Formant values were estimated as the mean of successive measurements at 33% and 66% of the distance from onset to offset of the vowel and were hand corrected (especially for /u/ and /i/ which were sometimes partly unvoiced). The Burg algorithm implemented in Praat was used for formant extraction and the detection of amplitude peaks was determined in a band lower than 5.5 kHz (recommended for female voices).

Individual formant values as well as the distance between formants were measured. For all vowels  $F_1$  and  $F_2$  values were considered:  $F_1$  is a reliable acoustic correlate of the contrast between vowels in the height dimension in French; while  $F_2$  marks the distinction between front and back vowels, and is also a secondary correlate of vowel rounding.  $F_3$  was considered for front vowels as a cue to the rounding contrast (front rounded vowels having a lower  $F_3$ ). French /i/, /y/, /u/, /o/ and /ɔ/ are defined as focal vowels characterized by a sharp concentration of energy in a narrow frequency band due to the merging of two of their formants (Schwartz, Boë, Vallée, & Abry, 1997; Vaissière, 2011). In order to test whether boundary effects affect their focal properties, the distance  $F_2-F_1$  was measured for all back vowels, the distance  $F_3-F_2$  was considered for /y/, and the distance  $F_4-F_3$  was examined for /i/.

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

A measure of acoustic dispersion was also investigated. As observed in Gendrot and Gerdes (2011) and Cho et al. (2011), initial strengthening may affect the distribution of vowels in the acoustic space. It is hypothesized that vowels can occupy a larger acoustic area and, within this larger space, are more distinct from each other in stronger prosodic positions. Two acoustic spaces have been considered:  $F1/F2$  and  $F2/F3$ . Within these spaces, an index of the peripherality of the vowel is measured as the Euclidian distance of each vowel category from the centroid of the spaces. These centroids were calculated for each speaker over all the prosodic conditions in order to have the same point of comparison for the 2 systems compared (in W and IP). The  $F1/F2$  centroid is computed as the mean of  $F1$  and  $F2$  values for all vowels, while  $F2/F3$  centroid is computed as the mean of  $F2$  and  $F3$  values for the front rounded and unrounded vowels /i, e, ε, y, ø, œ/.

Finally, since spectral realization of vowels may depend on their acoustic duration (Gendrot & Adda, 2005; for French) and since prosodic strengthening may affect the temporal characteristics of segments, acoustic vowel duration was measured for all vowels.

#### 2.4. Statistical analyses

In a first analysis, a three-factor ANOVA was conducted to test for the effects of 'boundary' (with two levels: IPi, Wi), 'speaker' (with four levels: S1, S2, S3, S4) and 'vowels' (with 10 levels: /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/) on the 3 articulatory and 9 acoustic dimensions tested. The results of this analysis (not presented in detail here) showed a main effect of prosodic boundary on most phonetic properties (except  $F4-F3$  and peripherality in  $F2/F3$  space) but also an interaction between the boundary effect and the vowel on all the 12 dimensions. Consequently, the analyses discussed in the remainder of the paper are done vowel by vowel.

First, a two-factor ANOVA was used to determine the effect of 'boundary' (with two levels: IPi, Wi) for each vowel, and the possible interaction of the effect with the 'speaker' factor. Statistical results for this main effect and interaction are given in Table 2 (lines (a) and (b)). In the case of an interaction with the speaker factor, the effect of boundary was further tested in four separate one-way ANOVAs for each speaker. Results of these analyses are not detailed here for lack of space. However, the direction of significant differences between IP and W conditions for each speaker is indicated in Table 2 (lines (c)) and speaker specific patterns will be drawn on when relevant.

Second, in order to test the interaction of boundary effects with the rounding contrast between the two front vowel sets (presented in Section 3.3), two-factor ANOVAs were conducted for each pair /i–y/, /e–ø/, /ɛ–œ/, with the factors 'boundary' (2 levels: IP, W) and 'vowel roundedness' (2 levels: rounded, unrounded). All articulatory and acoustic dimensions were tested this way to determine whether the effect of boundary interacts with the contrast between the vowel roundedness in each pair.

All post-hoc pairwise comparisons were done with Tukey post-hoc tests. Critical significance was set at  $p < .05$ .

### 3. Results

Results of the articulatory study will be presented first, for the unrounded front vowels, the rounded front vowels, and the rounded back vowels. Then, we will turn to the effect of prosodic boundary on the acoustic properties of these vowels. Finally, we will focus on the vowel pairs contrasting in roundedness to see how the boundary effect interacts with this contrast.

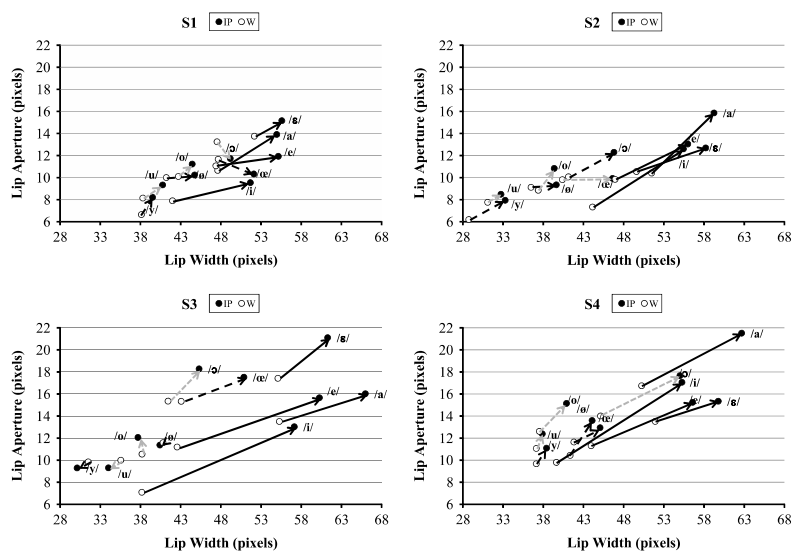


Fig. 1. Lip width and lip aperture for the 10 vowels for each speaker in the 2 prosodic conditions. Arrows indicates the changes from W-initial position (open circles) to IP-initial position (black circles) for the three vowel sets: front unrounded (plain black lines), front rounded (dashed black lines), back rounded (dotted grey lines).

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

**Table 2**

Summary of results by vowels and parameters. In (a), main effect of 'boundary' and direction of the difference between IP- and W-initial positions. In (b), interaction of 'boundary' with 'speaker'. When an interaction is found, the third line (c) summarizes the significant differences found between the two positions in the analyses per speakers. Subsequent lines give the mean values and standard errors (s.e.) for each variable per speakers (S1, S2, S3, S4). Significance levels: \*\*\* $p < .001$ , \*\* $p < .05$ , ns: non-significant.

		F1 (Hz) (4/4 spks)		F2 (Hz) (4/4 spks)		F3 (Hz) (4/4 spks)		Duration (ms) (4/4 spks)		Distance to centroid F1/F2 (4/4 spks)		Distance to centroid F2/F3 (4/4 spks)		Lip width (pixels) (4/4 spks)		Lip aperture (pixels) (4/4 spks)		Upper lip (mm) (3/4 spks)	
		IP	W	IP	W	IP	W	IP	W	IP	W	IP	W	IP	W	IP	W	IP	W
/i/	(a)	$F(1,100)=1$ ns		$F(1,100)=0$ ns		$F(1,100)=32^{***}$ IP > *W		$F(1,103)=0$ ns		$F(1,100)=1$ ns		$F(1,100)=18^{***}$ IP > *W		$F(1,103)=258^{***}$ IP > *W		$F(1,103)=158^{***}$ IP > *W		$F(1,80)=0$ ns	
	(b)	$F(3,100)=4^*$		$F(3,100)=2$ ns		$F(3,100)=3^*$		$F(3,103)=0$ ns		$F(3,100)=2$ ns		$F(3,100)=4^*$		$F(3,103)=7^{**}$		$F(3,103)=11^{**}$		$F(2,80)=0$ ns	
	(c)	ns all spks				IP > *W S1, S2, S4						IP > *W S1, S2, S4		IP > *W all spks		IP > *W all spks			
	S1	265(4)	264(3)	2571(18)	2531(18)	3599(24)	3393(27)	51(3)	49(2)	1024(18)	985(18)	1058(25)	899(21)	52(4)	42(1)	10(3)	8(2)	5(6)	6(6)
	S2	268(8)	253(4)	2434(16)	2430(21)	3576(30)	3469(28)	61(3)	62(1)	828(16)	826(21)	974(27)	889(28)	55(1)	44(2)	13(2)	7(3)	5(6)	4(5)
S3	241(1)	252(6)	2138(21)	2244(25)	3445(16)	3420(23)	53(3)	56(3)	593(20)	695(24)	841(14)	869(27)	57(1)	38(1)	13(5)	7(5)	9(1.2)	9(1.3)	
S4	418(15)	464(23)	2515(80)	2532(27)	3440(62)	3259(46)	54(3)	53(3)	742(74)	752(26)	761(56)	617(40)	55(1)	40(1)	17(1)	10(1)			
/e/	(a)	$F(1,102)=2$ ns		$F(1,102)=27^{**}$ IP > *W		$F(1,102)=83^{**}$ IP > *W		$F(1,104)=0$ ns		$F(1,102)=27^{**}$ IP > *W		$F(1,102)=52^{**}$ IP > *W		$F(1,104)=183^{**}$ IP > *W		$F(1,104)=72^{**}$ IP > *W		$F(1,78)=0$ ns	
	(b)	$F(3,102)=6^*$		$F(3,102)=1$ ns		$F(3,104)=2$ ns		$F(3,104)=4^*$		$F(3,102)=1$ ns		$F(3,102)=1$ ns		$F(3,104)=7^{**}$		$F(3,104)=27^{**}$		$F(2,78)=2$ ns	
	(c)	IP < *W S3, IP > *W S4						IP > *W S4						IP > *W all spks		IP > *W S2, S3, S4			
	S1	397(3)	402(6)	2271(32)	2151(17)	3106(23)	2867(15)	54(5)	57(3)	714(32)	594(17)	530(25)	342(17)	55(1)	47(1)	12(6)	11(4)	5(4)	5(4)
	S2	338(3)	336(3)	2173(53)	2047(31)	2938(45)	2739(29)	57(3)	63(2)	563(53)	437(31)	386(52)	246(21)	56(4)	47(5)	13(5)	10(3)	4(7)	5(7)
S3	357(5)	379(3)	2006(38)	1943(21)	2839(33)	2647(31)	55(2)	55(2)	445(38)	381(21)	289(40)	189(22)	60(1)	43(1)	16(7)	11(4)	8(1.2)	6(1.3)	
S4	450(5)	437(4)	2381(12)	2203(16)	3029(12)	2913(20)	63(3)	55(2)	599(12)	425(16)	368(13)	181(18)	57(3)	44(1)	15(8)	11(4)			
/ɛ/	(a)	$F(1,101)=24^{**}$ IP > *W		$F(1,101)=23^{**}$ IP > *W		$F(1,101)=5^*$ IP > *W		$F(1,101)=36^{**}$ IP < *W		$F(1,101)=36^{**}$ IP > *W		$F(1,101)=0$ ns		$F(1,101)=56^{**}$ IP > *W		$F(1,101)=55^{**}$ IP > *W		$F(1,70)=0$ ns	
	(b)	$F(3,101)=5^{**}$		$F(3,101)=1$ ns		$F(3,101)=1$ ns		$F(3,101)=2$ ns		$F(3,101)=0$ ns		$F(3,101)=3^*$		$F(3,101)=2$ ns		$F(3,101)=2$ ns		$F(2,70)=0$ ns	
	(c)	IP > *W S4										IP > *W S1, IP < *W S3							
	S1	537(5)	523(7)	1888(17)	1826(10)	2891(14)	2842(14)	81(3)	91(2)	354(16)	292(9)	104(14)	62(9)	56(1)	52(2)	15(4)	14(4)	5(3)	5(4)
	S2	420(5)	412(3)	1896(50)	1729(42)	2797(53)	2733(26)	78(4)	101(3)	304(44)	207(28)	214(31)	174(33)	58(1)	50(1)	13(3)	11(4)	4(8)	4(5)
S3	432(7)	421(5)	1831(10)	1723(24)	2554(19)	2506(16)	70(4)	82(3)	276(10)	169(22)	147(14)	200(21)	61(1)	55(1)	21(6)	17(7)	8(1.2)	7(1.1)	
S4	607(11)	547(12)	2027(11)	1956(10)	2858(12)	2875(9)	80(4)	89(5)	260(12)	177(12)	72(9)	94(10)	60(1)	52(1)	15(5)	14(4)			
/a/	(a)	$F(1,98)=198^{**}$ IP > *W		$F(1,98)=0$ ns		$F(1,98)=9^*$ IP > *W		$F(1,99)=65^{**}$ IP < *W		$F(1,98)=15^{**}$ IP > *W		$F(1,98)=0$ ns		$F(1,99)=258^{**}$ IP > *W		$F(1,99)=237^{**}$ IP > *W		$F(1,76)=0$ ns	
	(b)	$F(3,98)=19^{**}$		$F(3,98)=2$ ns		$F(3,98)=21^{**}$		$F(3,99)=1^{**}$		$F(3,98)=3^*$		$F(3,98)=2$ ns		$F(3,99)=4^*$		$F(3,99)=6^{**}$		$F(2,76)=1$ ns	
	(c)	IP > *W all spks				IP > *W S2, S3, IP < *W S4		IP < *W all spks		IP > *W S1, S3, S4				IP > *W all spks		IP > *W all spks			
	S1	691(10)	584(6)	1367(16)	1356(7)	2782(22)	2759(8)	65(3)	72(1)	341(9)	267(5)	458(19)	471(8)	55(1)	48(4)	14(4)	11(3)	4(6)	5(5)
	S2	508(9)	423(8)	1411(38)	1360(49)	2764(23)	2648(13)	63(2)	73(2)	268(30)	272(45)	452(37)	519(48)	59(1)	51(1)	16(4)	10(2)	4(6)	4(4)
S3	580(11)	547(6)	1269(23)	1337(20)	2461(15)	2321(18)	58(1)	71(1)	360(16)	284(17)	565(24)	582(21)	66(1)	55(1)	16(5)	14(4)	8(1.2)	8(1.1)	
S4	828(9)	669(5)	1624(9)	1655(13)	2706(18)	2818(18)	55(5)	69(1)	353(9)	205(8)	462(10)	395(15)	63(1)	50(1)	22(8)	17(3)			
/y/	(a)	$F(1,105)=1$ ns		$F(1,105)=1$ ns		$F(1,105)=14^{**}$ IP < *W		$F(1,108)=2$ ns		$F(1,105)=1$ ns		$F(1,105)=0$ ns		$F(1,108)=4^*$ IP > *W		$F(1,108)=18^{**}$ IP > *W		$F(1,78)=0$ ns	
	(b)	$F(3,105)=6^{**}$		$F(3,105)=5^*$		$F(3,105)=3^*$		$F(3,108)=6^{**}$		$F(3,105)=3$ ns		$F(3,105)=3^*$		$F(3,108)=3^*$		$F(3,108)=3^*$		$F(2,78)=1$ ns	
	(c)	IP > *W S1, IP < *W S4		IP > *W S1		IP < *W S1, S3, S4		IP > *W S4				IP < *W S3		IP > *W S2		IP > *W S1, S2			
	S1	252(4)	235(4)	1758(35)	1625(19)	2430(19)	2541(36)	55(3)	51(3)	277(21)	204(6)	455(20)	388(31)	40(1)	38(1)	8(2)	7(3)	8(6)	8(6)
	S2	274(7)	257(10)	2058(34)	2095(30)	2648(47)	2642(35)	59(3)	64(2)	456(33)	495(31)	306(33)	318(30)	33(1)	29(1)	8(3)	6(3)	6(6)	6(4)
S3	248(4)	260(9)	2043(17)	2072(18)	2912(42)	3068(56)	51(3)	54(2)	499(17)	526(17)	361(33)	494(45)	30(1)	32(1)	9(5)	10(3)	12(1)	12(1)	
S4	399(5)	451(22)	2177(26)	2220(36)	2767(22)	3002(37)	60(3)	44(3)	409(25)	446(35)	228(19)	241(37)	38(1)	37(1)	11(6)	10(8)			

/ə/	(a)	$F(1,99)=6^*$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=18^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=5^*$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,99)=2$ ns	$F(1,99)=9^*$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=6^*$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,99)=18^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,99)=14^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,75)=0$ ns
	(b)	$F(3,99)=0$ ns	$F(3,99)=10^{**}$ IP>*W S1, S4	$F(3,99)=6^{**}$ IP>*W S1	$F(3,99)=8^{**}$ IP>*W S4, IP<*W S2	$F(3,99)=2$ ns	$F(3,99)=15^{**}$ IP<*W S1, S4	$F(3,99)=2$ ns	$F(3,99)=10^{**}$ IP>*W S4	$F(2,75)=0$ ns
	S1	393(5) 386(5)	1691(28) 1490(10)	2723(8) 2677(10)	52(2) 56(2)	148(24) 80(7)	212(15) 376(10)	45(1) 41(1)	10(.3) 10(.2)	6(.6) 7(.5)
	S2	341(4) 330(4)	1625(42) 1652(29)	2529(22) 2547(9)	56(3) 64(2)	103(21) 101(18)	369(27) 332(20)	40(2) 38(1)	9(.2) 9(.2)	6(.8) 5(.7)
	S3	359(6) 357(8)	1651(22) 1641(24)	2285(17) 2368(41)	53(2) 57(2)	115(11) 96(20)	428(20) 352(44)	40(1) 41(1)	11(.5) 12(.3)	7(1.1) 8(1)
S4	438(3) 427(4)	1917(12) 1847(12)	2754(8) 2772(10)	60(2) 48(1)	154(10) 113(8)	200(10) 237(12)	44(1) 41(1)	14(.4) 10(.3)		
/œ/	(a)	$F(1,111)=116^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,111)=41^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,111)=30^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=12^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,111)=21^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,111)=54^{**}$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,112)=62^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=0$ ns	$F(1,81)=2$ ns
	(b)	$F(3,111)=4^*$	$F(3,111)=5^*$	$F(3,111)=9^{**}$	$F(3,112)=5^{**}$	$F(3,111)=4^*$	$F(3,111)=8^*$	$F(3,112)=2$ ns	$F(3,112)=7^{**}$	$F(2,81)=0$ ns
	(c)	IP>*W all spks	IP>*W S1, S3	IP>*W S1, S3, IP<*W S4	IP>*W S1, S3, S4	IP<*W S1	IP<*W S1, S3	IP>*W S1, S3		
	S1	486(8) 425(9)	1512(11) 1367(15)	2775(10) 2705(12)	76(2) 67(2)	99(8) 195(14)	319(10) 476(16)	52(1) 48(2)	10(.4) 12(.5)	5(.3) 6(.5)
	S2	366(9) 346(5)	1541(29) 1486(23)	2574(17) 2576(11)	67(3) 75(2)	98(21) 137(19)	386(31) 432(21)	47(1) 40(1)	10(.3) 10(.2)	4(.8) 5(.5)
S3	429(4) 357(8)	1614(13) 1495(20)	2433(12) 2354(26)	66(2) 56(2)	82(7) 94(14)	307(15) 450(23)	51(1) 43(1)	18(.5) 15(.5)	7(1.1) 8(1.1)	
S4	495(14) 451(5)	1730(16) 1708(18)	2755(10) 2814(12)	76(4) 64(2)	84(10) 114(11)	345(14) 344(18)	45(1) 42(1)	13(.6) 12(.4)		
/u/	(a)	$F(1,113)=3$ ns	$F(1,113)=4$ ns	$F(1,113)=30^{**}$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,114)=13^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>		$F(1,114)=12^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,114)=15^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>		$F(1,87)=1$ ns
	(b)	$F(3,113)=8^{**}$	$F(3,113)=0$ ns	$F(3,113)=8^{**}$	$F(3,113)=11^{**}$		$F(3,114)=5^*$	$F(3,114)=4^*$		$F(2,87)=1$ ns
	(c)	IP>*W S1, S3		IP<*W S1, S4	IP>*W S4		IP>*W S1, S2	IP>*W S1		
	S1	288(4) 254(6)	839(14) 865(19)	2652(16) 2958(41)	70(3) 63(3)		41(1) 38(.5)	9(.3) 8(.2)		8(.6) 7(.5)
	S2	305(4) 301(5)	950(35) 1004(23)	2858(18) 2844(15)	64(3) 64(1)		33(.5) 31(.4)	8(.3) 8(.2)		6(.4) 6(.3)
S3	283(5) 263(7)	1214(36) 1264(52)	2853(63) 2961(51)	57(2) 60(3)		34(1) 36(.5)	9(.4) 10(.2)		12(1.4) 12(1)	
S4	435(12) 494(29)	1161(36) 1258(26)	3002(27) 3206(43)	74(3) 47(3)		38(.4) 37(1)	12(.4) 11(.5)			
/o/	(a)	$F(1,104)=3$ ns	$F(1,104)=8^*$ <b>IP&lt;*W</b>	$F(1,104)=1$ ns	$F(1,109)=3$ ns		$F(1,109)=5^*$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,109)=59^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>		$F(1,88)=0$ ns
	(b)	$F(3,104)=3$ ns	$F(3,104)=3^*$ IP<*W S2, S4	$F(3,104)=10^{**}$ IP>*W S3, IP<*W S4	$F(3,109)=1$ ns		$F(3,109)=2$ ns	$F(3,109)=1$ ns		$F(2,88)=1$ ns
	(c)									
	S1	402(5) 385(4)	952(12) 935(9)	2823(12) 2798(9)	61(3) 54(1)		44(1) 43(1)	11(.3) 11(.3)		7(.6) 7(.5)
	S2	357(9) 343(4)	1008(16) 1044(9)	2798(13) 2782(15)	59(3) 60(1)		39(1) 37(1)	11(.2) 11(.3)		5(.5) 6(.4)
S3	402(5) 411(7)	843(16) 875(25)	2475(13) 2390(13)	56(3) 53(2)		38(1) 38(1)	12(.3) 12(.4)		11(.9) 10(1.2)	
S4	466(6) 474(4)	1130(14) 1210(11)	2855(14) 2955(11)	55(4) 50(2)		41(1) 38(1)	15(.6) 15(.5)			
/ɔ/	(a)	$F(1,104)=80^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,104)=0$ ns	$F(1,104)=10^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=3$ ns		$F(1,112)=63^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>	$F(1,112)=41^{**}$ <b>IP&gt;*W</b>		$F(1,75)=1$ ns
	(b)	$F(3,104)=9^{**}$	$F(3,104)=1$ ns	$F(3,104)=7^{**}$	$F(3,112)=4^*$		$F(3,112)=6^{**}$	$F(3,112)=19^{**}$		$F(2,75)=0$ ns
	(c)	IP>W S1, S4		IP>*W S3, IP<*W S4	IP<*W S2		IP>*W S2, S3, S4	IP>*W S2, S3, S4 IP<*W S1		
	S1	591(10) 527(12)	1065(14) 1094(11)	2907(17) 2866(16)	72(5) 70(3)		49(1) 48(1)	12(.4) 13(.2)		5(.5) 6(.4)
	S2	454(8) 436(6)	1109(15) 1131(14)	2727(25) 2701(9)	55(3) 70(1)		47(1) 41(1)	12(.2) 10(.3)		5(.7) 5(.7)
S3	527(11) 502(9)	983(14) 1020(19)	2572(24) 2494(17)	62(3) 70(3)		45(1) 41(1)	18(.5) 15(.3)		7(1) 8(.9)	
S4	753(9) 647(5)	1251(13) 1238(10)	2854(15) 2944(15)	72(3) 68(3)		55(1) 45(1)	18(.4) 14(.6)			

### 3.1. Boundary effect on the labial articulation of the vowels

Table 2 presents the effects of boundary and boundary by speaker interactions for lip width, aperture and protrusion parameters. Speaker specific patterns are also indicated. Fig. 1 illustrates the variations found in lip width and aperture for the 10 vowels in the 2 prosodic conditions by speakers.

Results show an effect of prosodic boundary on the configuration of the labial orifice for both unrounded and rounded vowels. The four unrounded front vowels /i/, /e/, /ɛ/, /a/ have a larger lip width and lip aperture in IP-initial position compared to W-initial position. These variations are shown by all speakers (except for the aperture of /e/ for speaker S1) but with a different magnitude causing a boundary per speaker interaction for all vowels.

Interestingly, the articulatory variations in IP-initial positions for the front rounded vowels follow the same direction as the one found for their unrounded counterparts, i.e. an enlargement of the labial orifice. Across speakers, when initial in IP, /y/, /ø/ have larger lip width and aperture, and /œ/ has a larger lip width. However, the modifications in the labial configuration for these vowels appear to be more constrained than the ones observed for the unrounded front vowels. First, they are less consistent across speakers: some of the variations reach significance for only some speakers as can be seen in the results of the analyses by speakers summarized in the rows (c) in Table 2. Second, as can be observed in Fig. 1, the magnitude of the difference between IP and W positions is smaller for the rounded vowels than for their unrounded counterparts (we will return to this later in Section 3.3). Finally, the labial configuration of the rounded vowels is less consistently modified in the two dimensions (only /y/ of S2 shows a significant increase in both width and aperture), while unrounded vowels are quasi-systematically enlarged in both lip width and aperture.

For the back rounded vowels, the effect is comparable to the one found for the front unrounded and rounded vowels. Overall, back rounded vowels /u/, /o/, /ɔ/ have a larger lip width and aperture in IP-initial position. While speaker differences are clear for /u/ and /ɔ/ appears to be more consistent across speakers (with 3–4 speakers showing the same trend). Interestingly, one speaker (S1) shows a reversed pattern with a smaller lip aperture for /ɔ/ in IP-initial position.

Surprisingly, as can be seen in Table 2, the degree of lip protrusion remains unaffected by prosodic position for all the vowels and for the three speakers analysed for this parameter.

In sum, a similar trend is observed for most of the three vowel sets: be they unrounded or rounded (contrastively or not), French oral vowels tend to have a larger lip aperture and width when initial in higher prosodic position. These results do not provide support for an enhancement of the rounding specifications for the rounded vowels (rounded vowels are not more rounded nor protruded), while unrounded vowels are more 'unrounded-like' in strong prosodic position.

### 3.2. Boundary effect on the acoustic properties of the vowels

We will now turn to the effect of boundary strength on the acoustic realization of the vowels. We first consider the effect of boundary type on the acoustic dispersion of the vowels in the acoustic spaces defined by  $F1/F2$  and  $F2/F3$ . We then examine the influence of prosodic boundaries on specific formants contributing to height, backness and rounding contrast in the vowel system, as well as on a cluster of formants defining certain vowels as focal.

#### 3.2.1. Effects on the dispersion of the vowels in the $F1/F2$ and $F2/F3$ acoustic spaces

The distribution of the 10 oral vowels in the  $F1/F2$  and  $F2/F3$  acoustic spaces is presented in Fig. 2 for each speaker. From a visual examination of the figure, it appears that there is an expansion of the acoustic space when IP-initial position is compared to W-initial position. This expansion is particularly striking in the lower part of the  $F1/F2$  spaces and the lower left part of the  $F2/F3$  spaces.

These observations are confirmed by the distance to centroid measurements given in Table 2. In IP-initial positions, all vowel categories except /i, y, œ/ are more peripheral in the  $F1/F2$  space. For the closed vowels /i/ and /y/ no effect is found, while for the mid-open rounded vowel /œ/ a reverse tendency appears: /œ/ is more centralized in IP-initial position. An interaction with the speaker is found for /a, œ, o/: the vowel /a/ is more peripheral for all speakers except S2; the vowel /o/ is more peripheral for S2 and S4; while for /œ/ the above-mentioned centralization reaches significance for one speaker only (S1).

The  $F2/F3$  space is particularly interesting for capturing the opposition between the front rounded and unrounded vowels. In IP-initial position, the unrounded front vowels, /i/ and /e/ are also more peripheral in this  $F2/F3$  space, and this effect is shared by three to four speakers. The behaviour of the other unrounded vowel /ɛ/ depends on the speaker with an increase peripherality for S1, but a decrease for S3. For the rounded front vowels, on the other hand, there is a tendency towards a centralization in the  $F2/F3$  space for /œ/ and /ø/ but, this trend reaches significance only for one speaker in each case (S3 for /ø/ and S4 for /œ/). A similar centralization is found for /y/ for speaker S3.

#### 3.2.2. Effects on $F1$ , $F2$ , $F3$ values by vowels

All speakers pooled, boundary type has an effect on the  $F1$  of the four open and mid-open vowels (i.e. the vowels having the highest  $F1$ ) and of the mid-closed /ø/, but no effect on the closed and mid-closed vowels /i/, /y/, /u/, /e/, /ɛ/, /o/. This effect on  $F1$  is found to be speaker-dependent for most vowels. An increase of  $F1$  in IP-initial position is shown by all speakers for /a/ and /œ/, and /ø/. An absence of effect is also shared by all speakers for /i/ and /o/. For the other vowels, less consistency is found: some speakers show an increase of  $F1$  (/y/ and /u/ for S1, /u/ for S3) or a decrease of  $F1$  (/y/ S4, /e/ S3), or no effect (/e/ S1, S2; /y/ S1, S2, S3; /u/ S2, S4).

Considering  $F2$ , a significant increase is found in IP for the four front vowels /e/, /ɛ/ (all speakers) and /ø/, /œ/ (for S1 and S4, and for S1 and S3, respectively). For the back vowel /o/, on the other hand, a significant decrease of  $F2$  is found in IP-initial position (this effect reaching significance for the same speakers: S1 and S4).

Considering  $F3$ , an interesting tendency is observed when comparing the front rounded and unrounded vowels. For the three unrounded vowels,  $F3$  is higher in IP-initial position: this is shared by all speakers for /e/ and /ɛ/, and by all speakers but S3 for /i/. On the other hand,  $F3$  is lower in IP-initial position for the rounded /y/ and /ø/. The analyses by speaker show, however, that this effect on the rounded vowels is less robust for /ø/ (significant only for S1) than for /y/ (significant for all speakers except S2). For the other rounded front vowel, /œ/, no clear tendency emerges: an increase of  $F3$  is shown in the analysis with all speakers pooled, but opposite strategies are found between speakers (increase of  $F3$  for S1 and S3, decrease of  $F3$  for S4).

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>



**Table 3**  
Summary of results by vowels and focal properties. See Table 2 for reading instructions.

		F2–F1 (4/4 spks)		F3–F2 (4/4 spks)		F4–F3 (4/4 spks)	
		IP	W	IP	W	IP	W
/u/	(a)	$F(1,113)=6^*$ IP < *W				$F(1,100)=4$ ns	
	(b)	$F(3,113)=0$ ns				$F(3,100)=2$ ns	
	(c)						
	S1	551(14)	611(21)	S1		696	810
	S2	645(37)	703(24)	S2		964	929
/o/	(a)	$F(1,104)=8^*$ IP < *W		(a)	$F(1,105)=17^{**}$ IP < *W		$F(1,105)=1$ ns
	(b)	$F(3,104)=1$ ns		(b)	$F(3,105)=5^*$		$F(3,105)=3^*$
	(c)			(c)	IP < *W S1, S4		IP > *W S1, IP < *W S3
	S1	550(11)	550(9)	S1	672	917	1619
	S2	665(25)	695(9)	S2	590	547	1317
/ɔ/	(a)	$F(1,104)=7^*$ IP < *W					
	(b)	$F(3,104)=1$ ns					
	(c)						
	S1	524(55)	673(76)	S1			
	S2	655(20)	696(11)	S2			
/œ/	(a)	$F(1,104)=7^*$ IP < *W					
	(b)	$F(3,104)=1$ ns					
	(c)						
	S1	524(55)	673(76)	S1			
	S2	655(20)	696(11)	S2			

### 3.2.3. Effects on F2–F1, F3–F2, F4–F3 for focal vowels

Focal vowels distinguish themselves by the convergence of two formants: French /i/ is characterized by a merging of F3 and F4, /y/ by a merging of F3 and F2, and /u/, /o/ and /ɔ/ by a merging of F1 and F2 (Vaissière, 2011). An effect of boundary on these focal properties is observed for some vowels as shown in Table 3. For /i/, no difference is found on the F4–F3 distance between IP- and W-initial position. For /y/ and back vowels, however, focal characteristics are affected by prosodic position. F3 and F2 of /y/ are closer together in IP-initial position, but this effect reaches significance for only two speakers (S1, S4). For the back vowels /u/, /o/, /ɔ/, a narrowing of F2–F1 is observed in IP-initial position for all speakers.

### 3.2.4. Effects on acoustic durations

No clear relationship between the spectral changes in IP-initial position described above and the acoustic duration of the vowels is found. As shown in Table 2, three different patterns varying according to vowels and speakers are observed: a shortening in IP-initial position is observed for /ɛ/ and /a/ for all speakers and for /ø/ and /ɔ/ for S2; a lengthening in IP-initial position is observed for /u/ and /œ/ for all speakers and also for /e/, /y/, /ø/ for S4; no effect is found on duration for the remaining cases.

In sum, spectral properties of French vowels are affected by prosodic position. First, an overall expansion of the acoustic spaces defined by F1 and F2 or F2 and F3 is observed in IP-initial position. The vowels /i, e, ɛ, a, ɔ, u, ø/ tend to be more peripheral in F1/F2 and/or F2/F3 spaces, while a tendency toward centralization is observed for some speakers for the rounded vowels /œ, ø, y/ in the F1/F2 and/or F2/F3 spaces. Variations in F1, F2, and F3 are also found to be vowel dependent. An increase of F1 is observed mainly for vowels in the lower part of the acoustic space but also for some other vowels. Variations on F2 and F3 depend even more clearly on the vowel-specific acoustic properties: front /e/, /ɛ/, /ø/, /œ/ have a higher F2 in IP-initial position, while back /o/ has a lower F2; unrounded front vowels /i/, /e/, /ɛ/ have a higher F3 in IP-initial position while /y/ and sometimes /ø/ have a lower F3. This reinforcement of the acoustic characteristics of the vowels is also found in terms of the clustering F2–F1 for the focal back vowels, and of the clustering F3–F2 for the focal /y/ for two speakers. These spectral variations cannot be ascribed to an increased acoustic duration of the vowels since IP-initial vowels are not systematically lengthened.

### 3.3. Boundary effects on the contrast between the front rounded and unrounded vowel pairs

In this section we test whether the uniform increase in the labial cavity found for all vowel types, as well as the vowel-specific spectral changes observed in the preceding sections, affect the phonetic contrast between the front rounded and unrounded vowels in French. Separate analyses are done for each of the three vowel pairs /i–y/, /e–ø/, /ɛ–œ/ and we test for an interaction between the effect of boundary (IP, W) and the vowel roundedness (rounded, unrounded) on the articulatory and acoustic parameters associated with this contrast. An interaction between the two factors would suggest that boundary-driven variations affect differently the rounded and unrounded vowels in the pairs. Pairwise post-hoc comparisons reveal that rounded and unrounded vowels in the pairs are not distinguished for some parameters in W-initial position while they are in IP-initial position. We will refer to these cases as a 'loss' of phonetic contrast in these specific dimensions for W-initial position and will report on such cases below.

Recall that both rounded and unrounded vowels have a larger lip area and lip width in IP-initial position. This boundary effect interacts with vowel roundedness for the pair /i–y/ ( $F(1,211)=56$ ;  $p<.001$  for aperture,  $F(1,211)=123$ ;  $p<.001$  for width) and the pair /e–ø/ ( $F(1,203)=26$ ;  $p<.001$  for aperture,  $F(1,203)=72$ ;  $p<.001$  for width). Indeed, as previously mentioned and as can be seen in Fig. 1, the effect of boundary is larger in magnitude for the unrounded vowels. Consequently, rounded and unrounded vowels are more distinct in terms of their labial configuration in IP-initial position. This increase in phonetic contrastiveness is even more striking when looking at the distinctions between rounded and unrounded counterparts in W-

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

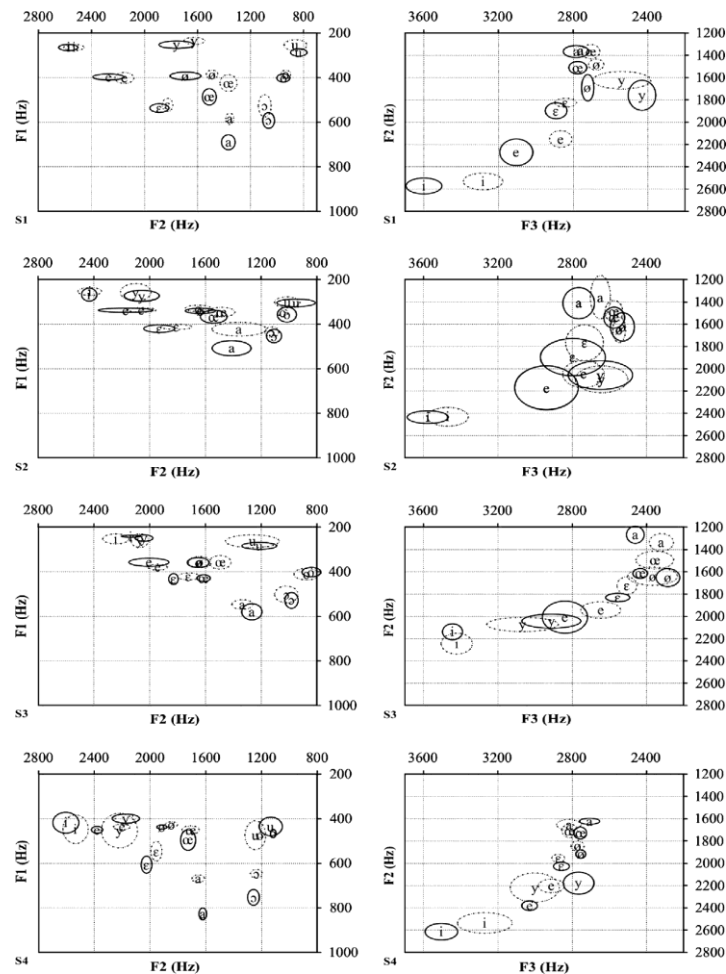


Fig. 2. Distribution of the 10 vowels in the F1/F2 (left) and F2/F3 (right) acoustic spaces for each speaker and in the two prosodic positions: IP (solid line) and W (dotted line).

initial position in some cases: a loss of phonetic contrast is observed between /i/ and /y/ for S1 and S4 for lip width and for S2 and S4 for lip aperture; and between /e/ and /ø/ for S3 and S4 for lip width and for S2 and S3 for lip aperture. No interactions for lip aperture and width are found for the /ɛ–œ/ pair and for upper lip protrusion for any pairs.

Regarding the spectral characteristics of the vowels, we have shown in the previous section, that the direction of the boundary-induced variations differs for the rounded and unrounded vowels. In the present analysis, we observe interactions between boundary effect and vowel roundedness for F3 and F3–F2 for the pair /i–y/ ( $F(1,205)=46$ ;  $p<.001$  for F3;  $F(1,205)=73$ ;  $p<.001$  for F3–F2) and the pair /e–ø/ ( $F(1,201)=81$ ;  $p<.001$  for F3;  $F(1,201)=21$ ;  $p<.001$  for F3–F2). No interaction is observed for the pair /ɛ–œ/. Within the closed and mid-closed vowel pairs, unrounded vowels are distinct from rounded vowels in terms of F3 in all positions, but in IP-initial position this acoustic distinction is increased. In terms of F3–F2, the vowels /i/ and /e/ always contrast with their rounded counterparts in IP-initial position, while a loss of phonetic contrast in W-initial position is observed between /i/ and /y/ for speakers S3 and S4, and between /e/ and /ø/ for S3.

#### 4. Discussion

The first objective of this study was to assess *whether vowels, like consonants, are subject to initial strengthening*. Our answer is yes: both spectral properties and labial articulation of the French vowels can be affected by the strength of the prosodic boundary preceding them (IP or W). Prosodically induced variations of some phonetic parameters have been observed for all 10 vowels and for all four speakers. Nonetheless, as observed in all other studies on this issue, boundary effects are not systematic. They are frequent, but large inter- and intra-speaker and vowel-by-vowel variation exist. We also know that these boundary effects are more robust between extreme prosodic conditions. In a preliminary acoustic study (Georgeton, Audibert, & Fougeron, 2011), we tested the effect of three types of boundary on the acoustic properties of some French vowels. Acoustic differences were the

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

largest between IP and W conditions, while for the intermediate level of boundary (AP, Accentual Phrase) several patterns were found, with AP sometimes being distinct from both IP and W, or AP patterning with either IP or with W conditions. That said, we consider that boundary-induced variations reflect the prosodic organization of an utterance, and should be considered as *one of the many* possible phonetic manifestations of prosodic structure. In line with many other studies on prosodically conditioned segmental variation, we are also tempted to conclude that these variations are not random and that the mechanism underlying this effect is linguistically driven. This brings us to our second set of questions.

(1) *What is a prosodically strengthened vowel?*

As outlined in the introduction, 'prosodic strengthening' is commonly defined as a spatial and/or temporal expansion of articulatory gestures. Our analysis of three parameters linked to labial articulation confirms such a spatial expansion of gestures in domain initial position for the lip features related to the size of the frontal labial orifice. Lip width and lip aperture have been found to increase in IP-initial position for almost all vowels (except for lip aperture for /œ/). However, no effect has been found for the third parameter of the rounding contrast: lip protrusion. Our results can be compared to other studies looking at prosodically induced variations on lip geometry in French. For instance, an increase of lip area under focus was found by [Ménard, Loevenbruck, & Savariaux \(2006\)](#) on video data for four adult speakers (but not for children), by [Ménard et al. \(2013\)](#) for sighted speakers (but not for blind speakers), by [Dohen et al. \(2009\)](#) on optotrack data for five speakers. A boundary effect on lip aperture is also reported by [Tabain and Perrier \(2007\)](#) for domain-final /u/, with an increase in vertical lip distance before strong prosodic boundaries for at least two of their three speakers. Concerning protrusion, the results presented in the literature are more controversial. Domain final /u/s are reported to be more protruded before stronger boundaries in [Tabain and Perrier \(2007\)](#). An increase of upper lip protrusion on focused syllables (with various segmental contents) is also the strongest effect observed by [Dohen et al. \(2006, 2009\)](#), while [Ménard et al. \(2013\)](#) did not find variation in upper lip protrusion on focused /a, i, y, u/.

Concerning the temporal expansion of gesture in strong position, our study has little to contribute. The poor temporal resolution of video data prevented kinematic analyses of the lip movements and the absence of protrusion variation discouraged further dynamic analyses. From our acoustic duration data, it seems that the labial and spectral modifications observed cannot be ascribed to longer acoustic output, as was observed by [Cho et al. \(2011\)](#) and [Lehner-LeHouillier et al. \(2010\)](#), but replicate the lack of lengthening observed by [Gendrot et al. \(2011\)](#). However this does not imply that the timing of articulatory gestures, starting well before the acoustic output during the pause in IP condition, is not affected. This question will have to be resolved with other types of articulatory data.

(2) *Are all vowels in IP-initial position modified the same way? Which properties of the vowels are affected by a boundary effect?*

Our articulatory and acoustic results of a large set of vowels provide interesting elements to answer these questions. In our articulatory analysis, as already stated, there is a strong tendency toward a spatial enlargement of the labial orifice in IP-initial position for all the vowels considered, be they rounded or not (contrastively or redundantly rounded). Nonetheless, important differences are found according to vowel sets. The magnitude of the enlargement of the labial orifice is larger for the unrounded vowels than for the rounded vowels. For the rounded vowels, the effect is also less robust with more inter-speaker variations. Finally, the enlargement of the labial cavity is achieved differently for the rounded and unrounded vowels: unrounded vowels show a systematic enlargement in both aperture and width, while the lip geometry of rounded vowels is often modified in a single dimension. A possible explanation for these differences may be related to physiological constraints. As shown in [Fig. 1](#), rounded vowels are realized in a much more restricted articulatory space, constraining articulatory variation. [Zerling \(1990\)](#) also noticed that the contextual effect of adjacent consonants on the labial articulation of French vowels was not uniform across vowel sets, with less variation for /y, u, o, ø/ (his [+Hlab] category). Less boundary induced variations are also found in our study for this set of vowels, as illustrated in [Fig. 1](#) for S1, S3, and S4 especially. We also replicate the overlap he found between the [+lab] (/œ, ø/) and [-lab] (/i, e, ɛ, a/) categories, showing that the rounded vowels /ɔ, œ/ can have similar lip width or aperture as unrounded vowels, more consistently so in W-initial positions. In our acoustic analysis, boundary effects were even more clearly vowel-dependent. As far as individual formants are concerned ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) we also found different effects according to the vowel category. In the following paragraph, we summarize these acoustic results and see how they relate to the various accounts presented in the introduction.

A first hypothesis was that initial strengthening might reinforce the syntagmatic contrast in the speech chain by reinforcing the 'vocalicity (vowelness)' of the vowel. This hypothesis is an extrapolation to vowels of (i) the results found for domain-initial consonants that have been interpreted as a reinforcement of their consonantal properties, and (ii) the increased aperture found for accented vowels (e.g. in English, by [Beckman, Edwards, & Fletcher, 1992](#)) which has been interpreted as a reinforcement of their sonority, referred to as "sonority expansion" strategy. *Are French vowels more sonorous in IP-initial positions?* In our study,  $F_1$  can be viewed as one of the acoustic correlates of sonority (see [Parker, 2002](#)) and may thus be relevant to this issue. Note, that while  $F_1$  value relates quite well to vowel aperture, defined by tongue and jaw height, it is also sensitive to lip aperture if the vowel configuration can be modelled as a Helmholtz resonator. Contrary to what would be predicted by an overall increase in sonority,  $F_1$  does not increase for all vowels after IP boundary. Indeed, an increase in  $F_1$  is found mainly for open and mid-open vowels (/a, œ/ for the four speakers, /ɛ/ for S1, /ɔ/ for S1 and S4) and rarely for closed or mid-closed vowels (/ə/ all speakers pooled, /e/ for S4, /y/ for S1 and /u/ for S1 and S3).

The functional aspect of this 'syntagmatic contrast enhancement' hypothesis relates to the demarcative function of prosody and supposes that strengthened segments at prosodic edges are more distinct from their flanking neighbours, especially across the prosodic boundary. In our corpus, initial vowels are preceded by a labial stop ([p#V]), and followed by a labial obstruent (except for /ɔ/). In IP condition, the vowel is often separated from the preceding /p/ by a pause, and we observed some cases where the vowel is preceded by a glottalized period. In W condition, it is highly probable that 'enchaînement' occurs and that the preceding /p/ is re-syllabified with the test vowel. As was mentioned by [Fougeron \(1998\)](#), it is possible that the phonetic realization of vowels in W-initial positions are influenced by a larger coarticulation/overlap with the preceding /p/ than in IP-initial position. Acoustically, this could result in a lowering of all formants in W-initial position, but this was not found in our data. For example, if we consider  $F_3$ , which is more directly linked to resonance of the labial cavity, a lower  $F_3$  in W-initial position is found for /i/ (S1, S2, S4), /e/, /ɛ/, /a/ (S2, S3) /œ/ (S1 S3), but a higher  $F_3$  is found for /y/ (S1, S3, S4) and /ə/ (S1). In articulatory terms however, even though the trajectory of the labial gesture from the /p/ to the test vowel cannot be followed with enough accuracy on videos, we did observe (at what could be considered as the target for the vowel) a smaller labial orifice in W-initial position for all vowels. If this narrowing of the labial cavity is due to coarticulation with the preceding- and probably also the following-consonants in W-initial position, then the phonetic properties of vowels in IP-initial position could be modelled as conditioned by a reduced coarticulation in that position. This idea of reduced coarticulation in prosodically strong position is not new. It has been proposed to account for properties of prominent syllables (like Swedish stress syllables in [Öhman \(1967\)](#)'s model, pitch accented English syllables in [De Jong, Beckman, and Edwards \(1993\)](#) and [Harrington, Fletcher, and Roberts \(1995\)](#)). This idea was tested by [Cho \(2005\)](#) for domain-final vowels (and vowels in #CV

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

syllables). For absolute initial segments, however, this proposal needs to be further tested, for example by examining initial vowels in different consonantal environments, as well as in [V#V] contexts.

Let us now consider the second hypothesis according to which prosodic strengthening enhances paradigmatic contrast. This hypothesis derives from the idea developed by De Jong (1995) in reference to Lindblom (1990) to explain prominence effects by a local switch toward a hyperarticulation mode of speech, referred to as "local hyperarticulation". As a consequence, this hyperarticulation entails changes in the phonetic properties of the sounds, which enhance the perceptual clarity of the output: "the hyperarticulation account predicts that all phonemically distinctive contrasts will be directly affected by stress, not just sonority contrasts" (De Jong, 1995: 493). Under this assumption, prosodic strengthening thus relates to communication by enhancing the distinctiveness of speech sounds and by maximizing phonological contrasts. But, *are all distinctive properties of a given segment enhanced in strong positions? If not, which features and contrasts are enhanced?* Our study on the full oral French vowel system is particularly instructive for these issues. In this dense system, the 10 vowels contrast in pairs according to height, backness, and rounding.

Let's consider first the feature [±round]. The phonetic contrast between front rounded and unrounded vowels is affected by prosodic position in terms of  $F_3$  and  $F_3$ - $F_2$  values and dispersion, lip width and lip aperture. In IP-initial position, [-round] vowels /i, e, ε/ have a larger constriction at the lips accompanied by a higher  $F_3$  (for at least 3 speakers) and a larger  $F_3$ - $F_2$  distance. These acoustic results echo the effects found by Fougeron (1998, 2001) for /i/ and by Gendrot and Gerdes (2011) who observed an increase of  $F_3$  for all unrounded vowels at higher prosodic boundaries. All together these variations in IP-initial position could be interpreted as an enhancement of the [-round] specifications of these vowels. However, for the rounded vowels, not all properties that make the vowels [+round] are enhanced. Articulatorily, rounded vowels tend to have a larger rather than a smaller lip constriction in IP-initial positions and no change is observed in lip protrusion, the most visible lip feature (Benoît et al., 1994) and an important parameter for modifying the length of the labial cavity. Acoustically however, the variations at play concur to enhance spectral properties that are distinctive for this category (a lowering of  $F_3$  of /y/ for S1, S3, S4 with a narrowing of  $F_3$ - $F_2$  for S1 and S4, and a lowering of  $F_3$  for /ø/ (S1) and /œ/ (S4)). This is shown especially for /y/ and/or for two of the four speakers (S1, S4). A similar lowering of  $F_3$  as well as a narrowing of  $F_3$ - $F_2$  was found for /y/ in Gendrot and Gerdes (2011). In the absence of a reduction of the labial constriction and a lengthening of the labial cavity, this lowering of  $F_3$  remains to be explained. It is possible that complementary manoeuvres at the tongue and/or larynx level concur to expand the cavities that can be responsible for a lowering of  $F_3$ .

In our last analysis we showed that in both acoustic and articulatory terms, the phonetic contrast between [+round] and [-round] vowels is maximized in IP-initial position for the closed and mid-closed vowel pairs. Our lip aperture and width results match one of the scenarios depicted by Cole et al. (2007), (chart (c) of their Fig. 1): the two contrastive categories are affected by strengthening in a similar way; both undergo an increase in the contrastive measure (here, lip aperture and width) but because the increase is much larger for one of the categories (here, unrounded vowels), the consequence is an enhancement of the articulatory contrast in the strengthened position. From an acoustico-perceptual point of view, the effect of boundary induced variations also results in a maximization of the distinction between the acoustic targets.

As far as height and backness are concerned, we observed an effect of boundary on  $F_1$ ,  $F_2$  and  $F_2$ - $F_1$ . First, as already stated, the vowels /e, ε, ø, a, ɔ, o, u/ are found to be more peripheral in the acoustic space defined by  $F_1$  and  $F_2$ , and therefore are potentially more distinct within this larger acoustic space. This enlargement of the acoustic space in IP-initial position replicates the results found by Gendrot et al. (2011) in French and German, and by Cho et al. (2011) in Korean. (Recall that in these studies however vowels are not always domain-initial but can be in the IP-initial CV syllable.) Within the four aperture degrees in the system, open and mid-open French vowels seem to pattern together in terms of boundary conditioned variations. A systematic increase of  $F_1$  is observed for /a/ and /œ/, and less systematically for /ε/ (S1) and /ø/ (S1, S4), which could be interpreted as an enhancement of their [+low] specification. However, an increase of  $F_1$  is also found for the [-low] vowels /ø/ for the 4 speakers, while for the other [-low] vowels no clear trend emerge (with an increase or decrease of  $F_1$  for /y/, /u/ and /e/ for some speakers, and no effect on /i/ for all). These last results could again be explained by the limited articulatory (and acoustic) freedom in such a dense system for the targets getting closer to the palate.

The maximization of acoustic contrast between front and back vowels is also clear in IP-initial position. The raising of  $F_2$  for /e/ and /ε/ for all speakers, and for /ø/ (S1, S4), /œ/ (S1, S3), /y/ (S1) can be interpreted as an enhancement of the [-back] specification of these vowels, while the narrowing of the  $F_2$ - $F_1$  distance for all back vowels, and the diminution of  $F_2$  for /o/ (S2, S4) contribute to enhance their [+back] specification.

For some of the focal vowels, boundary effects have also been found to affect and enhance what could be related to their 'perceptual/phonetic clarity' as mentioned in De Jong (1995) or Cho (2001), Cho et al. (2011), that is a narrowing of  $F_2$ - $F_1$  for back vowels, and of  $F_3$ - $F_2$  for /y/. For /i/ however, our results do not replicate what was found by Gendrot and Gerdes (2011), since no effect on  $F_4$ - $F_3$  appears in our data.

In conclusion, our results brings additional evidence in favour of an out-put driven motivation of initial strengthening. Our examination of a large vocalic oral system allowed us to show that prosodically induced articulatory and acoustic variation can contribute to the maximization of phonetic contrasts within the system in IP-initial position. Nonetheless, a larger set of speaker should be investigated to fully understand speaker specific strategies. It also suggests that the way initial strengthening operates may be modulated by constraints linked to the density of the system and physiological limitations, opening interesting directions for future researches.

## Acknowledgements

This work has been supported by the French Investissements d'Avenir - Labex EFL program (ANR-10-LABX-0083). We thank the speakers who participated in our experiment and Nicolas Audibert for his help in the analyses. We are also grateful to Ioana Chitoran, Abby Cohn, Agathe Benoit-Lucy and Rachid Ridouane for their suggestions on previous versions of the paper and to the editors of this special issue, H el ene Loevenbruck, and an anonymous reviewer for helpful comments in revising this paper.

## References

- Aby, C., Bo e, L. J., Descout, R., Gentil, M., & Graillet, P. (1980). *Labialit e et phonétique. Données fondamentales et  tudes expérimentales sur la géométrie et la motricité labiales*. Publications de l'Université des Langues et Lettres de Grenoble.
- Barnes, J. A. (2002). *Positional neutralization: A phonologization approach to typological patterns (Unpublished Ph.D. dissertation)*. Berkeley: University of California.
- Beckman, M. E., Edwards, J., & Fletcher, J. (1992). Prosodic structure and tempo in sonority model of articulatory dynamics. In: G. J. Docherty, & D. R. Ladd (Eds.), *Papers in laboratory phonology III: Phonological structure and phonetic form* (pp. 331-353). Cambridge: Cambridge University Press.
- Benoît, C., Mohamadi, T., & Kandel, S. (1994). Effects of phonetic context on audio-visual intelligibility of French. *J. Speech and Hearing Research*, 37, 1195-1293.
- Boersma, P., & Weenink D. (2009). Praat: Doing phonetics by computer (Version 5.1.22) [Computer program]. (<http://www.praat.org/>) Retrieved 15.09.09.
- Bombien, L., Mooshammer C., Hoole P., Rathcke T., & K uhner B. (2007). Articulatory strengthening in initial German /k/ clusters under prosodic variation. In *Proceedings of the 16th international congress of phonetic sciences* (pp. 457-460). Saarbrücken, Germany.

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

- Byrd, D. (2000). Articulatory vowel lengthening and coordination at phrasal junctures. *Phonetica*, 57(1), 3–16.
- Byrd, D. (2002). Commentary: Relating prosody and dynamic action units. In *The 8th conference on laboratory phonology*. New Haven, Connecticut.
- Byrd D., & Choi, S. (2006). At the juncture of prosody, phonology, and phonetics – The interaction of phrasal and syllable structure in shaping the timing of consonant gestures. In *The 10th conference on laboratory phonology*. Paris, France.
- Byrd, D., & Saltzman, E. (1998). Intra-gestural dynamics of multiple phrasal boundaries. *Journal of Phonetics*, 26, 173–199.
- Cho, T. (1998). Domain-initial strengthening in the prosodic hierarchy: an EPG study. In *Proceedings of 11th international conference on Korean linguistics (ICKL 11)*, University of Hawaii at Manoa.
- Cho, T. (2001). Effects of morpheme boundaries on intergestural timing: Evidence from Korean. *Phonetica*, 58, 129–162.
- Cho, T. (2005). Prosodic strengthening and featural enhancement: Evidence from acoustic and articulatory realizations of /a, i/ in English. *Journal of Acoustical Society of America*, 11(6), 3867–3878.
- Cho, T. (2006). Manifestation of prosodic structure in articulation: Evidence from lip kinematics in English. In: L. Goldstein, D. H. Whalen, & C. T. Best (Eds.), *Laboratory phonology 8* (pp. 519–548). Berlin/New York: Mouton de Gruyter.
- Cho, T. (2008). Prosodic strengthening in transboundary V-to-V lingual movement in American English. *Phonetica*, 65(1–2), 45–61.
- Cho, T. (2011). The phonetics–prosody interface in laboratory phonology. In: N. C. Kuma, B. Botma, & K. Nasukawa (Eds.), *The continuum companion to phonology*. London/New York: Continuum.
- Cho, T., Jun, S.-A., & Ladefoged, P. (2002). Acoustic and aerodynamic correlates of Korean stops and fricatives. *Journal of Phonetics*, 27, 207–229.
- Cho, T., & Jun, S.-A. (2000). Domain-initial strengthening as featural enhancement: Aerodynamic evidence from Korean. *Chicago Linguistics Society*, 36, 31–44 (Also appeared in *UCLA working papers in phonetics*, 99, 57–70).
- Cho, T., & Keating, P. (1999). Articulatory and acoustic studies of domain-initial strengthening in Korean. *UCLA working papers in phonetics*, 97, 100–138.
- Cho, T., & Keating, P. (2009). Effects of initial position versus prominence in English. *Journal of Phonetics*, 37(4), 466–485.
- Cho, T., & Keating, P. A. (2001). Articulatory and acoustic studies on domain-initial strengthening in Korean. *Journal of Phonetics*, 29(2), 155–190.
- Cho, T., Lee, Y., & Kim, S. (2011). Communicatively driven versus prosodically driven hyper-articulation in Korean. *Journal of Phonetics*, 39(3), 344–361.
- Cho, T., & McQueen, J. (2005). Prosodic influences on consonant production in Dutch: Effects of prosodic boundaries, phrasal accent and lexical stress. *Journal of Phonetics*, 33(2), 121–157.
- Clements, G. N. (1987). Toward a substantive theory of feature specification. *Proceedings of NELS*, 18(1), 79–89.
- Cole, J., Kim, H., Choi, H., & Hasegawa-Johnson, M. (2007). Prosodic effects on acoustic cues to stop voicing and place of articulation: Evidence from Radio News speech. *Journal of Phonetics*, 35, 180–209.
- De Jong, K. J. (1995). The supraglottal articulation of prominence in English: Linguistic stress as localized hyperarticulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1), 491–504.
- De Jong, K. J., Beckman, M. E., & Edwards, J. (1993). The interplay between prosodic structure and coarticulation. *Language and Speech*, 36, 197–212.
- Doherty, M., Loevenbruck, H., & Hill, H. (2006). Visual correlates of prosodic contrastive focus in French: Description and inter-speaker variability. In *Proceedings of speech prosody* (pp. 221–224). Dresden, Germany.
- Doherty, M., Loevenbruck, H., & Hill H. (2009). Recognizing prosody from the lips: Is it possible to extract prosodic focus from lip features? In Alan Wee-Ching Liew, & Shilin Wang (Eds.), *Visual speech recognition: Lip segmentation and mapping, medical formation science reference*, Hershey, New York.
- Fougeron, C. (1998). *Variations articulatoires en début de constituants prosodiques de différents niveaux en français (Ph.D. dissertation)*, Université Paris 3.
- Fougeron, C. (1999). Articulation of prosodic phrasing in French. In *Proceedings of the 14th international congress of phonetic sciences* (pp. 675–678). San-Francisco, USA.
- Fougeron, C. (2001). Articulatory properties of initial segments in several prosodic constituents in French. *Journal of Phonetics*, 29, 109–135.
- Fougeron, C., & Jun, S.-A. (1998). Rate effects on French intonation: Phonetic realization and prosodic organization. *Journal of Phonetics*, 26, 45–70.
- Fougeron, C., & Keating, P. A. (1997). Articulatory strengthening at edges of prosodic domains. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(6), 3728–3740.
- Fromkin, V. (1964). Lip positions in American English vowels. *Language and Speech*, 7, 215–225.
- Gendrot, C., & Adda, M. (2005). Impact of duration on F1/F2 formant values of oral vowels: An automatic analysis of large broadcast news corpora in French and German. In *Proceedings of eurospeech* (pp. 2453–2456). Lisbon, Portugal.
- Gendrot, C., & Gerdes, K. (2011). Prosodic hierarchy and spectral realization of vowels in French. In H.-Y. Yoo, & E. Delais-Roussarie (Eds.), *IDP 2009* (pp. 191–205). Paris, France.
- Gendrot, C., Gerdes, K., & Adda-Decker, M. (2011). Impact of prosodic position on vocalic space in German and French. In *Proceedings of the 17th international congress of phonetic sciences* (pp. 731–734). Hong-Kong, China.
- Georgeton, L., & Audibert, N. (2012). Variations de la configuration labiale des voyelles /i, y, a/: effets de la position prosodique et du locuteur. In *Proceedings of the 19ième Journées d'Etude sur la Parole (JEP 2012)* (pp. 465–472). Grenoble, France.
- Georgeton, L., Audibert, N., & Fougeron, C. (2011). Rounding and height contrasts at the beginning of different prosodic constituents in French. In *Proceedings of the 17th international congress of phonetic sciences* (pp. 739–742). Hong Kong, China.
- Harrington, J., Felcher, J., & Roberts, C. (1995). Coarticulation and the accented/unaccented distinction: evidence from jaw movement data. *Journal of Phonetics*, 23, 305–322.
- Hirst, D. J., & Di Cristo, A. (1984). French intonation: A parametric approach. *Die Neueren Sprachen*, 83, 564–569.
- Keating, P. A., Cho, T., Fougeron, C., & Hsu, C. (2003). Domain-initial strengthening in four languages. In: J. Local, R. Ogden, & R. Temple (Eds.), *Laboratory phonology IV: Phonetic interpretation* (pp. 145–163). Cambridge University Press.
- Kim, S., & Cho, T. (2012). Prosodic strengthening in the articulation of English /æ/. *Studies in Phonetics, Phonology and Morphology*, 18(2), 321–337.
- Krivokapic, J. (2007). Prosodic planning: Effects of phrasal length and complexity on pause duration. *Journal of Phonetics*, 35, 162–179.
- Kuzla, C., Cho, T., & Ernestus, M. (2007). Prosodic strengthening of German fricatives in duration and assimilatory devoicing. *Journal of Phonetics*, 35, 301–320.
- Kuzla, C., & Ernestus, M. (2011). Prosodic conditioning of phonetic detail in German plosives. *Journal of Phonetics*, 39, 143–155.
- Ladefoged, P. (1979). Articulatory parameters. In *9th international congress of phonetic sciences* (Vol. I, pp. 41–47).
- Lehnert-Lehoullier H., McDonough J., & McAleavey S. (2010). Prosodic strengthening in American English domain-initial vowels. In *Proceedings speech prosody Chicago*.
- Lindblom, B. (1990). Explaining phonetic variation: A sketch of the H & H theory. In: W. Hardcastle, & A. Marchal (Eds.), *Speech production and speech modeling* (pp. 403–440). Dordrecht: Kluwer.
- Ménard L., Leclerc A., Tiede M., Prémont A., Turgeon C., & Trudeau-Fiset P., et al. (2013). Correlates of contrastive focus in congenitally blind adults and sighted adults. In *Proceedings of the 14th annual conference of the international speech communication association*, Lyon, France.
- Ménard, L., Loevenbruck, H., & Savariaux, C. (2006). Articulatory and acoustic correlated of contrastive focus in French: A developmental study. In: J. Harrington, & M. Tabain (Eds.), *Speech production: models, phonetic processes and techniques* (pp. 227–251). New York: Psychology Press.
- Öhman, S. (1967). *Word and sentence intonation: A quantitative model (STL-QPSR 2-3)* (pp. 20–54). Stockholm: KTH.
- Onaka, A. (2003). Domain-initial strengthening in Japanese: An acoustic and articulatory study. In *Proceedings of the 15th international congress of phonetic sciences*. (pp. 2091–2094). Barcelona, Spain.
- Parker, S. G. (2002). *Quantifying the sonority hierarchy (Ph.D. dissertation)*. University of Massachusetts Amherst.
- Pasdeloup, V. (1990). *Modèle de règles rythmiques du français appliqué à la synthèse de la parole (Thèse de doctorat)*. Université de Provence.
- Schwartz, J.-L., Boë, L.-J., Vallée, N., & Abry, C. (1997). The dispersion-focalization theory of vowel systems. *Journal of Phonetics*, 25(3), 255–286.
- Sterniade, D. (1987). Redundant values. *CLS*, 23, 339–363.
- Stevens, S., Keyser, S. J., & Kawasaki, H. (1986). Toward a phonetic and phonological theory of redundant features. In: Joseph S. Perkell, & Dennis H. Klatt (Eds.), *Invariance and variability in speech processes* (pp. 429–449). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Tabain, M., & Perrier, P. (2005). Articulation and acoustics of /il/ in pre-boundary position in French. *Journal of Phonetics*, 33, 77–100.
- Tabain, M., & Perrier, P. (2007). An articulatory and acoustic study of /ul/ pre-boundary position in French: The interaction of compensatory articulation, neutralization avoidance and featural enhancement. *Journal of Phonetics*, 35, 135–161.
- Vaissière J. (2011). On the acoustic and perceptual characterization of reference vowels in a cross-language perspective. In *Proceedings of the 17th international congress of phonetic sciences* (pp. 52–59). Hong-Kong, China.
- Wightman, C. W., Shattuck-Hufnagel, S., Ostendorf, M., & Price, P. J. (1992). Segmental durations in the vicinity of prosodic phrase boundaries. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91, 1707–1717.
- Zerling, J.-P. (1990). *Aspects articulatoires de la labialité vocale en français. Contribution à la modélisation à partir de labio-photographies, labiofilms et films radiologiques. Etude statique, dynamique et contrastive* (Ph.D. dissertation) Université de Strasbourg II.

Please cite this article as: Georgeton, L., & Fougeron, C. Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2014.02.006>

# Domain initial strengthening and height contrast in French: acoustic and ultrasound data

Laurianne Georgeton, Tanja Kocjančič Antolík & Cécile Fougeron

Laboratoire de Phonétique et Phonologie, UMR 7018, CNRS/Univ. Paris 3-Sorbonne Nouvelle, France

[laurianne.georgeton; cecile.fougeron]@univ-paris3.fr; tkocjancic@gmail.com

## Abstract

*This paper investigates how prosodic boundary strength (IPi vs. IPm) affects the production of the vowels /i, e, ε, a/, which contrast on a four degrees of height scale in French. Acoustic and tongue configuration data are examined for four speakers. Results show an expansion of the vowel space in IP-initial position that is achieved by a rising of F2 for /i, e, ε/ and of F1 for /ε, a/. Differences in tongue configuration also contribute to an expansion of the articulatory space in IP-initial position are also observed. Measurements on the highest point of the tongue show a narrowing of the constriction for /i, e, ε/, accompanied by fronting for /e, ε/, and a widening and backing of the constriction for /a/ for most speakers. These variations in IP-initial position lead to a maximization of phonetic contrasts in terms of height and frontness within the pairs /e-ε/ and /ε-a/ for most speakers, but not within the pair /i, ε/, probably due to articulatory/acoustic constraints.*

**Keywords:** vowels, prosodic boundary, French, height contrast

## 1. Introduction

Several studies have reported an effect of prosodic position on vowels, with a modification of their acoustic or articulatory properties when accented or close to a prosodic boundary (see the review by Cho 2011; and recently Kim & Cho 2011, 2012; Georgeton & Fougeron, 2014). Except for the last reference, most studies have been limited to the investigation of only a few types of vowels, usually peripheral vowels. Consequently, it is not clear whether all vowel types are modified in the same way, nor whether prosodically driven segmental variations may be modulated by the density of the phonological inventory.

In order to address these questions, the purpose of this study is to investigate prosodic effect on vowels in a dense dimension of contrasts, namely the four levels of height on which the four front vowels /i, e, ε, a/ are contrastive in French. Variations in the lingual and acoustic properties of these vowels are tested according to the strength of the prosodic boundary, i.e. according to whether they are initial or medial in an Intonational Phrase (IPi or IPm).

Few studies have investigated variations in the lingual articulation of vowels in absolute domain-initial positions (#VC sequences) and their results show that vowels are influenced by prosodic strengthening (as consonants do) with a global increase in gestural magnitude in higher prosodic constituents, which interacts with vowel in different directions. In a study investigating lingual variation of the two vowels /ε/ and /ɔ/ in English, Lehnert-Lehouillier and colleagues reported a greater articulatory magnitude in IP initial position, without more description on the direction of the changes in lingual configuration (Lehnert-Lehouillier, McDonough McAleavey, 2010). Kim and Cho (2011, 2012)

observed that for all the three front English vowels /i, ɪ, æ/, boundary induced variation resulted in a featural enhancement of [+/-high] properties in such a way that, in IP-initial position, the high front vowels /i, ɪ/ were higher while the low front /æ/ was lower. For the vowel /æ/, this variation in height was accompanied by more anterior tongue position.

In French, prosodically driven lingual variations on vowels have been mostly investigated under focal accentuation or in domain-final position. Loevenbruck (1999, 2000) observed a similar expansion in height contrast between /i/ and /a/ under focal accentuation, with a higher tongue body for /i/ and a lower tongue body for /a/. Tabain & Perrier investigated domain final /i/ (2005), /a/ (2003) and /u/ (2007) in different prosodic constituents. A lower tongue body before stronger prosodic boundaries was also found for the low vowel /a/, but for /i/ the effect was lesser and speaker-dependent: one of their three speakers showed a backing of the tongue but the other two tended to raise and front their tongue body. For the vowel /u/, they observed tongue dorsum backing coupled with raising or lowering depending on the speaker. The authors concluded that these different strategies concurred to a common acoustic goal: the raising of F3 for vowel /i/, and the lowering of F2 for vowel /u/ in order to prevent a perceptual confusion with /y/. These results suggest that articulatory variations induced by prosodic boundaries may depend on the language's phoneme inventory and the preservation of vowel contrasts (see also Cho & Jun 2000 for consonantal contrasts). In a recent study (Georgeton & Fougeron, 2014), we also observed contrast-dependent variation in domain-initial position, by looking at the labial articulation and acoustic properties of the 10 oral vowels of the French system. While all vowels showed an increase in lip area in IP-initial position, this effect was found to be larger for the unrounded vowels. Consequently, the contrast between front rounded and unrounded vowels was found to be maximized in IP-initial position.

In the present paper, we address further this question by investigating changes in tongue configuration and acoustic property for the four front (unrounded) French vowels /i, e, ε, a/. Within these four levels of height, density-dependent limitations on phonetic variation may be at play (as suggested by Manuel, 1990 for example). According to the literature cited above, an enlargement of the oral constriction can be expected for the lower vowel /a/, while predictions are not clear for the vowel /i/, and absent for the non-peripheral vowels, the mid-closed /e/ and mid-open /ε/. We will therefore examine how prosodic effect modifies the articulation of these domain-initial vowels and whether it interacts with vowel contrasts in this dense system.

## 2. Material and method

The lingual configuration and acoustic properties of the four front oral vowels /i, e, ε, a/ have been investigated in two prosodic conditions: in an Intonational phrase-initial (IPi) vs. a IP-medial (IPm) position. For the IPm position, vowels were initial in the second word of a fake compound first name. The

four vowels were produced in controlled sentences in a [ip#VC] context. C is /p/ for /i, e, a/ and /v/ for mid-open /ɛ/, in order to prevent its pronunciation as mid-closed (see Georgetown & Fougeron 2014 for the description of a similar corpus). Four female speakers were recorded with a Midray DP600 ultrasound (60 i/sec) with head stabilization (Articulate Instruments Ltd, 2008).

Each sentence was produced 10 times in a random order but repetitions with un-exploitable tongue contours have been discarded from the analysis. Table 1 summarizes the number of renditions analyzed per vowels and prosodic positions (IPi, IPm) for the 4 speakers (SA, SC, SL, SZ).

Table 1: Number of renditions analyzed by speaker, prosodic position and vowels.

	SC		SL		SZ		SA	
	IPi	IPm	IPi	IPm	IPi	IPm	IPi	IPm
/i/	10	10	10	10	11	9	5	5
/e/	10	10	10	10	8	9	6	6
/ɛ/	10	10	10	10	9	9	6	6
/a/	10	10	8	8	11	9	5	6

Target vowels were segmented and labeled in Praat in order to extract acoustic duration and formant values. F1 and F2 were taken at three successive points in the middle of target vowels and then averaged. For lingual configuration, one to three (depending on vowel duration) successive tongue contours were traced manually in the middle of the vowel with Articulate Assistant Advanced (Articulate Instruments Ltd, 2012) and then averaged for each vowel/position condition. An estimation of vowel height and place of articulation was done by quantifying the height (y-axis) and front-back location (x-axis) of the highest point of the tongue, which was automatically extracted from individual contours.

In order to test whether F1, F2, duration and coordinates of the highest point of the tongue vary according to prosodic position, analyses by speaker are done with sample t-tests for each vowel. In order to test the interaction of boundary effects with height contrast between each pair /i-e/, /e-ɛ/ and /ɛ-a/ two-factor ANOVAs (position, vowel) were conducted for each speaker. (Note that due to space limitations, statistical details are not given here and only significant differences are reported; for speaker SA, given his small number of renditions, only tendencies are reported).

### 3. Results

#### 3.1. Boundary effect (IPi vs IPm) on the lingual and acoustic properties per vowel types

Differences in tongue contours and in spectral according to prosodic positions are illustrated in

Figure 1. For all speakers, an effect of prosodic position is observed, with speaker- and vowel-dependent patterns. Looking at F1 and F2 of vowels in IP-initial position compared to IP-medial position, the following variations are observed:

- /i/ has a higher F2 for all speakers except SZ, and no variation is found on F1;
- /e/ has a higher F2 for all speakers and a higher F1 for one speaker (SL)
- /ɛ/ has a higher F2 and a higher F1 for all speakers;
- /a/ has a higher F1 for all speakers. An effect on F2 is found for speakers SL and SZ but in an opposite direction: higher F2 for SZ and lower F2 for SL.

These spectral variations are not accompanied by systematic differences in acoustic vowel duration. Speakers SL, SC and SA have longer /i/ in IPi, but for the other vowels, few differences in vowel duration appear, and these differences are speaker- and vowel-dependent. A lengthening in IPi is found for /e/ for SC, a shortening is found for /ɛ/ for SL, for /a/ for SL and SZ, and for the nine other comparisons there is no change in vowel duration.

Considering articulatory variations, the differences in tongue contours between the two positions presented in Figure 1 appear to be larger for speakers SL, SZ and SA than for speaker SC, and are clearly vowel dependent.

As explained in the method section, a quantification of the differences in lingual configuration is made to estimate the degree and location of the constriction at the highest point of the tongue. In IP-initial position, the following variations are observed:

- /i/ has a narrower constriction with a rising of the highest point of the tongue for all speakers except SZ, who rather shows a backing of the constriction.
- /e/ has a narrower constriction for all speakers and a fronter constriction for speaker SL and SA;
- /ɛ/ has a narrower constriction for all speakers and a fronter constriction for all except SC.
- /a/, on the other hand, has a wider constriction for all speakers, and a backer constriction for all except SC.

Overall, from a systemic perspective, the variations observed in IP-initial compared to IP-medial position contribute to an expansion of the acoustic and articulatory spaces. This expansion is achieved by an enlargement of the spaces both in the vertical dimension (constriction height, F1) and horizontal dimension (constriction location, F2).

#### 3.2. Boundary effects on the contrast between vowels pairs

The effect of prosodic position is further tested here on the acoustic and articulatory contrast between adjacent vowels along the vowel height dimension of contrast. For this, we test whether the effect of boundary depends on the vowel identity within the three vowel pairs (/i-e/, /e-ɛ/, /ɛ-a/), and therefore whether the contrast between the members of the pairs is affected by prosodic position.

For the /i-e/ pair, a significant interaction is found on constriction height for all speakers: both /i/ and /e/ have a narrower constriction in IPi, but the amplitude of the tongue rising for /e/ is larger than that for /i/. Consequently, /e/ gets closer to /i/ and the contrast in height dimension between these two vowels is not maximized in IP-initial position. An interaction is also found on dimensions linked to place of articulation: front-back position of the constriction for SL and SC, and F2 for SZ and SA. For all speakers except SC, both vowel are modified in the same way (higher F2 for SZ and SA and fronter constriction for SL) but with a larger change for /e/. Consequently /e/ gets closer to /i/. Speaker SC is the only one showing a larger contrast in constriction location between /i/ and /e/ in IPi, with a fronting of the constriction for /i/ and a backing for /e/.

For the pair /e-ɛ/, an interaction is found on the dimensions linked to vowel height: F1 for all speakers except SL, and constriction height for SL. This interaction reflects a maximization of the distinction between the mid-closed and mid-open vowels in IPi for all speakers, with a greater narrowing of the constriction for /e/ than /ɛ/ (SL), and a large rising of F1 for /e/ (SC, SZ, SA). Interactions are also found

on the dimensions linked to place of articulation for all speakers except SC: on F2 for SL and SA, on the front-back position of the constriction for SL and SZ. Again the contrast between the two vowels is maximized in IPi for SL and SA with a larger F2 rise for /e/ than /ɛ/ (SL and SA) and more fronting of the constriction (SL). For SZ however, the two vowels get closer in IPi with a slight backing of the constriction for /e/ and a slight fronting for /ɛ/.

For the pair /ɛ-a/, interactions are found on constriction height for all speakers, on F1 for all speakers except SA, on constriction location for all except SC and on F2 for all except SZ. The two vowels are more distinct in IPi position with a wider constriction and higher F1 for /a/ than /ɛ/ for all speakers except SA, and with a backer constriction for SL, SA, SZ, and a lower F2 for SL, SC, SZ.

#### 4. Discussion and conclusion

In this study, we investigated the effect of prosodic position on the lingual and acoustic properties of the front unrounded oral French vowels /i, e, ɛ, a/ in IP-initial vs. IP-medial positions. As found in the other studies presented in the introduction, we show that prosodic position influences the articulation and acoustic properties of the vowels. In IP-initial position an expansion of the articulatory and acoustic spaces is observed in height and front-back dimensions of the lingual constriction (estimated from the highest point of the tongue) as well as in F1 and F2 dimensions.

The observation of more than two degrees of vowel height provides interesting results on the direction of this boundary effect. Different sets of vowels can be distinguished. On the dimension related to tongue height (vertical position of the highest point of the tongue), the non-low vowels /i, e, ɛ/ pattern together with a narrower constriction degree in IP-initial position for most of the speakers (three for /i/, four for /e, ɛ/). On the other hand, the low vowel /a/ shows a widening of the oral constriction for all speakers, as observed in other studies. Regarding the location of the constriction in the front-back dimension, a fronting of the constriction is observed in IPi for /e, ɛ/ (two speakers for /e/, and three for /ɛ/), while /a/ has a backer constriction (three speakers). These measurements made on the highest point of the tongue appear to be well suited to quantify some of the differences in tongue contours illustrated in Figure 1. However, they do not capture the overall modifications in tongue shape and location. Modifications in the oral cavity resonators are therefore better accounted for by the variations in F1 and F2. In IP-initial position, the vowels /i, e, ɛ/ also pattern together with a rising of F2 for at least three speakers. In terms of F1, the non-high /e, a/ are both characterized by a rising of F1 for all speakers (also for /ɛ/ for one speaker).

Our data further show that in a dense system of contrast, where vowels have little room for phonetic variations, prosodic boundary effects may contribute to maximize the contrast between adjacent vowels. An increase of phonetic distinctiveness is observed on our articulatory and/or acoustic measurements with differences according to speakers and vowel pairs. Overall, for all pairs but /i-e/, the distinction between the vowels is maximized in IP-initial position in at least one dimension for all speakers. The contrast between the mid-open and mid-closed vowels is mainly increased in the height dimension (F1 and constriction height), and the contrast between the mid-open and open vowels is mainly increased in height and/or frontness of the constriction. In most cases, the direction of the articulatory and/or acoustic variations in IP-initial position is similar for the two vowels of the pair, but is

larger for one of them, leading to an increase of contrast between the two. A similar tendency was observed in Georgetown & Fougeron (2014) for the labial configuration resulting in an increase of contrast between front rounded and unrounded vowels (see also Cole et al. 2007 for consonants). For the pair /i-e/, however, no increase of contrast is found, except for the location of the constriction for SC. Acoustic and physiological limitation can explain that the tongue rising in IPi is more constrained for /i/ and is thus smaller than that for /e/. Similarly, boundary induced variation at the lips were found to be larger for unrounded vowels than for the more constrained rounded vowels in Georgetown & Fougeron (2014). Taken together these results suggest that phonetic contrasts between vowels tend to be maximized in IP-initial position in dimensions that are less constrained by articulatory and/or acoustic limitations. Cross-linguistic comparisons between languages with different vowel inventories are now necessary to determine how these limitations comply with the language system of contrasts.

#### 5. Acknowledgements

This work has been supported by the French Investissements d'Avenir - Labex EFL program (ANR-10-LABX-0083).

#### 6. References

- Articulate Instruments Ltd (2008). *Ultrasound Stabilisation Headset Users Manual: Revision 1.4*. Edinburgh, UK, Articulate Instruments Ltd
- Articulate Instruments Ltd (2012). *Articulate Assistant Advanced User Guide: Version 2.14*. Edinburgh, UK: Articulate Instruments Ltd.
- Cho, T. (2011). The phonetics-prosody interface in laboratory phonology. In: N. C. Kuma, B. Botma, & K. Nasukawa (Eds.), *The continuum companion to phonology*. London / New York: Continuum.
- Cho, T., & Jun, S.-A. (2000). Domain-initial strengthening as featural enhancement: Aerodynamic evidence from Korean. *Chicago Linguistics Society*, 36, 31-44 (Also appeared in UCLA working papers in phonetics, 99, 57-70).
- Georgetown, L. & Fougeron, C. (2014). Domain-initial strengthening of French vowels and phonological contrasts: Evidence from lip articulation and spectral variation. *Journal of Phonetics*.
- Cole, J., Kim, H., Choi, H., & Hasegawa-Johnson, M. (2007). Prosodic effects on acoustic cues to stop voicing and place of articulation: Evidence from Radio News speech. *Journal of Phonetics*, 35, 180-209.
- Kim, S., & Cho, T. (2012). Prosodic strengthening in the articulation of English /æ/. *Studies in Phonetics, Phonology and Morphology*, 18(2), 321-337.
- Kim, S., & Cho, T. (2011). *Articulatory manifestation of prosodic strengthening in English /i/ and /ɛ/. Phonetics and Speech Sciences 3.4 13-21. The Korean Society of Speech Sciences*
- Lehnert-LeHouillier H., McDonough J., & McAleavey S. (2010). Prosodic strengthening in American English domain-initial vowels. In *Proceedings speech prosody Chicago*.
- Loevenbruck, H. (1999). An investigation of articulatory correlated of the Accentual Phrase in French. *Proceedings of the 14th ICPHS, San Francisco, USA, vol.1, pp. 667-670*.
- Loevenbruck, H. (2000). Effets articulatoires de l'emphase contrastive sur la Phrase Accentuelle en Français. *Proceedings of the XXIIIth Jep, Aussois, France, pp. 165-168*.
- Manuel, S. (1990). The role of contrast in limiting vowel-to-vowel coarticulation in different languages. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 1286-1298.
- Tabain, M. (2003). Effects of prosodic boundary on /aC/sequences: articulatory results. *Journal of the Acoustical Society of America* 113, 2834-2849.



Tabain, M., & Perrier, P. (2005). Articulation and acoustics of /i/ in pre-boundary position in French. *Journal of Phonetics*, 33, 77-100.

Tabain, M., & Perrier, P. (2007). An articulatory and acoustic study of /u/ pre-

boundary position in French: The interaction of compensatory articulation, neutralization avoidance and featural enhancement. *Journal of Phonetics*, 35, 135-161.

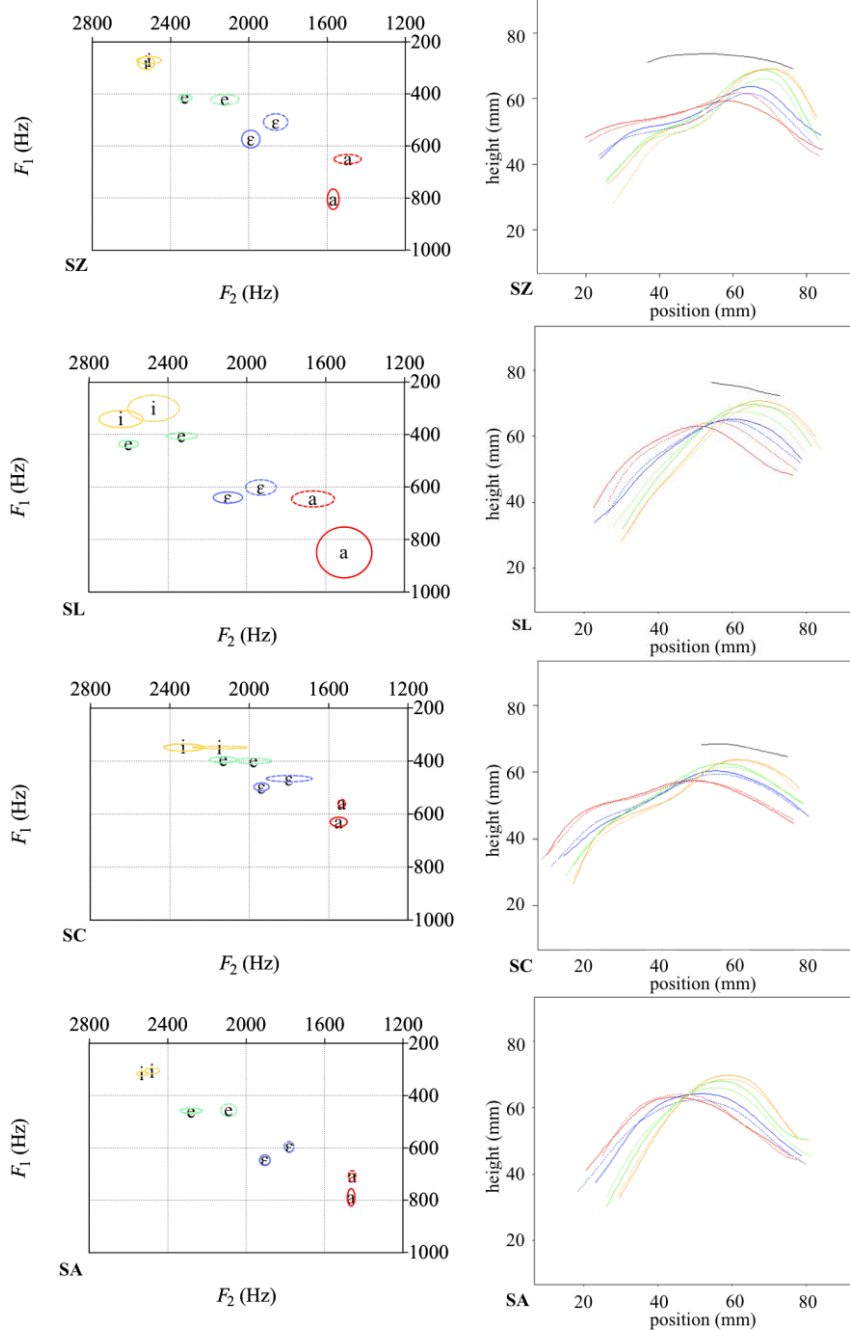


Figure 1: Mean tongue contours and F1/F2 values of the four vowels /i/ (orange), /e/ (green), /ɛ/ (blue) and /a/ (red) in IPi (solid line) and IPm (dotted line) for the four speakers (SZ, SL, SC, SA).

## Acoustic and lingual variation within the 4-way contrast of vowel height in French

Laurianne Georgeton, Tanja Kocjančič Antolík & Cécile Fougeron

Lab. de Phonétique et de Phonologie UMR 7018, CNRS/Univ. Paris 3-Sorbonne Nouvelle, France

[laurianne.georgeton; cecile.fougeron]@univ-paris3.fr; tkocjancic@gmail.com

Phonetic variation in the realization of vowels has been found to depend on the density of phonological inventories (Manuel & Krakow, 1984; Manuel, 1990), with a larger dispersion in the acoustic space of the vocalic targets in a system with fewer vocalic contrasts. In this study, we explore the variability of vowels in the dense system of French, where the four distinctive degrees of height leave little room for phonetic variation. More specifically, we examine how prosodically conditioned variations, earlier attested for peripheral vowels in the language (Loevenbruck 1999, Tabain 2003, Tabain & Perrier 2005), affect height contrasts between front vowels.

The lingual configuration and spectral properties of the four front oral vowels /i, e, ε, a/ produced in Intonational phrase-initial position (IPi), where articulatory strengthening is expected (Georgeton & Fougeron, in press), are compared with those in Word-initial position (Wi). Synchronized ultrasound and audio data of four female speakers was recorded, with each vowel being produced in controlled [ip#VC] context and repeated ten times. For acoustic measurements (F1, F2 and F2-F1), three points were taken in the middle of target vowels and then averaged. For lingual configuration, three successive contours were traced manually in Articulate Assistant Advanced in the middle of the vowel and then averaged.

Preliminary results based on the two speakers analyzed so far are illustrated in Figure 1. They show an expansion of the acoustic and articulatory space in IP-initial position, which is more important for one of the speaker (S1). In IP-initial position, the four vowels of the two speakers are more peripheral in terms of F1 for the low vowels /ε, a/ and of F2 for /i, e, ε/. In terms of lingual configurations, the articulatory space between the maximally contrasting vowels (/i/ and /a/) is strikingly larger in IPi position (solid lines) for speaker S1: there is a slight rising of the front part of the tongue for /i/ (compared to its contour in Wi) and a large lowering of the front part of the tongue accompanied by a slight backing for /a/ (compared to its contour in Wi). Crucially in IPi positions, the difference in tongue contour between vowel pairs of different height is enlarged (see for each pair the difference between the solid lines vs. the difference between the dotted lines) except for the pair /i-e/. The second speaker, S2, shows very little variation in tongue contour according to position. A slight narrowing of the constriction is observed for /e/ and /ε/ in IPi, due to a small rising of the tongue, with a slight fronting for /ε/. For /i/ and /a/ no clear variations are found.

While two other speakers remain to be analyzed, these results first confirm other observations of speaker-dependent articulatory variations in prosodically strong positions. More interestingly, they show that, when present, articulatory and acoustic variation tends to maximize the contrast between vowels. Furthermore, they suggest that in this dense system of height contrasts, distinctions between the four vowels tend to be maximized by variation in dimensions which are freer to vary (frontedness for /i, e/, lowering for /ε, a/).

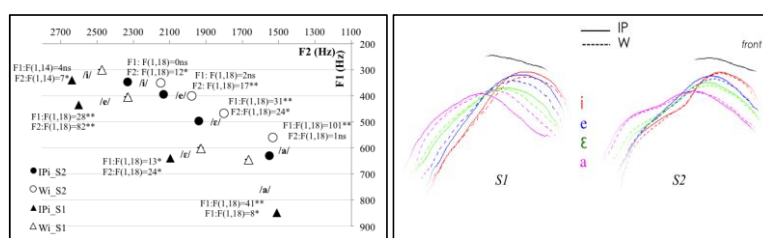


Figure 1 Left: Distribution of the 4 front vowels in the F1/F2 space according to prosodic positions and speakers with results of the IP vs. W comparisons. Right: Mean tongue contours for the 4 vowels in IPi (plain line) and Wi (dotted line) positions for the 2 speakers.

### References

Georgeton, L. & C. Fougeron. in press, Domain-initial strengthening on French vowels and phonological contrasts: evidence from lip articulation and spectral variation. Special Issue, *J. Phonetics* / Loevenbruck H. 1999, An investigation of articulatory correlates of the Accentual Phrase in French, *Proc. 14<sup>th</sup> ICPhS San Francisco*, 667-670 / Manuel, S.Y. & Krakow, R.A. 1984, Universal and language particular aspects of vowel-to-vowel coarticulation, *Haskins Status Report on Speech Research*, SR-77/78, 69-78 / Manuel, S.Y. 1990, The role of contrast in limiting vowel-to-vowel coarticulation in different languages, *J. Acoust. Soc. Am.*, 88, 1286-98 / Tabain M. 2003, Effects of prosodic boundary on /aC/ sequences : Articulatory results, *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 (5), 2834-2849. / Tabain M. & Perrier P. 2005, Articulation and acoustics of /i/ in pre-boundary position in French. *J. Phonetics* 33, 77-100.





# Listes des tableaux

Tableau 1: système vocalique du français classé selon les contrastes de nasalité, d'aperture, de lieu d'articulation (antériorité/postériorité) et d'arrondissement (note : tendance à une neutralisation entre les voyelles / $\tilde{e}$ / - / $\tilde{\alpha}$ / et /a/-/a/) .....	29
Tableau 2: Représentation de la classification binaire des voyelles orales du français extrait de Dell (1985) .....	30
Tableau 3: Position du paramètre P1, correspondant à la mâchoire, proposée par le modèle de Maeda (P1_initial) et position du paramètre P1 modifiée (P1_modif) selon un abaissement de 0,5 pour chaque voyelle. (0,5= mâchoire haute, -1,5= mâchoire basse) .....	40
Tableau 4: Valeurs formantiques F1, F2, F3 (FX) pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX_initial), relevées après abaissement de la mâchoire (FX_modif). FX_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif. FX_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif en pourcentage %. (diminution en noir, augmentation en gris) .....	41
Tableau 5: Position du paramètre P5, correspondant à l'ouverture aux lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P5_initial) et position du paramètre P5 modifiée (P5_modif) selon une augmentation de 0,5 pour chaque voyelle. (1= ouverture large, -1= aperture réduite). .....	42
Tableau 6: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX_initial), relevées après augmentation de l'aperture aux lèvres (FX_modif). FX_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif. FX_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris) .....	42
Tableau 7: Position du paramètre P5, correspondant à l'ouverture aux lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P5_initial) et position du paramètre P5 modifiée (P5_modif) selon une augmentation de 0,5 pour les voyelles [-arrondi] et selon une diminution de 0,5 pour les voyelles [+arrondi] (1= ouverture large, -1= aperture réduite) .....	43
Tableau 8: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX_initial), relevées après augmentation de l'aperture aux lèvres pour les voyelles non-arrondies et diminution de l'aperture aux lèvres pour les voyelles arrondies (FX_modif). FX_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif. FX_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris) .....	44
Tableau 9: Position du paramètre P6, correspondant à la protrusion des lèvres, proposé par le modèle de Maeda (P6_initial) et modifié (P6_modif) dans le sens d'une diminution du paramètre pour les voyelles non-arrondies et dans le sens d'une augmentation du paramètre pour les voyelles arrondies. .....	45
Tableau 10: Valeurs formantiques F1, F2, F3 pour l'ensemble des voyelles orales et F4 pour /i/, relevées dans le modèle de base de Maeda (FX_initial), relevées après diminution de la protrusion pour les voyelles non-arrondies et après augmentation de la protrusion pour les voyelles arrondies (FX_modif). FX_diff rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif. FX_diff% rend compte de la différence entre les valeurs FX_initial et FX_modif en pourcentage % (diminution en noir, augmentation en gris) .....	45
Tableau 11 : Corpus utilisé dans ce travail, pour les voyelles /y, ø, œ, u, o, ɔ/ du français en position initiale IP et W (en gras). .....	55

Tableau 12: Tableau récapitulatif de la position syllabique de la voyelle cible dans la phrase cadre (constituée de 12 à 16 syllabes) selon la position prosodique étudiée et la voyelle. 6 <sup>e</sup> /16 désigne la 6 <sup>ème</sup> syllabe sur un nombre de 16 syllabes .....	55
Tableau 13 : Séquences pré et post-frontières pour les voyelles /i/, /e/, /a/, /y/, /ø/, /u/ et /o/ (en gras). .....	56
Tableau 14: Séquences pré- et post-frontières pour les voyelles /œ/, /ɛ/ et /ɔ/ (en gras). .....	56
Tableau 15: Corpus voyelle par voyelle (en gras) en position GA .....	57
Tableau 16: Résultats du test perceptif montrant la condition prosodique choisie par les auditeurs, tous locuteurs confondus.....	65
Tableau 17 : Résumé du nombre d'items acoustiques pris en compte pour cette thèse. ....	66
Tableau 18: Récapitulatif des items acoustiques, par voyelle et par condition prosodique IP et W, pris en compte pour cette thèse.....	66
Tableau 19: Corrélations moyennes, tous locuteurs confondus, des distances verticale et horizontale externes issues de Qualisys (mesures moyennées et alignées) et de la vidéo.....	71
Tableau 20 : Récapitulatif des mesures articulatoires retenues pour cette thèse. ....	79
Tableau 21 : Récapitulatif des mesures acoustiques retenues pour cette thèse. ....	80
Tableau 22 : Récapitulatif du nombre d'occurrences pour les mesures acoustiques (4 locuteurs) /pour les mesures d'aperture et d'éirement (4 locuteurs)/ pour les mesures de protrusion (3 locuteurs), pour chaque voyelle, pour les deux positions prosodiques IP et W. ....	80
Tableau 23: Résultats des tests F ANOVA à 3 facteurs 'position prosodique', 'voyelle' et 'locuteurs' sur les 10 paramètres acoustiques étudiés. La première colonne correspond aux résultats du test F pour l'effet de la position prosodique, la seconde colonne rend compte de l'interaction entre la position prosodique et la voyelle et la troisième colonne l'interaction entre les trois facteurs. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif .....	82
Tableau 24: Résultats des tests F ANOVA à 3 facteurs 'position prosodique', 'voyelle' et 'locuteurs' sur les 6 paramètres articulatoires étudiés. La première colonne correspond aux résultats du test F pour l'effet de la position prosodique, la seconde colonne rend compte de l'interaction entre la position prosodique et la voyelle et la troisième colonne l'interaction entre les trois facteurs. Niveaux de significativité ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif .....	82
Tableau 25: Résultats statistiques sur les paramètres éirement, aperture et protrusion pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	87
Tableau 26: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif .....	87
Tableau 27: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'position prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de	

l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	88
Tableau 28: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3, F4, F3-F2 et F4-F3 pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	89
Tableau 29: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /i/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	90
Tableau 30: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	92
Tableau 31 : Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	92
Tableau 32: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	93
Tableau 33: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3 et F3-F2 pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	94
Tableau 34: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /y/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	95
Tableau 35: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues	

dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	97
Tableau 36: Résultats statistiques sur les paramètres de l'abaissement du menton pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	97
Tableau 37: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2, pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	98
Tableau 38: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	99
Tableau 39: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /u/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	100
Tableau 40: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	101
Tableau 41: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	102
Tableau 42: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	103
Tableau 43: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	104



Tableau 44: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /e/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	104
Tableau 45: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	105
Tableau 46: Résultats statistiques sur les paramètres d'abaissement du menton pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	106
Tableau 47: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	107
Tableau 48: Résultats statistiques sur les F1, F2 et F3 pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	108
Tableau 49: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /ø/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	109
Tableau 50: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	110
Tableau 51: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	111
Tableau 52: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs	

‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	112
Tableau 53: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	113
Tableau 54: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /o/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	113
Tableau 55: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	114
Tableau 56: Résultats statistiques sur le paramètre d’abaissement du menton pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	115
Tableau 57: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	116
Tableau 58: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3, pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	117
Tableau 59: Résultats statistiques des mesures de durée et d’intensité pour la voyelle /ε/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	117
Tableau 60: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur ‘positions prosodiques’ et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En (c) : résumé des différences significatives obtenues	

dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	119
Tableau 61: Résultats statistiques sur le paramètre abaissement du menton pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	120
Tableau 62: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	120
Tableau 63: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	121
Tableau 64: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /œ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	122
Tableau 65: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	124
Tableau 66: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	124
Tableau 67: Résultats statistiques sur les paramètres aire, K2 pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	125
Tableau 68: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F2-F1 pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	126

Tableau 69: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /ɔ/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	126
Tableau 70: Résultats statistiques sur les paramètres étirement, aperture et protrusion pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	127
Tableau 71: Résultats statistiques sur le paramètre d'abaissement du menton pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	128
Tableau 72: Résultats statistiques sur les paramètres aire et K2 pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	129
Tableau 73: Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2 et F3 pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	129
Tableau 74: Résultats statistiques des mesures de durée et d'intensité pour la voyelle /a/. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	130
Tableau 75: Résultats statistiques sur la mesure de dispersion F1-F2 pour l'ensemble des voyelles orales. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	133
Tableau 76: Résultats statistiques sur la mesure de dispersion F2-F3 pour l'ensemble des voyelles orales. En (a) : effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	134

Tableau 77: Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour les paires de voyelles /i-y/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif.....	142
Tableau 78: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, sur les paramètres aire, étirement et aperture pour les paires de voyelles /i-y/ locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	143
Tableau 79: Résultats statistiques sur les paramètres F2 et F3 pour la paire de voyelles /i-y/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	147
Tableau 80: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, sur les paramètres F2 et F3 pour les paires de voyelles /i-y/ locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	148
Tableau 81 : Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour la paire /e-ø/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif.....	150
Tableau 82: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, sur les paramètres d’aire, d’étirement et d’aperture pour les paires de voyelles /e-ø/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	151
Tableau 83: Résultats statistiques sur les paramètres F2, F3 pour la paire de voyelles /e-ø/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	155
Tableau 84: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l’analyse de l’effet du facteur ‘position prosodique’, sur le paramètre F2 pour la paire de voyelles /e-ø/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif...	156
Tableau 85: Résultats statistiques sur les paramètres aire, étirement, protrusion pour la paire /ε-œ/. En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	159
Tableau 86: Résultats statistiques sur les paramètres F2, F3 pour la paire de voyelles /ε-œ/ En (a) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘voyelles’ direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs ‘positions prosodiques’ et ‘locuteurs’. En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. ....	159

Tableau 87: En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', sur le paramètre F2 pour la paire de voyelles /ε-œ/, locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif... 159	
Tableau 88: Résultats statistiques sur le paramètre F2 pour la paire /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/ ainsi que /y-u/, /ø-o/ et /œ-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif..... 163	
Tableau 89: Résultats statistiques sur les paramètres aire et étirement pour les paires de voyelles /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/ En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. .... 165	
Tableau 90: Résultats statistiques sur le paramètre aire, aperture et menton pour la paire /i-u/, /e-o/ et /ε-ɔ/ ainsi que /y-u/, /ø-o/ et /œ-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. .... 170	
Tableau 91: Résultats statistiques sur le paramètre F1 pour la paire /i-e/, /y-ø/ et /u-o/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif... 173	
Tableau 92: Résultats statistiques sur les paramètres aire, aperture et menton pour les paires /e-ε/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif. .... 178	
Tableau 93: Résultats statistiques sur le paramètre F1 pour les paires /e-ε/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. En (a) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'voyelles' direction des différences significatives entre IP et W. En (b) : interaction entre les facteurs 'positions prosodiques' et 'locuteurs'. En (c) : résumé des différences significatives obtenues dans l'analyse de l'effet du facteur 'position prosodique', locuteur par locuteur (présentée en Annexe 2). En gras : le contraste est maximisé. Niveaux de significativité : ** : p<.001, * : p<.05 et ns : non significatif... 180	
Tableau 94: Tableau récapitulatif des variations articulatoires observées sur chaque voyelle, tous locuteurs confondus, sur les huit paramètres étudiés : étirement, aperture, protrusion, aire, K2 et menton. Les cellules vides correspondent aux résultats non-significatifs..... 183	

Tableau 95: Tableau récapitulatif des variations acoustiques observées sur chaque voyelle, tous locuteurs confondus, sur les paramètres acoustiques : F1, F2, F3, F4, F2-F1, F3-F2, durée et intensité. Les cellules vides correspondent aux données non-considérées dans cette étude et ns aux données pour lesquelles les résultats ne sont pas significatifs. ....	186
Tableau 96 : Principales variations sur les mesures d'étirement, d'aperture, de protrusion et d'abaissement du menton relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée. Une flèche montante correspond au résultat $IP > *W$ (* : $p < .05$ ) et une flèche descendante correspond au résultat $IP < *W$ (* : $p < .05$ ), tous locuteurs confondus. ....	198
Tableau 97 : Principales variations acoustiques sur les formants F1, F2, F3 relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée (en Hz). Une flèche montante correspond au résultat $IP > *W$ (* : $p < .05$ ) et une flèche descendante correspond au résultat $IP < *W$ (* : $p < .05$ ), tous locuteurs confondus. ....	198
Tableau 98 : Principales variations sur les valeurs d'intensité et de durée relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées pour chaque voyelle étudiée. Une flèche montante représente le résultat $IP > *W$ (* : $p < .05$ ) et une flèche descendante représente le résultat $IP < *W$ (* : $p < .05$ ), tous locuteurs confondus. ....	199
Tableau 99 : Principales variations sur les valeurs de distance entre les formants F2-F1 et F3-F2 relevées dans cette thèse en position initiale de constituant IP, observées sur chaque voyelle focale. Une flèche montante représente le résultat $IP > *W$ (* : $p < .05$ ) et une flèche descendante représente le résultat $IP < *W$ (* : $p < .05$ ), tous locuteurs confondus. ....	199
Tableau 100 : Résultats statistiques sur les paramètres d'aire, d'étirement, d'aperture, K2 (étirement/aperture), protrusion, abaissement du menton de l'effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W, locuteur par locuteur et voyelle par voyelle. Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	231
Tableau 101 : Résultats statistiques sur les paramètres F1, F2, F3, F4, intensité, durée, centroïde F1/F2 et centroïde F2/F3 de l'effet du facteur 'positions prosodiques' et direction des différences significatives entre IP et W, locuteur par locuteur et voyelle par voyelle. Niveaux de significativité : ** : $p < .001$ , * : $p < .05$ et ns : non significatif. ....	239
Tableau 102 : Tableau récapitulatif des résultats statistiques effectués par les modèles mixtes et l'ANOVA simple sur les paramètres acoustiques (F1, F2, F3, durée intensité) et sur les paramètres articulatoires (aperture, étirement, aire, protrusion et mâchoire) .....	258





## Listes des figures

Figure 1 : Echelle de résistance à la suppression des voyelles latines. L'accent est porté ici par la troisième syllabe. D'après Vaissière, 1996 (p68).	7
Figure 2 : Schéma représentant les palatogrammes de "figue" (fin de mot) et "figue" (fin de phrase) à gauche et "garçon", "c'est un garçon" à droite, extrait de Durand (1930) (p11)	8
Figure 3 : D'après Straka (1963, p83) rapport entre consonnes et voyelles selon l'énergie articulatoire des syllabes, d'après des clichés cinéradiographiques sur le français. Lorsque la syllabe est en position forte, le contraste d'aperture au sein de la syllabe CV est renforcé.	10
Figure 4 : Deux types de contrastes linguistiques : <i>syntagmatique</i> et <i>paradigmatique</i> (inspiré de Hsu & Jun 1997, et Fougeron 1998)	10
Figure 5 : Exemples de hiérarchies prosodiques pour l'anglais et autres langues et pour le français. Figure extraite de Fougeron 1998.	11
Figure 6: Graphiques schématiques des scénarios (a), (b), (c) et (d), illustrant l'effet du renforcement prosodique sous une position accentuée et sous une position non-accentuée, pour deux catégories phonologique contrastive, basé sur la figure 1 de Cole et al. (2007), (p 183).	13
Figure 7: Pourcentage du contact linguopalatal (à gauche) et durée d'obstruction (à droite) de la consonne /n/ pour cinq positions prosodiques (U pour Utterance, IP pour Intonational Phrase, PP pour Phonological ou Intermediate Phrase, W pour word, S pour Syllabe), d'après Keating, Cho, Fougeron & Hsu (2003).	19
Figure 8 : Schéma descriptif des paramètres pris en compte dans l'étude de la labialité d'après Fromkin (1964) et Abry et Boë (1980). Voir le texte pour la définition des termes. D'après Abry et Boë (1980).	34
Figure 9 : Dispersion des voyelles du français [-lab], [+lab] et [++lab] suivant l'aperture (écartement vertical, mm) et l'étirement (écartement horizontal, mm), d'après Zerling, 1990.	37
Figure 10 : Hiérarchie des voyelles orales du français selon les paramètres D : « position du dos de la langue » (D6 : antérieur à D8 : postérieur), O : « ouverture des lèvres » (O1 : fermé à O4 : ouvert) , S « étirement des lèvres » (S1 : non-étiré à S4 : étiré) et P « protrusion des lèvres (P1 : non-protruses à P4 : protruses), d'après Potard & Laprie (2005).	38
Figure 11 : Paramètres du modèle articulatoire de Maeda. Les flèches indiquent le sens de variation de chaque articulateur.	39
Figure 12: Structure prosodique conçue pour le segment test /i/ aux deux positions prosodiques étudiées. En (a) position initiale dans un Groupe Intonatif (IP) (b) position initiale dans un Mot lexical (W). Le constituant le plus haut est le constituant Phrase (U, Utterance), AP désigne le Groupe Accentuel (Accentual Phrase) et S le niveau syllabe. Ces arbres correspondent à une des structurations possibles de l'énoncé.	54
Figure 13: Illustration de la segmentation du signal acoustique avec le logiciel Praat, sur la séquence /VIC1ap/ en position IP (GI) en haut et W en bas, pour le locuteur S1	58
Figure 14: Illustration de la segmentation du signal acoustique avec le logiciel Praat, sur la séquence /V <sub>1</sub> C <sub>1</sub> εv/, et /V <sub>1</sub> C <sub>1</sub> ɔʁ/ et /V <sub>1</sub> C <sub>1</sub> œf/, en position GA (en haut) et GI (en bas) pour le locuteur S1. Le phonème /œ/ est transcrit par /9/, /ɔ/ par /o/ et /ʁ/ par /r/ sur la tire utilisée.	60
Figure 15 : Caractéristiques prosodiques attendues pour le codage prosodique d'un énoncé en tant que condition Groupe Intonatif (GI/IP).	61

Figure 16 : Caractéristiques attendues pour le codage d'un énoncé en tant que condition Groupe Accentuel GA. ....	61
Figure 17 : Caractéristiques attendues pour le codage d'un énoncé en tant que condition Mot lexical W. ....	62
Figure 18 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 1. ....	63
Figure 19 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 2. ....	63
Figure 20 : Caractéristiques prosodiques correspondant au type d'énoncé ambigu de Type 3. ....	64
Figure 21 : schéma du système d'acquisition physiologique utilisé dans cette thèse .....	67
Figure 22 : Schéma récapitulatif des mesures articulatoires prises dans ce travail. En (a), positionnement des marqueurs Qualisys, sur le visage du locuteur (en gris : marqueurs de références, en noir : marqueurs des lèvres, en blanc : marqueurs du menton). En (b), agrandissement des lèvres dans un plan frontal, mesures prises via la vidéo sur le contour interlabial (flèche blanche : étirement ; flèche noire : apertures). En (c), agrandissement des lèvres dans un plan sagittal, mesures prises via le Qualisys (croix : point à équidistance des deux commissures des lèvres, mesure de protrusion correspond au déplacement de cette croix dans le plan z ; marqueurs blancs : marqueur du milieu retenu pour mesurer l'abaissement du menton dans le plan y). ....	79
Figure 23: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'apertures (à droite) de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). ....	87
Figure 24: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type). ....	88
Figure 25: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). ....	89
Figure 26: Valeurs moyennes des mesures de F3-F2 de la voyelle /i/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). ....	90
Figure 27: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'apertures (à droite) de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). ....	92
Figure 28: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type). ....	93
Figure 29: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). ....	94
Figure 30: Valeurs moyennes des mesures de F3-F2 de la voyelle /y/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). ....	95
Figure 31: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'apertures (à droite) de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). ....	97
Figure 32: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type). ....	98
Figure 33: Valeurs moyennes des mesures de F2-F1 de la voyelle /u/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). ....	99
Figure 34: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'apertures (à droite) de la voyelle /e/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). ....	102
Figure 35: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /e/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type). ....	103

Figure 36: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	106
Figure 37: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	107
Figure 38: Valeurs moyennes des mesures de F3 de la voyelle /ø/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en Hz, avec erreur-type). .....	108
Figure 39: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /o/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	111
Figure 40: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /o/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	112
Figure 41: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ε/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	115
Figure 42: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /ε/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	116
Figure 43: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche), d'aperture (à droite), de protrusion (en bas) de la voyelle /œ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	119
Figure 44: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /œ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	121
Figure 45: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /ɔ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	124
Figure 46: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /ɔ/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	125
Figure 47: Valeurs moyennes des mesures d'étirement (à gauche) et d'aperture (à droite) de la voyelle /a/, tous locuteurs confondus, en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels, avec erreur-type). .....	128
Figure 48: Valeurs moyennes des mesures d'aire de la voyelle /a/, tous locuteurs confondus en position IP (en gris) et en position W (en blanc), (en pixels <sup>2</sup> , avec erreur-type).....	128
Figure 49 : Valeurs moyennes des voyelles /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/ et /u/, /o/, /ɔ/ sur les axes F1/F2 à gauche et F2/F3 à droite (en Hz), en position IP (ellipse d'écart-type en trait plein) et position W (ellipse d'écart-type en trait pointillé), tous locuteurs confondus. La croix rouge représente le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3.....	135
Figure 50 : Valeurs moyennes des voyelles /i/, /e/, /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/ et /u/, /o/, /ɔ/ sur les axes F1/F2 à gauche et F2/F3 à droite (en Hz), en position IP (trait plein) et position W (trait pointillé), pour chaque locuteur S1, S2, S3 et S4. La croix rouge représente le centroïde de chaque espace acoustique F1/F2 et F2/F3.....	137
Figure 51 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /i/ et /y/ sur les paramètres d'aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), de protrusion (en mm), d'étirement (en pixels) et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	142
Figure 52 : variations pour la paire /i-y/ en position IP et W pour les mesures d'aire (en pixels <sup>2</sup> ), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) et de protrusion (en mm) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). Les valeurs de protrusion n'ont pu être extraites pour le locuteur S4. ....	146

Figure 53 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /i/ et /y/ sur les paramètres F3 (en Hz) et F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	147
Figure 54 : Variations pour la paire /i-y/ en position IP et W pour les mesures de F2 (en Hz) et F3 (en Hz) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). ....	149
Figure 55 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /e/ et /ø/ sur les paramètres d'aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), de protrusion (en mm), d'étirement (en pixels) et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	151
Figure 56 : variations pour la paire /e-ø/ en position IP et W pour les mesures d'aire (en pixels <sup>2</sup> ), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) et de protrusion (en mm) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). Les valeurs de protrusion n'ont pu être extraites pour le locuteur S4 .....	154
Figure 57 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /e/ et /ø/ sur les paramètres F3 (en Hz) et F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	155
Figure 58 : Variations pour la paire /e-ø/ en position IP et W pour les mesures de F2 (en Hz) et F3 (en Hz) pour les 4 locuteurs (S1, S2, S3, S4). ....	157
Figure 59 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /ɛ/ et /œ/ sur les paramètres d'aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), de protrusion (en mm), d'étirement (en pixels) et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	158
Figure 60 : Représentation du contraste [±arrondi] entre les voyelles /ɛ/ et /œ/, sur le paramètre F2 (en Hz) aux positions IP et W, pour les locuteurs S1, S2, S3 et S4. ....	160
Figure 61 : Représentation du contraste [±arrière] pour les paires /i-u/, /e-o/, /ɛ-ɔ/ et les paires /y-u/, /ø-o/, /œ-ɔ/ sur le paramètre F2 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	163
Figure 62 : Représentation du contraste [±arrondi] pour les paires /i-u/, /e-o/ et /ɛ-ɔ/ sur les paramètres d'Aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), d'aperture (en pixels), d'étirement (en pixels) de protrusion (en mm), aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	167
Figure 63 : Représentation du contraste [±haut] pour la paire /i-e/ sur les paramètres d'aperture (en pixels), et pour la paire /u-o/ sur les paramètres d'Aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	170
Figure 64 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /y-ø/, sur les paramètres d'Aire aux lèvres (en pixels <sup>2</sup> ), et d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4). ....	171
Figure 65 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /i-e/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4) .....	174
Figure 66 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /y-ø/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	174
Figure 67 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /y-ø/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4). ....	175
Figure 68 : Représentation du contraste [±haut] pour les paires /u-o/, sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4). ....	175
Figure 69 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /e-ɛ/, sur le paramètre d'aire (en pixels <sup>2</sup> ) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	178

Figure 70 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /o-ɔ/, sur le paramètre d'aire (en pixels <sup>2</sup> ) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	178
Figure 71 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /ø-œ/, sur le paramètre d'aperture aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4). ....	179
Figure 72 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /o-ɔ/, sur le paramètre d'aperture (en pixels) aux positions IP et W, pour chaque locuteur (S1, S2, S3, S4). ....	179
Figure 73 : Représentation du contraste [±bas] pour les paires /e-ɛ/, /ø-œ/ et /o-ɔ/. Sur le paramètre F1 (en Hz) aux positions IP et W, tous locuteurs confondus. ....	181
Figure 74: Mesures d'étirement et d'aperture pour les 10 voyelles par locuteur, pour chaque position prosodique. Les points blancs indiquent la position de la voyelle en position W et les points noirs en position IP pour les trois catégories de voyelles : antérieures non-arrondies (trait noir plein), antérieures arrondies (trait pointillé noir) et les postérieure (traits pointillé gris).....	185
Figure 75 : Résumé des résultats observés en position IP. La croix (x) montre qu'il existe une interaction entre la paire étudiée et la position IP. Les cases grisées montrent que le contraste entre la paire étudiée est maximisé en position IP.....	192
Figure 76 : Schéma des différents patterns observés dans cette thèse entraînant une maximisation du contraste paradigmatique entre deux voyelles. La flèche blanche représente le contraste entre les deux voyelles en position W. La flèche noire représente la maximisation du contraste entre les deux voyelles en position IP. (1) : en position IP, le contraste entre les voyelles est maximisé par une maximisation des caractéristiques acoustiques et/ou articulatoires de chacune des voyelles, (2) : en position IP, il existe une augmentation des caractéristiques acoustiques et/ou articulatoires des deux voyelles : mais l'augmentation est plus forte pour la voyelle [-F], le contraste est maximisé. (3a et b) : en position IP, les caractéristiques restent stables pour l'une des deux voyelles, alors que l'autre augmente ou diminue dans le but de maximiser le contraste. ....	193
Figure 77 : (a) Valeurs moyennes des voyelles orales du français en position IP et W, résultats de notre étude, réalisation des voyelles en position IP (ligne pleine) et réalisation des voyelles en position W (ligne pointillée), croix rouge représente le centroïde F1/F2. (b) valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles orales du français selon leur durée. (en noir : de 30-50 ms, en rouge : de 60 à 80 msec, en bleu de 90 à 110 msec), extrait de Gendrot et Gerdes 2009 (c) Valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles en position initiale de constituants prosodiques (noir pointillé: position interne de mot, noir : position initiale de mot, rouge : Groupe accentuel et bleu : Groupe intonatif), extrait de Gendrot et Gerdes 2009, (d) Valeurs moyennes des formants F1 et F2 des voyelles en position finale de constituants prosodiques (noir pointillé: position interne de mot, noir : position initiale de mot, rouge : Groupe accentuel et bleu : Groupe intonatif), extrait de Gendrot et Gerdes 2009. ....	205
Figure 78 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	242
Figure 79 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour chaque voyelle étudiée (/i/, /e/ /ɛ/, /a/, /y/, /ø/, /œ/, /u/, /o/, /ɔ/), tous locuteurs confondus (S1, S2, S3, S4), en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	243

Figure 80 : Représentations des valeurs de F1 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour le groupe de voyelles « ouvert » (/a/, /ɛ/, /œ/, /ɔ/) et le groupe de voyelles « autre » (/i/, /e/, /y/, /ø/, /u/, /o/), tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W). .....	244
Figure 81 : Représentations des valeurs de F2 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour chaque voyelle, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	245
Figure 82 : Représentations des valeurs de F2 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour les catégories voyelles antérieures (ant) et voyelles postérieures (post) tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).....	246
Figure 83 : Représentations des valeurs de F3 selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour les voyelles antérieures (excepté /a/) tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	247
Figure 84 : Représentations des valeurs de durée selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) ...	249
Figure 85 : Représentations des valeurs d'intensité selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) ...	250
Figure 86 : Représentations des valeurs d'aperture selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	251
Figure 87 : Représentations des valeurs d'aperture aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).....	252
Figure 88: Représentations des valeurs d'étirement selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	252
Figure 89: Représentations des valeurs d'étirement aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).....	253
Figure 90: Représentations des valeurs d'étirement selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, toutes voyelles confondues et tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	254
Figure 91: Représentations des valeurs d'aire aux lèvres selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....	255
Figure 92: Représentations des valeurs de protrusion selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) ...	256
Figure 93: Représentations des valeurs d'abaissement de la mâchoire selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).....	257

Figure 94 : Représentations des valeurs de F1 (haut, gauche), F2 (haut, droite), F3 (bas) selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W) .....260

Figure 95 : Représentations des valeurs de l'aperture (haut, gauche), l'étirement (haut, droite) et l'aire aux lèvres (bas) selon la médiane, le premier et troisième quartiles et l'étendue des données, pour toutes les voyelles, tous locuteurs confondus, en fonction de la position prosodique (IP vs W).....261





## **Renforcement des voyelles orales du français en position initiale de constituants prosodiques : interaction avec les contrastes phonologiques.**

Le but de cette thèse est de mieux comprendre le phénomène de renforcement initial pour les voyelles du français : ses mécanismes de réalisations et sa fonction linguistique. Pour cela, cette thèse compare la réalisation acoustique et articulatoire (lèvres et menton) des voyelles orales du français /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ en position strictement initiale de Groupe Intonatif et en position médiane de Groupe Intonatif. Le corpus a été enregistré par quatre locutrices avec deux appareils en simultané : une caméra pour l'analyse de l'aperture et l'étirement des lèvres et un appareil de capture mouvements (Qualisys) pour l'analyse articulatoire de la protrusion des lèvres et de l'abaissement du menton. Une étude acoustique a également été menée (formants, intensité, durée). Cette thèse montre que le renforcement initial modifie des caractéristiques phonétiques des voyelles qui peuvent contribuer, d'une part, à renforcer les contrastes syntagmatiques en augmentant la sonorité de la voyelle : augmentation de l'aperture et l'étirement aux lèvres pour l'ensemble des voyelles et augmentation d'intensité acoustique pour la plupart. D'autre part, le renforcement initial renforce des caractéristiques acoustiques et articulatoires propres à chaque voyelle. Ces variations contribuent à maximiser les contrastes paradigmatiques entre voyelles : soit par une maximisation de chacune des valeurs du contraste ([+F] et [-F]), soit par une maximisation d'une des deux valeurs du contraste ([+F] ou [-F]).

*Mots clés : renforcement initial, voyelles orales, français, contrastes phonologiques.*

---

## **Domain-initial strengthening on oral vowels in french: interaction with phonological contrasts.**

The goal of this thesis is to better understand the phenomenon of domain-initial strengthening on French vowels: how it is realized and its linguistic function. We compare the acoustic and articulatory variations (on the lips and chin) of the French oral vowels /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ in initial position of Intonational Phrase and in medial position of Intonational Phrase. The corpus was recorded by four female speakers with two different systems simultaneously. Lip aperture and lip width were analyzed from the video data and lip protrusion and lowering of the chin were captured by an optical motion capture system (Qualisys). An acoustic study was also conducted (formants, intensity, duration). Results show that initial strengthening affects phonetic properties of vowels which may contribute to enhance syntagmatic contrasts by increasing their sonority: increased lip aperture and width for all vowels, and increased acoustic intensity for most. Moreover, initial strengthening enhances vowel-specific acoustic and articulatory properties. Consequently, initial strengthening contributes to maximize paradigmatic contrasts between vowels, either by maximizing contrast of each of the values ([+F] and [-F]), either by maximizing the value of a single contrast ([+F] or [-F]).

*Keywords : domain-initial strengthening, oral vowels, french, phonological contrasts.*

UNIVERSITE SORBONNE NOUVELLE – PARIS 3  
ED 268 Langage et Langues : Description, théorisation, transmission  
Laboratoire de Phonétique et de Phonologie (UMR7018) – 19 rue des bernardins, 75005 Paris.