



Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds. Lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral.

Stéphanie Borel

► To cite this version:

Stéphanie Borel. Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds. Lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral.. Linguistique. Université de la Sorbonne nouvelle - Paris III, 2015. Français. <NNT : 2015PA030016>. <tel-01162201>

HAL Id: tel-01162201

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01162201>

Submitted on 9 Jun 2015

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

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

UNIVERSITE SORBONNE NOUVELLE – PARIS 3

Ecole Doctorale 268

« Langage et langues : description, théorisation, transmission »

Laboratoire de Phonétique et Phonologie, UMR 7018

Thèse de Doctorat en Phonétique

Stéphanie BOREL

Perception auditive, visuelle et audiovisuelle
des voyelles nasales par les adultes devenus sourds
Lecture Labiale, Implant cochléaire, Implant du tronc cérébral

Thèse dirigée par
Madame le Professeur Jacqueline VAISSIERE

Soutenue le 14 janvier 2015

Jury :

Mme Peggy GATIGNOL, Professeur Associé, UPMC (pré-rapporteur)

M. Willy SERNICLAES, Professeur Honoraire, ULB (pré-rapporteur)

Mme Lise CREVIER-BUCHMAN, Praticien Hospitalier, Chargée de Recherche, CNRS

M. Shinji MAEDA, Directeur de Recherche Emérite, CNRS

M. Vincent PEAN, Docteur en traitement du signal, Expert indépendant

M. Olivier STERKERS, Professeur des Universités, Praticien Hospitalier, UPMC

Mme Jacqueline VAISSIERE, Professeur des Universités, Paris 3 (directeur)

Résumé

Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds : Lecture Labiale, Implant cochléaire, Implant du tronc cérébral

Cette thèse porte sur la perception visuelle, auditive et audiovisuelle des voyelles nasales [ã] (« lent »), [ɔ̃] (« long ») et [ẽ] (« lin ») par des adultes devenus sourds, implantés cochléaires et implantés du tronc cérébral. L'étude sur la perception visuelle des voyelles, auprès de 22 adultes devenus sourds, redéfinit les sosies labiaux des voyelles nasales et propose une mise à jour de la classification des visèmes. Trois études sur l'identification auditive des voyelles nasales auprès de 82, 15 et 10 adultes implantés cochléaires mettent en évidence leur difficulté à reconnaître les trois voyelles nasales, qu'ils perçoivent comme des voyelles orales. Les analyses acoustiques et perceptives suggèrent que les adultes implantés cochléaires s'appuient sur les informations fréquentielles des deux premiers pics spectraux mais négligent les informations d'intensité relative de ces pics. D'après l'étude menée auprès de 13 adultes implantés du tronc cérébral, des informations acoustiques linguistiques sont transmises par l'implant du tronc cérébral mais la fusion entre les informations auditives et visuelles pourrait être optimisée pour l'identification des voyelles. Enfin, une enquête auprès de 179 orthophonistes pointe le besoin d'une information sur la définition phonétique articulatoire actualisée des voyelles [ã] et [ẽ].

Mots clés : phonétique, voyelle, nasalité, lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral

Abstract

Auditory, visual and auditory-visual perception of nasal vowels by deafened adults : Speechreading, Cochlear Implant, Auditory Brainstem Implant

This thesis focuses on the visual, auditory and auditory-visual perception of french nasal vowels [ã] (« lent »), [ɔ̃] (« long ») and [ɛ̃] (« lin ») by Cochlear Implant (CI) and Auditory Brainstem Implant (ABI) adults users. The study on visual perception of vowels, with 22 deafened adults, redefines the lip configuration of french nasal vowels and provides an update of the classification of vocalic visual phonemes. Three studies on auditory identification of nasal vowels with 82, 15 and 10 CI users highlight their difficulty in recognizing the three nasal vowels, which they perceive as oral vowels. Acoustic and perceptual analyzes suggest that adults with CI rely on frequency informations of the first two spectral peaks but miss the informations of relative intensity of these peaks. The study with 13 ABI users show that some linguistic acoustic cues are transmitted by the ABI but the fusion of auditory and visual features could be optimized for the identification of vowels. Finally, a survey of 179 Speech Language and Hearing Therapists show the need of an update on the phonetic articulation of french nasal vowels [ã] and [ɛ̃].

Keywords : phonetics, vowel, nasality, speechreading, cochlear implant, auditory brainstem implant

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements :

A Madame le Professeur Jacqueline Vaissière qui a illuminé mes dix années de parcours phonétique de ses connaissances, son enthousiasme, sa vivacité d'esprit et son énergie. Parce que si j'ai trainé aussi longtemps c'était aussi un peu pour ne pas vous quitter.

A Monsieur le Professeur Olivier Sterkers pour sa confiance, son soutien et la totale liberté d'action qu'il m'a laissée lors de l'élaboration de cette thèse. Parce que vous m'avez donné ma chance. Pour votre vision de la recherche clinique, le courage et la ténacité dont vous faites preuve pour l'appliquer.

A Monsieur Willy Serniclaes et à Madame Peggy Gatignol qui ont accepté d'être pré-rapporteurs de cette thèse. A Messieurs Shinji Maeda et Vincent Péan, qui ont accepté d'évaluer mon travail.

A Madame le Docteur Lise Crevier-Buchman qui m'a guidée vers la phonétique clinique, présente à toutes les étapes de mon parcours universitaire et qui est un modèle.

A Monsieur le Docteur Didier Bouccara pour m'avoir fait découvrir l'audiologie et pour son amitié.

A Madame le Docteur Evelyne Ferrary pour son accueil au laboratoire de l'unité Inserm UMR-S 1159, havre de paix, son aide et son soutien précieux à plusieurs étapes sensibles de mon parcours et dans tous les multiples projets que j'engage. Evelyne, je vais terminer tous les autres travaux en cours maintenant, je vous le promets. A tous les membres du laboratoire qui m'ont si naturellement intégrée: Yann, Guillaume, Elisabeth, Armand, Renato, Daniele.

A Madame le Docteur Isabelle Mosnier pour ses encouragements répétés et sa bienveillance à mon égard. Pour tous les projets enthousiasmants de recherche clinique qu'elle impulse.

A Peggy Gatignol pour m'avoir tendu la main à un moment critique. Pour m'avoir permis d'enseigner et m'avoir offert de nombreuses opportunités.

Aux patients et témoins qui ont accepté de participer aux différents tests, certains plusieurs fois!

A mes collègues orthophonistes du Centre Référent Implant Cochléaire de l'Adulte à la Pitié-Salpêtrière: Emmanuèle Ambert-Dahan dont la présence est le meilleur des stimulants, Martine Smadja, grâce à qui j'ai eu la chance de rencontrer l'équipe du Pr. O. Sterkers, qui m'a formée au réglage d'implant cochléaire, et surtout, source inépuisable de trucs, astuces et conseils dans tous les domaines. Marion de Bergh et Amélie Liagre-Callies avec lesquelles il est un plaisir de travailler au quotidien et qui composent si gentiment avec certaines de mes humeurs et/ou lubies. A Marlène Lallau qui arrive à pic pour la poursuite des projets de phonétique clinique.

Aux orthophonistes Dorothée Jacob, Marine Pasquet, Mathilde Lavrut et Amandine Noiret, anciennes étudiantes, qui ont accepté que j'utilise dans cette thèse certaines des données issues de leur mémoire de fin d'étude.

Aux relecteurs chacun experts dans leur domaine: Hélène Dejeune, Michaël Marcilloux, Michel Kalamarides, Isabelle Mosnier, Yann Nguyen, Marine Ardoint.

A tous les membres du Centre Référent Implant Cochléaire de l'Adulte à la Pitié-Salpêtrière pour leur gentillesse et leur participation à certains enregistrements ou tests: Mustapha Smaïl notre soleil, Dominique Fontaine, Daniele Bernardeschi, Véronique Pieters qui me fournit en biscuits, Cécile Horvath qui surveille ma consommation de biscuits, sous l'œil amusé mais qui en dit (toujours) long de Christel Carillo, Solange Lator, Dorith Amar toujours motivée, Jonathan Flament à qui j'ai fait une place sur l'étagère de mon bureau. Pour le plaisir chaque jour renouvelé de travailler à vos côtés.

Aux équipes des sociétés Advanced Bionics, Cochlear, Med-el et Neurelec pour leur aide logistique lors de la dernière année.

A tous les phonéticiens et phonologues que j'ai rencontrés durant ces dix années de parcours phonétique, dont les travaux m'ont inspirée et avec lesquels j'ai pu échanger: Charalampos Karypidis, Takeki Kamiyama, Rajesh Khatiwada, Julie Montagu, Claire Pillot, Nathalie Lévêque, Cécile Fougeron, Cédric Gendrot, Nikola Paillereau, Johanne Akpossan, Clara Legendre et j'en oublie!

A Barbara Hemforth et Emilia Elliepsen du Laboratoire d'Excellence *Empirical Foundations of Linguistics* qui ont tout déverrouillé à un moment critique.

A mes collègues et amis de l'Unadréo, Société Savante en Orthophonie, pour leur soutien, leurs encouragements et l'énergie qu'ils déploient pour développer et promouvoir la Recherche en Orthophonie. Pour le temps *Off* qu'ils m'ont laissé lors de la finalisation de la thèse.

A mes parents, mon beau-père, ma belle-mère et mes amis pour leur amour, leur soutien, leur compréhension et leur patience vis-à-vis de mon manque de disponibilité pendant ces dernières années.

Je dédie cette thèse à Michaël, qui m'aime, me supporte et me soutient depuis le début de ce projet.

Sommaire

I. Introduction	15
II. Chapitre 1 : Articulation des voyelles orales et nasales	21
<i>A. Description articuloire des voyelles orales et nasales.....</i>	<i>23</i>
1. Les systèmes vocaliques des langues du monde	25
2. Le système vocalique du français.....	25
3. Les voyelles nasales	29
<i>B. Etude n°1: Quels sosies labiaux pour les voyelles nasales ?.....</i>	<i>37</i>
1. Objectifs	37
2. Méthode.....	42
3. Résultats	43
4. Discussion	49
III. Chapitre 2: Acoustique des voyelles orales et nasales.....	57
<i>A. Description acoustique des voyelles orales et nasales.....</i>	<i>59</i>
1. Correspondances entre articuloire et acoustique	59
2. Catégorisation acoustique des voyelles	61
3. Les voyelles focales.....	61
4. Valeurs formantiques de référence des voyelles du français.....	62
5. Description acoustique des voyelles nasales	63
<i>B. Etude n°2 : Comparaison acoustique des voyelles orales et nasales</i>	<i>73</i>
1. Objectifs	73
2. Méthode.....	73
3. Résultats	75
4. Discussion	81
IV. Chapitre 3: Perception des voyelles orales et nasales.....	83
<i>A. La perception auditive.....</i>	<i>85</i>
1. Anatomophysiologie de l'audition	85
2. Le codage de la fréquence	90
<i>B. La perception des voyelles</i>	<i>93</i>
1. La perception de la parole	93
2. La perception des voyelles	96
3. La perception des voyelles nasales.....	99
<i>C. Impact de la surdité neurosensorielle.....</i>	<i>103</i>
<i>D. L'implant cochléaire.....</i>	<i>105</i>

1. Principe de fonctionnement et suivi post-implant.....	105
2. La perception des voyelles avec l'implant cochléaire.....	112
3. La perception des voyelles nasales avec l'implant cochléaire	136
V. Chapitre 4: Perception des voyelles nasales par les adultes implantés cochléaires.....	137
<i>A. Etude n°3 : Identification de voyelles et de consonnes nasales par 82 adultes implantés cochléaires à un délai post-implant précoce et tardif.....</i>	<i>137</i>
1. Objectifs	139
2. Méthode.....	139
3. Résultats	142
4. Discussion	156
<i>B. Etude n°4 : Discrimination des paires orale-nasale phonologiques et phonétiques</i>	<i>163</i>
1. Objectifs	165
2. Etude perceptive	165
3. Résultats	170
4. Analyse acoustique.....	173
5. Résultats	178
6. Discussion	185
<i>C. Etude n°5 : Perception de l'amplitude relative des formants par les adultes implantés cochléaires</i>	<i>189</i>
1. Objectifs	191
2. Méthode.....	191
3. Résultats	194
4. Discussion	196
VI. Chapitre 5 : Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles avec l'implant du tronc cérébral.....	199
A. Compréhension de la parole avec l'implant du tronc cérébral	201
1. Fonctionnement de l'implant du tronc cérébral	201
2. Résultats pour la compréhension de la parole	202
<i>B. Etude n°6 : Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles par les adultes devenus sourds utilisateurs d'un implant du tronc cérébral.....</i>	<i>207</i>
1. Objectifs	207
2. Méthode.....	207
3. Résultats	210
4. Discussion	214
VII. Chapitre 6: Applications de la thèse, conclusion générale et perspectives.....	217
A. Etude n°7 : Enquête auprès des orthophonistes.....	219

1. Objectifs	219
2. Méthode	219
3. Résultats	220
4. Discussion	226
<i>B. Conclusion générale et perspectives</i>	<i>229</i>
1. L'apport des données cliniques aux théories phonétiques	232
2. L'apport des résultats phonétiques à la pratique clinique	232
VIII. Références	239
IX. Annexes	263
<i>A. Transcriptions orthographiques possibles pour les voyelles nasales du français</i>	<i>263</i>
<i>B. Script Praat Analyse tout (script fricative de Gendrot, 2009)</i>	<i>264</i>
<i>C. Exemple de listes de Lafon</i>	<i>266</i>
<i>D. Exemple de listes de Fournier</i>	<i>267</i>
<i>E. Population de l'étude n°1</i>	<i>268</i>
<i>F. Script Praat du test perceptif de l'étude n°4</i>	<i>269</i>
<i>G. Configuration Klatt pour la génération des stimuli de l'étude n°5</i>	<i>271</i>
<i>H. Script Praat du test perceptif de l'étude n°5</i>	<i>272</i>
<i>I. Questionnaire (brut) de l'étude n°7</i>	<i>274</i>
<i>J. Publications et participation à des travaux d'équipe ayant donné lieu à des publications entre 2008 et 2014 dans les domaines de la phonétique et de l'audiologie</i>	<i>276</i>
X. Liste des tableaux	279
XI. Liste des figures	285

I. Introduction

Cette thèse se situe à l'interface entre la phonétique et la clinique. Elle traite de la description articulatoire, acoustique et perceptive des voyelles nasales [ã] de « lent », [õ] de « long » et [ẽ] de « lin » du français septentrional et de leur perception par les adultes devenus sourds.

Les voyelles nasales, présentes dans 20% des langues du monde, sont articulées avec le voile du palais abaissé, laissant ainsi le flux d'air (en général) voisé passer à la fois par la cavité orale et par la cavité nasale. Le spectre résultant est riche (avec des formants et des antiformants), complexe et instable dans le temps du fait des mouvements progressifs du voile du palais. La description acoustique des voyelles nasales est beaucoup plus complexe que celle des voyelles orales, puisqu'aux pics spectraux de la cavité orale s'ajoutent ceux de la cavité nasale, perturbés par des antiformants issus de la mise en dérivation des deux cavités.

Traditionnellement, la description articulatoire, en lien avec la notation de l'alphabet phonétique international (API) et l'alternance morpho-phonologique, oppose la voyelle nasale ouverte postérieure [ã] à la voyelle orale ouverte non postérieure [a] par exemple dans « paysan »/« paysanne », la voyelle [ẽ] à la voyelle mi-ouverte antérieure étirée [ɛ] par exemple dans « romain » vs. « romaine », la voyelle [õ] à la voyelle mi-ouverte postérieure [ɔ] par exemple dans « bon » vs. « bonne », la voyelle [œ] à la voyelle mi-ouverte antérieure arrondie [ø] par exemple dans « jeûne » vs. « jeune ». Cependant, plusieurs auteurs (Zerling, 1984 ; Berit-Hansen, 2001 ; Fagyal, 2006 ; Montagu, 2001 et 2007 ; Carignan, 2012) évoquent, pour le français septentrional, sous l'influence de la perte progressive de distinction entre le [ẽ] de « brin » et le [œ] de « brun », un déplacement articulatoire progressif, appelé *Changement en Chaine* (Figure 1). L'espace laissé libre par la perte de distinction entre [ẽ] et [œ] provoquerait un glissement de l'articulation orale du [ẽ] antérieur vers le [a] central. Ainsi, l'articulation de la voyelle [ã] afin de rester distinctive et maintenir les oppositions phonologiques avec le [ẽ] comme « vin » vs. « vent », « rein » vs. « rang », se modifierait à son tour en devenant progressivement plus fermée, plus postérieure et plus arrondie. Pour les mêmes raisons, la voyelle [õ] se déplacerait. Ainsi, plusieurs auteurs proposent une description phonétique actualisée de l'articulation orale des voyelles nasales : [ã] serait arrondie et plus proche de [ɔ] (« menthe » vs. « motte »), [ẽ] s'ouvrirait vers [a]

(« cinq » vs. « sac »), [ɔ̃] serait plus fermée et postériorisée, s'approchant ainsi de [o] (« fonce » vs. « fausse »).

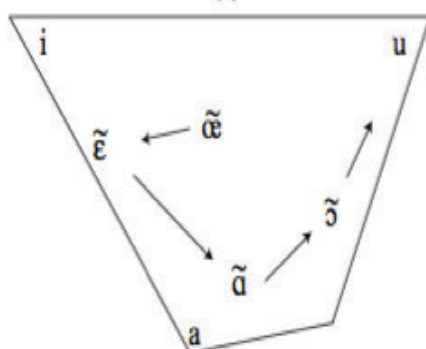


Figure 1: *Changement en Chaîne* des voyelles nasales du français septentrional. Tiré de Fagyal et al. (2006), page 34.

Le projet de ce travail est né de l'observation clinique dans le cadre de notre activité d'évaluations orthophoniques et de réglages d'implants cochléaires auprès d'adultes devenus sourds implantés cochléaires dans l'équipe du Pr. O. Sterkers, à l'origine à l'Hôpital Beaujon (AP-HP, Clichy) et désormais à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP, Paris) dans l'unité *Otologie, Implants auditifs et Chirurgie de la base du crâne*. La persistance des adultes implantés cochléaires, mêmes les plus performants, à « être sourds » à la nasalité vocalique nous a interpellé. Lorsque nous avons recueilli leurs confusions, quotidiennement, au fur et à mesure des évaluations, nous avons rapidement constaté qu'elles correspondaient à ce que Montagu (2007) décrivait comme étant le début non nasalisé de la voyelle nasale, du moins en contexte [tV]. Ainsi, il ne semblait manquer aux adultes implantés cochléaires que l'indice acoustique porteur du « trait » de nasalité. Par ailleurs, les adultes sourds non implantés avaient également des difficultés à percevoir les voyelles nasales mais ils les confondaient entre elles, percevant correctement l'indice de nasalité (Adam, 2006 et Lefèvre 2008) mais pas le lieu d'articulation. Cet indice de la nasalité vocalique a été revendiqué par certains comme unique pour toutes les voyelles nasales, mais ceci n'a jamais été objectivé. Le sujet devenait alors doublement intéressant car il pouvait, d'une part, enrichir la connaissance du traitement de la parole avec l'implant cochléaire, en proposant les voyelles nasales comme support verbal original et complexe, jamais proposé auparavant à notre connaissance, et d'autre part, enrichir la connaissance phonétique en considérant l'implant cochléaire comme un modèle pour comprendre les indices acoustiques et perceptifs de la nasalité.

Le premier objectif de cette thèse est donc de mettre en évidence la difficulté spécifique des adultes implantés cochléaires à percevoir la nasalité vocalique. Les objectifs secondaires sont de comprendre la ou les raisons pour lesquelles les adultes implantés cochléaires ne perçoivent pas le trait de nasalité et si possible, proposer des solutions de remédiation.

Puis nous avons élargi le champ de réflexion à la lecture labiale. En perception visuelle de la parole, puisque l'abaissement du voile du palais est invisible, les labiolecteurs ne peuvent s'appuyer que sur l'articulation orale de la voyelle pour l'identifier. La mutation de l'articulation orale des voyelles nasales, du fait du changement en chaîne, influence-t-elle leur reconnaissance visuelle ? Les classifications de visèmes utilisées en rééducation orthophonique tiennent-elles compte de ces changements ?

Enfin, nous nous sommes intéressée à la perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles orales et nasales par les adultes utilisateurs d'un implant du tronc cérébral (ITC). Ce système de réhabilitation auditive apporte des résultats auditifs plus modestes que l'implant cochléaire mais permet, la plupart du temps, aux personnes qui l'utilisent, de maintenir une communication orale en s'appuyant à la fois sur des informations auditives et visuelles. Nous nous sommes donc demandé quelle était, chez les adultes implantés du tronc cérébral, la part respective des informations auditives, visuelles et audiovisuelles transmises pour l'identification des voyelles.

La thèse s'articule autour de six chapitres chacun constitués d'une revue de littérature et d'une ou plusieurs études (Tableau 1). Le premier chapitre traite la description articulaire des voyelles orales et nasales et de la façon dont elles sont perçues en lecture labiale par 22 labiolecteurs normo-entendants et 22 labiolecteurs devenus sourds (*étude n°1*). Le second chapitre porte sur la description acoustique des voyelles nasales et propose une comparaison acoustique des voyelles orales et nasales à partir des données de 10 locutrices normo-entendantes (*étude n°2*). Les troisième et quatrième chapitres s'intéressent à la perception des voyelles par les adultes normo-entendants, devenus sourds et implantés cochléaires. Une revue de littérature étudie l'apport et les limites de l'implant cochléaire pour l'identification des voyelles ainsi que l'impact de la résolution et du décalage fréquentiels. Trois études portent ensuite sur l'identification des voyelles nasales par les adultes implantés cochléaires. Une étude rétrospective auprès de 82 adultes s'intéresse à l'identification de voyelles à des

stades post-implant précoce et tardif (*étude n°3*). Un test de discrimination de voyelles orales-nasales met en lien les caractéristiques acoustiques des voyelles et leurs confusions auditives par 15 adultes implantés cochléaires afin d'expliquer acoustiquement les confusions faites par les auditeurs (*étude n°4*). Enfin, un test de discrimination voyelles synthétisées s'intéresse à la perception de différences d'intensité des formants par 10 adultes implantés cochléaires afin de déterminer s'il n'existe pas un déficit des adultes implantés cochléaires dans ce domaine, qui pourrait expliquer leur difficulté à percevoir le trait de nasalité (*étude n°5*). Le cinquième chapitre porte sur l'identification auditive, visuelle et audiovisuelle de voyelles par 13 adultes implantés du tronc cérébral et le lien entre la résolution fréquentielle et l'identification de voyelles (*étude n°6*). Enfin, le sixième chapitre s'intéresse aux applications des six études précédentes pour la rééducation de l'adulte sourd. Les réponses de 179 orthophonistes à un questionnaire sur les pratiques orthophoniques (*étude n°7*) sont le point de départ d'une réflexion sur les apports de la thèse à la prise en charge orthophonique de l'adulte sourd.

Axe phonétique	Axe clinique	Etude	Méthode	Population
Articulatoire	Lecture labiale	Etude 1	Prospective Vidéo Identification	22 adultes sourds 22 adultes normo-entendants
Acoustique		Etude 2	Prospective Analyse spectrale	10 locutrices normo-entendantes
Perceptif	Perception avec IC	Etude 3	Rétrospective Etude de dossiers cliniques Identification Voix directe	82 adultes implantés cochléaires
	Perception avec IC	Etude 4	Prospective Discrimination Stimuli naturels	15 adultes implantés cochléaires 6 adultes normo-entendants
	Perception avec IC	Etude 5	Prospective Discrimination Stimuli de synthèse	10 adultes implantés cochléaires 10 adultes normo-entendants
	Perception avec ITC	Etude 6	Prospective Identification Voix directe	13 adultes implantés du tronc cérébral
Applications	Pratiques cliniques	Etude 7	Prospective Enquête	179 orthophonistes dont 21 expérimentés dans la prise en charge de l'adulte sourd

Tableau 1 : Architecture générale de la thèse.

II. Chapitre 1 : Articulation des voyelles orales et nasales

Le Chapitre 1 est composé d'une partie théorique et d'une partie expérimentale sur les sosies labiaux des voyelles nasales (étude n°1). Dans la partie théorique, nous décrivons le système vocalique du français, le comparons à celui de l'anglais et du finnois et nous intéressons à l'articulation des voyelles orales et nasales. L'articulation des voyelles nasales septentrionales est en mutation et nous analysons les modalités de ce *Changement en Chaîne*, depuis l'Ancien Français. L'étude n°1 porte sur la lecture labiale et a pour objectif de comparer deux classifications cliniques de visèmes vocaliques (Istria et al., 1982 et Dumont, 2002) et une classification phonétique de la labialité (Zerling, 1990) en focalisant notre attention sur les voyelles nasales du français. Un test d'identification visuelle de 10 voyelles orales : [a, i, u, y, e, ε, o, ə, ø, œ] et 3 voyelles nasales du français : [ã, õ, ẽ] prononcées en contexte CV (Consonne-Voyelle) avec C (Consonne) = [p, t, k] par deux locutrices a été proposé sur un support vidéo sans information auditive. Le taux moyen d'identification visuelle, toutes voyelles orales et nasales confondues, est significativement meilleur dans le groupe des adultes sourds ($34 \pm 2,8\%$) que dans celui des adultes normo-entendants ($26 \pm 1,5\%$). Les voyelles [a], [i] et [u] sont les trois voyelles les mieux identifiées visuellement aussi bien par les adultes devenus sourds (respectivement 77%, 70% et 56% d'identification) que par les adultes normo-entendants (71%, 52% et 53%). Les trois voyelles nasales sont moins bien identifiées que les dix voyelles orales, aussi bien par les sujets sourds (15% pour les nasales et 39% pour les orales) que par les sujets entendants (9% pour les nasales et 31% pour les orales). La perception visuelle de l'aperture et de la labialité des voyelles nasales est en accord avec les descriptions phonétiques actuelles en retrouvant notamment [ã] comme arrondie. Aucune des deux classifications cliniques ne permet d'expliquer toutes les confusions visuelles des adultes sourds. Une nouvelle classification des visèmes vocalique est proposée.

Introduction

Après avoir présenté le système vocalique du français du point de vue articulatoire et phonologique, nous nous intéresserons plus particulièrement aux voyelles nasales du français et à l'articulation buccale de celles-ci. La question de la correspondance entre voyelle orale et voyelle nasale pourrait sembler accessoire à première vue. Cependant, elle influe sur la description phonétique des voyelles nasales. D'un point de vue orthophonique, elle pose la question des correspondances articulatoire, acoustique et perceptive à opposer en rééducation orthophonique pour cibler la nasalité. Quelle voyelle opposer à chacune des voyelles nasales pour ne travailler que l'élévation/abaissement du voile du palais? Comment interpréter les erreurs en lecture labiale et en perception auditive chez les adultes sourds?

A. Description articulatoire des voyelles orales et nasales

Les phonèmes d'une langue sont essentiellement de deux types : les voyelles et les consonnes. La réalisation des consonnes correspond à une ou plusieurs strictions ou obstructions sévères au niveau du conduit vocal. Pour la réalisation des voyelles, l'onde sonore source issue de la vibration des plis vocaux (communément appelés les « cordes vocales »¹) circule librement, sans obstacle, le long du conduit vocal, où elle est filtrée. Le signal acoustique ainsi émis est de type périodique complexe, de plus forte amplitude que celui des consonnes environnantes. Chaque voyelle constitue le noyau d'une syllabe. Une syllabe est composée d'une voyelle, seule ou associée à une ou plusieurs consonnes (ou semi-voyelles). Par exemple, le mot « strict » ne constitue qu'une seule syllabe. Il n'y a pas en français de consonnes syllabiques, c'est-à-dire de consonnes pouvant remplacer la voyelle comme sommet de la syllabe (il en existe en anglais, par exemple, comme /l/, /m/ ou /n/).

¹ Le terme « vocal folds » a définitivement remplacé le terme de « vocal cords » dans la littérature de langue anglaise mais pas encore dans la littérature de langue française.

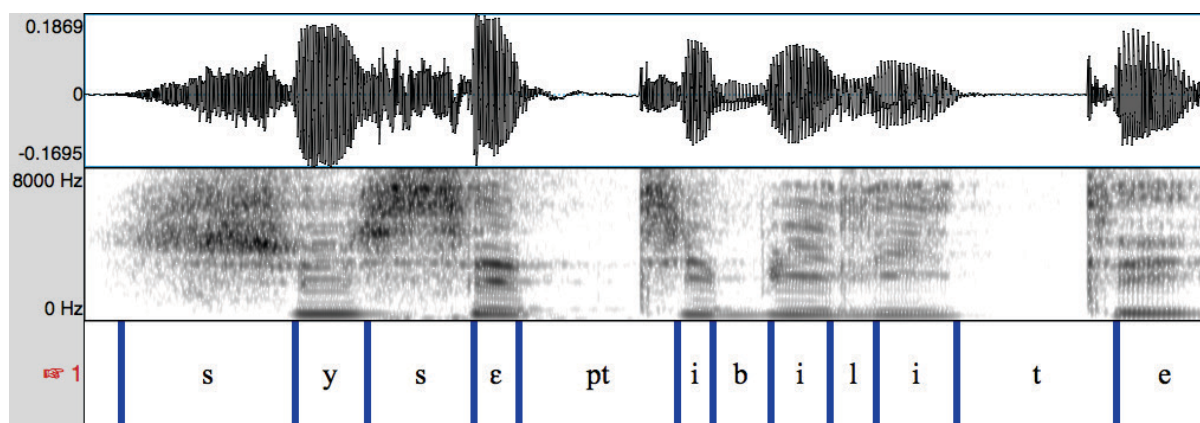


Figure 2: Oscillogramme et spectrogramme du mot «susceptibilité» [syseptibilite]. Elaboré par l’auteur du manuscrit.

Comme on peut l’observer sur la Figure 2, les deux consonnes occlusives sourdes [t] sont composées d’un silence correspondant à la tenue de l’occlusion, suivi d’un signal apériodique impulsionnel, correspondant au bruit lors du relâchement (*burst* en anglais). Pour [pt], on observe une zone de friction après le burst, générée par la coarticulation du [t] et du [i]. L’occlusive est caractérisée phonologiquement par l’aspect interrompu du silence associé au bruit de relâchement mais se réalise ici « phonétiquement » suivie d’un court bruit continu, sans que cela ne change l’identité du phonème [t]. La consonne occlusive sonore [b] présente une barre de voisement pendant la tenue de l’occlusion et un bruit de relâchement, ici de plus faible intensité que pour une occlusive sourde. Les deux exemplaires de la consonne fricative [s] sont composés d’un signal apériodique continu, sans relâchement net. La zone intense (noire) du bruit généré par [sy] est plus basse que celle générée par [sε] car l’arrondissement des lèvres du [y] allonge le conduit vocal et abaisse les résonnances. Ces différences phonétiques causées par la coarticulation des phonèmes entre eux ne modifient pas l’image phonologique : dans les deux cas, il s’agit de la consonne /s/. La consonne sonante [l] est un signal continu périodique avec présence d’énergie dans les moyennes fréquences. Toutes les voyelles sont plus intenses que les consonnes et sont caractérisées par des renforcements d’harmoniques, les formants (généralement 4 formants en-dessous de 4000 Hz pour un conduit vocal masculin).

1. Les systèmes vocaliques des langues du monde

Si, le nombre de voyelles dans les langues varie de 3 à 28 (Vallée et al., 1999), 99% des langues ont au moins deux voyelles. Deux tiers des langues ont entre 5 et 7 voyelles. Les timbres les plus fréquents sont [i] (99% des langues), [a] (98%), [u] (40%), [e] (44%) et [o]. Les langues tendent à exploiter seulement les deux dimensions que sont l'aperture et le degré d'antériorité/postériorité pour les huit premières voyelles (traits primaires), et utiliser un trait secondaire (nasalité, labialité ou durée) pour les suivantes. Les voyelles nasales sont présentes dans 22% des langues du monde et les voyelles antérieures arrondies dans 9% des langues du monde. Deux tendances existent expliquant ainsi la similarité des systèmes vocaliques à travers les langues. La première est une tendance des langues du monde à disperser les voyelles pour qu'elles soient aussi éloignées que possible les unes des autres et ainsi bien discriminables perceptivement, selon la *théorie de la dispersion* (Lindblom, 1986). La seconde tendance est exprimée sous la forme de la *théorie de la focalisation* : les langues choisiraient en priorité des voyelles présentant des zones de renforcement de formants, les voyelles quantiques (Stevens, 1972) encore une fois dans un but de saillance perceptive. La *théorie combinée de la dispersion-focalisation* (TDF) prédit, quant à elle, les tendances générales vocaliques sur la base à la fois de la distinctivité au sein d'un système et de la prégnance acoustico-perceptive individuelle pour les voyelles (Schwartz et al., 1997). Il existe un troisième principe, le *principe d'économie*, cherchant toujours à utiliser le moins de traits distinctifs possibles pour un nombre d'oppositions de phonèmes maximal, décrit par Ohala (1979, cité par Schwartz et al. en 2012 pour le développement de la *Perception for Action Control Theory*). Dans le même sens, Martinet (1970) dans son ouvrage *Economie des changements phonétiques* décrit la manière dont les langues du monde évitent la redondance des traits distinctifs.

Les systèmes vocaliques évoluent au cours de temps et nous prendrons pour exemple l'évolution des voyelles nasales dans le système vocalique du français.

2. Le système vocalique du français

D'un point de vue articulatoire, quatre caractéristiques permettent de distinguer entre-elles les voyelles du français.

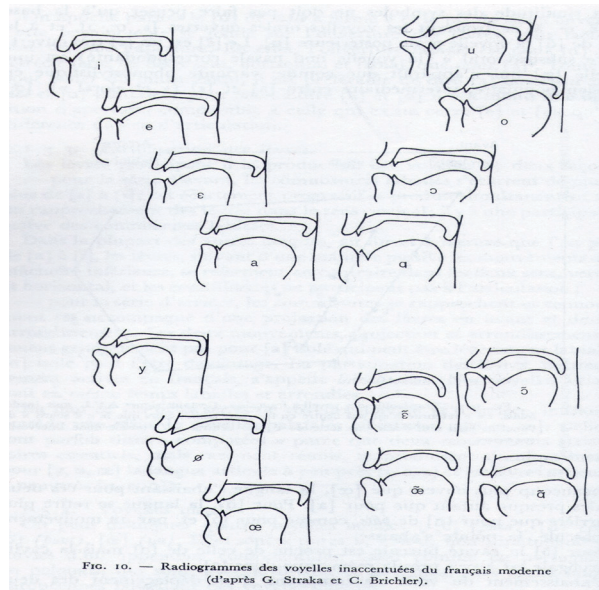


Figure 3: Radiogrammes des voyelles du français moderne. Tiré de Fernand Carton (1974), Introduction à la phonétique du français, page 40.

- Le **lieu d'articulation** : selon la localisation de la masse de la langue, on distingue les voyelles antérieures [i] [e] [ɛ] [a] [y] [ø] [œ] [ɛ̃] [œ̃] des voyelles postérieures [u] [o] [ɔ] [ɑ] [ɑ̃] [ɔ̃].
- L'**aperture** est corrélée à la position de la langue et de la mâchoire sur un axe vertical. Quatre degrés d'aperture se distinguent selon que les voyelles sont fermées [i] [y] [u], mi-fermées [e] [ø] [o], mi-ouvertes [ɛ] [œ] [ɔ] ou ouvertes [a] [ɑ] [ɑ̃].
- La **nasalité** : le velum ou voile du palais, est abaissé pour l'articulation des voyelles nasales du français: [ɑ̃] [ɔ̃] [ɛ̃] [œ̃].
- L'**arrondissement** de l'orifice labial permet en français de distinguer les voyelles antérieures arrondies [y] [ø] [œ] [œ̃] des voyelles antérieures non-arrondies [i] [e] [ɛ] [ɛ̃]. L'arrondissement est, la plupart du temps, accompagné d'un mouvement de protrusion, projection des lèvres en avant, sorte de facilitateur physiologique, sans valeur phonologique.

Lieu \ Aperture	Antérieur				Postérieur			
	Non arrondie		Arrondie		Non arrondie		Arrondie	
Fermée	[i] lit		[y] lu				[u] loup	
Mi-fermée	[e] les		[ø] peu				[o] lot	
Mi-ouverte	Orale [ɛ] laid	Nasale [ɛ̃] brin	Orale [œ] leur	Nasale [œ̃] brun			Orale [ɔ] lors	Nasale [ɔ̃] long
Ouverte	[a] patte				Orale [ɑ] pâte	Nasale [ɑ̃] pente		

Tableau 2 : Voyelles du français classées selon les quatre dimensions articulatoires : lieu d'articulation, aperture, labialité et nasalité (élaboré par l'auteur du manuscrit).

a) **Systèmes vocaliques minimal et maximal**

Le nombre de consonnes dans une langue est en général stable. Le nombre de voyelles de l'inventaire phonologique peut varier d'un locuteur à l'autre en fonction notamment de caractéristiques régionales (Vaissière, 2006). Le système vocalique de chaque locuteur du français pourra comprendre entre 10 (système minimal) et 15 (système maximal) voyelles.

Les oppositions de voyelles mi-fermée/mi-ouverte (dites moyennes), /e/-/ɛ/, /o/-/ɔ/, et /ø/-/œ/ sont mises en évidence par les paires minimales² « les » /le/ vs. / « lait » /lɛ/, « Baule » vs. « bol », « je » vs. « jeu » tendent à disparaître. Il existe en français, pour ces paires de voyelles, la règle phonologique de l'alternance vocalique qui conditionne une distribution de la voyelle dans la syllabe de la manière suivante :

- Dans une syllabe ouverte (type CV où C=consonne et V=voyelle), la voyelle moyenne /ɛ/ (comme dans « lait », « laid », « épais ») tend à se fermer pour devenir /e/ (« lait » /lɛ/ prononcé comme /le/ « les », « épais » /epɛ/ prononcé comme « épée », /epe/), ou à être toujours fermée (par exemple la forme CV avec V=/ɔ/ n'existe plus en français)
- Dans une syllabe fermée (type CVC), les voyelles /o, ø / tendent à s'ouvrir (« Paule » /pol/ prononcé comme « Paul », /pɔl/, « jeûne » /ʒœn/ prononcé comme « jeune »,

² Une paire minimale est un couple mots ne s'opposant que par un phonème.

/ʒœn/) et la forme CVC avec V=/e/ n'existe plus en français, c'est-à-dire que la voyelle /e/ s'ouvre nécessairement en /ɛ/ lorsqu'elle est suivie d'une consonne.

L'opposition de /œ/ labialisé de « brun » ou « l'un » et /ɛ/ non labialisé de « brin » ou « lin » tend à disparaître, de même que l'opposition entre /ɑ/ postérieur de « pâte » et /a/ non-postérieur de « patte ».

b) **Différences entre le système vocalique du français, de l'anglais et du finnois**

La quasi totalité des études s'intéressant à la perception des voyelles par les adultes implantés cochléaires portent sur les voyelles de l'anglais. Le système vocalique de l'anglais diffère du système vocalique du français et nous le présenterons rapidement dans ce paragraphe. Par ailleurs, une équipe finlandaise (Välimaa et al., 2002 et 2011) a étudié de façon approfondie la perception des voyelles du finnois par les adultes implantés cochléaires. Nous présenterons rapidement les caractéristiques du système vocalique du finnois.

Le **système vocalique de l'anglais** (Ostiguy et al., 1996) comporte 11 voyelles simples et 3 voyelles à double timbre, les diphtongues. Les traits articulatoires permettant de distinguer les voyelles entre elles sont l'aperture (4 degrés comme en français), le lieu d'articulation (antérieur/central/postérieur), la tension (tense/lax, pour les voyelles fermées, dites hautes) et la diphtongaison. Certaines voyelles sont diphtonguées, c'est-à-dire qu'elles sont allongées et que leur timbre varie au cours de leur prononciation. Trois de ces diphtongues sont linguistiquement distinctives : /aj/, /aw/ et /oj/. Il n'existe pas de voyelle phonologiquement arrondie dans le système vocalique anglais, mais comme en français, les voyelles postérieures tendent à être phonétiquement arrondies. Les voyelles tendues tendent à être réalisées phonétiquement avec une plus grande durée que les voyelles relâchées.

Le **système vocalique du finnois** contient 16 voyelles (les 8 voyelles brèves /i, y, e, o, æ, u, ɑ/ et les 8 voyelles longues /i:³, y:, e:, o:, æ:, u:, ɑ:). Les traits distinctifs utilisés pour opposer les voyelles sont l'aperture, l'antériorité-postériorité, l'arrondissement et la quantité (durée). Contrairement au français et à l'anglais, la durée joue en finnois un rôle distinctif, comme par exemple pour la paire minimale /tuli/ (« feu ») vs. /tu:li/ (« vent ») (Välimaa et al., 2002).

³ Le signe diacritique « : » indique que la voyelle est allongée.

De plus, outre les différences dans la construction du système phonologique, des différences phonétiques peuvent également s'observer entre les langues. Par exemple, le même symbole /i/ peut ne pas recouvrir la même réalité phonétique dans toutes les langues. Un /i/ prototypique en français est caractérisé par un rapprochement et renforcement mutuels du troisième et du quatrième formant, tandis qu'un /i/ en anglais britannique est caractérisé par une position plus haute du F₂. Les symboles de l'A.P.I identiques masquent ces différences phonétiques cross-linguistiques (Vaissière, 2011).

3. Les voyelles nasales

Au niveau articulatoire, la nasalité, qu'elle soit vocalique ou consonantique, est en premier lieu la conséquence de l'ouverture du port vélopharyngé lors de la production des sons de parole. Cette ouverture est réalisée en abaissant le voile du palais principalement par la cessation de l'activité du levator palatini. Un ensemble d'articulations complémentaires intervient dans la production des voyelles nasales postérieures du français comme par exemple, l'arrondissement et la protrusion des lèvres, ce que nous allons développer dans les prochains paragraphes.

a) Voyelles nasalisées et voyelles nasales

Il y a au moins une consonne nasale dans 97% des 317 langues recensées dans la base de données UPSID (Maddieson et Disner, 1984). Parmi tous les traits segmentaux, la nasalité est un de ceux le plus enclin à l'assimilation⁴ (Clements et al. 2014). Une voyelle placée devant une consonne nasale [m,n,ɲ, en français par exemple] en coda⁵, a tendance à se nasaliser. Par exemple, dans le mot « femme », le [a] est nasalisé d'un point de vue phonétique, c'est-à-dire qu'il y a un effet acoustique de la nasalisation mais cela ne change pas l'identité de la voyelle, ni le sens du mot prononcé. Une voyelle nasale est par contre une voyelle pour laquelle il existe une opposition phonémique (phonologique) avec une autre voyelle. La nasalité permet de distinguer des mots par ailleurs identiques dans les paires minimales lin-lait, faim-fait, teinte-tête, Inde-aide, banc-bas, lent-las, pente-pâte, dompter-doter, longe-loge (Straka, 1979).

⁴ Assimilisation: différentes sortes de changements dont un son est susceptible d'être affecté quand il subit l'influence d'un son voisin (Carton, 1997).

⁵ Coda: partie finale d'une syllabe, composée d'une ou plusieurs consonnes.

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

Tableau 3 : Synthèse de la présence des consonnes et voyelles nasales dans les langues du monde. Tiré de Clements et al. (2014), page 184.

Dans les langues du monde, le plus souvent, le système contient des consonnes nasales mais pas de voyelles nasales (appelé type B dans le Tableau 3, par exemple en anglais et en arabe). Le français est un système de type A, comprenant à la fois des consonnes nasales et des voyelles nasales (Clements et al., 2014).

b) Les voyelles nasales dans les langues du monde

Seules 150 langues sur 700 possèdent des voyelles nasales phonologiques (Ruhlen, 1975), soit environ 20% des langues du monde (Maddieson et Disner, 1984). Le portugais compte 6 voyelles nasales, le polonais en présente 2. Le dialecte gheg de l'Albanie, certains dialectes Gascons, quelques langues Celtes ainsi que des langues de l'Afrique, de l'Inde du Nord (dont le hindi) et de l'Amérique du Sud comportent également des voyelles nasales phonologiques (Ruhlen, 1979 ; Straka, 1979).

c) Les voyelles nasales en français

En français, il existe actuellement quatre voyelles nasales que l'on peut retrouver dans la suite de mots « un bon vin blanc » [œbɔ̃vɛ̃blɑ̃]. En français, les voyelles nasales sont « pures » (Carton, 1997), c'est-à-dire non diphtonguées ou suivies d'un appendice consonantique nasal comme c'est le cas en portugais ou en polonais. Cependant, il existe des différences géographiques considérables dans le système des voyelles nasales en France. En français méridional, les quatre voyelles nasales sont encore utilisées et peuvent être partiellement nasalisées et suivies d'une consonne nasale, sous la forme [aã̃] (Léon et al., 1983; Fagyal et al., 2006).

(1) *Fréquence d'occurrence des voyelles nasales du français*

Les fréquences d'occurrence pour les quatre voyelles nasales vont de 5,1 à 7,4%. Nous verrons dans l'étude n°3 si cette représentation est comparable dans les listes de mots utilisés pour l'évaluation clinique de la surdité (Tableau 4).

	Chavasse (1948)	Lafon (1961)	Delattre (1965)	Hess (1975)	Valdman (1976)	Tubach et Boë (1990)	New et Pallier (2014)
	Fréq.(%)	Fréq.(%)	Fréq.(%)	Fréq.(%)	Fréq.(%)	Fréq.(%)	Fréq.(%)
[ã]	2	3,3	3,2	3,4	3,5	3,55	3,5
[õ]	1,7	2	1,62	2	2,2	1,95	1,8
[ẽ]	1,1	1,4	1,03	1,1	1,2	1,26	1
[œ]	0,3	0,5	0,44	0,4	0,5	0,5	0,5
Total	5,1	7,2	6,29	6,9	7,4	7,3	6,8

Tableau 4: Fréquence d'occurrence des voyelles nasales. Synthèse tirée de Carignan (2013) et complétée par Tubach et Boë (1990, cités par Vaissière (1995)) et Lexique.org (New et Pallier, 2014). Les fréquences (exprimées en pourcentages) des phonèmes d'après la dernière version de la base Lexique 3.8.

(2) *Evolution des voyelles nasales du français au cours du temps*

L'apparition des voyelles nasales et leur évolution au cours du temps ont pu être étudiées à partir des poèmes des IX^{ème} et XI^{ème} siècles et des chansons de gestes des XII^{ème} et XIII^{ème} siècles, formes d'écriture qui jouaient beaucoup avec l'assonance. Cependant, il n'existe pas de grammaire ou de description linguistique de l'époque et il est difficile de décrire l'évolution des voyelles nasale de façon univoque (Berit-Hansen, 1998).

Pendant la période de l'Ancien Français (IX^{ème}-XIV^{ème} siècles), a eu lieu une nasalisation progressive des voyelles orales situées devant les consonnes nasales /m/, /n/, /ɲ/ en coda. La voyelle est progressivement nasalisée sous l'effet de la consonne nasale qui la suit, mais cette consonne reste prononcée, elle n'a pas encore disparu. Les voyelles ouvertes se sont nasalisées en premier et les voyelles fermées en dernier selon l'ordre présumé suivant (Reenen, 1985, cité par Berit-Hansen, 1998) :

an 1000 : /a/
vers 1025 : /e/
vers 1150 : /o/
vers 1250 : /i/, /u/

Au début du Moyen Français, au XIV^{ème} siècle, toutes les voyelles sont nasalisées devant les consonnes nasales en coda, c'est-à-dire qu'à ce moment chaque voyelle orale a une « correspondante » nasalisée (Pope, 1934). Mais une réduction du système vocalique nasal apparaît déjà par neutralisation⁶ entre /ẽ/ et /ẽ/ et /õ/ et /õ/. Puis /ẽ/ se combine avec /ã/ pour donner /ã/ (Pope, 1934, cité par Berit-Hansen, 1998).

Pendant la période du Moyen Français (XIV^{ème}-XV^{ème} siècle), il y a un affaiblissement puis une disparition de la consonne nasale en coda suivant la voyelle nasalisée. Ne reste alors que la voyelle nasale.

Par exemple :

campus > champs

tempus > temps

A la fin du Moyen Français (XVI^{ème}-XVII^{ème} siècle), les voyelles nasales deviennent phonologiques. Puis leurs timbres commencent à se confondre. Dès le XVIII^{ème} siècle, à l'époque du Français Moderne, il ne reste alors que 4 voyelles nasales: /ã/, /õ/, /ẽ/ et /œ/. Actuellement, comme évoqué précédemment, on assiste à la neutralisation progressive de l'opposition phonologique entre /œ/ et /ẽ/ en français parisien et plus généralement en français du nord de la France, avec cependant des variations possibles d'un locuteur à l'autre, pour des raisons régionales, démographiques ou socio-culturelles (Berit-Hansen, 1998). Depuis la seconde partie du XX^{ème} siècle, plusieurs auteurs avancent que le timbre des voyelles nasales du français septentrional continue d'évoluer décrivant un *Changement en chaîne*.

(3) *Lien entre phonétique orthographe*

Comme il est mentionné dans le Tableau 5 (Berit-Hansen, 1998, adapté de Rochet, 1976), si chaque voyelle orale possédait au début du Moyen Français une correspondante nasale, à l'heure actuelle chaque voyelle nasale est historique la « correspondantes » de plusieurs voyelles orales, que celle suggérée par la notation de l'Alphabet Phonétique International (API).

⁶ Une opposition est neutralisée quand la différence entre deux phonèmes ne peut plus servir, dans certaines positions à des fins distinctives.

FIGURE 4. CORRESPONDANCES ÉTYMOLOGIQUES ENTRE LES VOYELLES LATINES ET LES VOYELLES NAsALES DU FRANÇAIS MODERNE.

Latin vulgaire		Français moderne	
Syllabe fermée	Syllabe ouverte		
[a] grande	[a] manu	/ã/	grand
[ɛ] ventu	[ɛ] bene		vent
[e] fendere	[e] plenu		fendre
[i] cinque	[i] vinu	/ɛ̃/	main
			bien
			plein
		/ɔ̃/	vin
			cinq
[o] ponte	[o] bonu	/ɔ̃/	pont
[o] onda	[o] donu		bon
[au] aunk(u)lu	[au] catalaunis		onde
		/œ̃/	don
			oncle
			Châlons
[u] hum(e)le	[u] unu	/œ̃/	humble
			un

(Source: Rochet 1976:39-40)

Tableau 5: Correspondances étymologiques entre les voyelles latines et les voyelles nasales du français moderne (selon Berit-Hansen, 1998, page 80, adapté de Rochet, 1976).

L'étendue des transcriptions orthographiques possibles pour chacune des voyelles nasales (voir le détail Annexe A) peut également susciter des confusions dans la notion de « correspondantes ».

(4) Les voyelles nasales entre-elles

Les traits articulatoires distinctifs qui séparent les quatre voyelles nasales entre elles sont l'antériorité/postériorité de la langue et l'arrondissement/écartement des lèvres. La hauteur de la langue et l'ouverture des mâchoires (aperture) seraient des informations redondantes (Delattre, 1965). Les voyelles [ɛ̃] et [œ̃] ont une articulation linguale proche (Chlumsky et al., 1938 ; Bothorel et al. 1986 ; Zerling, 1984 ; Delvaux, 2002) et assez centrale (Delvaux, 2002), mais la configuration des lèvres est différente : [ɛ̃] est non labial et [œ̃] est labialisé/arrondi. (Bothorel et al., 1986). D'après Zerling (1984), la neutralisation de l'opposition entre [ɛ̃] et [œ̃] ne se fait pas au profit de [ɛ̃] mais d'une voyelle intermédiaire entre [ɛ̃]-[œ̃] ; le phonème unique correspondant à [ɛ̃]/[œ̃] est intermédiaire, ni labialisé, ni non labialisé (Zerling, 1984, Berit-Hansen, 1998). La voyelle [ɔ̃] est plus haute (plus fermée) et plus arrondie que la voyelle [ã] (Delvaux, 2002). Selon Zerling (1984) et Bothorel et al. (1986), la langue est proche pour ces deux voyelles et la différenciation entre elles ne se fait pas tant par l'aperture que par la labialisation, [ɔ̃] étant sur-labialisée (Zerling, 1984). On observe un glissement de [ã] vers [ɔ̃] pour 56% des locuteurs en 1974 et 69% en 1993 (Berit-Hansen, 1998). Ce glissement s'observe davantage chez les locuteurs jeunes.

(5) Les voyelles nasales par rapport aux voyelles orales

En plus de l'abaissement du voile du palais, comment les voyelles orales et nasales se distinguent-elles ?

	Nombre de locuteurs	Méthodes
Chlumsky et al., 1938	1	Radiographie
Delattre, 1965	5	Cinéradiographie
Brichler-Labaeye, 1970	1	Cinéradiographie
Zerling, 1984	2	Cinéradiographie
Bothorel et al., 1986	4	Cinéradiographie
Delvaux, 2002	4 (belges)	IRM
Montagu, 2002 et 2007	11	Vidéo face et profil
Carignan, 2012	3	Articulographe électromagnétique

Tableau 6: Etudes comparant l'articulation et/ou l'acoustique des voyelles nasales et orales du français.

	[ã] versus [a]	[õ] versus [o]	[ẽ] versus [e]
Aperture (mandibule +langue)	Plus fermée (Delattre, Zerling) langue plus haute (Zerling), Plus ouverte (Delvaux)	Plus fermée (Delattre, Zerling et Delvaux pour certaines femmes)	Plus fermée (Zerling) Plus ouverte (Brichler-Labaeye, Delvaux chez les femmes, Carignan), Proche de [æ] et même de [a] (Montagu) Identique (Delattre)
Lieu (langue)	Plus postérieure (Chlumsky, Delattre, Zerling, Delvaux, Carignan chez 2/3)	Plus postérieure (Delattre, Zerling, Delvaux pour les femmes) Identique (Chlumsky)	Moins antérieure (Zerling, Delvaux chez les femmes, Carignan chez 2/3 locuteurs) Constriction pharyngale plus prononcée (Delattre)
Labialité	Labialisée et plus protruse (Zerling, Chlumsky) Plus arrondie (Delvaux), Plus arrondie et plus protruse, proche de [ɔ] (Montagu) Moins arrondie (Delattre)	Plus arrondie (Delattre, Delvaux pour les femmes), Plus protruse et proche de [o] (Zerling, Bothorel, Montagu) voire surlabialisée (Zerling, Montagu),	Non labialisée ou intermédiaire (Zerling) Identique (Delattre)

Tableau 7: Résultats des études, décrites dans le Tableau 6, comparant l'articulation labio-linguale des voyelles nasales et des voyelles orales.

(6) *Le Changement en Chaîne ou Shift Chain*

Plusieurs auteurs évoquent un *Changement en Chaîne* ou *Chain Shift* des voyelles nasales du français de du nord de la France (Fonagy, 1989 ; Berit-Hansen, 2001 ; Fagyal et al., 2006 ; Montagu, 2007 ; Carignan, 2012) qui correspondrait à une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre des voyelles sur le triangle vocalique (Fagyal et al., 2006) :

- L'opposition [ẽ]-[œ̃] se neutralise
- [ẽ] se centralise et s'ouvre
- [ã] se postériorise, se ferme et se labialise
- [õ] se ferme, se postériorise et se surlabialise

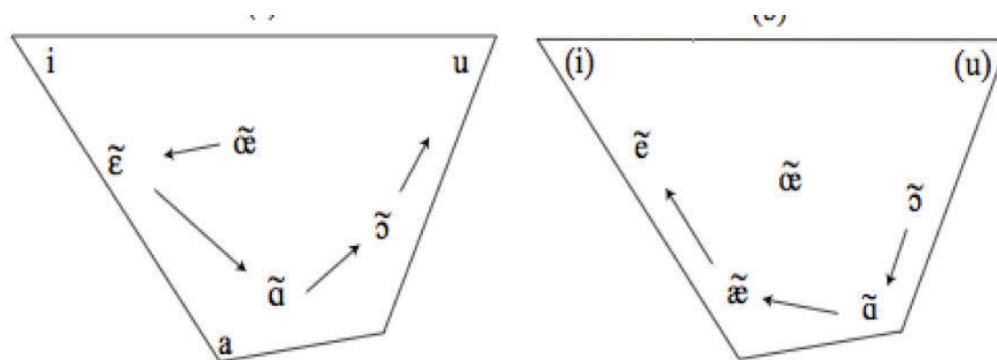


Figure 4: *Changement en Chaîne* des voyelles nasales dans le système vocalique du français parisien (à gauche) et du français canadien (à droite). Un changement s'effectue dans les deux cas mais en sens opposés. Tiré de Fagyal et al. (2006), page 34.

Un *Changement en Chaîne* des voyelles nasales est également en cours en français québécois mais il s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre (Fagyal et al., 2006).

(7) *La notation de l'alphabet phonétique international (API)*

En 1885, pour la transcription des quatre voyelles nasales [ã] [õ] [ẽ] [œ̃], Passy et Jones choisissent d'ajouter le signe diacritique tild [~] au symbole A.P.I de leur voyelle phonologique orale alternante [a] [ɔ] [ɛ] [œ], sur la base des alternances morpho-phonologiques, « paysan » vs. « paysanne », « bon » vs. « bonne », « brun » vs. « brune », « jeun » vs. « jeune », « sain » vs. « saine ». Or, comme nous venons de le voir, la voyelle nasale n'est pas une « simple » combinaison de la voyelle orale alternante et de l'abaissement du velum (Zerling, 1984 ; Montagu, 2007 ; Delvaux, 2012 ; Carignan, 2013). Les symboles traditionnellement utilisés pour représenter les voyelles nasales du français ne correspondent

pas à leur articulation phonétique et ceci est naturellement dû en partie à leur origine multiple (Tableau 5) et au choix quasi arbitraire des symboles pour les représenter. Cependant, nous avons vu, avec l'exemple du [i] en français et en anglais britannique, que d'une langue à l'autre, un même symbole API pouvait recouvrir des réalités phonétiques différentes (Vaissière, 2011). D'après Delattre (1965), si Paul Passy avait pu voir les radiographies il aurait peut-être proposé des symboles différents. D'après Zerling (1984) :

« L'ensemble des observations permet de dire que les symboles phonétiques habituellement utilisés ne sont pas toujours les plus représentatifs de l'articulation ou de la qualité acoustique des voyelles nasales. Notamment le symbole [ɔ̃] qui est discutable et [ã] qui est inadéquat à tout point de vue ».

Certains auteurs ont proposé de changer la notation API des voyelles nasales du français ([æ̃], [Ã], [ɔ̃] et [ō]), par exemple, à la place de [ɛ̃] [œ̃] [ã] [õ], selon Brichler-Labaeye (1970). Cette proposition ne semble cependant pas idéale car les configurations exactes de la langue et des lèvres pour la production des voyelles nasales n'ont finalement peut-être pas de correspondantes orales exactes et peut-être qu'aucun symbole ne représenterait parfaitement l'articulation de la voyelle. De plus, les français septentrionaux, méridionaux et québécois n'auraient alors plus les mêmes symboles phonétiques pour des voyelles, qui pourtant conservent leur distinctivité phonologique dans de nombreuses paires minimales.

Par contre, il nous semble important que ces descriptions articulatoires phonétiques précises des voyelles nasales soient connues des orthophonistes afin qu'ils puissent adapter leur prise en charge en fonction de celles-ci. Ainsi, nous proposons une première étude, application des données articulatoires des voyelles nasales à la perception visuelle de l'articulation des voyelles, la lecture labiale.

B. Etude n°1: Quels sosies labiaux pour les voyelles nasales ?

Remarque préliminaire :

Les données de cette étude ont été colligées dans le cadre du mémoire d'orthophonie « Facteurs prédictifs pour l'acquisition d'une lecture labiale fonctionnelle chez l'adulte sourd » de Mathilde Lavrut et Amandine Noiret (Lavrut et Noiret, 2013) dirigé par Emmanuèle Ambert-Dahan et Stéphanie Borel dans l'unité « Otologie, Implants auditifs, Chirurgie de la base du crâne » de la Pitié-Salpêtrière et soutenu en 2013 au DUEFO, UMPC, Paris. Les données ont bénéficié d'une analyse complémentaire dans le cadre de cette thèse afin de répondre aux hypothèses spécifiques à la phonétique clinique et font l'objet d'un article en préparation « Quels sosies labiaux pour les voyelles nasales ? Stéphanie Borel, Mathilde Lavrut, Amandine Noiret, Emmanuèle Ambert-Dahan, Olivier Sterkers, Jacqueline Vaissière en préparation pour une soumission dans la revue Glossa.

1. Objectifs

Dans l'étude n°1, nous souhaitons répondre aux questions suivantes :

- Les voyelles nasales peuvent-elles être identifiées visuellement sur la seule base d'indices d'aperture et de labialité ?
- Les confusions s'orientent-elles vers les voyelles orales de la description traditionnelle ou de la description selon le *Changement en Chaine* ?
- Les classifications de visèmes actuelles permettent-elles d'expliquer les confusions visuelles des labiolecteurs ?

a) La lecture labiale

Il existe différentes définitions de la lecture labiale. La plus complète semble être celle de l'UNESCO, datant de 1983 et rapportée par Dumont (2008) : « *Procédé permettant de comprendre ce que dit une autre personne en tenant compte d'indications visuelles telles que les mouvements des muscles faciaux, des lèvres, des mains et du corps en général* ». Chez l'adulte devenu sourd, la lecture labiale constitue un support à l'audition dans le traitement de la parole qui est le plus souvent audiovisuel. C'est davantage par la fusion des indices auditifs (dégradés par la surdité) et des indices visuels (parcellaires), que l'adulte devenu sourd va pouvoir maintenir une communication fonctionnelle et épanouissante (Borel, 2013). En

lecture labiale, toutes les caractéristiques articulatoires ne sont pas visibles, ce qui peut engendrer des confusions de phonèmes. Par exemple, la position exacte de la langue, les vibrations des plis vocaux et l'abaissement du velum ne sont pas visualisés et génèrent des confusions que l'on classe généralement dans la catégorie des « sosies labiaux ». Aux difficultés inhérentes à la reconnaissance visuelle de certains phonèmes s'ajoutent des difficultés propres à la combinaison des phonèmes entre eux dans le cadre de la parole continue. En effet, la parole se présente comme un flux rapide d'en moyenne 200 mots par minute et 12 à 15 phonèmes par seconde, continu, puisque phrases et mots ne sont pas segmentés, variable selon, par exemple, le « style » plus ou moins hyper articulé du locuteur (Demorest et Bernstein, 1992) et lacunaire, car une proportion importante de mots et de phonèmes est prononcée imparfaitement, voire pas du tout (Caron, 1989). Le phénomène de coarticulation, c'est-à-dire l'anticipation ou le prolongement du geste articulatoire d'un phonème sur les phonèmes alentour, modifie l'image labiale de chaque phonème. Par exemple, la forme labiale de la consonne [s] est différente dans la première (arrondi) et la seconde (non arrondi) syllabe du mot « souci », influencée par la voyelle suivante. Ces phénomènes peuvent influencer les phonèmes tout au long du mot comme, par exemple, dans le mot « structure » [stRykyR], où le [y], voyelle arrondie, quatrième phonème du mot, influence l'articulation labiale du [s] dès le début du mot.

b) L'entraînement à la lecture labiale

(1) Les différentes approches

L'entraînement de la lecture labiale fait l'objet de différentes approches. Certaines, plutôt analytiques, s'attachent en premier lieu aux formes labiales de chaque consonne et voyelle, avant de les combiner entre-elles, à la manière du B.A-BA (Garric, 1974). D'autres approches, plus globales ou mixtes, mettent en avant que certains éléments de parole sont invisibles en raison de leur articulation ou leur entourage phonétique tandis que d'autres éléments, bien que visibles, doivent être interprétés parce qu'ils sont ambigus. En conséquence, selon M. Istria et al. (1982), en lecture labiale, il va falloir « *percevoir ce qui peut être vu, interpréter ce que l'on a perçu, compléter ce qui n'a pas été vu* ». Les phonèmes ne seront alors pas présentés isolément mais associés entre eux. Quelle que soit la méthode utilisée, l'entraînement à la lecture labiale s'appuiera également sur une prise de conscience par la personne malentendante de sa propre articulation, en produisant soi-même des sons de

parole avec feed-back kinesthésique (ex : sensation des vibrations lors de l'émission des consonnes voisées) et visuel (utilisation d'un miroir).

(2) *Les classifications de visèmes*

En perception visuelle de la parole, certaines caractéristiques articulatoires, comme les mouvements du voile du palais ou des plis vocaux, ne sont pas perceptibles visuellement. Le terme de « phonème » ne semble plus convenir pour désigner ce qui est perçu par le labiolecteur dans la mesure où, à une même image labiale peut correspondre plusieurs phonèmes : *les sosies labiaux*. Dumont (2002) préfère donc l'appellation de « visèmes », en référence au *Visual phoneme* de Fisher (1968), pour désigner « *les phonèmes dont l'articulation visible procède du même geste facial* ». Les sosies labiaux sont regroupés sous l'appellation d'un même visème. En français, nous connaissons deux classifications cliniques de visèmes (Istria et al., 1982 ; Dumont et Calbour, 2002) auxquelles nous ajouterons la classification de Zerling (1990), classification phonétique, mais non clinique, ne portant que sur l'arrondissement).

Dans leur *Manuel de lecture labiale*, Istria et al. (1982) proposent une classification à quatre catégories sur la base d'observations cliniques.

bouche ouverte – groupe A [a, ε=ẽ]
bouche ouverte/avancée – groupe AN [ã, ɔ, œ]
bouche avancée – groupe O [o= ð, u=y, ø]
bouche étirée – groupe I [i, e]

Les phonèmes séparés par le symbole « = » sont considérés comme des sosies labiaux par Istria et al. (1982). Dans une même catégories, les phonèmes qui ne sont pas des sosies labiaux sont considérés comme proches ou « faux sosies ».

Pour les voyelles, la classification proposée par Dumont et Calbour (2002) comprend cinq catégories sur la base d'observations cliniques.

visème [i]
visème [ɔ, o, ɔ̃, y, u]
visème [œ, ø, e]
visème [ɛ, ɛ̃, e]
visème [a, ɑ]

Selon J.P. Zerling (1990), phonéticien, s'il existe bien deux types de labialisation phonologique (arrondi vs. non arrondi), il existe trois degrés de labialisation phonétique. Zerling (1990) propose une classification de la labialité phonétique à trois niveaux à partir des 1238 réalisations de 14 voyelles, prononcées par 105 locuteurs filmés par trois caméras synchronisées à la vitesse de 50 images par seconde :

[-lab] = non-labialisées : [i, e, ɛ, a, ɛ̃]
[+lab] = (moyennement) labialisées : [œ, ɔ, ɑ]
[++lab] = fortement labialisées : [y, ø, u, o, ɔ̃]

Outre les trois classifications précédemment citées, d'autres cliniciens spécialistes de la lecture labiale proposent des descriptions des voyelles nasales. La voyelle [ɑ̃] est décrite par Jeanne Garric (1974) comme la voyelle [ɑ] associée, chez certaines personnes, à « *un abaissement du menton correspondant à celui du voile du palais* ». La voyelle [ɔ̃] comme la voyelle [o] sont associées, chez certaines personnes, à « un allongement de la partie située entre la base du nez et la lèvre supérieure ». La voyelle [ɛ̃] est associée à la voyelle [ɛ]. Haroutunian (2007), dans son *Manuel pratique de lecture labiale* décrit la forme des lèvres de [ɑ̃], [ɔ̃] et [ɛ̃] comme celle de [ɑ], [o] et [ɛ] associées à une contraction importante.

(3) *Les confusions visuelles les plus fréquentes dans la littérature*

Les visèmes les plus faciles à percevoir sont les trois voyelles cardinales [i], [a], [u] (Dumont, français, 2008). La voyelle [ɑ̃] est majoritairement confondue avec une voyelle arrondie [y], [u], [o] ou [ɔ̃] que ce soit chez les sourds ou chez les entendants (Petithomme, 2013). Tseva et Cathiard (1990) ont présenté les matrices de confusions (Figure 5) de tests de perception visuelle de Mourand-Dornier auprès de normo-entendants (1980) et Gentil (1980) auprès de sourds prélinguaux.

	i	e	ɛ	ə	y	u	o	ɔ	ɛ̃	ẽ	œ	ʌ	Autres
i	517	16	111	16	2	0	2	5	0	0	0	0	2 329
e	33	467	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500
ɛ	17	29	525	94	0	0	0	0	17	6	0	0	312
ə	0	0	202	587	0	0	2	2	29	0	0	0	178
y	4	4	0	0	191	342	52	14	0	0	9	4	42 338
u	87	0	13	0	133	493	53	20	0	0	40	0	26 135
o	5	0	5	0	0	189	544	5	0	5	16	0	5 226
ɔ	0	0	4	12	0	25	58	463	0	154	12	0	25 247
ɛ̃	22	11	366	27	0	0	0	0	89	0	0	0	485
ẽ	0	0	9	14	0	4	110	224	19	395	0	37	0 188
œ	11	11	0	0	0	144	388	67	0	0	167	0	22 190
ʌ	0	0	0	0	0	0	100	166	0	67	0	400	0 267
ʌ	0	0	0	0	0	100	0	66	500	0	0	0	0 233 101
Tot.	696	538	1235	750	426	1197	1375	1466	154	627	244	441	355 3496

	i	e	ɛ	ə	y	u	o	ɔ	ɛ̃	ẽ	œ	ʌ	Autres
i	579	29	46	13	4	8	0	4	0	46	4	0	4 263
e	138	150	75	125	0	0	0	0	0	75	25	0	0 412
ɛ	75	96	313	96	0	0	8	4	42	3	4	4	0 355
ə	25	0	125	413	0	0	12	0	12	0	0	12	0 401
y	25	6	6	6	263	294	19	6	0	0	6	6	0 363
u	0	0	0	50	87	388	25	0	0	0	0	0	0 62 388
o	0	0	0	31	81	175	125	19	0	0	6	0	31 532
ɔ	12	0	0	12	12	37	175	225	0	0	0	0	0 527
ɛ̃	12	0	37	388	0	25	0	0	188	0	0	12	0 338
ẽ	12	37	113	413	0	25	12	0	0	0	0	0	0 388
œ	12	50	25	263	0	0	0	12	25	12	25	0	0 576
ʌ	12	0	0	12	0	25	37	0	0	0	12	250	37 615
ʌ	0	0	12	25	12	113	138	12	0	0	25	25 138	500
Total	902	368	752	1847	459	1090	551	270	254	149	94	334	272 5658

Figure 5 : Matrices de confusions pour la perception visuelle des voyelles : A gauche : données de Mourand-Dornier (1980) auprès de 30 adultes normo-entendants, sur un corpus de 5 listes cochléaires de Lafon, sur enregistrement vidéo d'une locutrice. A droite : données de Gentil (1981), auprès de 51 adolescents sourds, sur un corpus de 19 syllabes CV et CVC, sur enregistrement vidéo de deux locuteurs (1981). Données regroupées par Tseva et Cathiard (1990). Données brutes.

Nous avons procédé à une analyse de ces données afin de déterminer quelles étaient les confusions les plus fréquentes des voyelles nasales (Tableau 8).

Auteur	Voyelle cible	Taux de réponse correcte	Confusion n°1	Confusion n°2
Mourand-Dornier (1980, normo-entendants)	[ã]	40%	[ɔ] 22%	[o] 11%
Gentil (1981, sourds prélinguaux)	[ã]	25%	[ɔ̃] 4%	[o] 4%
Mourand-Dornier (1980, normo-entendants)	[ɔ̃]	17%	[o] 39%	[u] 14%
Gentil (1981, sourds prélinguaux)	[ɔ̃]	14%	[o] 14%	[u] 11%
Mourand-Dornier (1980, normo-entendants)	[ẽ]	9%	[ɛ] 37%	[i] 2%
Gentil (1981, sourds prélinguaux)	[ẽ]	0%	[a] 41%	[ɛ] 11%
Mourand-Dornier (1980, normo-entendants)	[œ]	Non testé		
Gentil (1981, sourds prélinguaux)	[œ]	1%	[a] 26%	[e] 5%

Tableau 8 : Résultats de l'identification visuelle des voyelles nasales dans les études de Mourand-Dornier (1980, normo-entendants) et Gentil (1981, sourds prélinguaux) rapportés par Tseva et Cathiard (1990). Données analysées dans le cadre de cette thèse.

On remarque dans le Tableau 8 que la voyelle nasale [ã] est la mieux reconnue visuellement aussi bien par les adultes normo-entendants (40%) que par les adultes sourds (25%). Les confusions s'orientent majoritairement vers des voyelles arrondies d'aperture mi-fermée ou mi-ouverte. La voyelle [ɔ̃] est mal reconnue (17% et 14%) et majoritairement

confondue avec des voyelles arrondies d'aperture fermée ou mi-fermée. La voyelle [ɛ̃] n'est quasiment jamais correctement identifiée (9% et 0%) et les confusions s'orientent toujours vers une voyelle non-arrondie mais pouvant aussi bien être d'aperture fermée que mi-ouverte ou ouverte.

2. Méthode

a) Population

Le groupe expérimental est composé de 22 adultes (13 hommes et 9 femmes) âgés de 18 à 91 ans (MOY $\pm$ SEM : 53 $\pm$ 4,6 ans), présentant une surdité sévère à profonde, candidats à l'implantation cochléaire. De différents niveaux d'étude, tous ont été recrutés dans l'unité *Otologie, implants auditifs, chirurgie de la base du crâne*, du Pr. O. Sterkers au sein du Groupe Hospitalier de la Pitié-Salpêtrière. Un groupe témoin de sujets normo-entendants appariés en âge (de 17 ans à 93 ans ; 53 $\pm$ 4,5 ans), en sexe (13 hommes, 9 femmes) et en niveau d'études, a également été recruté (Tableau en Annexe E). Une lettre d'information a été fournie quelques jours avant l'évaluation et un consentement a été signé par chaque participant. Les sujets non francophones natifs ont été exclus de l'étude. L'acuité visuelle a été vérifiée au moyen de l'échelle de Monoyer (1875) avec comme critère d'exclusion les sujets présentant une acuité inférieure à quatre dixièmes. Le Codex (Belmin et al., 2007), un test rapide de dépistage des troubles cognitifs, a été proposé aux sujets de plus de 65 ans. Les sujets classés en « catégories diagnostiques C et D », signifiant un risque de démence élevé, ont été exclus de l'étude.

b) Stimuli

Treize voyelles intégrées dans des syllabes de type CV où C est une consonne [p, t, k] et où V est une voyelle [a, i, u, y, e, ε, o, ɔ, ø, œ, ã, õ, ẽ], prononcées par deux locutrices orthophonistes parisiennes ont été proposées sur un support vidéo exclusivement de face avec pour tâche d'identifier visuellement la voyelle prononcée. La question posée au sujet est : « Quelle est la voyelle prononcée ? ». Celui-ci doit répéter la syllabe perçue mais seule la voyelle fait l'objet d'une cotation. Il n'y a qu'une seule présentation de chaque stimulus et le sujet peut répondre « je ne sais pas ». Au total, chaque sujet voit six occurrences différentes de chacune des 13 voyelles testées, c'est-à-dire dans trois contextes consonantiques, prononcés par deux locutrices.

3. Résultats

a) Comparaison des résultats des adultes devenus sourds et des adultes normo-entendants

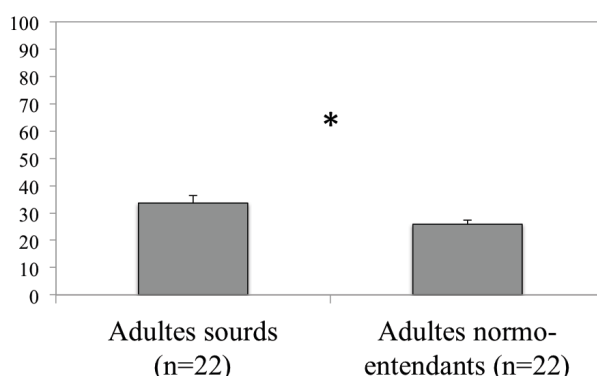


Figure 6 : Identification visuelle de voyelles par 22 sujets sourds et 22 sujets normo-entendants appariés en sexe âge et niveau d'étude (13 voyelles * 3 contextes consonantiques * 2 locutrices).

Le taux moyen d'identification visuelle, toutes voyelles orales et nasales confondues, est significativement plus élevé dans le groupe des adultes devenus sourds (MOY±SEM : $34 \pm 2,8\%$) que dans le groupe des normo-entendants ($26 \pm 1,5\%$) avec test t apparié : $t=2,67$; $p=0,014$. Il n'y a pas de différence significative d'identification des voyelles prononcées par l'une ou l'autre des locutrices, dans aucun des deux groupes. Aucun effet du contexte [p, t, k] sur la reconnaissance visuelle des voyelles n'est relevé, ni pour les adultes normo-entendants (MOY±SEM respectivement : $28 \pm 7\%$, $26 \pm 6,5\%$ et $24 \pm 4,4\%$, ANOVA avec $F(2,36)=0,09$, $p=0,91$), ni pour les adultes devenus sourds (MOY±SEM respectivement : $36 \pm 6,9\%$, $28 \pm 7,2\%$, $34 \pm 5,8\%$, ANOVA avec $F(2,36)=0,31$, $p=0,7$).

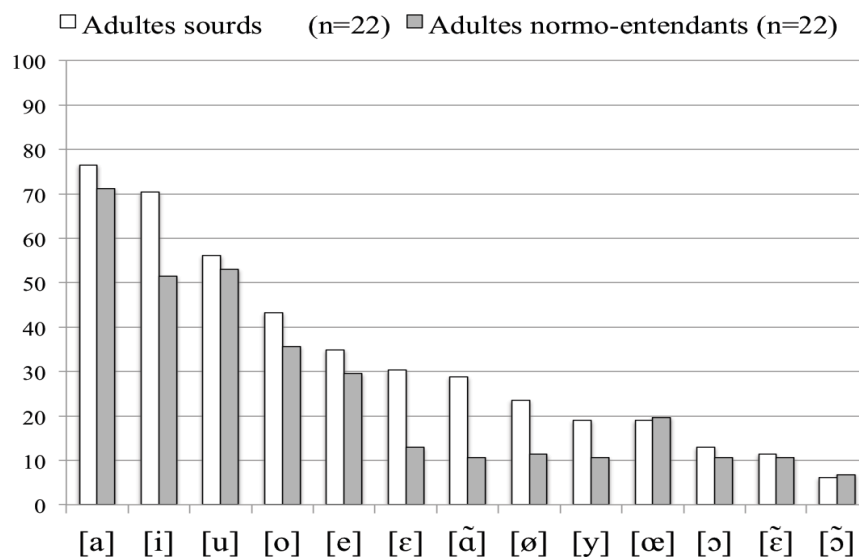


Figure 7 : Identification visuelle de 13 voyelles par 22 adultes sourds et 22 adultes entendants (pour chaque voyelle : 3 contextes consonantiques * 2 locutrices).

Les voyelles [i], [a] et [u] sont les trois voyelles les mieux identifiées visuellement, aussi bien par les sujets sourds que par les sujets normo-entendants. Les trois voyelles nasales sont moins bien identifiées que les dix voyelles orales, aussi bien par les sujets sourds (15% pour les nasales et 39% pour les orales) que par les sujets normo-entendants (9% pour les nasales et 31% pour les orales). Chez les sujets sourds, la voyelle [ã] est la mieux identifiée (29%), devant [ɛ̃] (11%) et [õ] (6%) qui sont les deux voyelles les moins bien identifiées pour l'ensemble du test. Chez les normo-entendants, les trois voyelles nasales sont parmi les moins bien identifiées (11% pour [ã] et [ɛ̃] ; 7% pour [õ]).

b) Confusions observées

Les matrices ont été élaborées de façon à distinguer visuellement les voyelles arrondies (à gauche) des voyelles non arrondies (à droite).

	ARRONDIES							NON-ARRONDIES								
	[y]	[u]	[ø]	[o]	[õ]	[œ]	[ɔ]	[ã]	[a]	[ẽ]	[ɛ]	[e]	[i]	NR	tot.	
[y]	25	59	8	10	1	1	0	0	2	0	0	1	1	24	132	
[u]	10	74	7	20	3	0	0	0	0	0	0	3	0	15	132	
[ø]	2	28	31	25	2	0	1	7	6	2	0	1	0	27	132	
[o]	1	15	20	57	8	1	1	0	0	0	0	2	1	26	132	
[õ]	4	38	13	35	8	2	6	0	0	0	0	0	2	24	132	
[œ]	0	1	11	8	2	25	10	33	14	1	0	1	2	24	132	
[ɔ]	0	0	8	3	1	8	17	31	20	3	0	1	0	40	132	
[ã]	0	1	18	22	2	14	8	38	6	3	0	5	0	15	132	
[a]	0	1	0	0	0	0	0	2	101	3	0	6	0	19	132	
[ẽ]	0	0	4	0	0	0	0	1	26	15	8	16	37	25	132	
[ɛ]	0	0	1	1	0	1	0	0	32	18	40	7	3	29	132	
[e]	0	1	1	0	0	3	0	0	9	6	11	46	19	36	132	
[i]	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	13	93	21	132	
tot.	42	219	122	181	27	55	43	112	217	52	61	102	158	325	1716	

Figure 8 : Matrice de confusion des 22 sujets sourds pour l'identification visuelle des voyelles dans trois contextes consonantiques prononcés par deux locutrices (13 voyelles * 3 contextes consonantiques [p,t,k] * 2 locutrices * 22 labiolecteurs sourds = 1716 réponses). En noir, les confusions entre les voyelles arrondies et non arrondies. Les stimuli présentés sont dans la colonne de gauche et les réponses des labiolecteurs sur la première ligne.

	ARRONDIES							NON-ARRONDIES								
	[y]	[u]	[ø]	[o]	[ɔ̃]	[œ]	[ɔ]	[ã]	[a]	[ẽ]	[ɛ]	[e]	[i]	NR	tot.	
[y]	14	67	9	11	0	2	0	1	2	1	0	2	0	23	132	
[u]	12	70	12	23	4	1	0	0	2	1	0	0	0	7	132	
[ø]	6	41	15	34	2	2	1	4	9	1	0	2	0	15	132	
[o]	2	44	10	47	8	1	0	1	3	0	0	1	1	14	132	
[ɔ̃]	8	46	3	38	9	2	2	0	1	0	0	0	1	22	132	
[œ]	1	7	15	15	2	26	5	14	16	4	1	1	3	22	132	
[ɔ]	2	7	11	8	3	8	14	23	22	2	3	4	0	25	132	
[ã]	0	13	14	36	7	6	10	14	9	0	0	1	1	21	132	
[a]	0	3	1	2	1	0	0	3	94	4	1	4	1	18	132	
[ẽ]	1	6	2	2	1	1	0	15	18	14	8	13	37	14	132	
[ɛ]	0	2	0	1	1	1	0	3	44	14	17	19	8	22	132	
[e]	0	6	0	0	1	0	0	4	15	10	4	39	33	20	132	
[i]	0	4	0	0	0	0	0	2	9	6	6	24	68	13	132	
tot.	46	316	92	217	39	50	32	84	244	57	40	110	153	236	1716	

Figure 9 : Matrice de confusion des 22 sujets normo-entendants pour l'identification visuelle des voyelles dans trois contextes consonantiques prononcés par deux locutrices. (13 voyelles * 3 contextes consonantiques [p,t,k] * 2 locutrices * 22 labiolecteurs normo-entendants = 1716 réponses). En noir, les confusions entre les voyelles arrondies et non arrondies. Les stimuli présentés sont dans la colonne de gauche et les réponses des labiolecteurs sur la première ligne.

Dans l'ensemble, aussi bien chez les adultes sourds que chez les adultes normo-entendants, les confusions n'apparaissent qu'à l'intérieur de chacune des deux catégories de voyelles arrondies et non-arrondies (Figures 8 et 9). Les confusions entre catégories sont marginales (<10/132 réponses pour chaque phonème) sauf pour la voyelle [ã] et les voyelles mi-ouvertes arrondies [ɔ] et [œ] qui suscitent des erreurs de jugement de labialité. La voyelle [ã] est majoritairement confondue avec une voyelle arrondie (82% des confusions exprimées pour les sourds et 89% pour les normo entendants) et [ɔ] et [œ] sont, soit confondues avec [ã] (ce qui est la réciproque de la confusion de [ã] vers les voyelles arrondies), soit avec [a].

c) **Taux d'identification par trait : aperture, lieu, labialité, nasalité**

Dans les matrices de confusions, pour chaque voyelle, les réponses ont été classées, pour chaque catégorie de voyelle, selon qu'elles respectaient ou non chacun des quatre traits articulatoires : aperture, lieu, labialité, nasalité. Pour chaque caractéristique, ont été acceptées comme bonnes réponses, aussi bien la réponse cible que chacune des réponses respectant chacun des traits articulatoires de la voyelle cible selon la description du Tableau 9. L'ensemble a été divisé par 132 (1 voyelle * 2 locutrices * 3 contextes * 22 labiolecteurs = 132 réponses) pour être présenté sous forme de moyenne et erreur-type.

	Aperture	Lieu	Labialité	Nasalité
[a]	ouvert	antérieur	non arrondi	oral
[ɛ]	mi ouvert	antérieur	non arrondi	oral
[e]	mi fermé	antérieur	non arrondi	oral
[i]	fermé	antérieur	non arrondi	oral
[œ]	mi ouvert	antérieur	arrondi	oral
[ø]	mi fermé	antérieur	arrondi	oral
[y]	fermé	antérieur	arrondi	oral
[ɔ]	mi ouvert	postérieur	arrondi	oral
[o]	mi fermé	postérieur	arrondi	oral
[u]	fermé	postérieur	arrondi	oral
[ã]	ouvert	postérieur	non arrondi	nasal
[ɔ̃]	mi-ouvert	postérieur	arrondi	nasal
[ẽ]	mi ouvert	antérieur	non arrondi	nasal

Tableau 9 : Description articulatoire utilisée pour le calcul du taux d'identification par trait articulatoire.

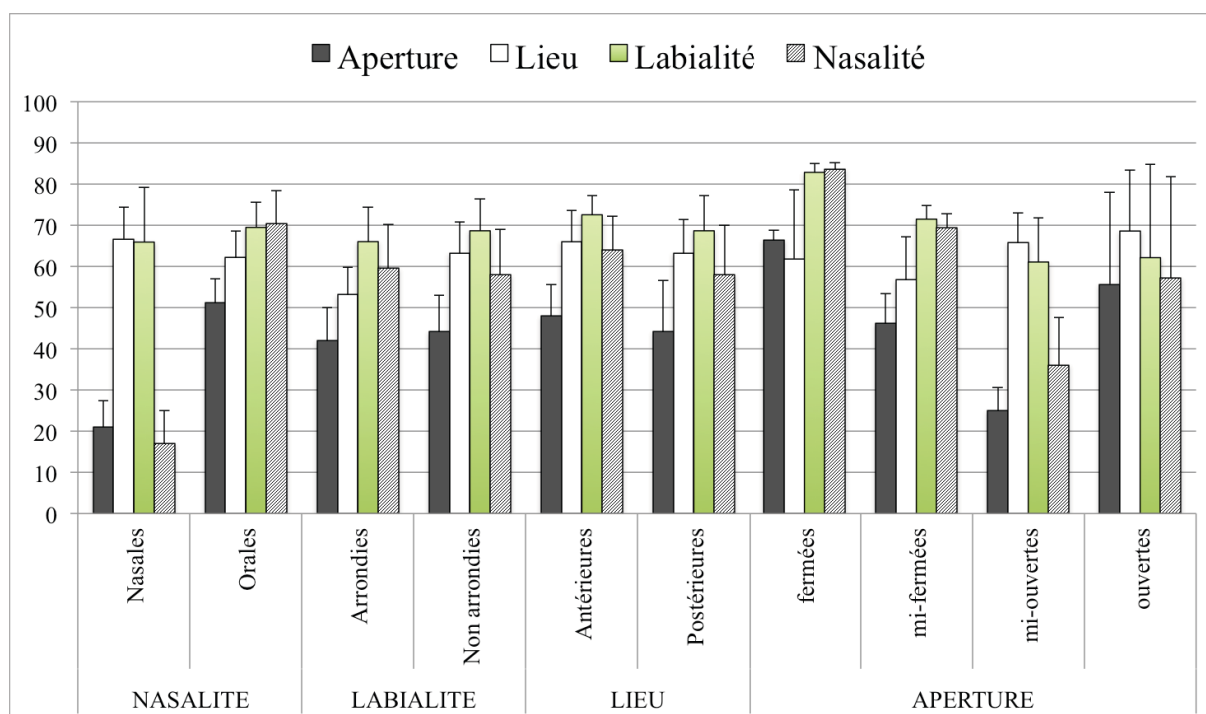


Figure 10 : Identification visuelle de voyelles en fonction du trait articulatoire chez 22 adultes sourds (MOY±SEM). L'aperture est reconnue à 21% pour les voyelles nasales et 51% pour les voyelles orales.

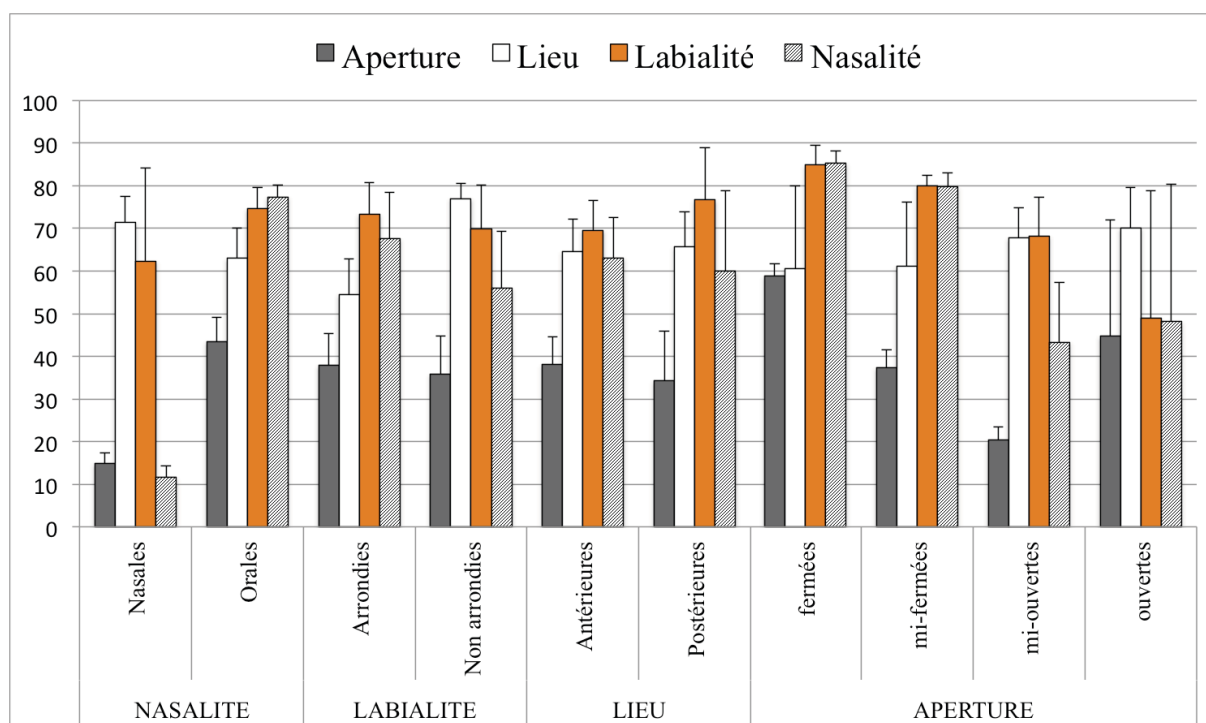


Figure 11 : Identification visuelle de voyelles en fonction du trait articulatoire chez 22 adultes normo-entendants (MOY±SEM). L'aperture est reconnue à 15% pour les voyelles nasales et 38% pour les voyelles orales.

Les patterns d'erreurs sont les mêmes chez les sujets sourds et chez les sujets entendants (Figures 10 et 11). Dans le groupe des voyelles nasales, l'aperture est mal identifiée. Ce déficit s'observe également dans le groupe des voyelles mi-ouvertes, qui comporte cependant les deux voyelles nasales [ɛ̃] et [ɔ̃] (Figure 10).

d) Classifications de visèmes

Les matrices ont été redistribuées en respectant les classifications cliniques de visèmes de Istria et al. (1982), Dumont et Calbour (2002) et la classification phonétique de la labialité de Zerling (1990).

	[a ɛ̃ ε i e]	[ɑ ɔ œ]	[o ɔ̃ u y ø]	NR	tot.		[a ɛ̃ ε i e]	[ɑ ɔ œ]	[o ɔ̃ u y ø]	NR	tot.
[i]	113	2	4	13	132	[i]	110	0	1	21	132
[e]	101	4	7	20	132	[e]	91	3	2	36	132
[a]	104	3	7	18	132	[a]	110	2	1	19	132
[ɛ̃]	90	16	12	14	132	[ɛ̃]	102	1	4	25	132
[ε]	102	4	4	22	132	[ε]	100	1	2	29	132
[ɑ]	11	30	70	21	132	[ɑ]	14	60	43	15	132
[ɔ]	31	45	31	25	132	[ɔ]	24	56	12	40	132
[œ]	25	45	40	22	132	[œ]	18	68	22	24	132
[o]	5	2	111	14	132	[o]	3	2	101	26	132
[ɔ̃]	2	4	104	22	132	[ɔ̃]	2	8	98	24	132
[u]	3	1	121	7	132	[u]	3	0	114	15	132
[y]	5	3	101	23	132	[y]	4	1	103	24	132
[ø]	12	7	98	15	132	[ø]	9	8	88	27	132
tot.	390	160	699	203	1452	tot.	389	207	588	268	1452

Figure 12 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Zerling (1990), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.

	[a ɛ̃ ε]	[ɑ ɔ œ]	[o ɔ̃ u y ø]	[i e]	NR	tot.		[a ɛ̃ ε]	[ɑ ɔ œ]	[o ɔ̃ u y ø]	[i e]	NR	tot.
[a]	99	3	7	5	18	132	[a]	104	2	1	6	19	132
[ɛ̃]	40	16	12	50	14	132	[ɛ̃]	49	1	4	53	25	132
[ε]	75	4	4	27	22	132	[ε]	90	1	2	10	29	132
[ɑ]	9	30	70	2	21	132	[ɑ]	9	60	43	5	15	132
[ɔ]	27	45	31	4	25	132	[ɔ]	23	56	12	1	40	132
[œ]	21	45	40	4	22	132	[œ]	15	68	22	3	24	132
[o]	3	2	111	2	14	132	[o]	0	2	101	3	26	132
[ɔ̃]	1	4	104	1	22	132	[ɔ̃]	0	8	98	2	24	132
[u]	3	1	121		7	132	[u]	0	0	114	3	15	132
[y]	3	3	101	2	23	132	[y]	2	1	103	2	24	132
[ø]	10	7	98	2	15	132	[ø]	8	8	88	1	27	132
[i]	21	2	4	92	13	132	[i]	4	0	1	106	21	132
[e]	29	4	7	72	20	132	[e]	26	3	2	65	36	132
tot.	341	166	710	263	236	1716	tot.	330	210	591	260	325	1716

Figure 13 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Istria et al. (1982), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.

	[i]	[ɔ o ɔ̃ y u]	[ø œ]	[ɛ ɛ e]	[ɑ̃ a]	NR	tot.		[i]	[ɔ o ɔ̃ y u]	[ø œ]	[ɛ ɛ e]	[ɑ̃ a]	NR	tot.
[i]	68	4	0	36	11	13	132	[i]	93	1	0	16	1	21	132
[ɔ]	0	34	19	9	45	25	132	[ɔ]	0	21	16	4	51	40	132
[o]	1	101	11	1	4	14	132	[o]	1	82	21	2	0	26	132
[ɔ̃]	1	103	5	0	1	22	132	[ɔ̃]	2	91	15	0	0	24	132
[y]	0	92	11	3	3	23	132	[y]	1	95	9	1	2	24	132
[u]	0	109	13	1	2	7	132	[u]	0	107	7	3	0	15	132
[ø]	0	84	17	3	13	15	132	[ø]	0	58	31	3	13	27	132
[œ]	3	30	41	6	30	22	132	[œ]	2	21	36	2	47	24	132
[e]	33	7	0	53	19	20	132	[e]	19	1	4	63	9	36	132
[ɛ̃]	37	10	3	33	35	14	132	[ɛ̃]	37	0	4	39	27	25	132
[a]	8	4	1	50	47	22	132	[a]	3	1	2	65	32	29	132
[ɑ̃]	1	6	1	9	97	18	132	[ɑ̃]	0	1	0	9	103	19	132
[ɑ]	1	66	20	1	23	21	132	[ɑ]	0	33	32	8	44	15	132
tot.	153	650	142	205	330	236	1716	tot.	158	512	177	215	329	325	1716

Figure 14 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Dumont et Calbour (2002), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.

4. Discussion

a) Résultats généraux

On peut s'étonner du score global (34%) relativement faible pour l'identification visuelle de voyelles des sujets adultes sourds. Rappelons cependant qu'il s'agit d'une tâche difficile, peu écologique puisque proposée sur un support vidéo. Les personnes sourdes ont l'habitude d'utiliser les trois dimensions du locuteur pour lire sur les lèvres et la vidéo, proposée de face, en deux dimensions, a pu rendre la tâche plus difficile. Petithomme (2013) a observé des performances en lecture labiale moins bonnes quand les stimuli étaient présentés sur support vidéo qu'avec l'orthophoniste en face-à-face, notamment pour l'identification des voyelles cardinales.

Nous avons testé la reconnaissance des voyelles selon trois contextes consonantiques. On aurait pu imaginer que les consonnes [p], visible, et [k], palatal qui s'adapte à la voyelle et renseigne sur celle-ci, soient facilitatrices pour la reconnaissance des voyelles que la consonne [t], qui mobilise l'apex de la langue. Cependant, aucune différence d'identification visuelle n'est retrouvée entre les trois contextes consonantiques, ni pour les adultes normo-entendants, ni pour les adultes sourds.

b) Analyse des confusions vocaliques

(1) Les voyelles orales

Les voyelles les mieux reconnues par les deux groupes de sujets sont les voyelles périphériques du triangle vocalique, voyelles cardinales, auxquelles s'ajoute la voyelle [o].

De plus, ces quatre voyelles extrêmes sont attractives, c'est-à-dire que les confusions s'orientent préférentiellement vers elles.

Pour les voyelles orales, la majorité des confusions respecte le caractère arrondi ou non arrondi de la voyelle. Sauf pour [œ] et [ɔ], arrondies, dont les confusions s'orientent vers [a], non arrondie. Si les voyelles [œ] et [ɔ] sont phonologiquement arrondies, leur aperture mi-ouverte rend l'arrondissement et la protrusion physiologiquement plus difficiles à réaliser. De fait, elles sont phonétiquement décrites comme « moyennement labialisées » (Zerling, 1990) et faiblement protruses (indice de protrusion de 1, sur une échelle de 0 à 4, selon Potard et Laprie, 2005) ce qui peut expliquer les confusions vers le [a], non arrondi et, qui plus est, voyelle extrême, donc attractive.

Pour les sujets sourds, les voyelles les plus difficiles à percevoir visuellement sont les voyelles mi-ouvertes orales [œ] et [ɔ] et nasales [ɔ̃] et [ɛ̃]. Rappelons que les voyelles ont toutes été placées dans une syllabe ouverte de type CV. Or, les voyelles mi-ouvertes orales [œ] et [ɔ] se retrouvent presque exclusivement, dans la langue française, en syllabe fermée de type CVC. Cette non-adéquation phonotactique explique peut-être les confusions d'aperture remarquées fréquemment pour ces deux phonèmes.

La voyelle [y] est très mal identifiée, généralement confondue avec [u]. La vidéo filmée de face, peut entraver la perception de la protrusion, qui diffère sensiblement entre la production du [y] et celle du [u], et ainsi gêner la différenciation de ces deux phonèmes. Potard et Laprie (2005), sur des données cinéradiographiques, ne trouvent pas de différence de protrusion entre [u] et [y]. Pourtant, bien que Zerling (1990) classe [u] et [y] dans la même catégorie (fortement labialisée [++lab]), il décrit également une très faible différence d'aire (mesure qui combine l'aperture et la labialité) entre [y] et [u] allant dans le sens d'une aire moins importante pour [u] que pour [y], donc d'une protrusion plus importante pour [u]. Ceci rejoint les résultats de Benguerel et Cowan (1974), qui montrent que l'activité du muscle orbicularis oris est plus élevée pour [u] que pour [y]. Ceci dit, les confusions vont essentiellement dans un sens : [y] est identifié [u] dans 45% des cas et [u] est identifié [y] dans seulement 8% des cas par les adultes sourds. De même, beaucoup de confusions concernent les voyelles antérieures arrondies [y] et [ø], au profit des postérieures arrondies [u] et [o]. Pour les labiolecteurs testés, pourquoi une voyelle arrondie serait-elle plus volontiers postérieure ? Peut-on expliquer le sens de cette confusion par un effet de fréquence d'occurrence des voyelles postérieures arrondies par rapport aux voyelles antérieures

arrondies ?

	Antérieure arrondie	Postérieure arrondie
fermée	[y]= 2,25%	[u]= 2,16%
mi-fermée	[ø] = 4,01%	[o]= 2,19%
mi-ouverte	[œ]=0,47 mais la voyelle neutre schwa = 3,5%	[ɔ]=1,07%

Tableau 10 : Fréquence d'occurrence des voyelles orales arrondies du français en % du nombre total de phonèmes du français. Source: lexique 3.8 (New et Pallier, 2004).

La tableau 10 montre que les voyelles postérieures arrondies ne sont pas plus fréquentes que les voyelles antérieures arrondies. Nous expliquerons donc plutôt ces confusions des voyelles antérieures arrondies vers les voyelles postérieures arrondies, par l'attraction des voyelles extrêmes [u] et [o] qui aimantent les réponses.

Dans le groupe des voyelles orales, il n'y a pas d'erreur visuelle de plus d'un degré d'aperture, ni de confusion entre les deux principaux degrés d'aperture, c'est-à-dire que le labiolecteur respecte le fait que la voyelle soit plutôt fermée (fermée et mi-fermée) ou plutôt ouverte (mi-ouverte et ouverte). L'aimantation vers les voyelles extrêmes (cardinales) pourrait être une cause de ce phénomène, les voyelles mi-fermées étant attirées vers les voyelles fermées [i] ou [u] et les voyelles mi-ouvertes étant attirées vers la voyelle ouverte [a].

(2) *Les voyelles nasales*

Dans le groupe des voyelles nasales, la description articulatoire traditionnelle, basée sur les alternances morpho-phonologiques et les symboles API, ne correspond pas à la réalité des confusions visuelles, à la fois pour l'aperture mais également pour la labialité de la voyelle [ã] (Zerling, 1984 ; Montagu, 2002). Les voyelles nasales suscitent de nombreuses erreurs visuelles, l'imbroglio allant jusqu'à des confusions de deux degrés d'aperture, et une confusion massive de labialité pour le [ã]. L'analyse par trait articulatoire révèle que l'aperture est moins bien reconnue dans le groupe des trois voyelles nasales que dans celui des voyelles orales (Figures 10 et 11). Les labiolecteurs testés n'auraient-ils des difficultés de perception visuelle de l'aperture que pour les trois voyelles nasales ? Cela semble peu

probable. Cependant, il serait trop rapide de conclure que ces erreurs ne sont dues qu'à une description articulatoire erronée des voyelles nasales. En effet, dans cette étude, la tâche ne consistait pas, au sens strict, à juger l'aperture, mais à identifier une voyelle entière dont l'identité dépend de la combinaison des quatre traits articulatoires, notamment, de l'aperture et de la labialité qui peuvent visuellement interagir (la labialité aurait tendance à visuellement «fermer » l'aperture).

La voyelle [ã] est la mieux identifiée des trois voyelles nasales, surtout par les sujets sourds (29%). Elle est quasi exclusivement confondue avec des voyelles arrondies d'apertures mi-ouvertes à fermées. Ces résultats rejoignent ceux de Mourand-Dornier (1980, normo-entendants) et Gentil (1981, sourds prélinguaux) rapportés par Tseva et Cathiard (1990). La voyelle [ã] est non arrondie d'après la description articulatoire phonologique mais est majoritairement confondue avec des voyelles arrondies. La confusion de labialité est une confusion visuelle grossière que nous n'observons pour aucune autre voyelle orale ou nasale (sauf pour [œ] et [ɔ] cf. supra), même chez les entendants. Il paraît étonnant que les sujets fassent une telle erreur. Ce résultat rejoint plutôt les observations de Zerling (1984 et 1990) qui décrit la voyelle [ã] comme une voyelle phonétiquement labialisée. Chez les normo-entendants, elle génère beaucoup de confusions qu'aucune des trois classifications testées ne parvient à prédire. Chez les adultes sourds, il n'y a pas de problème de classification. Parmi les cliniciens spécialistes de la lecture labiale, seuls Istria et al. (2002) classent la voyelle [ã] parmi les voyelles arrondies. Garric (1974), Dumont et Calbour (2002) et Haroutunian (2007) rapprochent plutôt la voyelle [ã] de la voyelle [a], non arrondie, en y ajoutant parfois un mouvement du menton.

La voyelle [ẽ] est très mal identifiée (11% dans chacun des deux groupes de sujets). Les confusions mettent en évidence un pattern inattendu car elles s'orientent dans une commune mesure, aussi bien vers la voyelle maximale ouverte [a] que vers la voyelle maximale fermée [i]. L'observation et l'analyse des données de Mourand-Dornier (1980, normo-entendants) et Gentil (1981, sourds prélinguaux) rapportés par Tseva et Cathiard (1990), dans le Tableau 8 mettent également en évidence des confusions vers [i] et [a]. Ces confusions « opposées » d'aperture ne se rencontrent que pour la voyelle [ẽ]. Visuellement, il semble y avoir une interaction entre l'aperture de la voyelle [ẽ], plus ouverte que celle de [ɛ] (Brichler-Labaeye, 1970 ; Delvaux, 2002 ; Carignan, 2012) voire s'approchant de [a] selon Montagu (2002), et les lèvres non arrondies orientant à l'opposé plutôt la confusions vers [i].

Dans son étude en cinéradiographie, Zerling (1984) a constaté une position des lèvres différente pour [ɛ̃] selon que le locuteur maintenait ou non l'opposition phonologique /ɛ̃/-/œ̃/. Chez le locuteur maintenant l'opposition, qui devait donc distinguer /ɛ̃/ et /œ̃/, la voyelle [ɛ̃] était plus étirée que chez le locuteur ne maintenant pas l'opposition. Dans la présente étude, on pourrait imaginer que l'une des deux locutrices aurait conservé l'opposition /ɛ̃/-/œ̃/ avec un [ɛ̃] articulé étiré (orientant les confusions vers [i]) tandis que l'autre locutrice n'aurait pas maintenu l'opposition, proposant alors un exemplaire de [ɛ̃] moins étiré (orientant les confusions vers [a]). Or, il n'en est rien car les confusions de [ɛ̃] vers [a] ou [i] se rencontrent aussi bien avec les voyelles prononcées par la locutrice n°1 que celles prononcées par la locutrice n°2. Les locutrices disent d'ailleurs ne faire, ni l'une ni l'autre, la distinction entre /ɛ̃/-/œ̃/. Ce résultat dépendrait peut-être alors plutôt de la référence du labiolecteur, qui sur un même exemplaire de /ɛ̃/ serait plutôt attiré par l'indice apporté par l'aperture ou par l'indice apporté par la labialité. Peut-être que tous les labiolecteurs n'ont pas les mêmes repères visuelles selon qu'ils maintiennent, eux-mêmes, l'opposition /ɛ̃/-/œ̃/ ou non. Nous n'avons malheureusement pas cette information à notre disposition.

La voyelle [ɔ̃] classée par Zerling comme fortement labialisée tout comme [y ø u o] (1990) est très mal reconnue (7% chez les normo entendants et 6% pour les devenus sourds). Les confusions sont majoritairement attirées par la voyelle cardinale arrondie [u] mais également la voyelle [o], ce qui rejoint les observations de plusieurs auteurs (Bothorel et al. 1986 ; Zerling, 1984 ; Montagu, 2002) au sujet de la labialité de [ɔ̃] qui serait proche de [o]. Les confusions s'orientent donc préférentiellement vers des voyelles fermée [u] ou mi-fermée [o], ce qui rejoint les données articulatoires de Zerling (1984) et Delvaux (2002) qui concluent que l'articulation de [ɔ̃] est plus fermée que celle de [ɔ]. Ces résultats sont également en accord avec les résultats en perception visuelle de la parole de Mourand-Dornier (1980, normo-entendants) et Gentil (1981, sourds prélinguaux) rapportés par Tseva et Cathiard 1990) et traités dans le Tableau 8.

(3) Comparaison des trois classifications

Les trois classifications ne peuvent être strictement comparées car aucune ne comprend le même nombre de catégories (trois chez Zerling, quatre chez Istria et al. et cinq chez Dumont et Calbour) mais l'on constate cependant, autant pour la population sourde que pour la population normo-entendante, que la classification de Zerling (1993) permet de

regrouper la plupart des confusions sans erreur de classification. Cependant, cette classification ne prend en compte que la dimension de labialité et non d'aperture, ce qui réduit les informations que l'orthophoniste pourrait apporter au patient. Parmi les deux classifications cliniques, la classification d'Istria et al. (1982) entraîne moins d'erreurs que celle de Dumont et Calbour (2002). Nous proposons une adaptation de la classification d'Istria et al. (1982) pour laquelle la voyelle [e] est déplacée dans la catégorie [a, ẽ, ɛ]. Ainsi, la voyelle [i] est laissée seule dans une catégorie, comme cela est le cas dans la classification de Dumont et Calbour (2002).

	[a ẽ ɛ e]	[ã ɔ œ]	[o õ u y ø]	[i]	NR	tot.		[a ẽ ɛ e]	[ã ɔ œ]	[o õ u y ø]	[i]	NR	tot.
[a]	103	3	7	1	18	132	[a]	110	2	1	0	19	132
[ẽ]	53	16	12	37	14	132	[ẽ]	65	1	4	37	25	132
[ɛ]	94	4	4	8	22	132	[ɛ]	97	1	2	3	29	132
[e]	68	4	7	33	20	132	[e]	72	3	2	19	36	132
[ã]	10	30	70	1	21	132	[ã]	14	60	43	0	15	132
[ɔ]	31	45	31	0	25	132	[ɔ]	24	56	12	0	40	132
[œ]	22	45	40	3	22	132	[œ]	16	68	22	2	24	132
[o]	4	2	111	1	14	132	[o]	2	2	101	1	26	132
[õ]	1	4	104	1	22	132	[õ]	0	8	98	2	24	132
[u]	5	3	101	0	23	132	[u]	3	0	114	0	15	132
[y]	5	3	101	0	23	132	[y]	3	1	103	1	24	132
[ø]	12	7	98	0	15	132	[ø]	9	8	88	0	27	132
[i]	45	2	4	68	13	132	[i]	17	0	1	93	21	132
tot.	453	168	690	153	252	1716	tot.	432	210	591	158	325	1716

Figure 15 : Classification proposée après adaptation de la classification d'Istria et al. (1982) en regard des résultats de la présente étude auprès des 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite) : la voyelle [e] est déplacée dans la catégorie [a ẽ ɛ] et la voyelle [i] est laissée seule dans une catégorie.

Cette nouvelle classification permet d'expliquer les confusions des 22 adultes sourds. Par contre, chez les 22 adultes normo-entendants, la voyelle [ã] est perçue comme fortement labialisée. Nous ne nous appuyons pas sur cette erreur des normo-entendants pour modifier la classification et ceci pour deux raisons. La première est que la voyelle nasale [ã] est considérée comme moyennement labialisée par Zerling (1990) qui a obtenu ces données auprès de nombreux locuteurs. La seconde est que les sujets normo-entendants sont considérés comme moins experts en lecture labiale que les sujets sourds.

En conclusion, les classifications actuelles de visèmes vocaliques ne permettent pas d'expliquer toutes les confusions visuelles faites par les adultes devenus sourds. Cette observation est en lien avec la redéfinition phonétique des voyelles nasales du français actuellement en cours. La voyelle [ã] est la voyelle nasale la mieux identifiée en lecture

labiale. Dans la démarche de description des images labiales faite à l'adulte devenu sourd, il semble préférable qu'elle soit présentée comme une voyelle labialisée. La voyelle [ɛ̃] est une voyelle qui pose beaucoup de difficultés de perception en lecture labiale et dont la description est complexe, avec une probable interaction entre l'indice d'aperture et l'indice de labialité. La voyelle [ɔ̃] est une voyelle qui pose beaucoup de difficultés en lecture labiale mais dont la description ne pose pas de problème particulier. Nous proposons une adaptation de la classification des visèmes d'Istria et al. (1982) qui permet de classer les confusions visuelles de 22 adultes devenus sourds testés dans cette étude.

III. Chapitre 2: Acoustique des voyelles orales et nasales

Dans le chapitre 2, l'acoustique des voyelles orales et nasales du français est abordée. Après avoir décrit les conséquences acoustiques entraînées par les mouvements des différents articulateurs, les voyelles orales font l'objet d'une classification acoustique. Les voyelles nasales sont ensuite décrites et observées sur divers spectrogrammes. Le spectre des voyelles nasales et nasalisées est complexe puisqu'il contient les pics spectraux issus de la cavité orale et de la cavité nasale ainsi que les antiformants issus de la mise en dérivation des deux cavités. La multiplicité des indices acoustiques, avancés dans la littérature pour la nasalité vocalique témoigne de la difficulté à trouver un consensus. L'indice acoustique de la nasalité vocalique n'est sans doute pas unique pour toutes les voyelles et dépend du timbre de chaque voyelle. Cependant, l'aplatissement des pics spectraux autour de F_1 et F_2 (Maeda, 1993 et Stevens, 1985) serait un indice fort. Sur les spectrogrammes, un renforcement des fréquences vers 3500-4000 Hertz est également fréquemment observé. Le *Changement en Chaîne* décrit dans le chapitre 1 entraîne des modifications acoustiques des voyelles nasales qui sont décrites puis font l'objet d'une étude dédiée, l'étude n°2.

L'étude n°2 est une comparaison acoustique entre les voyelles orales et nasales pour les paires de voyelles de l'alternance morpho-phonologique [ã]-[a], [õ]-[o] et [ẽ]-[e] et phonétiques [ã]-[ɔ], [õ]-[o] et [ẽ]-[a]. Dix locutrices du nord de la France ont répété 4 fois en chambre sourde 11 voyelles orales [a, ɑ, i, u, y, e, ɛ, o, ɔ, ø, œ] et 4 voyelles nasales [ã, õ, ẽ, ǣ] du français septentrional. Chaque voyelle a été insérée dans une phrase cadre de type « pile, il a dit <i> comme dans pile ». Pour chaque voyelle, les quatre premiers pics spectraux ont été mesurés semi-automatiquement sous Praat, au moyen du script « analyse tout » (Gendrot, 2009, Annexe B). Les proximités du premier et du quatrième pôle spectral entre [õ] et [o], du deuxième pôle spectral entre [ẽ] et [a] et du quatrième pôle spectral entre [ɔ] et [ã], pourraient être responsables des confusions auditives faites par les adultes implantés cochléaires. Ces zones correspondent à des modifications d'intensité observées sur les spectrogrammes.

A. Description acoustique des voyelles orales et nasales

Lors de l'articulation d'une voyelle, le bourdonnement glottal (le signal de source) est composé d'une fréquence fondamentale (F_0), qui correspond à la fréquence de vibration des plis vocaux, et d'harmoniques qui sont des multiples de F_0 . Ce bourdonnement excite le conduit vocal. Le conduit vocal, volume clos possédant des résonances naturelles (fonction de transfert), est modifiable par les mouvements des organes articulatoires (lèvres, langue, voile du palais). Il y a environ quatre résonances naturelles sous 4000 Hz (4500 Hz chez la femme). Les zones de renforcement d'harmoniques sont appelées formants. Un conduit vocal en position neutre, sans constriction c'est-à-dire sans rétrécissement par rapprochement des articulateurs, comme pour la voyelle neutre centrale [ə], peut être modélisé par un tube uniforme fermé à une extrémité (la glotte) et ouvert à l'autre (les lèvres). Si ce tube a une longueur de 17,5 cm (ce qui correspond à celle d'un conduit vocal masculin), les résonances naturelles sont de 500Hz, 1500Hz, 2500Hz et 3500Hz. Pour les voyelles orales, il y a en moyenne un formant tous les 1000 Hz chez les hommes, chaque formant étant numéroté en fonction de sa position sur l'échelle des fréquences (F_1 , F_2 , F_3 , F_4 ...). Le signal résultant est donc le produit du signal de source et de la fonction de transfert (Fant, 1960, Figure 16)

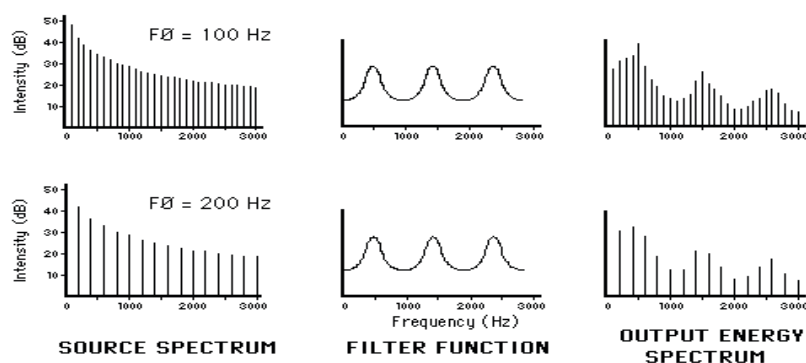


Figure 16: Schéma de la théorie Source-Filtre, d'après les travaux de Gunnar Fant (1960). Le signal acoustique de la voyelle est la combinaison du signal source, composé de la fréquence fondamentale F_0 et de ses harmoniques (à gauche, pour une voix d'homme en haut et une voix de femme en bas) et de la fonction de transfert, les résonances naturelles du conduit vocal (au milieu). A droite, le signal acoustique de la voyelle comporte des zones de renforcement d'harmoniques, les formants. Référence : <http://www.haskins.yale.edu>.

1. Correspondances entre articulatoire et acoustique

Les fréquences des formants renseignent donc indirectement sur la forme des cavités qui les ont créés (Tableau 11).

- Le premier formant F_1 augmente rapidement lorsque la mandibule et/ou la langue s'abaissent.
- F_2 est sensible à la position de la langue sur l'axe antéro-postérieur, et à la configuration des lèvres lorsque la langue est massée vers l'arrière pour les voyelles postérieures.
- F_3 est sensible à la longueur de la cavité antérieure lorsque la langue est massée vers l'avant. Le troisième formant joue donc un rôle important en français pour l'opposition d'arrondissement des voyelles antérieures. Par exemple, la protrusion et l'arrondissement des lèvres sont suffisants pour abaisser le troisième formant de [i], le regrouper avec F_2 et le transformer en [y] (Vaissière, 2007). Une représentation traditionnelle sur un axe F_1 - F_2 manque de précision pour distinguer ces classes de voyelles.
- F_4 est plus difficilement manipulable. Il serait dû principalement à la cavité supra laryngée (Takemoto et al., 2006).

Lowest possible formant	Highest possible formant
↓ F_1 Anterior part of the VT	↑ F_1 Posterior part of the VT
↓ F_2 Velar region lip rounding	↑ F_2 Mid-palatal region Glottal region
↓ F_3 Pharyngeal region bunching of the tongue, retroflexion lip rounding and/or lip protrusion	↑ F_3 Apical and prepalatal regions Glottal region (larynx lowering)

Tableau 11: Lien entre articulation (lieu de la constriction) et acoustique (mouvement des formants) pour les voyelles. Tiré de Vaissière (2007, *Experimental approaches to phonology*, page 66). VT: vocal tract/conduit vocal; velar region/région vélaire, en arrière de la cavité buccale; lip rounding/arrondissement des lèvres; bunching of the tongue/langue concave avec bord latéraux relevés; retroflexion/articulation par recourbement de la face inférieure de la pointe de langue; larynx lowering/abaissement du larynx.

On représente habituellement les voyelles sur un axe F_1/F_2 , sous forme d'un triangle vocalique (Figure 17). Cependant, cette représentation à deux dimensions ne prend pas en compte le troisième formant et la configuration des lèvres, pourtant importante en français pour différencier les voyelles antérieures arrondies des voyelles antérieures non-arrondies.

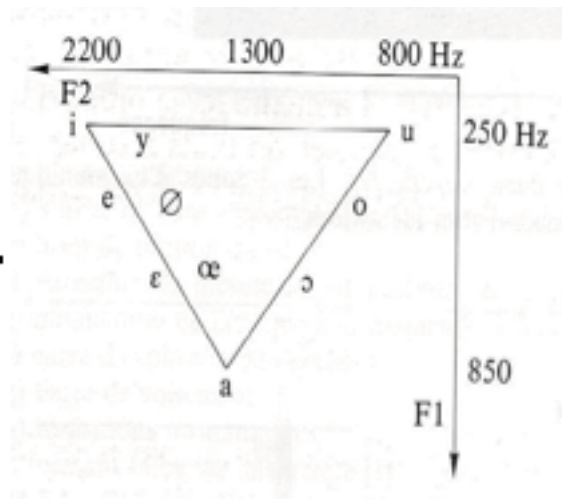


Figure 17: Triangle vocalique des voyelles du français. Tiré de Calliope (1989), page 82.

2. Catégorisation acoustique des voyelles

Du point de vue purement acoustique (et non articuloire), on peut distinguer trois catégories de voyelles (Vaissière, 2006)

- Les voyelles [i, e, ε, a antérieur, y], pour lesquelles l'énergie est massée dans les hautes fréquences, sont caractérisées par une grande distance acoustique entre les deux premiers formants ($F_3 - F_2 < F_2 - F_1$) ce qui correspond sur le plan perceptif aux voyelles dites « claires » ou « aigues » pour lesquelles les formants supérieurs à F_2 ont un poids perceptif, et sur le plan articuloire aux voyelles antérieures.
- Les voyelles [u, o, ɔ, a] caractérisées par un regroupement des deux premiers formants en dessous de 1000 Hz pour un homme ($F_2 - F_1 < F_3 - F_2$). Ces voyelles correspondent sur le plan perceptif aux voyelles dites « sombres » ou « graves », où seuls F_1 et F_2 ont un poids perceptif et sur le plan articuloire aux voyelles (labio) postérieures.
- Les voyelles [ø, œ, a central], pour lesquelles l'énergie se répartit uniformément sont caractérisées par un second formant situé autour de 1500 Hz ($F_2 - F_1 = F_3 - F_2$). Elles correspondent aux voyelles acoustiquement centrales. Bien que leur articulation linguale puisse être antérieure, l'arrondissement des lèvres abaisse le F_3 pour [ø, œ]

3. Les voyelles focales

Le système vocalique du français favorise des voyelles présentant une forte concentration d'énergie dans une région spécifique de l'étendue spectrale (Vaissière, 2007). Quand deux formants sont proches l'un de l'autre, ils se regroupent en un seul pic, assez

large. Vaissière (2011) propose pour le français, la description de 6 voyelles focales caractérisées par une fusion presque complète de deux formants adjacents :

- [i] présente un rapprochement F_3 - F_4 , parfois F_4 - F_5 : c'est la voyelle la plus claire, aigue
- [y] présente un rapprochement F_2 - F_3
- [u] présente un rapprochement F_1 - F_2 à leur minimum, sous 1000 Hertz et tellement proches que l'on pourrait croire qu'il ne s'agit que d'un seul et même formant. C'est la voyelle la plus sombre qu'un conduit vocal humain puisse produire.
- [ɑ] présente un rapprochement F_1 - F_2 avec F_1 maximal (F_1 et F_2 sont autour des 1000 Hz) . Il s'agit ici du [ɑ] postérieur, dont la distinction avec le [a] central est faite par peu de locuteurs francophones.
- [o] et [ɔ] présentent un rapprochement F_1 - F_2 , régulièrement espacé entre celui de [u] et de [ɑ]
- [ã] et [õ] : sans être pour autant considérées comme focales, les deux voyelles nasales postérieures bénéficieraient d'un ajustement des articulateurs labial et lingual pour rapprocher les deux pics spectraux les plus graves.

Palatal	(↑ <u>F₃</u> F ₄)	[i] ^{F₃ = 3200Hz}	French-type /i/	/i/
	(↑F ₂)	[i] ^{F₂ = 2500Hz}	British-type /i/	} /y/
	(F ₂ , <u>F₃</u>)	[y] ^{F₂ = 2100Hz}	Swedish-type /y/	
	(↓ <u>F₂</u> F ₃)	[y] ^{F₂ = 1900Hz}		
Pharyngeal	↑(F ₁ F ₂) or ↑(F ₁ <u>F₂</u>)	[ɑ] ^{F₂ = 1000Hz}		/ɑ/
Labio-velar	↓(F ₁ F ₂)	[ɔ] ^{F₂ = 900Hz}	French-type	/ɔ/
	↓(F ₁ F ₂)	[o] ^{F₂ = 800Hz}		/o/
	↓↓(F ₁ F ₂) or ↓↓(F ₁ <u>F₂</u>)	[u] ^{F₂ = 700Hz}		/u/

Tableau 12: Classification acoustique des voyelles selon Vaissière (2007), *Experimental approaches to phonology*, page 66. F_3F_4 correspond au regroupement de ces deux formants. F_3 souligné indique que ce formant dépend de la cavité antérieure. La flèche simple signifie que le formant est augmenté ou diminué. La flèche double signale que la position du formant est maximale ou basse dans l'échelle des fréquences.

4. Valeurs formantiques de référence des voyelles du français

Des valeurs formantiques de référence des voyelles du français sont disponibles. Gendrot et Adda-Decker (2004) ont publié les valeurs des formants obtenues sur un grand

corpus de journaux radiophoniques et télévisés. On trouve également dans l'ouvrage du groupe Calliope (1989) les valeurs des formants des voyelles en contexte non uniforme, [pV] ou [pVɤ] (ces valeurs sont quelque peu biaisées par le caractère postérieur de la consonne [ɤ]). Plus récemment, le groupe PhoDiFLE (Landron et al., 2010 ; Georgeton et al., 2012) du laboratoire de phonétique et phonologie de Paris 3 a publié les données pour toutes les voyelles françaises prononcées isolément et dans des logatomes de type CVCVCVC pour 40 locutrices françaises.

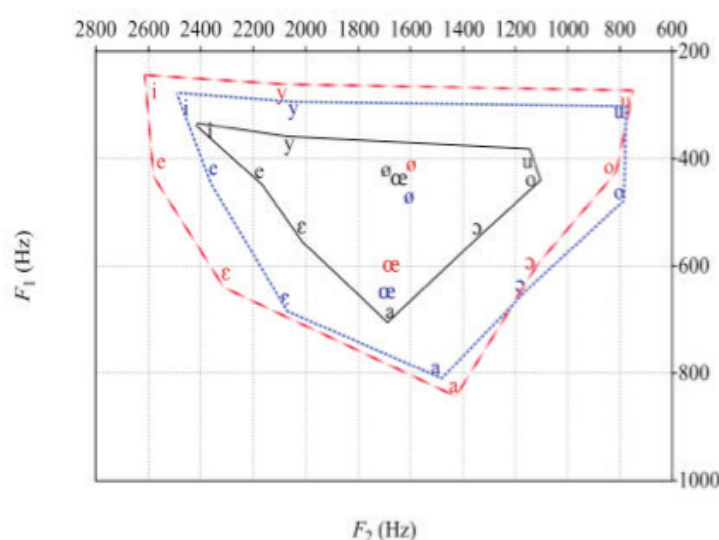


Figure 18: Comparaison des valeurs des formants pour les locutrices d'après les données de Calliope (1989, en contexte non uniforme, [pV] ou [pVɤ]), Gendrot et Adda-Decker (2004, parole radiophonique et radiotélévisée en contexte) et Georgeton et al. (2012, en isolé et dans des logatomes de type CVCVCVC). Tiré de Georgeton et al. (2012).

5. Description acoustique des voyelles nasales

a) Consonnes nasales

Nous développerons tout d'abord l'acoustique des consonnes nasales, qui est assez bien comprise et constitue une bonne introduction à l'étude de l'acoustique des voyelles nasalisées puis des voyelles nasales.

Pour les consonnes, considérons un tube principal de résonance, allant de la glotte aux narines, et composé de la cavité pharyngale et de la cavité nasale (sans la cavité orale). Cette cavité est plus longue que la cavité orale seule et comporte donc davantage de résonances naturelles, qui sont par ailleurs plus graves puisque la cavité est plus grande. De

plus, les formants ont une largeur de bande plus étendue, car la surface totale d'amortissement est plus grande. Les fréquences de résonances naturelles d'un tel conduit sont relativement stables et surviennent en général dans la région des 250-300 Hertz (murmure nasal), 1000 Hertz, 2000 Hertz et 3000 Hertz (Fant, 1960; Fujimura, 1962, Stevens, 2000).

L'ajout de la cavité orale pour l'articulation de la consonne nasale [m] ou [n] (Figure 19) par exemple introduit des antiformants qui affaiblissent les résonances naturelles du conduit nasal. La fréquence de ces antiformants dépend de la longueur du conduit vocal oral, en fonction du lieu de la constriction. Pour [m], la constriction se fait aux lèvres et le conduit oral est alors de longueur maximale (Figure 19), les antiformants se situent dans les basses fréquences (entre 750 et 1250 Hertz). Pour [n], la constriction apico-alvéolaire raccourcit le conduit oral et les antiformants se situent entre alors 1450 et 2200 Hertz. Le large pic à 250-300 Hertz correspond à une résonance naturelle de la cavité nasale mais se retrouve aussi dans la consonne sonante non nasale [l]. La consonne [l] contient aussi des antiformants mais le premier antiformant se trouve entre F_2 et F_3 , tandis qu'il est sous F_2 pour les nasales. En conclusion les consonnes nasales ont une forte concentration d'énergie autour de 250-300 Hertz et une énergie très réduite dans les fréquences supérieures (Clements et al, 2014).

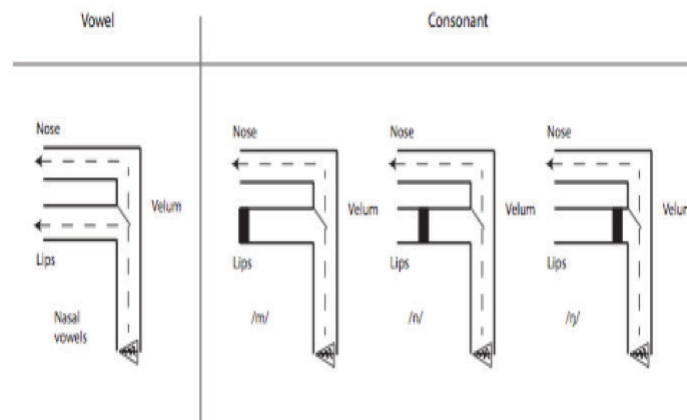


Figure 19: Configuration schématique du conduit vocal pour les voyelles nasales et les consonnes nasales bilabiale, apico-alvéolaire et palatale. La barre verticale noire indique le lieu d'articulation de la consonne. La flèche indique la direction du flux d'air. Tiré de Clements et al. (2014), page 188.

b) Voyelles nasalisées et voyelles nasales

Le spectre des voyelles nasales et nasalisées est complexe puisqu'il contient les pics spectraux issus de la cavité orale et de la cavité nasale, et les antiformants issus de la mise en dérivation des deux cavités. De plus, sa structure spectrale évolue dans le temps car le voile du palais (Clements et al., 2014) s'abaisse progressivement entre la consonne

précédente, le plus souvent orale et la voyelle nasale. L'ouverture du port vélo-pharyngé entraîne la sommation des résonances et antirésonances des cavités pharyngale, buccale, et nasale dont les sinus, cavités pneumatiques couplées avec la cavité nasale par des ouvertures étroites introduisent une résonance dans les basses fréquences. Il a été montré que l'ajout des sinus dans la modélisation articulatoire des voyelles nasales rendait leur timbre plus naturel (Maeda, 1982a ; Dang et al., 1994 ; Dang et Honda, 1996). Le spectre acoustique résultant est riche et complexe, quoique généralement plus lisse en terme fréquentiel et amorti en terme d'énergie. Ce n'est pas strictement la sortie de l'air par le nez qui produit le timbre nasal (il est possible de différencier [a] et [ã] même avec le nez bouché), mais le couplage acoustique entre les deux cavités et le fait que la résonance des cavités nasales se combine avec celle de la cavité buccale. Si l'antiformant (ou zéro) nasal tombe dans une région sans pôle, il y aura peu d'effet. Par contre, si le zéro tombe dans la région d'un pôle, alors celui-ci peut être fortement affaibli, voire supprimé. L'effet acoustique varie avec la fréquence de la première résonance du conduit oral et dépend donc de l'identité de la voyelle et de l'ampleur du couplage, c'est-à-dire de l'ouverture vélo-pharyngée (Maeda, 1993). L'indice principal de nasalité vocalique serait donc l'aplatissement des pics spectraux autour de F_1 et F_2 (Maeda, 1993 et Stevens, 1985). Ceci peut prendre la forme d'un élargissement du premier pic de la voyelle orale comme pour [a] ou l'ajout d'un formant autour du premier pic spectral, comme c'est le cas pour [i]. Un aplatissement dans les basses fréquences jusqu'à 10 Bark⁷ (égal à 1300 Hz) serait la caractéristique la plus commune des voyelles nasalisées (Maeda, 1993).

L'intensité des voyelles nasalisées et nasales est globalement plus faible que celle des voyelles orales (Bernthal et Beukelman, 1977). Souvent la bande passante des formants est augmentée jusqu'à 150% voire 200% (Delvaux, 2012). Les voyelles nasales sont intrinsèquement plus longues que les voyelles orales (Straka, 1955) et ceci semble avoir un effet perceptif en français, du moins selon Delattre et Monnot (1968).

Nous proposons une pré-étude s'intéressant aux effets de la nasalisation contextuelle sur les harmoniques. Nous comparerons les spectres des voyelles [iau], en contexte consonantique oral [dVd] et en contexte consonantique nasal [nVn].

⁷ Bark: L'échelle des Bark est basée sur des études psychoacoustiques et représenterait le traitement fait par le système auditif du spectre de la parole.

(1) Pré-étude sur l'intensité des harmoniques: comparaison des coupes spectrales des voyelles [aiu] orales et nasalisées chez 4 locuteurs.

(a) Méthode

Quatre locuteurs (deux hommes et deux femmes) ont été enregistrés au moyen d'un ordinateur MacBook pro (Apple®) et de l'interface Praat, sur le corpus [did], [dad], [dud], [nin], [nan], [nun]. Une coupe spectrale a été faite dans la partie stable de la voyelle, sur huit périodes consécutives (voir Figure 20 pour un exemple).

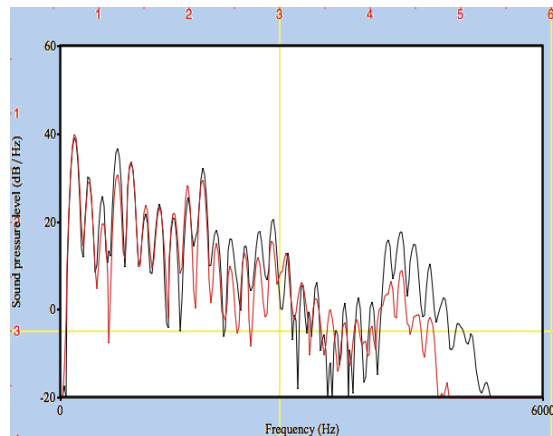


Figure 20: Spectre de la voyelle [a] dans [dad] (courbe noire) et dans [nan] (courbe rouge). Lorsque la voyelle est nasalisée, on observe un affaiblissement du 3^{ème} (526 vs. 527 Hertz ; 26 vs. 20 dB) et du 4^{ème} harmonique (711 vs. 710 Hertz ; 37 vs. 30 dB). La locutrice est l'auteur du manuscrit, les mesures ont été prises au cœur de la voyelle, sur 8 périodes consécutives.

(b) Résultats

	[i] nasalisé	[a] nasalisé	[u] nasalisé
Locutrice n°1 (sb)	Renforcement H2 et H3	Affaiblissement H3 et H4	Renforcement H3
Locutrice n°2 (ead)	Renforcement H1 et H4	Affaiblissement H4	Renforcement H1 et H5
Locuteur n°1 (gk)	Renforcement H3 et H4	Affaiblissement H2	Renforcement H2 et H4
Locuteur n°2 (jf)	Renforcement H3 H4	Affaiblissement H3 et H4	Renforcement H4 et H5
Tendances pour les 4 locuteurs	Renforcement entre H1 et H4	Affaiblissement entre H2 et H4	Renforcement entre H1 et H5

Tableau 13: Effet de la nasalisation consonantique contextuelle sur l'amplitude des harmoniques auprès de 4 locuteurs enregistrés sur le corpus [did], [dad], [dud], [nin], [nan] et [nun].

(c) *Synthèse*

Les effets de la nasalisation contextuelle (Tableau 13) sont les mêmes pour les quatre locuteurs mais l'harmonique modifié varie en fonction de la F_0 du locuteur et du timbre initial de la voyelle.

Concernant la différence entre harmoniques, Huffman (1990) propose comme indice la différence entre l'harmonique le plus intense du F_1 et F_0 , tandis que Hawkins et Stevens (1985) proposent la différence de fréquence entre le 1^{er} pôle nasal et le premier zéro nasal. Chen (1997 et 2000), comme Delattre (1965) précédemment, évoque un affaiblissement du premier formant, associé à l'ajout d'un pic spectral à 250 Hertz et 950 Hertz et propose comme indice acoustique de nasalité la différence d'amplitude entre le 1^{er} pôle oral et le 1^{er} pôle ou le 2^{ème} pôle nasal.

Véronique Delvaux, en 2012, dans son ouvrage *Les voyelles nasales du français*, a proposé une liste des différents indices acoustiques ayant été énoncés dans la littérature comme liés à la nasalité (Tableau 14).

Effet acoustique de la nasalisation	Source
Augmentation de la bande passante des formants	<i>Bloomer et Peterson, 1955</i> <i>House, 1957</i> <i>Dickson, 1962</i> <i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>
Augmentation de la bande passante de F1	<i>Delattre, 1954, 1955</i> <i>House et Stevens, 1956</i> <i>Hawkins and Stevens, 1985</i>
Modification de la fréquence des formants	<i>Dickson, 1962</i> <i>Gonay, 1972</i> <i>Stevens et al., 1976</i> <i>Watterson et Emmanuel, 1981</i>
Augmentation de la fréquence de F1	<i>House et Stevens, 1956</i> <i>Fujimura, 1960 & 1962</i> <i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>
Augmentation de la fréquence de F3	<i>Hanson, 1964</i> <i>Bloomer et Peterson, 1955</i>
Diminution de la fréquence de F2 et F3	<i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>
Ajout de résonances supplémentaires	<i>Bloomer et Peterson, 1955</i> <i>House, 1957</i> <i>Dickson, 1962</i> <i>Watterson et Emmanuel, 1981</i> <i>Hawkins et Stevens, 1985</i>
Ajout d'une résonance supplémentaire à environ 250 Hz	<i>Tarnoczy, 1948</i> <i>Delattre, 1954, 1955</i> <i>House et Stevens, 1956</i> <i>Hattori et al., 1958</i>
Ajout d'une résonance supplémentaire entre 250 Hz et 500 Hz	<i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>
Résonances affaiblies F1 affaibli	<i>Dickson, 1962</i> <i>Delattre 1954, 1955</i> <i>House et Stevens, 1956</i>
Antirésonances (zéros acoustiques, antiformants)	<i>Fujimura 1960, 1962</i> <i>Dickson, 1962</i> <i>Dillenschneider et al. 1973</i> <i>Hawkins and Stevens, 1985</i>
Antirésonance vers 500 Hz	<i>Hattori et al., 1958</i>
Antirésonance autour de F1	<i>Stevens, Fant et Hawkins, 1987</i>
Antirésonance autour de F3	<i>Bloomer et Peterson, 1955</i> <i>House and Stevens, 1956</i> <i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>
Bruit entre les formants	<i>Bloomer et Stevens, 1955</i> <i>Hattori et al., 1958</i>
Diminution générale de l'intensité	<i>House et Stevens, 1956</i> <i>Dickson, 1962</i> <i>Bernthal et Beukelman, 1977</i> <i>Kent, Liss et Philips, 1989</i>

Tableau 14: Indices spectraux de la nasalité vocalique dans diverses études. Reproduit de Delvaux (2012), page 130, à partir de Baken et Orlikoff (2000).

A ces indices, nous pouvons ajouter ceux de Smith (1951)

- F_0 inchangée
- F_1 affaibli
- Un formant nasal apparaît vers 1000 hertz
- F_2 affaibli et légèrement augmenté en fréquence
- Un formant nasal apparaît parfois vers 2000 hertz
- F_3 affaibli et abaissé en fréquence
- F_4 renforcé
- Les résonances au dessus de F_4 ont tendance à être affaiblies

c) Les voyelles nasales du français

Selon Vaissière (2007), le renforcement des hautes fréquences est un indice important (parfois le seul) de reconnaissance visuelle des voyelles nasales du français sur les spectrogrammes. L'observation de spectrogrammes de voyelles nasales est d'ailleurs très instructive (Figures 21, 22, 23 et 24).

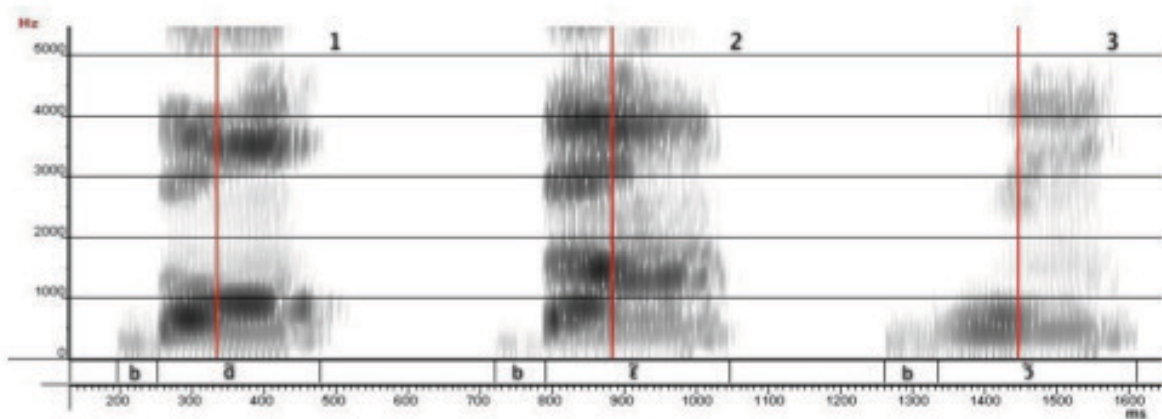


Figure 21: Spectrogramme des syllabes [bɑ̃] [bɛ̃] [bɔ̃]. La première partie de la syllabe est orale et la nasalisation acoustique commence approximativement au trait vertical. Tiré Clements et al. (2014), page 193.

(1) *Voyelle [ã]*

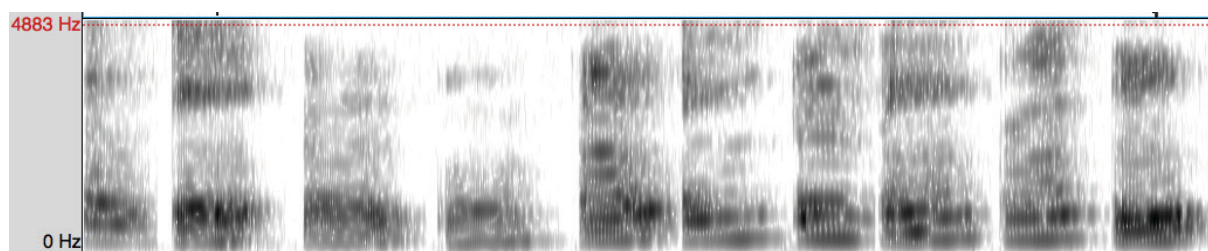


Figure 22: Spectrogrammes de la voyelle [ã] des 10 locutrices de l'étude n°2.

Pour la voyelle [ã], F_1 et F_2 semblent se concentrer pour former un pic très intense autour de 1000 Hertz (caractéristique du [a] postérieur, décrit par Vaissière (2007) comme $(F_1 F_2)^{1000 \text{ Hz}}$), tandis qu'un pic intense est également observé au dessus de 3500 Hz. Nous observons également l'affaiblissement dans la zone du troisième formant, communément appelé « oeil nasal ».

(2) *Voyelle [ẽ]*

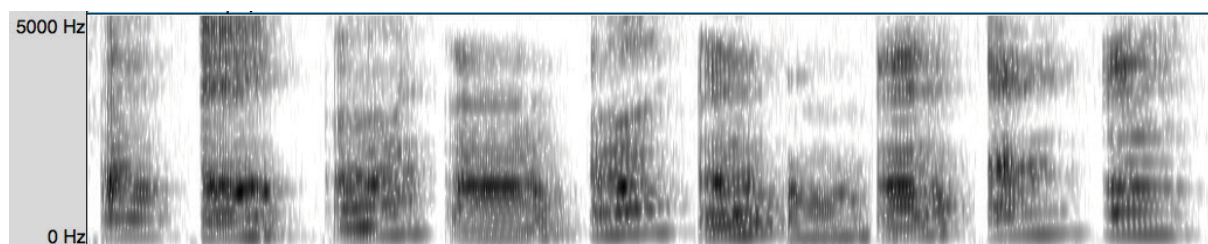


Figure 23: Spectrogrammes de la voyelle [ẽ] des 10 locutrices de l'étude n°2.

Pour la voyelle [ẽ], un pôle spectral très intense peut être observé autour de 1500 Hertz. Sous 1500 Hertz, on observe soit un affaiblissement (F_1 est aplati), soit plus de pôles qu'attendu (F_1 est coupé en deux par la présence d'un antiformant). Un oeil nasal (affaiblissement) est observé dans la zone du F_3 qui peut littéralement disparaître tandis que F_4 reste intense.

(3) *Voyelle [õ]*

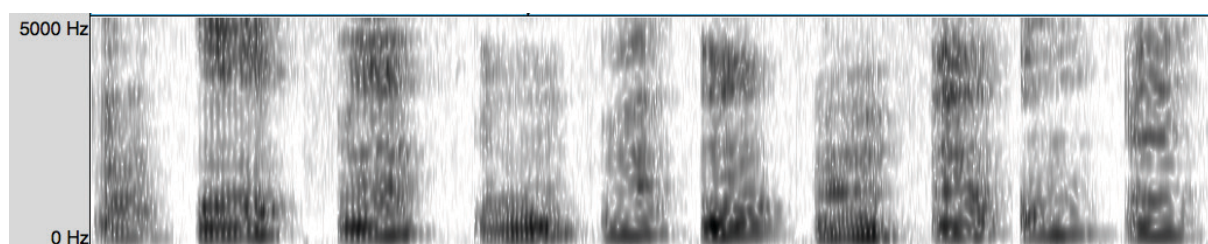


Figure 24: Spectrogrammes de la voyelle [õ] des 10 locutrices de l'étude n°2.

Pour la voyelle [ɔ̃], les caractéristiques communes aux 10 locutrices sont la présence de deux pics spectraux affaiblis sous les 1000 Hertz et d'un renforcement spectral au-dessus de 3500 Hertz.

d) Comparaison acoustique entre voyelles nasales et voyelles orales de l'alternance morpho-phonologique

Les conséquences acoustiques des modifications articulatoires décrites dans le chapitre précédent (Tableaux 6 et 7) sont présentées dans le Tableau 15.

	[ã] versus [a]	[ɔ̃] versus [ɔ]	[ẽ] versus [ɛ]
1 ^{er} pôle	Plus haut (Delvaux) Plus bas (Carignan chez 2/3) Proche de [ɔ] (Montagu)	Plus bas (Montagu, Carignan) Proche de [o] (Montagu)	Plus haut (Delvaux, Carignan) Proche de [ɛ] chez l'homme et de [a] chez la femme (Montagu)
2 ^{ème} pôle	Plus bas (Delvaux, Carignan) Proche de [ɔ] (Montagu)	Plus bas (Montagu, Carignan) Très affecté par la nasalité (Delvaux) Proche de [o] pour les hommes (Montagu)	Plus bas (Delvaux, Carignan) Proche de [a] (Montagu)

Tableau 15 : Synthèse des données fréquentielles comparatives entre voyelles orales et voyelles nasales. NB: Contrairement aux autres auteurs qui mesurent les pôles directement sur le spectre de la voyelle nasale, Montagu (2004) espère, à partir de l'analyse acoustique du début non nasalisé de la voyelle nasale, le *Nasal Onset Time*, mesurer le vocoïde sous-jacent à aux voyelles nasales.

Dans le but de compléter les données de la littérature (Tableau 15) nous allons procéder à une comparaison acoustique des valeurs spectrales des paires de voyelles [ã] versus [a], [ɔ̃] versus [ɔ] et [ẽ] versus [ɛ], auxquelles nous ajoutons les paires [ã] versus [ɔ], [ɔ̃] versus [o] et [ẽ] versus [a] qui semblent être davantage proches d'un point de vue acoustique.

B. Etude n°2 : Comparaison acoustique des voyelles orales et nasales

1. Objectifs

Cette étude a pour objectif de comparer les pics spectraux des voyelles orales et nasales et plus spécifiquement pour les paires orale-nasale qui sont sources de confusions chez les adultes implantés cochléaires (Borel, 2007 et études n°3 et 4 de cette thèse). L'objectif est de mettre en évidence les proximités acoustiques, susceptibles de générer ces confusions.

2. Méthode

a) Locutrices et corpus

Dix locutrices parisiennes, sans antécédent de trouble de la sphère ORL, âgées de 21 à 51 ans (MOY $\pm$ SEM, 32 $\pm$ 6,8 ans), ont enregistré, dans la cabine insonorisée d'audiométrie de l'unité *Otologie, Implants auditifs, Chirurgie de la base du crâne* du Pr. O. Sterkers, à la Pitié-Salpêtrière, 11 voyelles orales [a, ɑ, i, u, y, e, ε, o, ɔ, ø, œ] et 4 voyelles nasales du français [ã, õ, ẽ, œ̃], répétées 4 fois. Chaque voyelle a été insérée dans une phrase cadre de type « pile, il a dit <i> comme dans pile ». La consigne était la suivante: « *la voyelle qui apparaît entre crochets est celle du mot de référence qui apparaît au début et à la fin de la phrase. Détachez bien cette voyelle du mot précédent et suivant* ». Chaque phrase a été présentée sur une feuille séparée pour éviter tout effet de liste, selon le corpus suivant.

Pile, il a dit <i> comme dans pile.

Bébé, il a dit <é> comme dans bébé.

Papa, il a dit <a> comme dans papa.

Pouce, il a dit <ou> comme dans pouce.

Père, il a dit <è> comme dans père.

Tôt, il a dit <ô> comme dans tôt.

Puce, il a dit <u> comme dans puce.

Deux, il a dit <eu> comme dans deux.

Soeur, il a dit <oeu> comme dans Soeur.

Bol, il a dit <o> comme dans bol.
 Pont, il a dit <on> comme dans pont.
 Dent, il a dit <en> comme dans dent.
 Brin, il a dit <in> comme dans brin.
 Bun, il a dit <un> comme dans brun.

L'intégralité du corpus a été répétée quatre fois pour chacune des 10 locutrices, pour un nombre total de 40 exemplaires de chaque voyelle (l'ensemble des 15 phrases a été proposé 4 fois, dans un ordre différent pour chaque set de 15 phrases). La production des voyelles [œ] et [ɑ] a été demandée à titre indicatif mais n'a pas été utilisée pour les analyses car la majorité des locutrices a exprimé ne pas faire de distinction entre [œ] et [ɛ] ou [ɑ] et [a].

b) **Enregistrement**

L'enregistrement a été effectué au moyen d'un microphone H1 de la marque Zoom en format .wav avec les paramètres « low cut » et « auto-level » sur la position off. L'input level était fixé à 80 dB. Le microphone était placé à 80 centimètres des lèvres de la locutrice.

c) **Analyse acoustique**

Les enregistrements .wav ont été segmentés et étiquetés sous Praat 5.3.40 (Boersma et Weenink) au moyen d'une Textgrid. Le script Praat « analyse tout » de Gendrot (2009, Annexe B) a été utilisé pour obtenir les valeurs au coeur de la voyelle (F1-mid, F2-mid, F3-mid et F4-mid) des quatre premiers pôles spectraux.

d) **Représentations perceptives des valeurs des pôles spectraux**

Afin de faire le lien entre les valeurs acoustiques des voyelles et les résultats perceptifs des adultes implantés cochléaires, les valeurs en Hertz ont été converties en Bark selon la formule de Traunmüller (1990):

$$Bark = [(26,81 * f) / (1960 + f)] - 0,53$$

Un triangle vocalique a été élaboré en Hertz et en Bark afin de comparer la position des voyelles nasales à celle des voyelles orales sur une représentation F_1/F_2 .

e) **Traitement des données**

Le traitement des données a été effectué au moyen des logiciels Excel pour Mac 2011, version 14.4.3 et Statview 5.0. SAS Institute Inc. Une analyse statistique par ANOVA et tests PLSD de Fisher ont permis de comparer les moyennes des pôles spectraux des voyelles nasales et des voyelles orales pour les 40 occurrences de chaque voyelle.

3. **Résultats**

a) **Pôles spectraux**

(1) ***F_1 /Premier pôle spectral***

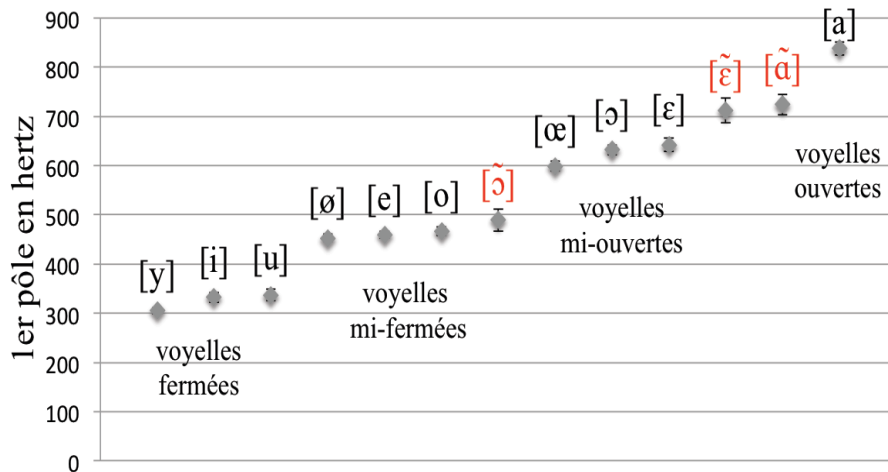


Figure 25: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du premier pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).

Pour les voyelles orales, la valeur du premier pôle spectral correspond à F_1 , qui est l'indice pour regrouper les voyelles fermées, mi-fermées, mi-ouvertes et ouvertes. Les valeurs du premier pic spectral se situent entre [o] et [œ] pour [ɔ̃], entre [ε] et [a] pour [ɛ̃] et [ɑ̃].

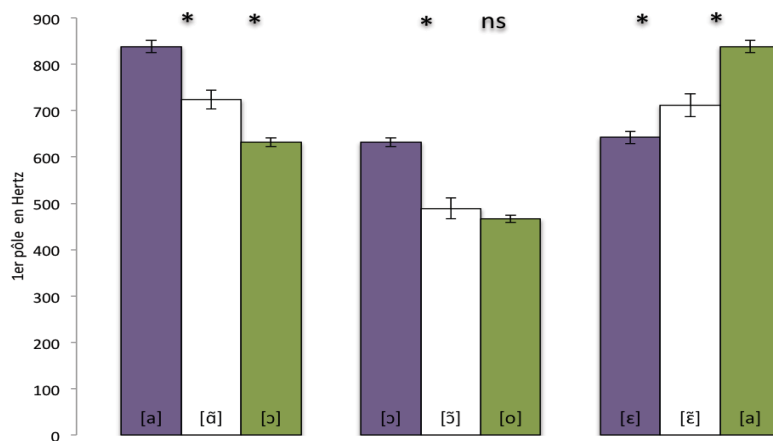


Figure 26: Fréquence du premier pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du *Changement en Chaine* (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$.

[a]	[ã]	[ɔ]	[õ]	[o]	[ɛ]	[ẽ]
838,2±13,4	723,9±20,6	632±9,9	489,1±22,3	466,4±8,3	642,2±13,3	712±24,9

Tableau 16: Valeurs (MOY±SEM) du premier pôle spectral (F_1) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).

Il n'y a pas de différence significative de fréquence (en Hertz et en Bark) entre le premier pôle spectral de [o] et celui de [õ], en moyenne pour les 40 occurrence de chacune des voyelles (en Hertz : 466,4±8,3 vs. 489,1±22,3).

(2) *F₂/ Deuxième pôle spectral*

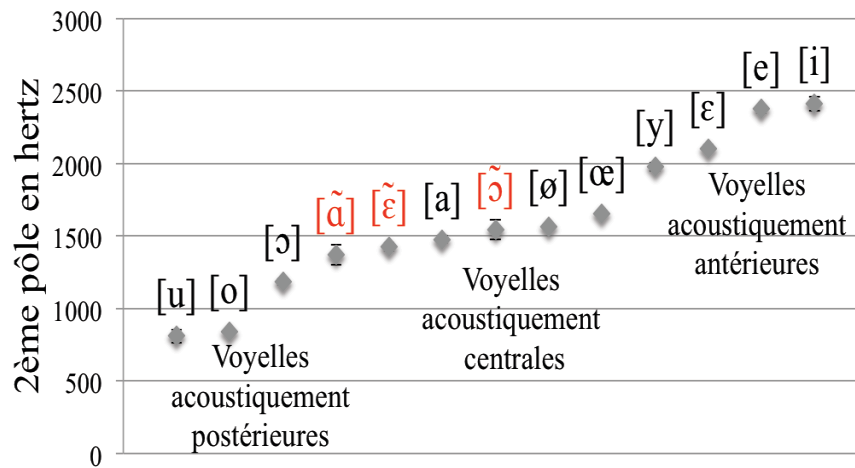


Figure 27: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du deuxième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).

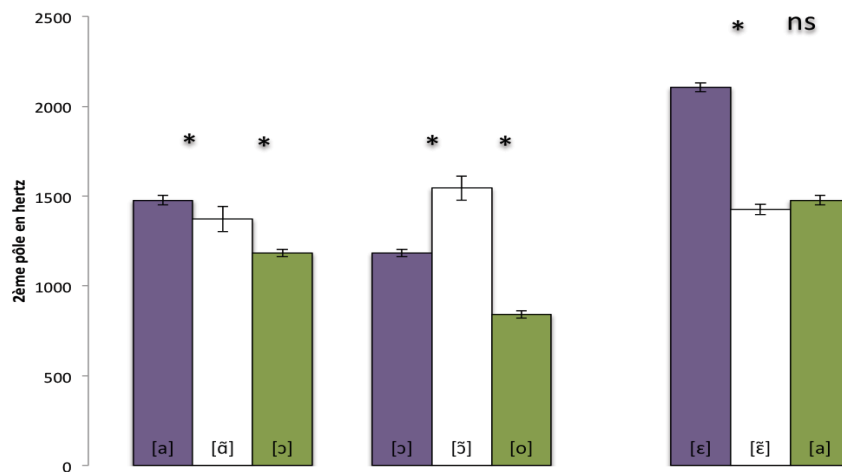


Figure 28: Fréquence du deuxième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du Changement en Chaîne (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$.

[a]	[ã]	[ɔ]	[õ]	[o]	[ε]	[ẽ]
1476,8±25,7	1371,5±69,4	1183,7±20,6	1543,9±66,8	840,8±19,7	2104,6±23,9	1425,9±29,2

Tableau 17: Valeurs (MOY±SEM) du deuxième pôle spectral (F_2) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).

Il n'y a pas de différence significative de fréquence (en Hertz et en Bark) entre le deuxième pôle spectral de [a] et celui de [ẽ] (en Hertz : 1476,8±25,7 vs. 1425,9±29,2).

(3) F_3 / Troisième pôle spectral

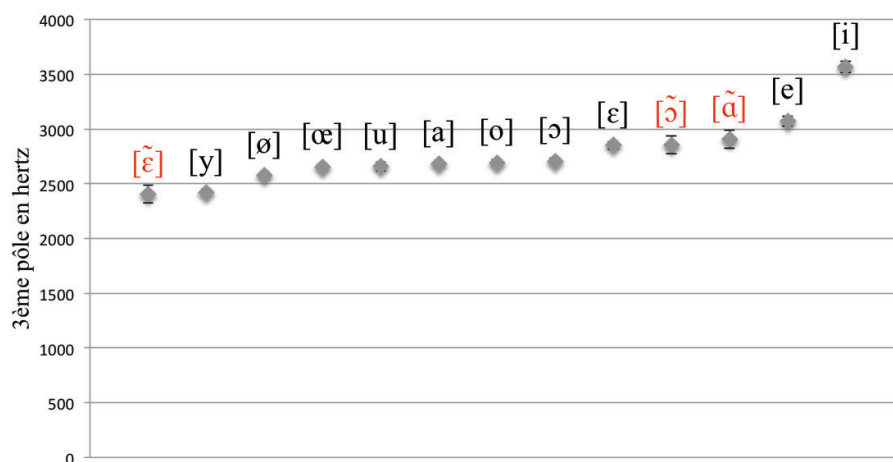


Figure 29: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du troisième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).

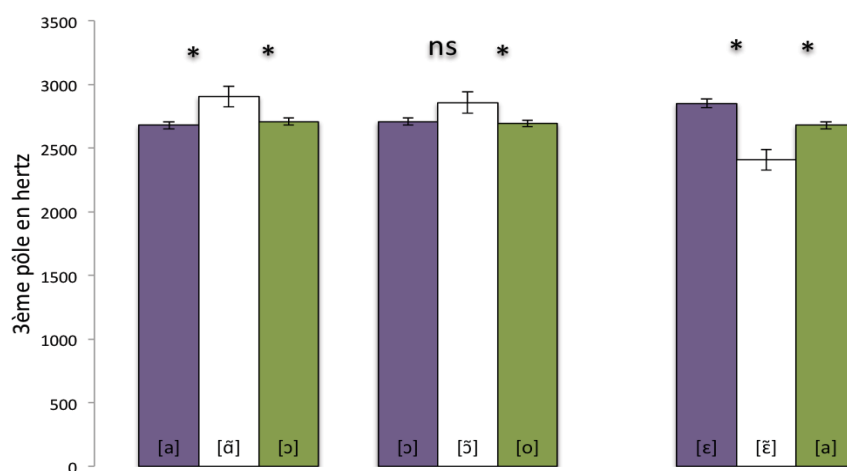


Figure 30: Fréquence du troisième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du changement en chaîne (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$.

[a]	[ã]	[ɔ]	[ɜ̃]	[o]	[ɛ]	[ɛ̃]
2679,3±29,3	2904,2±83,4	2707,3±26,8	2856,9±83	2692,5±25,5	2850,5±35,8	2405,5±80,3

Tableau 18: Valeurs (MOY±SEM) du troisième pôle spectral (F_3) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).

La fréquence du troisième pôle spectral est significativement différente entre la voyelle nasale et la voyelle orale de chacune des trois paires de la description phonétique du *Changement en Chaine*.

(4) *F₄/ Quatrième pôle spectral*

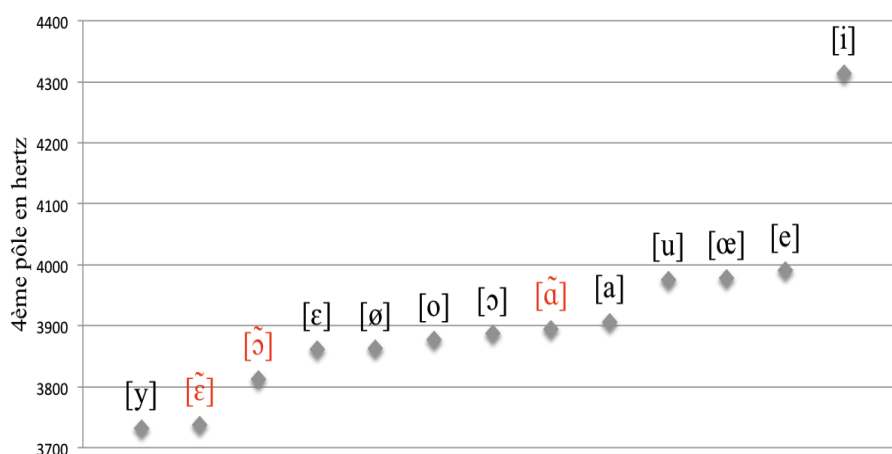


Figure 31: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du quatrième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).

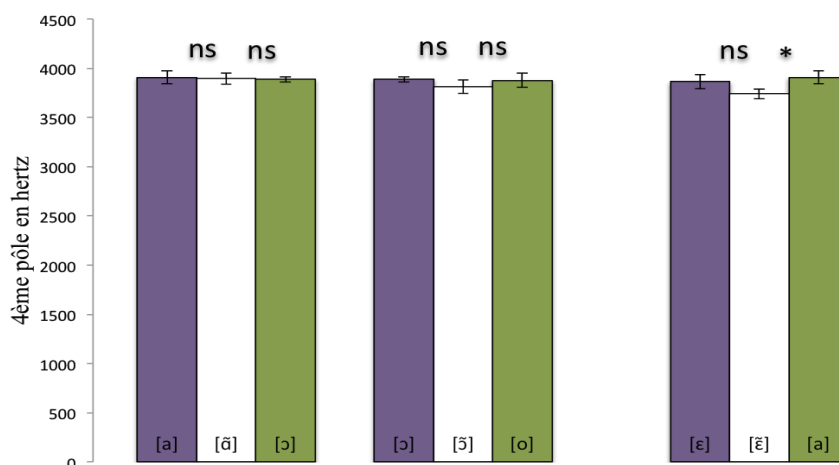


Figure 32: Fréquence du quatrième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du *Changement en Chaine* (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$.

[a]	[ã]	[ɔ]	[õ]	[o]	[ɛ]	[ẽ]
3906,4±67,3	3894,8±56,7	3887,4±27,2	3812,7±68,3	3877,4±30,2	3862,4±70,4	3738,1±48

Tableau 19: Valeurs (MOY±SEM) du quatrième pôle spectral (F_4) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).

b) Triangle vocalique

(1) En Hertz

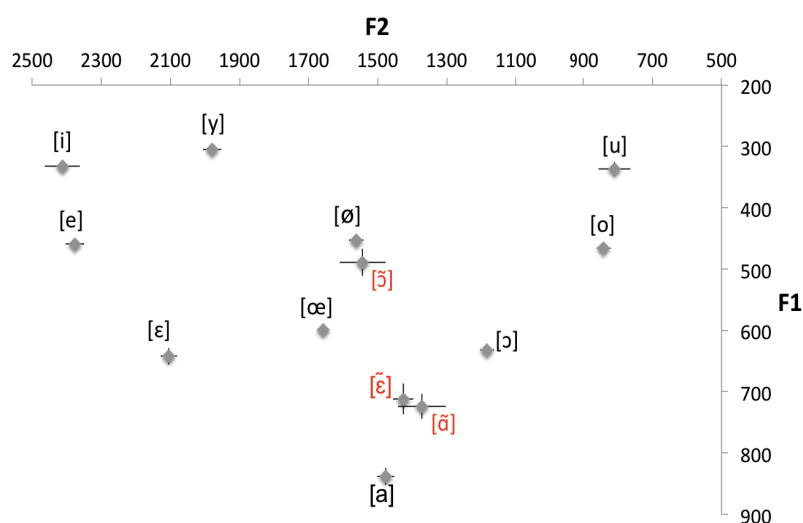


Figure 33: Triangle vocalique obtenu à partir des moyennes en Hertz des F_1 et F_2 de 40 occurrences (10 locutrices * 4 répétitions) de chaque voyelle. Pour chaque voyelle, la barre verticale représente l'erreur moyenne du F_1 et la barre horizontale l'erreur moyenne du F_2 .

(2) En Bark

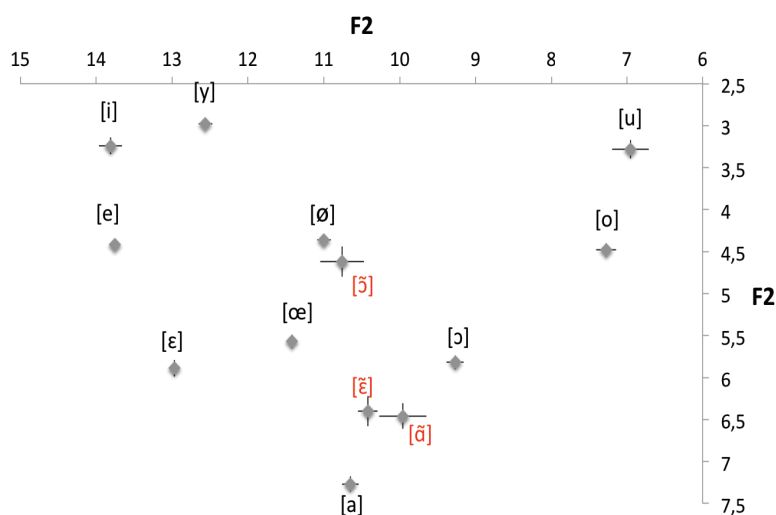


Figure 34: Triangle vocalique obtenu à partir des moyennes en Bark des F_1 et F_2 de 40 occurrences (10 locutrices * 4 répétitions) de chaque voyelle. Pour chaque voyelle, la barre verticale représente l'erreur moyenne du F_1 et la barre horizontale l'erreur moyenne du F_2 .

La variabilité est plus importante pour les F_1 et F_2 des trois voyelles nasales et pour le F_2 des voyelles [i] et [u]. Sur le plan F_1/F_2 en Hertz, [ɔ̃] est proche de [ø], les deux voyelles nasales [ɑ̃] et [ɛ̃] sont proches l'une de l'autre et à équidistance entre [œ], [ɔ] et [a].

4. Discussion

a) Synthèse des résultats

Hertz	voyelle [ã]	voyelle [õ]	voyelle [ẽ]
F ₁	[ẽ]	[ø] [e] [o]	aucune
F ₂	aucune	[ø] [a]	[a] [ã]
F ₃	[ε] [õ]	[ε] [ɔ]	[y]
F ₄	[a] [e] [ø] [o] [ɔ] [õ] [u]	[ε] [ø] [ẽ] [o] [ɔ]	[ø] [o] [y]

Tableau 20: Voyelles acoustiquement proches des voyelles nasales en fonction du pôle spectral en Hertz. ANOVA et tests PLSD de Fisher sur 40 occurrences de chaque voyelle (4*10 locutrices). La voyelle est considérée comme proche quand la valeur de $p > 0,05$.

Bark	voyelle [ã]	voyelle [õ]	Voyelle [ẽ]
F ₁	[ẽ]	[ø] [e] [o]	aucun
F ₂	aucune	[ẽ] [a]	[a] [õ]
F ₃	[ε]	[a]	aucune
F ₄	[a] [ε] [ø] [o] [ɔ] [œ] [õ] [u]	[ε] [ø] [ẽ] [o] [y]	[ε] [ø] [y]

Tableau 21: Voyelles acoustiquement proches des voyelles nasales en fonction du pôle spectral en Bark. ANOVA et tests PLSD de Fisher sur 40 occurrences de chaque voyelle (4*10 locutrices). La voyelle est considérée comme proche quand la valeur de $p > 0,05$.

	Pas de différence	Différence
paire [a]-[ã]	F ₄	F ₁ F ₂ F ₃
paire [ɔ]-[ã]	F ₄	F ₁ F ₂ F ₃
paire [ɔ]-[õ]	F ₃ F ₄	F ₁ F ₂
paire [o]-[õ]	F ₁ F ₄	F ₂ F ₃
paire [ε]-[ẽ]	F ₄	F ₁ F ₂ F ₃
paire [a]-[ẽ]	F ₂	F ₁ F ₃ F ₄

Tableau 22: Récapitulatif des indices acoustiques différents ou identiques pour chacune des paires de voyelles orale-nasale testées dans l'étude n°4.

Aucun indice n'est commun à l'ensemble des paires testées.

b) Discussion

Pour la paire [ɔ]-[ã], une proximité du quatrième formant est observée. Nous avons vu sur les spectrogrammes que la zone du F₄ était intense pour [ã]. Pour la paire [o]-[õ], une proximité des premier et quatrième formants est retrouvée. Encore une fois, l'observation que nous avons pu faire des spectrogrammes pour ces deux zones de fréquence nous a permis de constater que la voyelle nasale y était modifiée en terme d'intensité (affaiblissement pour F₁ et renforcement pour F₄). Pour la paire [a]-[ẽ], une proximité du deuxième formant est observée. Il s'agit d'un formant très intense pour la voyelle nasale. Les proximités spectrales retrouvées se situent dans des zones de renforcement ou d'affaiblissement fréquentiel de la voyelle nasale.

Sur le plan F₁/F₂, [õ] est proche de [ø], ce qui ne correspond pas aux descriptions retrouvées habituellement dans la littérature, où [õ] est plutôt proche de [o] (Carignan, 2012). Les deux voyelles nasales [ã] et [ẽ] sont proches l'une de l'autre. La voyelle [ã] est à équidistance de [ɔ] et [a], ce qui correspond aux différentes descriptions et est en accord avec un déplacement de type *Changement en Chaîne* (Fagyal et al., 2006 ; Carignan, 2012). Sur le plan F₁/F₂, la voyelle [ẽ] se situe entre [a], [ɔ] et [œ], ce qui n'est que partiellement en accord avec les résultats retrouvés dans la littérature selon lesquels [ẽ] serait proche de [a] (Montagu, 2007).

Aucun des indices acoustiques étudiés n'est commun aux six paires ([ã]-[a], [õ]-[ɔ], [ẽ]-[ɛ], [ã]-[ɔ], [õ]-[o], [ẽ]-[a]). Il ne semble pas y avoir pour ces paires testées, dans le cadre de cette étude, d'indice fréquentiel unique permettant de distinguer les voyelles nasales des voyelles orales.

En conclusion, les proximités du premier et du quatrième pôle spectral entre [õ] et [o], du deuxième pôle spectral entre [ẽ] et [a] et du quatrième pôle spectral entre [ɔ] et [ã] pourraient être responsables des confusions auditives faites par les adultes implantés cochléaires. Ces zones correspondent à des modifications d'intensité (affaiblissement ou renforcement) observées sur les spectrogrammes.

IV. Chapitre 3: Perception des voyelles orales et nasales

Le chapitre 3 traite de la perception des voyelles par les adultes normo-entendants, malentendants et implantés cochléaires. La perception auditive des voyelles met en jeu des mécanismes complexes. La fréquence bénéficie d'un codage tonotopique en fonction du lieu excité sur la membrane basilaire de la cochlée, pouvant être modélisé sous la forme de 36 filtres cochléaires (Moore, 1989). Jusqu'à environ 4000 Hertz (la limite supérieure est mal connue chez l'humain), un codage temporel de la fréquence en phase avec la fréquence fondamentale coexiste. Les fibres du nerf auditif répondent préférentiellement en fonction de leur fréquence caractéristique, la tonotopie étant conservée tout au long des voies auditives. L'identification des voyelles isolées repose davantage sur la perception des différences entre les formants que sur la valeur absolue de ceux-ci. En cas de surdité neurosensorielle acquise, les filtres cochléaires s'élargissent et le codage de la fréquence devient moins précis. En cas de réhabilitation par l'implant cochléaire, le signal est spectralement dégradé, par diminution de la résolution fréquentielle (12 à 22 électrodes pour représenter 3500 cellules ciliées internes et 36 filtres cochléaires) associé à un éventuel décalage entre la fréquence cible codée par l'implant et la Fréquence Caractéristique (F.C) du nerf auditif réellement stimulée et donc de la tonie⁸. Chez l'adulte implanté cochléaire, l'identification de voyelles est sensible au nombre d'électrodes. Plusieurs études suggèrent qu'il existe un plateau des performances autour de 7-8 électrodes pour la reconnaissance de la parole dans le silence par les implantés cochléaires. Cependant, la reconnaissance des voyelles, reposant essentiellement sur des indices spectraux, semble davantage bénéficier d'une augmentation du nombre d'électrodes, contrairement à la reconnaissance des consonnes, des mots et des phrases. Les difficultés perceptives en lien avec le décalage fréquentiel sont plus délicates à mettre en évidence. L'association de l'implant et de l'audition résiduelle, associée ou non à une prothèse auditive, la bimodalité, apporte un bénéfice pour les informations de basses fréquences. L'entraînement auditif structuré, individualisé et adaptatif permet d'améliorer l'identification des voyelles chez l'adulte implanté cochléaire.

⁸ Tonie: sensation auditive de hauteur des sons

A. *La perception auditive*

1. Anatomophysiologie de l'audition

a) Anatomie

Les organes de l'audition sont constitués de l'oreille et de ses connexions centrales. Au niveau fonctionnel, l'oreille externe et moyenne forment l'appareil auditif de transmission du phénomène vibratoire sonore (Figure 35) tandis que la transformation de l'énergie vibratoire du son en impulsions nerveuses relève de l'appareil auditif de transduction et a lieu dans l'oreille interne (Dulguerov et Remacle, 2005). L'oreille externe a pour rôle la protection, le renforcement acoustique et la transmission des informations vers l'oreille moyenne. Elle est composée du pavillon et du conduit auditif externe (Dulguerov et Remacle, 2005).

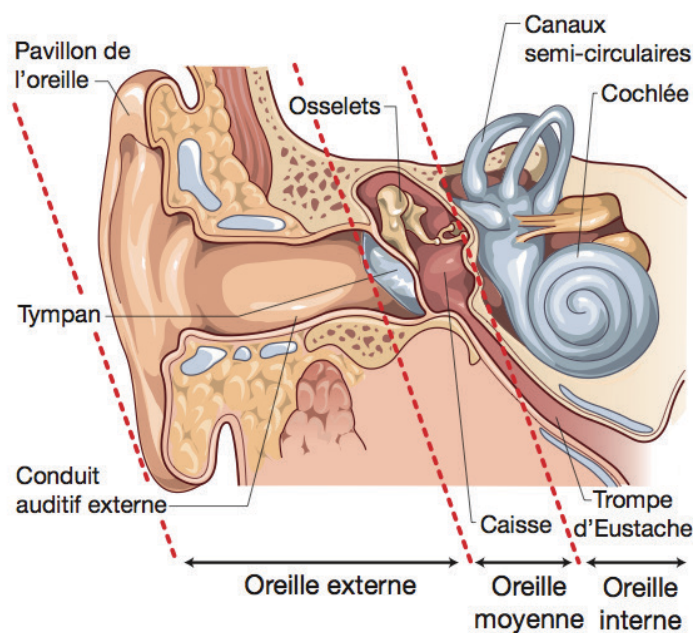


Figure 35 : Anatomie du système auditif périphérique. Tiré de Vibert et al. (2011), Neurophysiologie, page 64.

L'oreille moyenne est composée du tympan, membrane mobile, reliée mécaniquement par une chaîne de trois osselets, marteau, enclume et étrier à la fenêtre ovale de la cochlée. Dans l'oreille interne, la cochlée, cavité hélicoïdale, se présente comme un tube conique creusé dans l'os du rocher (labyrinthe osseux), d'une longueur de 35 mm et d'un diamètre d'environ 2 mm, enroulé sur lui-même (2 tours et demi de spires) et rempli de liquide (Figure

36). Sa base comporte deux orifices: la fenêtre ovale en haut, sur laquelle s'appuie l'étrier et la fenêtre ronde en bas. Entre les deux, la membrane basilaire sépare longitudinalement ce cône en une rampe vestibulaire sur laquelle s'ouvre la fenêtre ovale et une rampe tympanique sur laquelle s'ouvre la fenêtre ronde. La membrane basilaire supporte l'organe de Corti (Figure 37), inclus dans le canal cochléaire. Au sommet des deux rampes se situe l'hélicotreme.

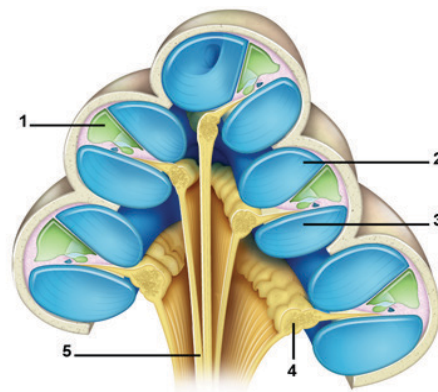


Figure 36 : Section axiale de la cochlée : 1) canal cochléaire contenant de l'endolymphe 2) rampe vestibulaire contenant de la périlymphe 3) rampe tympanique contenant de la périlymphe 4) ganglion cochléaire ou spiral 5) fibres du nerf auditif. Tiré de Pujol et al. (2013) NeurOreille : Voyage au centre de l'audition (www.cochlea.eu).

L'organe de Corti est composé d'environ 16000 cellules sensorielles : trois à cinq rangées de cellules ciliées externes (environ 12500) aux propriétés contractiles et une rangée de cellules ciliées internes (environ 3500) assurant la transduction mécano-neurale, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les cellules ciliées sont connectées au nerf auditif dont le ganglion se situe dans le modiolus qui est la partie centrale de la cochlée. Les nerfs vestibulaires et cochléaires se rejoignent à l'entrée du système nerveux central pour former le VIII^{ème} nerf crânien, nerf vestibulo-cochléaire.

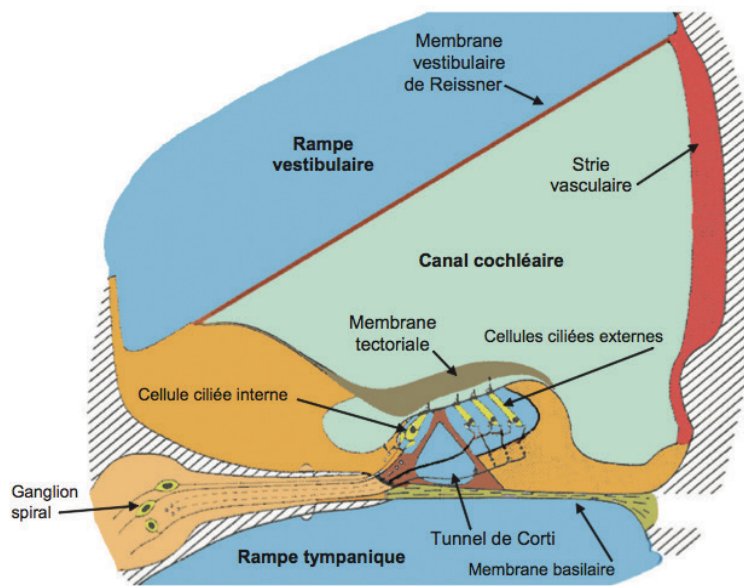


Figure 37: L'organe de Corti. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie p.67, 2011.

Le système auditif central s'étend des premiers neurones du nerf auditif jusqu'au cortex. Il comprend le nerf auditif, les structures sous-corticales auditives et le cortex auditif (Figure 40).

b) **Physiologie**

La pression du signal acoustique produit une déformation de la membrane tympanique. Celle-ci est couplée au manche du marteau et provoque des micromouvements de la chaîne ossiculaire dont le résultat final est un mouvement de va-et-vient (comme un piston) de la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale de la cochlée. La vibration est ainsi transmise à la périlymphe cochléaire (Figure 38). Le gradient électrochimique entre la périlymphe contenue dans les rampes vestibulaires et tympaniques et l'endolymphe qui remplit le canal cochléaire constitue la source d'énergie dans laquelle puisent les cellules sensorielles de la cochlée, les cellules ciliées.

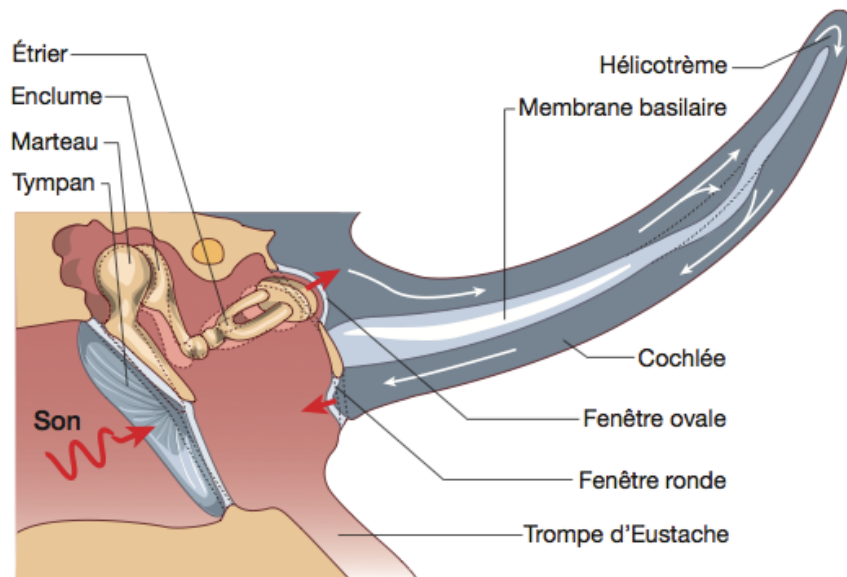


Figure 38 : Mouvement des osselets, de la fenêtre ovale, de la membrane basilaire et de la fenêtre ronde lors d'un son. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie, page 65.

Le fonctionnement de l'organe de Corti peut se résumer en cinq étapes (Pujol et al., 2013):

- 1 - les vibrations sonores transmises à la périlymphe font onduler la membrane basilaire vers le haut et le bas en fonction de la tonotopie cochléaire (Figure 39).
- 2- Les stéréocils des cellules ciliées externes, implantés dans la membrane tectoriale (Figure 37) sont déplacés horizontalement : lorsque la membrane basilaire s'élève, les cils sont basculés vers l'extérieur et la cellule ciliée externe est dépolarisée.
- 3- Les cellules ciliées externes dépolarisées se contractent par un phénomène d'électromotilité, ce qui amplifie la vibration initiale et joue dans le même temps un rôle de filtre sélectif.
- 4- La cellule ciliée interne est excitée.
- 5- La synapse entre la cellule ciliée interne et la fibre du nerf auditif est activée et un message est envoyé aux aires cérébrales.

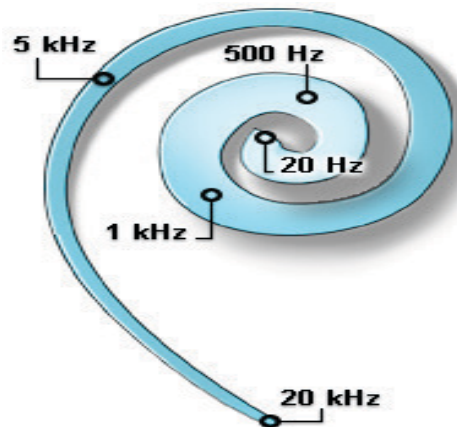


Figure 39 : Illustration de la tonotopie cochléaire. La membrane basilaire, longue de 15 à 35 mm, épaisse d'environ 0,003 mm, est étroite ($\approx 0,04$ mm) et rigide à la base (répond aux hautes fréquences) et large ($\approx 0,36$ mm) et souple à l'apex (répond aux basses fréquences). Tirée de <http://www.neuroreille.com>.

Chaque fibre du nerf auditif présente un seuil d'activation minimale pour une certaine fréquence appelée Fréquence Caractéristique (F.C.) ou préférentielle. Le champ de réponse de chaque fibre nerveuse auditive en fonction de la fréquence des sons incidents est représenté par une courbe d'accord.

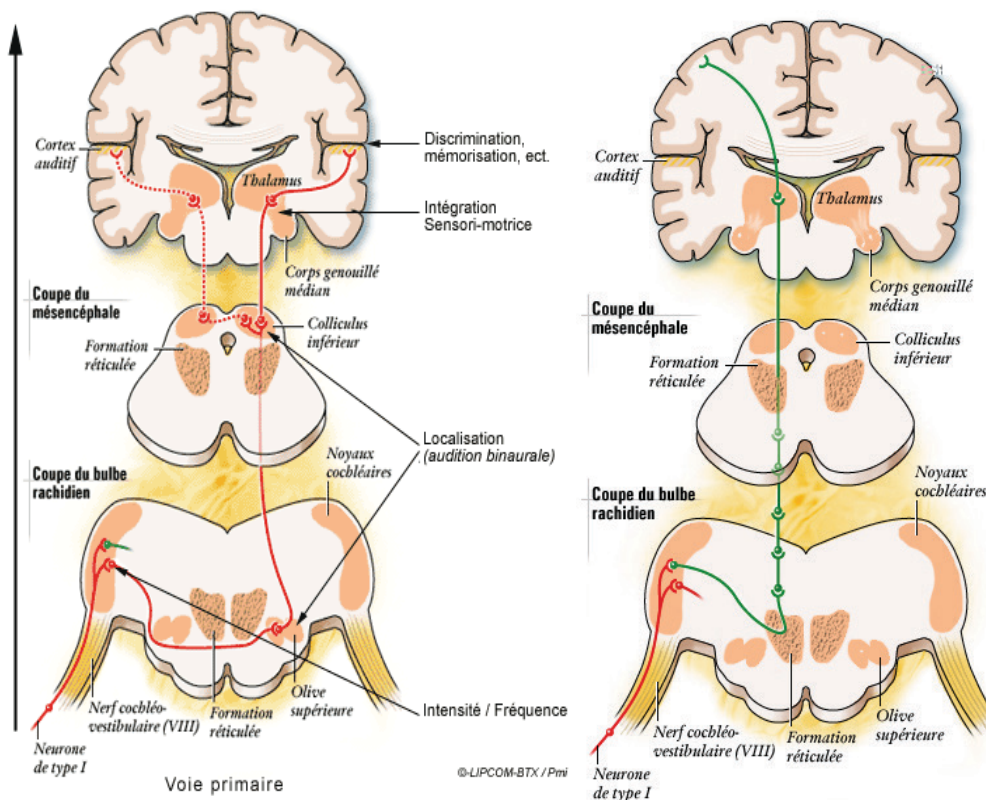


Figure 40 : Trajet du message sonore du nerf auditif au cerveau, voie auditive primaire (gauche) et non primaires (droite). Tiré de Pujol et al. (2013) www.cochlea.eu.

2. Le codage de la fréquence

La cochlée est sensible aux fréquences allant de 20 à 20000 Hertz. C'est Von Békésy (1960) qui a montré le lien entre le lieu de stimulation de la membrane basilaire et sensation de hauteur ressentie. Ce codage tonotopique ou spatial de la fréquence dans la cochlée a été ensuite modélisé par Greenwood (1990) sous forme de bandes de fréquences. Le fonctionnement de la cochlée peut-être schématisé comme reposant sur une série de 36 filtres passe-bandes se recouvrant partiellement de 26 à 10781 Hertz (Moore, 1989) : c'est le codage tonotopique spatial de la fréquence ou *place code*. Un filtre auditif est défini par sa fréquence centrale et par la largeur de bande rectangulaire équivalente, l'ERB⁹ (*Equivalent Rectangular Bandwidth*) (Moore et al., 1998). La disposition des filtres n'est pas linéaire : plus étroit dans les basses fréquences, les filtres s'élargissent au fur et à mesure que la fréquence augmente. Les caractéristiques des filtres varient donc avec leur fréquence centrale. Un second codage de la fréquence s'effectue parallèlement par un mécanisme temporel : la décharge des fibres nerveuses se synchronise alors sur la fréquence à coder. Lorsque la fréquence de stimulation sonore est suffisamment lente (par exemple, 500 Hz), la cellule ciliée interne alterne ses cycles de dépolarisation-repolarisation en phase, cycle à cycle avec la fréquence cible. C'est le codage temporel de la fréquence, que l'on peut également retrouver sous les termes de verrouillage en phase, calage à la fréquence, phase locking ou rate code. Cependant, si dans les basses fréquences les fibres nerveuses déchargent suffisamment rapidement pour que le phase locking soit effectif, plus la fréquence sera élevée, moins ce codage temporel de la fréquence sera possible. La limite supérieure du phase locking n'est pas bien connue chez l'humain (Deltenre, 2007) et varierait entre 3000 Hertz et 6000 Hertz. Pour les voyelles, la F_0 et les trois premiers formants sont tonotopiquement codés dans le nerf auditif : chaque formant évoque de l'activité dans la sous population de fibres possédant la fréquence caractéristique correspondante (Delgutte et Kiang, 1984).

Enveloppe versus Structure fine

Rosen a proposé, en 1992, une décomposition de la structure temporelle du signal de parole en trois types d'informations en s'appuyant sur la fréquence des fluctuations d'amplitude : 1) l'enveloppe du signal comprend les fluctuations d'amplitude lentes, à faible fréquence, entre 2 et 50 Hz 2) la périodicité du signal de parole comprend les fluctuations d'amplitude au cours du temps entre 50 et 500 Hz. Ces fluctuations transmettent la F_0 , le

⁹ $ERB = 24.7 \times (4.37f_c + 1)$ où f_c correspond à la fréquence centrale du filtre

voisement, l'intonation 3) la structure temporelle fine transmet les fluctuations rapides de l'amplitude dans le signal de parole, allant de 600 Hz à 10 kHz.

		TEMPORAL FEATURES		
		envelope	periodicity	fine-structure
LINGUISTIC CONTRAST	segmental	manner	★	★
		voicing	★	★
		place		★
		voice quality		★
	prosodic	tempo, rhythm	★	
		syllabicity	★	
		stress	★	
		intonation	★	

Figure 41: Rôle des informations temporelles d'enveloppe, de périodicité et de structure fine pour la transmission des contrastes linguistiques segmentaux et suprasegmentaux. Tiré de Rosen (1992).

Aujourd'hui, l'indice de périodicité est moins évoqué et les auteurs opposent plutôt les informations d'enveloppe (E) aux informations temporelles fines (TFS). Si l'enveloppe temporelle, même dégradée, semble suffisante pour une excellente intelligibilité dans le silence (Shannon et al., 1995 ; Smith et al., 2002), la compréhension de la parole dans le bruit requiert des informations de structure temporelle fine (Lorenzi et al., 2006 ; Moore, 2008).

B. La perception des voyelles

1. La perception de la parole

La perception de la parole comprend trois niveaux : psychoacoustique, phonétique et phonologique (Serniclaes, 2000). Le traitement auditif des sons de parole ne se limite pas à la transduction des ondes acoustiques en impulsions neurales. Le traitement psychoacoustique, périphérique, focalise l'attention sur certains détails acoustiques (durée, fréquence, modulations de fréquence, masquage) qui ne relèvent pas encore du traitement linguistique. A un niveau supérieur, le traitement phonétique est, quant, à lui sensible aux traits universels de la parole (barre de voisement, formants, transitions formantiques...) (Serniclaes, 2007). Le niveau phonétique de traitement procède à l'intégration de plusieurs indices acoustiques en un trait phonétique et il n'y a pas de relation bi-univoque entre les indices acoustiques et phonétiques : pour un même trait, il y a plusieurs indices acoustiques, et le poids relatif accordé à chaque indice dépend de la langue. Le niveau phonétique est déjà considéré comme un traitement cognitif « central » car l'auditeur doit procéder à une intégration et une abstraction des informations. Selon les phonèmes, des indices majeurs sont utilisés en priorité et des secondaires ne sont utilisés qu'en cas d'ambiguïté (voir par exemple Serniclaes, 1987, pour le voisement des consonnes occlusives). Cette capacité à intégrer les indices acoustiques pour les transformer en trait phonétique est innée, présente dès la naissance (Eimas et al., 1971 chez des enfants de 1 et 4 mois). A leur naissance, tous les êtres humains ont les mêmes patterns de perception phonétique, quel que soit l'environnement linguistique (la langue) dans laquelle ils évoluent. Ils peuvent discerner des différences entre les unités phonétiques de la plupart des langues, bien qu'ils ne les aient jamais entendues. Au fur et à mesure que l'enfant grandit, l'expérience linguistique a un effet sur la perception de la parole. L'exposition à une seule langue réduit les compétences à percevoir des différences entre les sons si ces différences n'ont pas de valeur linguistique dans la langue de l'environnement. L'enfant oriente sa perception des traits spécifiquement sur la langue de son environnement entre l'âge de 6 mois (les enfants de 6 mois sont déjà sensibles aux catégories de voyelles d'après Kuhl et al. (1992) et la fin de la première année (Werker et Tees, 1984, pour la distinction des oppositions de lieu d'articulation des consonnes). On dit que l'enfant devient « sourd » aux oppositions phonologiques non distinctives dans sa langue. Cette adaptation au cadre linguistique n'est pas qu'un simple processus de sélection mais un véritable processus d'apprentissage (Serniclaes et al., 2007) donnant lieu au niveau de traitement phonologique.

a) **Contraintes phonotactiques**

Lorsque les phonèmes sont combinés entre eux, interviennent les contraintes phonotactiques qui régissent les combinaisons de phonèmes acceptées ou refusées dans une langue donnée. Chaque langue a ces propres contraintes, certaines étant universelles. Par exemple, en français /tl/, /sr/ /tn/ /mp/ sont interdits en début de mots tandis que ces suites de consonnes sont autorisées en hébreu moderne. Si un auditeur francophone doit identifier un /tl/ hébreu, il aura tendance à « réparer » l'erreur et identifiera un /kl/ autorisé dans sa langue (Hallé et al., 1998).

b) **Restauration phonémique**

Les célèbres expériences de Warren en 1970 sur la restauration phonémique ont fait apparaître que le lexique permet à l'auditeur de reconstituer inconsciemment la forme sonore d'un phonème remplacé par du bruit dans une phrase, donnant ainsi lieu à un véritable phénomène d'illusions perceptives (Warren, 1970). Les connaissances lexicales permettent de restituer un phonème masqué par du bruit (Miller et Isard, 1963), ou supprimé (Warren et Obusek, 1971). On parle d'un effet descendant du lexique vers les niveaux inférieurs de traitement, que l'on nomme communément top-down (Nguyen, 2005).

c) **Effet de la fréquence lexicale**

La fréquence lexicale influence l'identification des mots. En 1957, Howes met en évidence l'existence d'une corrélation entre la fréquence lexicale d'un mot et son identification en environnement bruyant. D'après le Neighborhood Activation Model (Luce et Pisoni, 1998), les mots sont organisés dans le lexique en voisins phonologiques¹⁰. La fréquence lexicale du mot cible, c'est-à-dire la fréquence à laquelle ce mot se rencontre dans la langue, le nombre de voisins phonologiques et la fréquence lexicale de ces derniers influencent son identification. Cet effet de fréquence lexicale et de voisins phonologiques est également retrouvé chez les sujets malentendants (Dirks et al. 2001).

¹⁰ voisins phonologiques : ensemble des mots pouvant être formés par ajout, substitution, suppression d'un phonème par rapport au mot cible.

d) **La perception catégorielle (Liberman et al., 1957)**

Des études fondamentales sur l'identification phonémique ont été menées dès les années 50 au laboratoire Haskins. Ces expériences ont permis de mettre à jour le phénomène de perception catégorielle. Il est, dans certaines circonstances, à différence acoustique équivalente, plus difficile de discriminer deux réalisations acoustiques de la même catégorie (par exemple, deux [b] acoustiquement différents) que deux phonèmes de catégories différentes (par ex. un [p] et un [b]) pourtant tout aussi proches acoustiquement. La perception catégorielle contribue à réduire la variabilité acoustique rencontrée parmi les différents exemplaires d'un même phonème. Elle a été mise en évidence tout d'abord pour les consonnes occlusives (Liberman et al., 1957). Cependant, selon Fry et al. (1962, sur des voyelles synthétiques), on ne parvient pas à mettre en évidence de perception catégorielle pour les voyelles.

e) **La théorie motrice de la parole**

La théorie motrice de la perception de la parole (Liberman et al., 1967 et sa version révisée, Liberman et Mattingly, 1985) relie la perception auditive à la perception d'un pattern de mouvements articulatoires anticipés par l'auditeur. Ce que l'auditeur évoquerait, lorsqu'il perçoit un énoncé, ce sont les mouvements articulatoires qu'il aurait à produire pour émettre ce même énoncé. Ce serait donc le même mécanisme qui entrerait en jeu dans la production et la perception de la parole.

f) **Prototypes et « Magnet effect »**

Les bons exemplaires de voyelles ou « prototypes » jouent un rôle central dans la structuration de l'espace perceptif vocalique (Kuhl, 1991, pour le [i]). Les auditeurs ont plus de difficultés à percevoir les mêmes différences acoustiques entre voyelles dans le voisinage du prototype qu'à la périphérie de la catégorie. Le prototype les attire comme un aimant, d'où le terme de « magnet effect » donné à ce phénomène. Selon Kuhl (1991), les catégories vocaliques ont donc une structure interne « centrée » sur un prototype, version canonique de la voyelle, qui distord localement l'espace perceptif. Cette théorie n'est pas en contradiction

avec celle de la perception catégorielle de la parole selon laquelle la sensibilité perceptive est également plus importante entre les catégories (de voyelles) qu'à l'intérieur des catégories.

2. La perception des voyelles

Comme évoqué précédemment, les données de parole fournissent une collection d'indices acoustiques à partir desquels s'effectue un travail d'interprétation dont seul le produit final sera accessible à la conscience. L'auditeur semble procéder un double codage de l'information, continue, sous la forme d'une sorte de spectrographe auditif par exemple et discret, sous forme d'un ensemble d'étiquettes phonétiques (Nguyen, 2005).

Pour les voyelles modales, ce sont essentiellement les valeurs des formants qui portent l'information liée à l'identification. Mais combien de formants sont-ils nécessaires pour identifier correctement les voyelles ? Et l'auditeur traite-t-il ces informations spectrales formant par formant, avec des références normatives internes ou par comparaison des formants entre eux ? Nous verrons que des phénomènes d'intégration formantiques et de comparaisons entre formants entrent en jeu dans l'identification des voyelles.

a) F_2' ou formant effectif

Combien de formants sont-ils nécessaires pour identifier le timbre des voyelles ? Les premières réponses ont été données par des expériences à partir de synthèse de la parole dans les années 50 (Delattre et al., 1952 ; Calliope, 1989). L'identification de voyelles synthétisées à partir d'un seul formant ne semble possible que pour les voyelles postérieures, présentant les deux premiers formants séparés de moins de 3,5 Bark. Lorsque les formants sont proches de moins de 3 (Syrdal et Gopal, 1986) à 3,5 Bark (Chistovich et Lublinskaja, 1979), l'oreille procéderait à une intégration de ces formants pour ne percevoir qu'un centre de gravité (Center of gravity ou COG). Si le formant unique de la voyelle postérieure synthétique correspond au centre de gravité des 2 premiers formants, la voyelle est correctement identifiée (Delattre et al., 1952, Calliope, 1989). Par ailleurs, il est possible de synthétiser avec une qualité satisfaisante chaque voyelle orale utilisant seulement deux pics de résonance, F_1 et un deuxième formant, appelé F_2' . Pour les voyelles postérieures, sombres, F_2' ne correspond au deuxième formant réel. Pour les voyelles antérieures, F_2' correspond à la somme non linéaire pondérée des F_2 , F_3 et F_4 . De nombreuses études perceptives ont été menées sur ce sujet et

plusieurs formules ont été élaborées pour le calcul du F_2' (Bladon et Fant, 1978 ; Paliwal et al., 1983).

b) **Variabilité, normalisation et invariance**

Il existe une importante variabilité acoustique des voyelles, pouvant atteindre 20% de la fréquence des formants (Calliope, 1989) en fonction de l'âge et du sexe du locuteur (Ménard et al., 2002). Les espaces formantiques des femmes et des enfants se chevauchent partiellement sur les axes F_1/F_2 et F_2/F_3 (Peterson et Barney, 1952). Comment un adulte peut-il alors identifier correctement un [u] prononcé par un enfant alors que les formants de celui-ci correspondent à un [œ] dans son propre triangle vocalique ? Quels sont les mécanismes en jeu pour l'identification des catégories phonologiques distinctes, invariantes et indépendantes de la valeur absolue de chaque formant ? Pour l'anglais, Syrdal et Gopal (1986) ont mis en évidence qu'une différence F_1-F_0 inférieure à la distance de 3 Bark (env. 297 Hertz) était assimilée à une voyelle fermée tandis qu'une différence F_3-F_2 inférieure à 3 Bark était assimilée aux voyelles antérieures. Pour le français, Ménard et al. (2002) ont synthétisé par un modèle articulatoire les voyelles [i, y, u, e, o, ε, œ, ɔ, a] à sept étapes de croissance (de la naissance à 21 ans) afin d'étudier le lien entre la fréquence des formants, les distances acoustico-perceptives des formants entre eux et l'identification des voyelles. La fréquence fondamentale F_0 évolue avec l'âge présumé du modèle respectivement de 450, 360, 300, 270, 240, 210 et 110 Hz pour les âges de 0, 2, 4, 8, 12, 16 (ou femme adulte) et 21 ans (homme adulte). Les résultats de Ménard et al. (2002) confirment l'importance de la distance entre F_1 et F_0 pour la perception de l'aperture. En français, une distance F_1-F_0 de 2 Bark (env. 204 Hertz) sépare perceptivement les voyelles fermées des voyelles mi-fermées du français tandis que 4 Bark séparent les voyelles fermées des voyelles mi-ouvertes et ouvertes. La distance F_2-F_1 ($>5,5$ Bark ; env. 569 Hertz) semble le meilleur prédicteur de l'identification du lieu d'articulation des voyelles antérieures. Cependant, le rôle de la distance F_2-F_3 (>5 Bark, env. 509 Hertz) reste important, notamment pour les voyelles postérieures. D'après Ménard et al. (2002), les auditeurs pourraient ne pas avoir tous les mêmes stratégies perceptives. La perception de l'arrondissement est corrélée au F_2' , deuxième formant effectif, appliquant l'intégration spectrale des F_2 , F_3 et F_4 , compris dans une distance de 3,5 Bark (env. 347 Hertz). Par contre, l'ensemble des résultats de Ménard et al. (2002) ne portent que sur les voyelles orales et ne sont pas valables pour la voyelle [ɔ]. Ils confirment cependant que la perception des traits phonologiques est corrélée à la distance acoustique, bien que la valeur

absolue de cette distance ou la place des frontières dépende des langues.

Assman et Nearey (2003) ont étudié les effets du décalage fréquentiel sur l'identification des voyelles. Des voyelles naturelles prononcées par deux hommes adultes, deux femmes adultes et deux enfants dans les syllabes de type [hVd] ont été resynthétisées dans 5 conditions de décalage des formants : vers les basses fréquences (60% ou 80% de la valeur des formants) ou vers les hautes fréquences (150% ou 200% de la valeur des formants), associé à 3 conditions de décalage de la F_0 (de 50% à 400% de la valeur initiale). Le taux d'identification des voyelles diminue quand les valeurs des formants sont doublées, c'est-à-dire décalées vers les aigus (le taux d'identification passe de plus de 80% à moins de 20%) ou à l'inverse lorsque les valeurs des formants sont diminuées à 60% de leur valeur initiale, c'est-à-dire décalées vers les graves (le taux d'identification passe alors de plus de 80% à moins de 55%). Les décalages vers les aigus produisent moins d'effet négatif sur l'identification des voyelles produites par les hommes comparé aux voyelles produites par des femmes ou des enfants, tandis qu'à l'inverse, un décalage vers les graves entraîne moins d'impact négatif pour l'identification des voyelles produites par les enfants comparée à celle des adultes. Dans les différentes conditions, la baisse du taux de reconnaissance des voyelles décalées se compense lorsque les auteurs introduisent un décalage de la F_0 dans le même sens que celui des formants. Les auditeurs s'appuieraient donc sur la F_0 ou plutôt sur l'écart entre F_0 et les formants pour identifier les voyelles. Assman et Nearey (2003) suggèrent que l'exposition préalable des auditeurs aux régularités statistiques dans la parole naturelle est un facteur important pour l'identification des voyelles décalées en fréquence. Cette étude est particulièrement intéressante car nous verrons qu'avec l'implant cochléaire, il peut y avoir un décalage entre la fréquence cible et la fréquence réellement perçue.

c) **Les confusions les plus fréquentes en français pour les voyelles orales**

Hall et Hume (2013) ont proposé une identification des voyelles françaises [i e y ø œ a u o ɔ ẽ ã õ ə] prononcées par un homme (en contexte consonantique [aC₁VC₂a] où C₁, C₂ = [b,d,g] et C₁ ≠ C₂) à 25 auditeurs français. La voyelle [i] est parfaitement reconnue (100%), de même que [y] et [a] (99%). Les voyelles les mieux reconnues sont donc les voyelles les plus périphériques. Les confusions les plus importantes concernent la différence entre les voyelles mi-fermées et mi-ouvertes, dont l'opposition tend à disparaître (Hall et Hume, 2013).

3. La perception des voyelles nasales

a) Les principaux indices

En 2007, après 50 ans de travaux sur le sujet, la perception de la nasalité vocalique reste encore mal comprise (remarque de Delvaux, 2009). Nous savons cependant que les auditeurs perçoivent les voyelles nasales comme une classe naturelle (Butcher, 1978 ; Bendor et Etrange, 1982). Delattre écrivait en 1968:

Perceptuellement, ce que l'on appelle nasalité n'est autre qu'un déséquilibre dans l'intensité des deux premiers formants au profit du second.

Ce qui distinguerait les voyelles orales des voyelles nasales, selon Delattre (1965) ce ne serait donc pas la fréquence des formants mais leur intensité relative. Pour les voyelles orales, l'intensité des formants décroît au fur et à mesure que l'on monte dans l'échelle des fréquences. Pour les voyelles nasales l'intensité du premier formant serait inférieure à celle du deuxième formant et perceptivement la nasalité correspondrait à ce déséquilibre. Si l'on diminue l'intensité du F_1 de [ε] de 12 dB, les francophones entendraient alors [ẽ] à l'unanimité (Delvaux 1999, citant Delattre).

Mais si la perception de la nasalité vocalique était si simple, elle ferait certainement l'objet d'un consensus. De nombreux auteurs rapportent effectivement un affaiblissement relatif de F_1 ou du F_2 selon la voyelle (Maeda, 1993) mais il est associé à une myriade d'indices secondaires sans qu'aucun de ces indices ne semble valable pour l'ensemble des voyelles du français. L'échec à trouver un indice unique commun à toutes les voyelles nasales de toutes les langues peut s'expliquer par le fait que les calculs des conséquences acoustiques du couplage nasal (par la modélisation notamment) prédisent des modifications spectrales différentes en fonction de l'identité de la voyelle et de la position des formants dans celle-ci.

En fait, pour déterminer si une voyelle est nasale, les auditeurs d'appuieraient bien sur des informations de basses fréquences (Delattre, 1954 et 1965 ; House et Stevens, 1956 ; Hattori et al., 1958 ; Takeuchi et al., 1975; Hawkins et Stevens, 1985 ; Huffman, 1990 ; Beddor, 1993 ; Maeda, 1993) mais également de hautes fréquences (Hattori et al., 1958 ; Takeuchi et al., 1975). L'affaiblissement de l'intensité et l'aplatissement du spectre jouent également un rôle important (Fant, 1960; Stevens, 1998 ; Dickson, 1962 ; Bernthal et

Beukelman, 1977 ; Kent et al., 1989 ; Delvaux et al., 2002). Certains auteurs mettent également en avant le rôle de l'antiformant autour du F_3 (Bloomer et Peterson, 1955 pour l'hypernasalité; Jha, 1986; Kent et al., 1989). D'ailleurs, selon Delvaux (2012), la différence la plus nette entre voyelle orale et voyelle nasale se fait au niveau de F_3 . Le troisième formant étant généralement très affecté par la nasalisation (comme nous avons pu le voir partiellement dans le chapitre 2), il peut également se diviser en deux pics de moindre intensité ou être déplacé fréquentiellement, en général vers des fréquences plus élevées, sous l'effet des zéros (antiformants) nasals.

D'autres facteurs pourraient entrer en jeu. La durée jouerait un rôle pour l'identification des voyelles nasales selon Delattre et Monnot (1968). Cependant, selon Delvaux (2012), la durée ne constitue apparemment pas un indice perceptuel sur lequel se fondent systématiquement les auditeurs pour décider si une voyelle est orale ou nasale. Le contexte consonantique peut également influencer l'identification de la voyelle. En contexte consonantique nasal, une voyelle nasale a moins de chance d'être correctement identifiée comme nasale (Kawasaki, 1986 ; Beddor et Krakow, 1999).

b) Interaction perceptive entre aperture et nasalité

Plusieurs auteurs ont évoqué une interaction acoustique et perceptive entre la nasalité et l'aperture (Wright, 1986; Krakow et al., 1988; Beddor et al., 1984 et 1986).

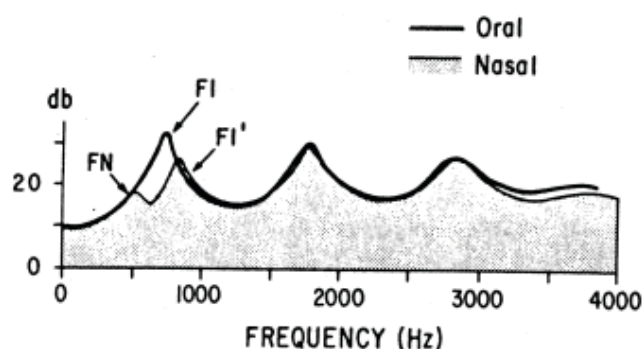


Figure 7
Transfer functions for the steady-state vowel portion of stimulus 4 from the oral (unfilled) and nasal (filled) continua. The first spectral peak has a lower frequency in the nasal vowel than in the oral vowel, but the predominant spectral peak in the nasal vowel is the upward-shifted $F1'$.

Figure 42: Interaction entre nasalité et aperture selon Beddor et al. (1986). L'ajout d'un pic spectral nasal FN entraîne le déplacement du $F1$ vers $F1'$ et un aplatissement de la préminence spectrale dans la zone du premier formant avec modification de la perception de l'aperture.

Selon Beddor et al. (1986), l'ajout d'une paire de pôle-zéro dans la zone des 400 Hertz entraîne un déplacement du centre de gravité (COG) de la voyelle (Figure 42). Les voyelles fermées sont alors perçues comme plus ouvertes et les voyelles ouvertes comme plus fermées. Ceci est une conséquence acoustique (et perceptive) directe de la nasalité, en dehors de toute modification articulaire telle que celles précédemment décrites selon le *Changement en Chaîne*. L'effet du centre de gravité disparaît quand la distance entre les formants est supérieure à 3,5 Bark (cas de [i] nasalisé pour l'étude de Beddor, 1984).

c) **Identification des voyelles nasales du français**

Pour la validation du logiciel d'évaluation des surdités centrales AIRTAC2, Del Fabro et Desmons (2014) ont testé un groupe de 122 sujets entendants, équilibré en âge et catégorie socio-professionnelle, sur une tâche d'identification et de discrimination de 9 voyelles isolées [i a u e o y ã ẽ õ]. Les voyelles nasales sont significativement moins bien identifiées que les voyelles orales. Chez les sujets entendants, la nasalité semble cependant être un indice fort car il y a peu de confusions entre orale et nasale. Par contre il y a de nombreuses confusions des voyelles nasales entre-elles : [ã] identifié [õ], [õ] identifié [ã], [ẽ] identifié [ã] (Hall et Hume, 2013). Sur un paradigme original, Montagu (2007) a proposé un test de perception sur la partie non nasalisée de la voyelle orale en contexte [tV]. Les résultats vont dans le sens des résultats acoustiques, c'est-à-dire que la partie non nasalisée de [ã] est identifiée [ɔ], celle de [ẽ] est identifiée [a] et celle de [õ] est identifiée [o].

Selon Delvaux (2012) : « Il est donc encore essentiel aujourd'hui de progresser dans la recherche d'un corrélat acoustico-perceptuel robuste de la nasalité vocalique, qui pourrait s'appliquer à un maximum de voyelles et de langues et qui supposeraient un processus perceptuel sous-jacent plausible à défaut d'être directement validé ». Le présent travail en étudiant les mécanismes de perception des voyelles nasales auprès des adultes implantés cochléaire s'inscrit dans une recherche de meilleure compréhension de la perception auditive de la nasalité vocalique.

C. Impact de la surdité neurosensorielle

Les atteintes auditives peuvent être de différents types (Figure 43) et de différents degrés (Tableau 23). Leurs étiologies sont multiples.

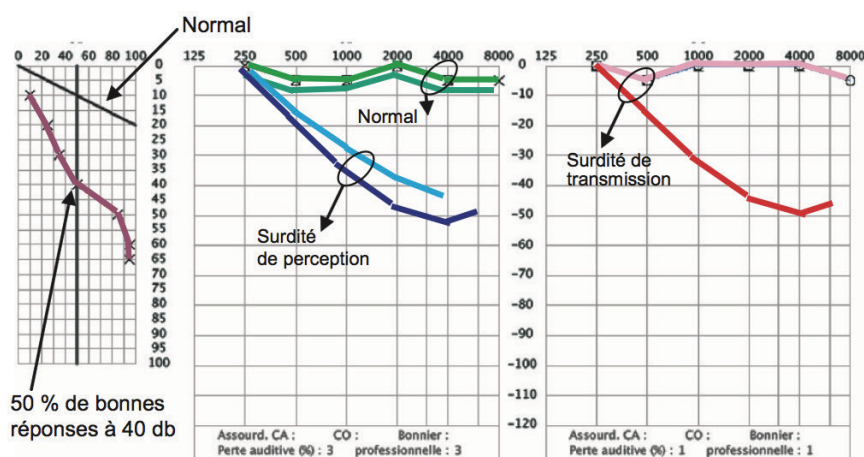


Figure 43 : A droite : Audiométrie tonale représentant une audition normale (en vert). Une surdité de transmission causée par une atteinte de l'appareil de transmission et caractérisée par une élévation des seuils uniquement en conduction aérienne (en rouge). Une surdité neurosensorielle causée par une atteinte de l'appareil de transduction mécano-neurale ou des relais auditifs supérieurs et caractérisée par une élévation des seuils audiométriques à la fois en conduction osseuse et aérienne (en bleu). A gauche : Audiométrie vocale. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie, page 75.

Plomp (1978) a décrit la perte auditive comme la combinaison d'un composant d'atténuation (A) et d'un composant de distorsion (D). Le composant d'atténuation correspond à la perte d'audibilité s'exprimant par l'élévation des seuils à l'audiométrie tonale.

Audition normale ou subnormale : La perte tonale moyenne ne dépasse pas 20 dB

Déficiencia auditive légère : La perte tonale moyenne est comprise entre 21 dB et 40 dB.

Déficiencia auditive moyenne : La perte tonale moyenne est comprise entre 41 dB et 70 dB.

Déficiencia auditive sévère : La perte tonale moyenne est comprise entre 71 dB et 90 dB.

Déficiencia auditive profonde : La perte tonale moyenne est comprise entre 91 dB et 120 dB.

Déficiencia auditive totale – Cophose : La perte moyenne est de 120 dB.

Tableau 23 : Classification audiométrique des déficiencias auditives du BIAP, Bureau International d'Audiophonologie, www.biap.org.

Le composant de distorsion (D) correspond à 1) la distorsion du codage de l'intensité ou recrutement avec un raidissement de la pente de croissance en sonie¹¹, un rapprochement des seuils de perception et d'inconfort 2) la distorsion du codage en fréquence ou détérioration de la résolution fréquentielle par élargissement des filtres cochléaires entraînant un brouillage fréquentiel. La largeur des filtres auditifs devient 2 fois à 4 fois supérieure à la normale (Moore, 2007) pour des pertes auditives moyennes à sévères (41-70 dB), 3) la distorsion de la dimension temporelle entraînant des difficultés à percevoir les sons brefs, un masquage proactif¹² des voyelles sur les consonnes dans la parole continue, a fortiori quand le débit est rapide.

Les sujets présentant une surdité neurosensorielle expriment généralement des difficultés à comprendre la parole dans le bruit, notamment en présence d'un bruit dynamique. Cette difficulté serait en lien avec la dégradation de la capacité à percevoir la structure temporelle fine du signal (Lorenzi et al., 2006).

Les surdités endocochléaires altèrent plus souvent la perception des hautes que des basses fréquences. De plus, l'intensité moyenne des consonnes étant plus faible que celle des voyelles, la perception des consonnes offre moins de robustesse que celle des voyelles en cas de surdité neurosensorielle (Deltenre, 2007). Adam (2006) rapportée par Lefèvre (2008) a mené une analyse des confusions de voyelles du français chez 70 adultes présentant une surdité moyenne, de 56 à 70 dB de perte auditive. Le taux moyen d'erreur était de 12% pour les voyelles et 18% pour les consonnes. La voyelle [a] est la mieux reconnue, suivie par ordre décroissant de reconnaissance par [ø], [o], [ã], [u], [e], [õ], [ê], [i] et [y]. Les voyelles acoustiquement sombres sont mieux reconnues que les voyelles claires. Les voyelles nasales ont tendance à être confondues entre-elles: le trait nasal de la voyelle est bien reconnu, l'erreur porte plutôt sur le lieu d'articulation.

¹¹ La sonie correspond à l'intensité ressentie, d'un point de vue psychoacoustique.

¹² Proactif : se dit d'un processus psychologique qui s'exerce d'amont en aval dans le temps.

D. L'implant cochléaire

Lors des 30 dernières années, 220000 personnes sourdes, adultes ou enfants ont bénéficié d'un implant cochléaire (Fallon, 2014) à travers le monde et 1391 implants cochléaires ont été posés en France en 2013 aussi bien chez l'enfant que chez l'adulte, selon les statistiques de l'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation (ATIH). Proposé dans les cas de surdités neurosensorielles sévères à profondes (Haute Autorité de Santé, 2007), l'implant cochléaire sollicite directement les fibres nerveuses dont une partie est le plus souvent encore fonctionnelle alors que les cellules sensorielles ont disparu. L'implant cochléaire comprend une partie interne - l'implant - comportant un boîtier et un faisceau d'électrodes inséré chirurgicalement dans la rampe tympanique, sous anesthésie générale par un chirurgien ORL spécialisé en implantologie cochléaire, et une partie externe - le processeur - mis en place et activé quelques semaines après l'intervention par un clinicien régleur.

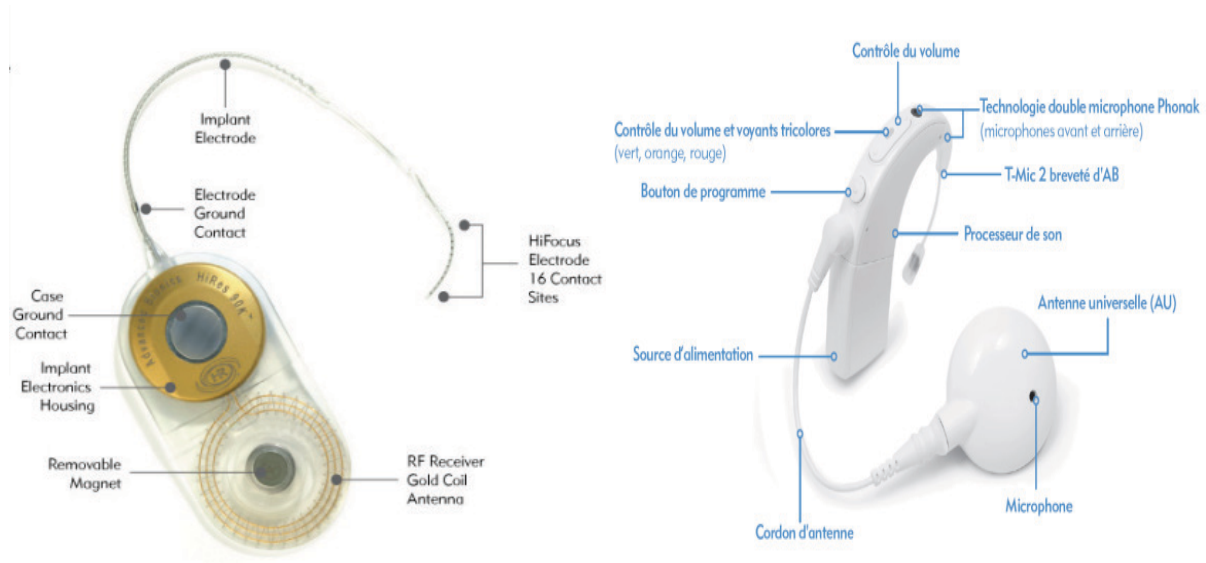


Figure 44 : Récepteur interne d'implant cochléaire (gauche) et processeur (droite). Document fourni avec courtoisie par la Société Advanced Bionics®.

1. Principe de fonctionnement et suivi post-implant

a) Fonctionnement de l'implant cochléaire

Le nombre d'électrodes de l'implant varie de 12 à 22 selon les marques, mais leur position dans la cochlée respecte toujours la tonotopie cochléaire sur une étendue

fréquentielle d'environ 100-200 Hz à 8000 Hz, avec quelques différences d'un système à l'autre.

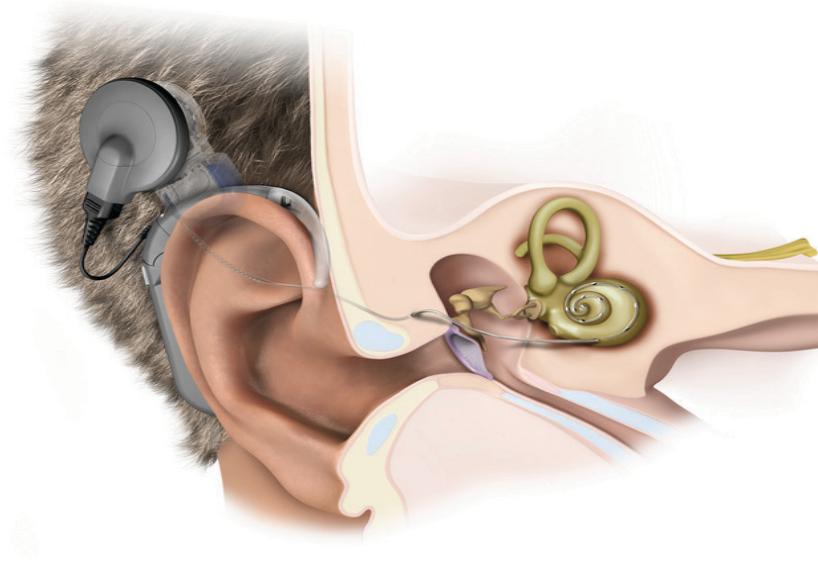


Figure 45 : L'implant cochléaire dans le système auditif. Document fourni avec courtoisie par la Société Med-el®.

Le fonctionnement de l'implant cochléaire suit plusieurs étapes successives :

- 1 : Les sons sont captés par le microphone situé sur le contour d'oreille et transmis au processeur vocal
- 2 : Le processeur vocal filtre les sons et les convertit dans un code d'excitation nerveuse
- 3 : Ces informations sont envoyées à l'antenne (fixée par aimantation en regard de l'implant) qui les transmet à travers la peau par radiofréquence
- 4 : L'implant interne réceptionne les ondes radio, les décode, puis adresse les impulsions électriques correspondantes au faisceau d'électrodes implanté dans la cochlée
- 5 : Les électrodes implantées dans l'oreille interne stimulent les fibres du nerf auditif en respectant la répartition fréquentielle de la cochlée (tonotopie)
- 6 : Le nerf auditif transmet ces impulsions nerveuses aux aires auditives du cerveau qui les interprète comme des sons.

Il existe quatre fabricants d'implants à travers le monde : Advanced Bionics®, Cochlear®, Med-El® et Neurelec-OticonMedical®. A notre connaissance, aucune étude n'a pu montrer de différence significative entre les systèmes proposés par les différents fabricants.

Les stratégies de codage

La stratégie de codage est l'ensemble de règles et de procédés permettant de convertir le signal d'entrée acoustique en signaux électriques de stimulation. Elle a pour but de transmettre le plus d'informations possible au nerf auditif. Traditionnellement, deux types de stratégies de codage sont distingués : celles qui privilégient l'information temporelle et celles qui privilégient l'information spectrale. Comme nous allons le voir, cette distinction est en réalité historique dans la mesure où les stratégies actuelles ont pour objectif de transmettre le mieux possible les deux types d'information. Les tout premiers implants cochléaires n'étaient composés que d'une seule électrode. On comprend aisément que les informations spectrales n'aient pas pu être précisément transmises. Un faisceau de plusieurs électrodes a ensuite été créé afin que chacune d'entre-elles puisse délivrer une information spécifique en fonction de sa place dans la cochlée. A la fin des années 70, les systèmes multicanaux ont été introduits avec des stratégies dites d'extraction de formants : F_0/F_2 tout d'abord, puis au début des années 80 la stratégie $F_0/F_1/F_2$ a été introduite (Drennan, 2014). L'ajout des informations liées au F_1 a permis de considérablement améliorer la compréhension de la parole pour les mots et les phrases. Cependant, les stratégies n'incorporaient pas encore les informations de hautes fréquences nécessaires pour l'identification de certaines consonnes (Blamey et al., 1985, anglais). À la fin des années 80, la stratégie MPEAK a proposé d'utiliser F_0/F_1 et F_2 en implémentant des informations de hautes fréquences afin d'améliorer le codage des consonnes. Les performances s'améliorèrent encore nettement. Cependant, notamment en milieu bruyant, les processeurs faisaient encore beaucoup d'erreurs de détection de la fréquence fondamentale et des fréquences des formants. Puis la stratégie CIS (Continuous Interlaved Sampling) fut décrite, en 1988, afin de contourner le problème d'interaction électrique générée par la stimulation simultanée de l'ensemble des électrodes. La stratégie CIS (actuellement utilisée par Med-el®) utilise une stimulation séquentielle, c'est-à-dire qu'une seule électrode est stimulée à la fois mais de façon très rapide, de 900 à 2400 fois par seconde, voire davantage avec les systèmes les plus récents (stratégie FS4). Son originalité est qu'elle ne transmet pas de façon dominante l'information spectrale mais donne plutôt un bon profil de la structure temporelle. La stratégie « n-of-m » a ensuite été développée. Au lieu d'une seule électrode, ce sont plusieurs électrodes du faisceau représentant les pics fréquentiels de signal entrant qui sont activées à un instant T. Les enveloppes temporelles extraites des différentes bandes de fréquences sont analysées pour identifier les n enveloppes ayant la plus forte amplitude parmi les m canaux à stimuler. Par exemple, la stratégie SPEAK,

sélectionne, à chaque cycle de stimulation, les 6 canaux ayant le signal d'entrée le plus intense sur les 20 canaux disponibles. Donc $n=6$ canaux saillants différents parmi les $m=20$ canaux disponibles sont activés, pour chaque cycle, environ 250 fois par seconde (vitesse de stimulation : 250 Hertz). Cette stratégie « n-of-m », basée sur l'extraction des pics spectraux, favorisant la représentation fréquentielle a permis une meilleure reconnaissance de la parole que l'approche consistant à extraire des indices acoustiques de la parole ($F_0/F_1/F_2$ et consonnes pour MPEAK par exemple), qui a finalement été abandonnée. Puis la stratégie ACE (Advanced Combination Encoder) a été développée (Cochlear®), pour 20 (m) puis désormais 22 (m) canaux, elle propose un nombre de maxima (n) variant de 6 à 14 et permet désormais, du moins théoriquement, d'augmenter la vitesse de stimulation de 250 Hertz à 900, 1200 voire 3600 Hertz dans le but d'ajouter un codage des informations temporelles. Globalement, on sait que l'implant cochléaire transmet des informations d'enveloppe de façon satisfaisante mais échoue à transmettre des informations de structure temporelle fine (TFS pour « Temporal Fine Structure »). Un des enjeux des stratégies de codage actuelles est donc d'améliorer la transmission des informations de structure temporelle fine afin d'améliorer la compréhension de la parole en environnement bruyant et l'écoute de la musique.

b) Réglages et Rééducation

(1) Les réglages du processeur

La programmation du processeur est un acte précis, approprié et personnalisé à chaque patient (Shapiro et Bradham, 2012). Il est fonction de la disparité neurosensorielle des patients (nombre de fibres du nerf auditif utilisables), de leur histoire auditive et des particularités anatomiques et physiologiques. Il existe un grand nombre de paramètres d'ajustement dont beaucoup interagissent. Les méthodes de réglage ont récemment fait l'objet d'une enquête internationale (Vaerenberg et al., 2014 ; Borel et al., 2014). Chez l'adulte, la méthode dite « comportementale », impliquant que le patient détermine ses seuils de perception et de confort à l'aide d'une échelle visuelle de croissance en sonie, est la plus fréquente. Cependant, depuis quelques années, une méthode de réglage automatisée basée sur les résultats à des tests psychoacoustiques (notamment le score de discrimination de phonèmes) a été développée (FOX®, Fitting Outcome Expert) et ouvre de nouvelles perspectives pour le réglage des implants cochléaires (Govaerts et al., 2010 ; Battmer et al., 2014; Amar et al., 2014).

(2) *La rééducation orthophonique post-implantation*

La plasticité cérébrale et la mémoire auditive jouent un rôle important dans l'apprentissage de l'interprétation des impulsions nerveuses délivrées par l'implant. Afin de développer la compréhension de la parole, une rééducation auditive post-implantation est proposée par un orthophoniste (Dumont, 2008). Cette prise en charge orthophonique de l'adulte sourd est adaptée au profil du patient, et consiste à optimiser sa compréhension de la parole, en lui proposant des situations faisant croître la difficulté des tâches perceptives, sur du matériel verbal ou non verbal varié, dans des contextes et des situations de communication divers et le tout en ajoutant éventuellement des tâches langagières ou cognitives interférentes. Dans le cas précis de la rééducation post-implant, l'accent, du moins dans les premiers temps, est mis sur la perception « implant seul », prothèse controlatérale éteinte et sans accès à la lecture labiale (lèvres cachées). Une échelle de difficulté progressive des tâches perceptives proposées comprend la détection (son perçu/non perçu), la discrimination (deux stimuli sont-ils identiques ou différents ?), l'identification au sein d'une liste fermée parmi un nombre fini de stimuli, puis en liste semi-ouverte sur un thème prédéfini et enfin en liste ouverte sans indiciage sur le stimulus qui va être proposé (Monguillot et Bertrand, 2005). Dans le cas de l'adulte devenu sourd implanté, c'est l'identification qui constitue le plus souvent l'étape de départ, avec un passage le plus rapide possible vers des exercices de reconnaissance en liste ouverte. La tâche de discrimination n'est a priori proposée que ponctuellement pour travailler des stimuli précis, identifiés comme posant des problèmes spécifiques. Les fonctions cognitives sont également stimulées dans le cadre de toute prise en charge de l'adulte sourd appareillé ou implanté (Ambert-Dahan, 2011) et la rééducation est proposée aussi bien dans le silence, que dans le bruit ou au téléphone (Borel et de Bergh, 2013). Plutôt qu'une « méthode » formalisée de rééducation post-implant, il existe différents axes rééducatifs pour lesquels chaque orthophoniste développera des exercices adaptés au profil et aux difficultés de l'adulte implanté cochléaire. A notre connaissance, seuls Dupont et Lejeune (2010) ont proposé dans leur ouvrage *Rééducation de la boucle audio-phonatoire chez les adultes sourds porteurs d'un implant cochléaire* une méthode analytique, portant sur le travail de chaque phonème. Concernant les voyelles nasales, qui font l'objet dans la présente étude d'une attention particulière, voici ce que les auteurs, belges, proposent sur la base de leur expérience clinique :

« La **voyelle [ã]** est une voyelle nasale ouverte, non arrondie. Des confusions sont possibles en raison de sa proximité avec les autres voyelles nasales [ẽ] et [õ] et avec sa correspondante orale [a]. En outre, son formant buccal est proche de [ɔ] et [o]. C'est la voyelle nasale la mieux perçue par les implantés cochléaires. Elle est principalement confondue avec les voyelles [a], [õ], [ẽ] et [ɔ]. Il y a une proximité acoustique entre [a], [ã] et [ɔ]. Leur formants sont assez proches : F₂ entre 1000 et 1200 Hertz et F₁ entre 600 et 800 Hertz. Ceci explique les confusions auditives faites par les implantés cochléaires. »

« La **voyelle [ẽ]** peut poser quelques difficultés d'identification pour les devenus sourds implantés cochléaires, surtout en début de réhabilitation auditive. Cette voyelle est principalement confondue avec les voyelles [a], [ã] et [õ]. »

« Pour la **voyelle [œ]**, des confusions sont possibles avec [ã], [õ], [ẽ], la voyelle postérieure [a], [œ] et [ɔ]. C'est la voyelle la moins bien perçue par les implantés cochléaires. »

« Pour la **voyelle [õ]**, des confusions sont possibles avec [ã] [ẽ] [œ] [ɔ], [u] et [o]. C'est une des voyelles les plus difficiles à identifier pour les adultes devenus sourds implantés cochléaires. »

Nous verrons dans le Chapitre 4 si les confusions obtenues auprès des adultes devenus sourds implantés cochléaires pour les voyelles nasales du français septentrional sont identiques à celles proposées par Dupont et Lejeune (2010) pour le français de Belgique.

c) **L'amélioration de la compréhension de la parole et de la communication avec l'implant cochléaire**

La pratique clinique et de nombreuses études menées à ce sujet (Blamey et al., 1996 et 2012) montrent qu'après l'implantation, les personnes sont plus à l'aise pour la communication quotidienne : les conversations en face-à-face et en petit groupe sont largement améliorées, la reconnaissance de mots et de phrases hors contexte, sans lecture labiale est le plus souvent possible. Une étude rétrospective (1990-2003) menée par l'équipe du Pr. O. Sterkers auprès de 118 personnes implantées a permis de montrer que l'implant cochléaire apporte un bénéfice important dès le sixième mois post-opératoire par comparaison

aux performances avant l'implantation, et ceci quels que soient l'âge du sujet, l'étiologie de la surdité, la qualité de la lecture labiale avant l'implantation et la stratégie de codage de l'implant. Les complications post-opératoires graves sont très rares (Mosnier et al., 2006). L'amélioration de la compréhension de la parole est significative dès les 3 à 6 premiers mois post-activation et peut se poursuivre au-delà du 12^{ème} mois (Mosnier et al., 2006). Depuis, les indications de l'implantation cochléaire ont évolué, et il est de plus en plus fréquent d'implanter des personnes ayant conservé une audition controlatérale fonctionnelle. Ces personnes voient également leur compréhension de la parole s'améliorer, notamment dans un environnement bruyant (Marx et al., 2011). Pour toutes les personnes implantées, la compréhension et la communication peuvent continuer à s'améliorer même après plusieurs années, que ce soit en accédant à une innovation technologique par le renouvellement du processeur externe (Mosnier et al., 2014) ou par une implantation controlatérale qui permet une meilleure compréhension de la parole dans le bruit (Mosnier et al., 2008 ; Coez et al. 2011). Il est cependant fréquent d'observer une variabilité des performances interindividuelles (Lazard et al., 2010a) pour laquelle plusieurs auteurs ont tenté de mettre en évidence des facteurs prédictifs.

d) Les facteurs prédictifs

Peter Blamey a publié en 1996 une étude rétrospective analysant statistiquement les résultats de 808 adultes sourds implantés cochléaires. Les facteurs prédictifs de la réussite de l'implantation inclus dans ce modèle (en ordre d'importance relative) étaient la durée de la surdité sévère à profonde (plus elle est longue plus le pronostic est péjoratif), l'âge au moment de la survenue de la surdité et au moment de l'implantation (les sujets de plus de 60 ans ont de moins bons résultats), la durée de l'expérience avec l'implant (les performances s'améliorent avec le temps) et l'étiologie. En 2012, Blamey a reproduit cette analyse avec les données de 2251 patients adultes devenus sourds, issus de 15 centres implantateurs à travers le monde. L'importance de chaque facteur a été confirmée. Cependant, l'importance relative de chacun d'entre-eux est un peu différente. Les effets de la durée de l'expérience avec l'implant et de l'âge au moment de la survenue de la surdité sont un peu majorés tandis que l'importance de la durée de surdité profonde avant l'implant semble s'être un peu minorée. Par ailleurs, l'effet de l'âge à l'implantation est retrouvé mais alors qu'il concernait les patients de plus de 60 ans en 1996, la frontière s'est décalée, en 2012, aux sujets de plus de 70 ans. Cependant, d'autres auteurs ne retrouvent pas de différences de performances entre les sujets les plus âgés et les

autres (Sterkers et al., 2004). Par ailleurs, chez les sujets âgés, l'attention est actuellement pointée sur le bénéfice de la réhabilitation auditive par l'implant cochléaire non seulement pour l'audition mais également pour la cognition, la qualité de vie et l'autonomie (Clark et al., 2012).

Les sujets avec au moins 85% des électrodes du porte-électrodes activées comprennent mieux la parole que ceux ayant plus de 15% des électrodes désactivées (Lazard et al., 2012).

2. La perception des voyelles avec l'implant cochléaire

Ces trente dernières années, le thème de la perception des voyelles par les adultes implantés cochléaires a donné lieu à de nombreuses publications. La reconnaissance de voyelles a beaucoup intéressé lors des premières années de développement de l'implant cochléaire, en tant que support verbal simple et bien contrôlé permettant de mieux comprendre comment les informations acoustiques et phonétiques étaient transmises par l'implant cochléaire au patient.

a) **Quelles sont les voyelles les mieux reconnues ?**

Le Tableau 24 présente des études ayant porté sur l'identification de voyelles dans différentes langues.

Auteurs, année et nombre d'auditeurs	Langue	Résultats	Commentaires
Blamey et al. (1987) n=3	anglais	[i] et [a] identifié 44/44 et 42/44 ; [u] identifié 29/44	Contexte [hVd]
Rodvik et al. (2008) n=5	norvégien	[i:] et [u:] correctement identifiés [ɑ] et [æ] confondus	Contexte [bVb]
Serniclaes et al. (1996) Méthode Transclas	français	[i] (85%) > [a, u, y] (83%) > [ã, e] (72%) > [o] (65%) > [ê] (55%) > [õ] (29%)	Contexte [sV] Stratégie Mel
Välimaa et al. (2002) n=12	finnois	[i, u, æ] > [ø, e, y]	Syllabes de types CV, CVV et VC avec 8 voyelles et 13 consonnes différentes.
Borel (2007) n=14	français	[i] (95%) > [a] (76%) > [ɛ] (45%) > [o] (36%) > [õ] (32%) > [u] (30%) > [y] (27%) > [ɔ, ã] (23%) > [ø] (21%) > [ê] (12%)	Contexte [bVb] et [mVm]. Le contexte [mVm] est défavorisant pour l'identification des voyelles nasales. Les syllabes correspondant à des mots sont mieux comprises (« bombe » vs. « bamb »)

Tableau 24 : Principaux résultats d'études ayant porté sur la perception des voyelles par les adultes implantés cochléaires.

Välimaa et al. (2002) signalent des difficultés à identifier les voyelles antérieures arrondies, ce qui est confirmé en français (Borel, 2007, en contexte CVC).

b) **Que nous apprennent les confusions ?**

Les confusions s'orientent souvent vers des voyelles avec un F_1 ou F_2 proche (Dorman et al., 1988, sur l'anglais). En finnois, à trois mois post-implant, les confusions de voyelles s'orientent vers les voyelles avec un F_1 ou un F_2 supérieur, ce qui met en évidence, d'après Välimaa et al. (2002), une difficulté pour la personne implantée cochléaire à s'adapter au

décalage fréquentiel entre la stimulation acoustique initiale et la fréquence caractéristique des neurones stimulés. Cependant, Välimaa et al. n'ont pas étudié spécifiquement ce paramètre en mesurant la profondeur d'insertion.

c) Sur quelles informations acoustiques les implantés cochléaires s'appuient-ils pour identifier les voyelles ?

Une des premières études recensées, celle de Dent et al. (1982), s'intéressait à la discrimination de paires minimales par des utilisateurs d'implant monoélectrode. Même avec une seule électrode, les voyelles fermées étaient discriminables des voyelles ouvertes. Cependant, rapidement, d'autres auteurs (Tong et al., 1988, anglais) ont conclu que pour une meilleure identification des voyelles, il était nécessaire que F_1 , F_2 et F_3 soient codés par les processeurs des implants cochléaires. Comme attendu, même avec les systèmes les plus récents, les voyelles acoustiquement proches sont plus difficiles à discriminer que les voyelles acoustiquement éloignées (Hay-McCutcheon et al., 2014, sur l'anglais). Les adultes implantés cochléaires identifient les voyelles sur la base des différences entre pics spectraux aussi bien que sur la place exacte de chaque pic (Laback et al., 2004, sur des voyelles allemandes synthétisées).

En anglais, F_1 revient dans plusieurs études comme étant le formant sur lequel les auditeurs implantés cochléaires s'appuient préférentiellement (Tyler, 1992, anglais ; Van Wieringen et Wouters, 1999, néerlandais ; Harnsberger et al., 2001, anglais, Xu et al., 2005, anglais). Tyler et al. (1992) ont proposé une identification de 9 voyelles anglaises à 10 adultes implantés cochléaires, dont la moitié présentant une surdité ayant débuté dans l'enfance. Une analyse des informations transmises selon la méthode de Miller et Nicely (1955) a permis, à partir des confusions de déterminer la quantité d'information perçue (IT pour Information Transmission) pour chaque paramètre acoustique testé (F_0 , F_1 , F_2 , F_3 et la durée). Une seconde analyse des informations transmises, dite SINFA (Wang et Bilger, 1973) est séquentielle et permet de classer les paramètres acoustiques par ordre d'importance pour l'identification des voyelles. L'analyse SINFA suggère que les informations acoustiques liées au F_1 et à la durée de la voyelle représenteraient 80% des informations transmises par l'implant et utilisées par la personne implantée pour l'identification de la voyelle. Les informations liées aux F_0 et F_2 ne constitueraient que 8% et l'information liée et F_3 serait redondante. Cependant, cette étude, aujourd'hui ancienne portait sur un système ne comprenant que 4 canaux (100-700 Hz, 700-

1500 Hz, 1500-2500 Hz et 2500-7000 Hz). De plus, comme nous l'avons vu, la durée n'est pas un trait distinctif en anglais. Xu et al. (2005, anglais) ont soumis 7 auditeurs normo-entendants à l'identification de 12 voyelles en contexte [hVd] et 20 consonnes vocodées en faisant covarier les informations spectrales de 1 à 16 canaux et les informations temporelles (vitesse de stimulation de 1 à 512 Hertz), sur un intervalle de fréquences de 150 à 5500 Hertz. L'analyse des confusions, selon la méthode des informations transmises IT (Miller et Nicely, 1955) a porté sur la transmission des indices acoustiques temporels (permettant de distinguer 4 voyelles brèves de 8 voyelles longues, bien que cet indice ne soit pas distinctif en anglais) et spectraux (informations liées au F_1 ou au F_2). En moyenne, pour l'ensemble des configurations de résolutions spectrales et temporelles, l'indice acoustique le mieux perçu est la durée de la voyelle, suivi du F_1 puis du F_2 (Xu et al., 2005). Le taux de reconnaissance d'une voyelle est lié à la JND¹³ du F_1 (Harnsberger et al., 2001, anglais). Les électrodes apicales (qui sont préférentiellement dans la zone de F_0 et F_1) ont une influence plus importante sur l'identification des voyelles (Fu et Shannon, 1999, anglais). A l'inverse, selon Chang (2006, anglais), les adultes implantés cochléaires utilisent davantage les informations portées par la différence entre F_2 et F_1 (antériorité/postériorité) que de hauteur (F_1), qui par contre sont davantage utilisées par les normo-entendants (Chang, 2006 anglais). L'élargissement de la bande passante de F_1 affecte la reconnaissance de voyelles par les implantés cochléaires tandis que l'élargissement de la bande passante de F_2 ne modifie pas l'identification des voyelles. Les stimuli avec un F_1 étroit sont mieux reconnus que ceux avec une bande large car d'après Hawks et al. (1997), le F_1 étroit active l'électrode cible par rapport aux électrodes adjacentes. Quand on rétrécit la bande passante de F_2 , la reconnaissance de certaines voyelles s'améliore, celle d'autres voyelles se dégrade (Hawks et al., 1997, anglais).

Plusieurs auteurs ont tenté de déterminer si tous les auditeurs implantés cochléaires avaient les mêmes stratégies d'écoute. Certains auditeurs implantés cochléaires s'appuieraient trop sur les informations de basses fréquences et négligeraient les informations de hautes fréquences (Dorman et Loizou, 1997 ; Van Wieringen et Wouters, 1999). En effet, si d'après Van Wieringen et Wouters (1999, Néerlandais, sur 3 adultes prélinguaux et 22 postlinguaux) tous les sujets utilisent l'indice acoustique de durée et de F_1 , les plus faibles auditeurs implantés s'appuient davantage sur les informations liées à la durée tandis que les meilleurs auditeurs sont davantage capables d'utiliser en plus des informations liées aux F_2 et F_3 . La

¹³JND : Just Noticeable Difference, plus petite différence perçue

différence entre les auditeurs « faibles » et « forts » est donc plus qualitative que quantitative selon Van Wieringen et Wouters (1999). Selon Munson et al. (2003, anglais), les auditeurs performants utiliseraient l'ensemble des informations des trois premiers formants tandis que les auditeurs les plus faibles n'utiliseraient que les informations portées par le F_2 au dépens des informations liées au F_1 et au F_3 . En finnois (Välimaa et al., 2010), à trois mois post-implant, les auditeurs les plus forts, identifient significativement mieux les voyelles cardinales /i, æ, u, a/ que les auditeurs les plus faibles, dont les confusions sont plus fréquentes et moins reproductibles que celles des meilleurs auditeurs.

d) **Quels facteurs influencent la perception des voyelles avec l'implant cochléaire ?**

Comme nous l'avons vu pour le résultat général de l'implant, il y a également une forte variabilité interindividuelle pour l'identification des voyelles (Gnansia et al. 2013 ; Goldsworthy et al. 2013). Plusieurs auteurs ont donc cherché des facteurs prédictifs de la bonne reconnaissance des voyelles. Les voyelles naturelles sont mieux reconnues que les voyelles de synthèse (Blamey et Clark, 1990). Les voyelles produites par les femmes sont moins bien reconnues que celles produites par les hommes selon Loizou et al. (1998, anglais) mais c'est l'inverse pour Serniclaes et al. (1998, par une évaluation automatique des performances de l'implant cochléaire « Transclas ») et il n'y a pas de différence entre voix d'homme et de femme chez Xu et al. (2005, anglais, parole vocodée). La reconnaissance de voyelles est moins bonne en contexte multi locuteurs que mono locuteur (Chang et Fu, 2006). Il y a un effet du sens, les voyelles intégrées dans des syllabes correspondant à des mots existants sont mieux identifiées (Välimaa et al., 2002 ; Borel, 2007).

(1) ***Le délai post-implant***

Les performances en identification de voyelles s'améliorent au fil du temps (Ruffin et al., 2007, anglais ; Välimaa et al., 2011, finnois).

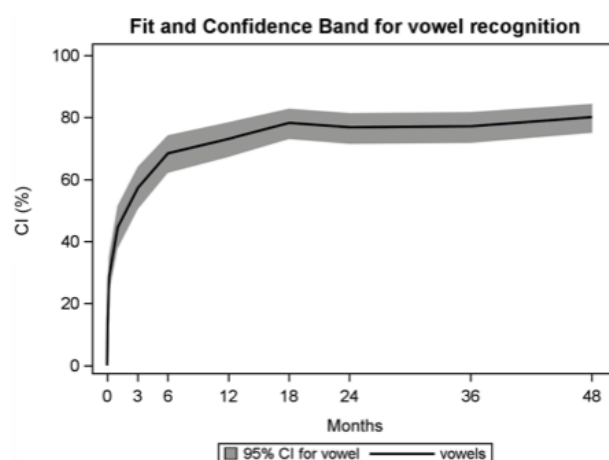


Figure 46 : Evolution de l'identification de voyelles de 4 jours à 4 ans post-activation. Par rapport à l'évaluation pré-implant, l'amélioration est significative dès les quatre premiers jours post-activation ainsi qu'entre l'évaluation post-4 jours et post 1 mois, entre post-1 mois et post-6 mois et entre post-6 mois et post-4 ans. Un plateau s'amorce à partir du 6^{ème} mois, même si l'amélioration entre le 6^{ème} mois et le 48^{ème} mois est significative. Tiré de Välimaa et al. (2011, finnois).

(2) *La durée de surdité profonde*

Quatre ans après l'implantation, l'identification de voyelles est significativement meilleure chez les patients dont la durée de surdité profonde est inférieure à 10 ans (Välimaa et al., 2011), ce qui rejoint les résultats généraux obtenus au sujet des facteurs prédictifs de la réussite de l'implant (Blamey et al., 1996 et 2012).

(3) *Le temps d'adaptation*

Plusieurs études suggèrent que l'espace perceptif vocalique nécessite du temps d'adaptation après un changement de traitement du signal. Pelizzzone et al. (1999) ont testé un changement de stratégie de codage et de nombre de canaux chez 12 patients (Ineraid, 4 canaux vs. CIS 6 canaux). Le suivi longitudinal pendant un an a montré que si, dès le changement, la stratégie CIS permettait d'améliorer l'identification des consonnes, il a fallu attendre 6 mois pour que le taux d'identification des voyelles ne s'améliore. Dorman et al. (1997) ont proposé à 8 adultes implantés, utilisateurs du système Ineraid 6 canaux, de changer de stratégie pour la CIS. Immédiatement après le changement, la reconnaissance de voyelles ne s'améliore pas. Par contre, un mois après le changement, elle est améliorée.

(4) Les compétences psychoacoustiques

Il existe une corrélation entre le seuil moyen de détection de modulations d'amplitude¹⁴ et l'identification de phonèmes dans le silence (Fu, 2002, anglais ; Cazals, 1994, français ; Gnansia et al., 2013, français).

(5) La stratégie de codage et les paramètres de réglage

Plusieurs études ont utilisé, entre autres, le score d'identification de voyelles pour comparer deux stratégies de codage. Très souvent, il n'a pas été observé de différence d'identification de voyelles selon le système ou la stratégie de codage de l'implant (Higgins et al., 2002 ; Loizou et al., 2003) ou alors des différences favorisant tantôt une stratégie tantôt l'autre (Skinner et al., 1996). Serniclaes et al. (1996, français) ont proposé une comparaison de deux répartitions fréquentielles (Mel¹⁵ et Linéaire, stratégies utilisées par le système MXM[®], désormais nommé Neurelec-OticonMedical[®]) en utilisant un système de reconnaissance de voyelles automatisé, « Transclas » fonctionnant sur la base d'une analyse discriminante statistique (Serniclaes et al., 2002). Le pourcentage de classification correcte de voyelles par la machine est plus élevé pour la répartition fréquentielle Mel. Cette supériorité serait due à la concentration plus importante de canaux fréquentiels sous les 4000 Hz. Serniclaes et al. (1998, français) ont ensuite évalué, toujours au moyen du système transclas, l'effet d'une augmentation de la densité des canaux dans les basses fréquences sur l'identification automatique de 10 voyelles du système vocalique minimal (dont les trois nasales) prononcées par 10 femmes et 10 hommes. Alors que la stratégie Mel précédemment citée applique une répartition linéaire jusqu'à 1000 Hertz et logarithmique ensuite (de 1000 à 8000 Hertz), Serniclaes et al. (1998) proposent une stratégie MMHS avec une extension de la répartition fréquentielle linéaire dans les basses fréquences (jusqu'à 3000 Hertz), permettant d'allouer

¹⁴ *Il s'agit de détecter des battements provoqués par la présentation simultanée de deux fréquences proches. Par exemple, deux sons purs de 1000 et 1010 Hertz émis simultanément produiront des variations d'amplitude d'une fréquence de 10 Hz aisément perceptibles comme des modulations de sonie à ce rythme de 10 Hertz.*

¹⁵ *L'échelle de Mel est une échelle psychoacoustique de fréquences*

d'avantage de canaux à la zone fréquentielle des formants (12 canaux sur 15 sous 3000 Hertz pour la stratégie MMHS, 10/15 pour la répartition Mel et 5/10 pour une répartition linéaire). La stratégie MMHS propose également un gain de 6 dB/octave au-dessus de 4000 Hertz, tandis qu'aucun renforcement, d'aucune zone fréquentielle n'est proposé par les stratégies Mel et Linéaire. Ce renforcement d'intensité est censé mimer les rehaussements spectraux appliqués par l'oreille externe et l'oreille moyenne et compenser la perte du signal de parole de 6dB/octave. Une évaluation automatique, basée sur une analyse discriminante statistique permet a permis de déterminer la quantité d'informations spectrales correctement transmises par chacune des répartitions fréquentielles, pour chaque voyelle et pour chaque genre de locuteur. Les résultats suggèrent que la stratégie MMHS a un léger effet négatif quand tous les 15 canaux sont actifs mais un effet positif dans des conditions plus difficiles, lorsque plusieurs canaux sont désactivés. Fourakis et al. (2004, anglais) ont comparé deux répartitions fréquentielles différentes chez huit auditeurs implantés cochléaires : la répartition standard et une autre répartition allouant une électrode de plus dans la région des formants. L'identification de voyelles en liste fermée et la discrimination de formants ont été améliorées par cette répartition modifiée, tandis qu'il n'y avait pas de différence pour la reconnaissance de mots monosyllabiques ou de consonnes.

Svirsky et al. (2002) ont développé le modèle MPI (multidimensional phoneme identification), un modèle composé d'algorithmes permettant de prédire les confusions de consonnes et de voyelles faites par les auditeurs implantés cochléaires. Ce modèle pouvait par exemple comparer l'identification de voyelles avec les stratégies de codage F_0 - F_2 , F_0 - F_1 - F_2 , F_0 - F_1 - F_2 - F_3 . D'après les auteurs, le MPI est un bon modèle pour faire la part des choses entre ce qui est dû à discrimination psychophysique et à l'identification des catégories. Cependant, son utilisation ne semble pas s'être généralisée depuis.

(6) *L'âge et les facteurs cognitifs*

L'âge chronologique associé aux capacités cognitives (mémoire verbale, vitesse de traitement) contribuerait à l'habileté à reconnaître des phonèmes spectralement dégradés. Il y notamment aurait davantage de variabilité des résultats chez les sujets âgés que chez les sujets jeunes (Schwartz et al., 2008, voyelles vocodées, anglais). Hay-McCutcheon et al. (2014, anglais) trouvent également chez 40 sujets implantés un effet de l'âge pour l'identification de voyelles en liste fermée, chaque année supplémentaire, correspondant à une diminution du

score de -0,47%. Les auteurs mettent en avant une éventuelle dégradation des stratégies de traitement temporel de l'information et de récupération des représentations phonologiques stockées dans la mémoire à long terme. Lazard et al. (2010b) ont exploré en imagerie fonctionnelle la mémoire phonologique chez des adultes présentant une surdité postlinguale, candidats à une implantation cochléaire. Chez ces personnes présentant une surdité profonde, les auteurs ont utilisé le langage écrit comme mode d'évaluation, en proposant des tâches de jugements de rime à partir de la lecture de mots ou de pseudo-mots permettant de dissocier la voie ventrale (route directe sémantique) impliquée dans la reconnaissance globale et l'accès au sens de la voie dorsale (route indirecte phonologique) responsable de la conversion graphème-phonème. Lazard et al. (2010b) s'appuient sur le principe que la conversion des lettres en segmentation phonologique repose sur des conversions auditives internes. En étudiant les stratégies de lecture sur des tâches de jugement de rimes, ils souhaitent apprécier la mémoire phonologique, avec pour hypothèse d'une part que cette mémoire phonologique se dégrade avec la durée de la surdité et d'autre part qu'un bon maintien de celle-ci serait être un facteur prédictif d'un résultat satisfaisant avec l'implant cochléaire. Les résultats montrent que les performances phonologiques se détériorent effectivement avec l'augmentation de la durée de surdité, au profit de la voie sémantique et qu'elles sont corrélées avec la reconnaissance de la parole en post-implant.

En ce qui concerne la perception de la parole avec l'implant cochléaire, deux questions ont été abordées de façon plus précise. La première s'intéresse au décalage fréquentiel *basalshift* qu'il peut y avoir entre la fréquence de chaque canal que l'implant cochléaire doit coder et la fréquence caractéristique réellement stimulée au niveau du nerf auditif. La seconde question porte sur la résolution spectrale. Le nombre d'électrodes de l'implant est inférieur au nombre de filtres cochléaires. Quel est l'impact de cette dégradation de la résolution fréquentielle sur la reconnaissance de la parole et plus précisément des voyelles ?

La particularité des études menées pour répondre à ces questions est qu'une partie non négligeable d'entre-elles (et cela est précisé pour chaque citation) n'a pas été menée auprès de personnes implantées cochléaires mais auprès de sujets normo-entendants soumis à une simulation d'implant appelé vocodeur. Ce moyen permet de contrôler de façon précise les informations acoustiques transmises et de générer des configurations extrêmes (désactivation d'électrodes, décalage fréquentiel) qu'il serait tant techniquement qu'éthiquement difficile de proposer aux personnes implantées. Il paraît cependant délicat de transposer strictement ces

résultats obtenus auprès de sujets normo-entendants à la population des adultes implantés cochléaires et ceci pour au moins deux raisons: la première est que chez la personne implantée, les fibres nerveuses et les relais auditifs centraux ont été redessinés par la privation neurosensorielle parfois très ancienne. Les effets de cette privation sont difficiles à quantifier. S'ils suggèrent d'une part une difficulté supplémentaire pour les implantés cochléaires par rapport à la population normo-entendante en condition de simulation, on peut à l'inverse avancer que la personne implantée, a fortiori si l'implantation est ancienne, a bénéficié d'un apprentissage et d'une adaptation au long cours au traitement du signal de l'implant, ce qui lui donne une bonne avance sur l'auditeur normo-entendant qui se trouve, quant à lui, pour la première fois confronté à ce type de signal (Gilbert et Pisoni, 2013). Nous verrons cependant en quoi la comparaison des scores d'identification de voyelles obtenus auprès de normo-entendants en situation de simulation et d'implantés cochléaires permet, dans certains cas, de faire la part des choses entre les effets des limitations techniques de l'implant et ceux de la privation sensorielle antérieure à l'implantation. D'après Rosen et al. (1999), bien qu'on ne sache pas s'il est possible de s'adapter complètement à un décalage fréquentiel, certaines études ne laissant pas suffisamment de temps d'adaptation à l'auditeur surreprésentent l'effet de ce décalage fréquentiel en ne le testant qu'en phase aiguë.

e) **Le décalage fréquentiel**

Il existe une variabilité importante de la taille de la cochlée en fonction des individus. Bien qu'il y ait une différence moyenne de taille de cochlée entre les hommes et les femmes, la variabilité que l'on peut rencontrer même entre deux individus du même sexe est plus importante que la variabilité homme/femme (Escudé et al., 2006). Comme la taille de la cochlée influence l'angle d'insertion de l'électrode (Escudé et al., 2006, sur l'implant Nucleus contour advance, Figure 47), il semble important de tenir compte de cette variabilité. De plus, chaque fabricant d'implants cochléaires a développé des modèles de faisceaux d'électrodes de différentes longueurs, soit pour des raisons d'orientations techniques (éviter les interactions entre les électrodes en les espaçant par exemple afin d'utiliser une stimulation la plus rapide possible) soit pour s'adapter à différentes situations cliniques (conservation de l'audition résiduelle, malformations cochléaires...).

(1) Variabilité des profondeurs d'insertion

Ainsi la fréquence caractéristique du nerf auditif réellement stimulée par chaque électrode dépend à la fois de la taille de la cochlée et de la longueur de l'électrode. L'angle d'insertion exprimé en degré renseigne sur la tonie perçue par la personne implantée en lien avec la tonotopie cochléaire.

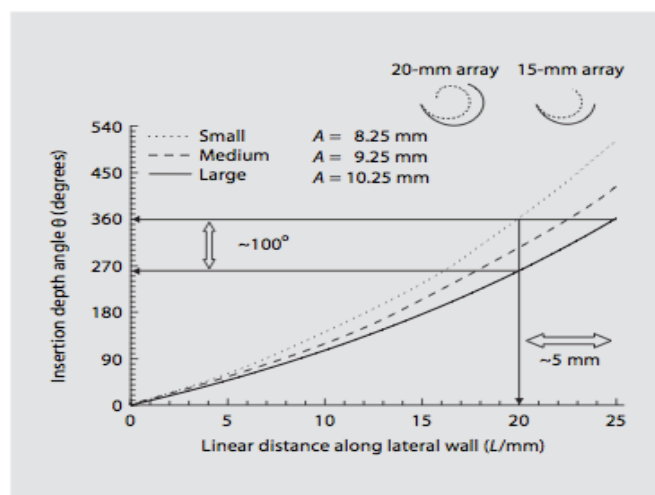


Figure 47 : Angle d'insertion, en degrés, pour une électrode de 20 mm en fonction de la taille de la cochlée. Pour une cochlée de petite taille (distance A = distance de la fenêtre ronde au mur latéral=8,25 mm), l'angle est d'environ 360 degrés tandis que pour une cochlée de grande taille (distance A=10,25mm) l'angle est de 260 degrés. Tiré de Escudé et al. (2006)

De nombreux auteurs ont travaillé sur les effets de ce décalage fréquentiel, la plupart du temps sur le *basalshift*, le décalage vers la partie la plus basale de la cochlée, donc vers les fréquences aiguës. Cependant, il est également possible de trouver dans certains cas des effets d'un décalage vers les fréquences graves.

(2) *Le décalage fréquentiel a-t-il un impact sur l'identification des voyelles ?*

L'effet théorique du *basalshift* est assez simple à comprendre et a été mis en évidence au moyen de vocodeurs auprès de sujets normo-entendants. Il est plus difficile à objectiver auprès d'auditeurs implantés cochléaires car le résultat général de l'implantation dépend de nombreux autres facteurs et isoler celui du décalage fréquentiel demande des analyses multivariées sur de larges populations.

Chez les normo-entendants soumis une simulation d'implant, l'identification des voyelles est plus sensible au décalage fréquentiel que celle des consonnes et des phrases car

même un décalage minime peut avoir un effet délétère (Dorman et al., 1997, anglais, vocodeurs chez des sujets normo-entendants).

Chez l'implanté cochléaire, Harnsberger et al. (2001, anglais), ont utilisé une méthode originale pour mettre en évidence les effets du décalage fréquentiel, la MOA ou *Method of adjustment*. Cette méthode part de l'image phonologique de la voyelle, par exemple le /i/ et demande à l'auditeur de sélectionner parmi plusieurs stimuli vocaliques synthétisés le plus prototypique du /i/. Ainsi Harnsberger et al. espèrent représenter l'espace perceptuel de l'auditeur et si l'auditeur choisit comme /i/ prototypique un stimulus avec F₁ et/ou un F₂ plus grave que ce qui est attendu, cela pourra être considéré comme un effet du décalage fréquentiel vers les aigus. Huit adultes implantés cochléaires et 43 normo-entendants ont participé à l'étude (Figure 48).

(a) *Espace perceptuel vocalique de 43 adultes normo-entendants anglophones d'après Harnsberger et al. (2001) :*

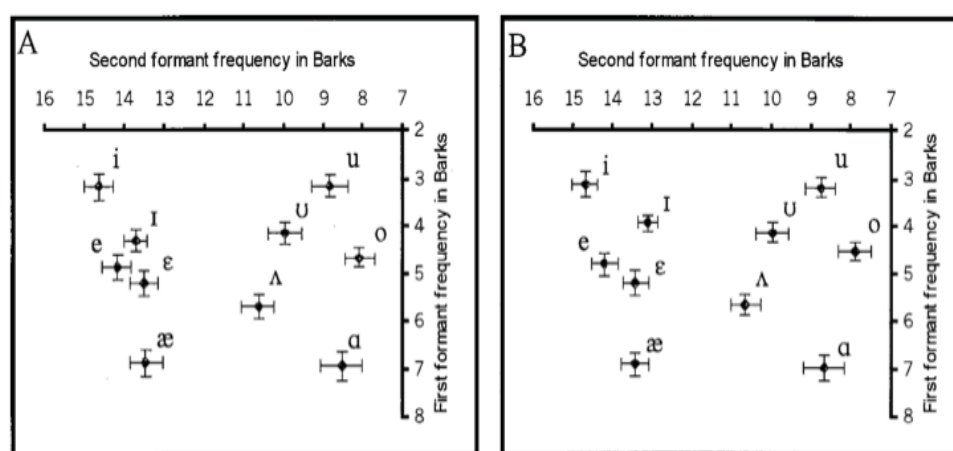


FIG. 1. The mean vowel space of normal-hearing listeners, calculated (a) using all of the ratings provided and (b) using only ratings of four or above.

Figure 48 : Espaces perceptuels selon *Method of adjustment* (MOA). Pour chaque voyelle cible, l'auditeur choisit l'exemplaire synthétique (parmi 330 voyelles synthétisées au total) qui lui semble le plus prototypique. Résultat pour la population de 43 normo-entendants anglophones. L'espace perceptif respecte l'espace acoustique tel que l'on peut l'observer sur un triangle vocalique de l'anglais. Tiré de Harnsberger et al. (2001).

(b) *Espace perceptuel vocalique de 8 adultes implantés cochléaires anglophones d'après Harnsberger et al. (2001) :*

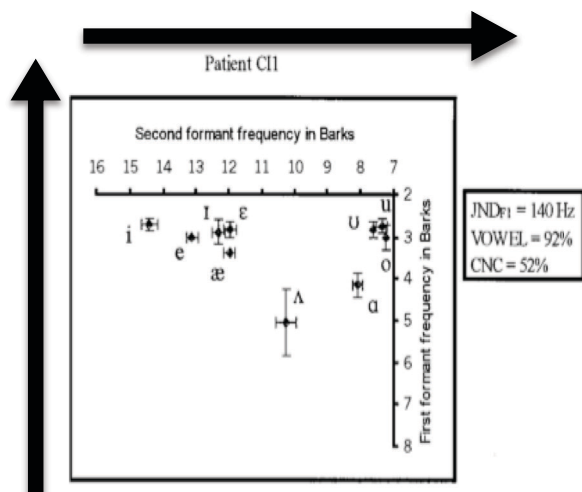


FIG. 3. The vowel space of patient CI1.

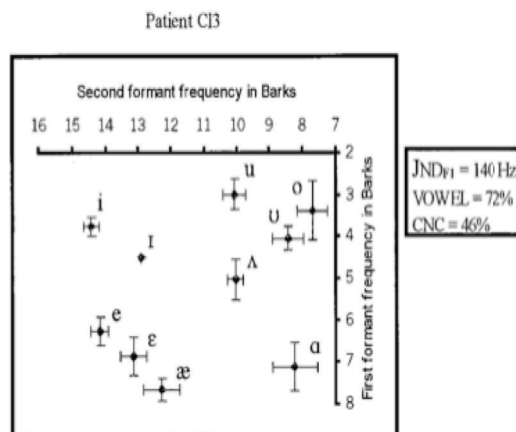


FIG. 5. The vowel space of patient CI3.

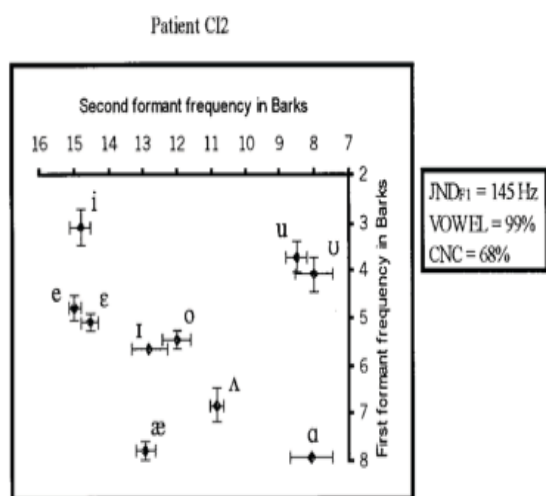


FIG. 4. The vowel space of patient CI2.

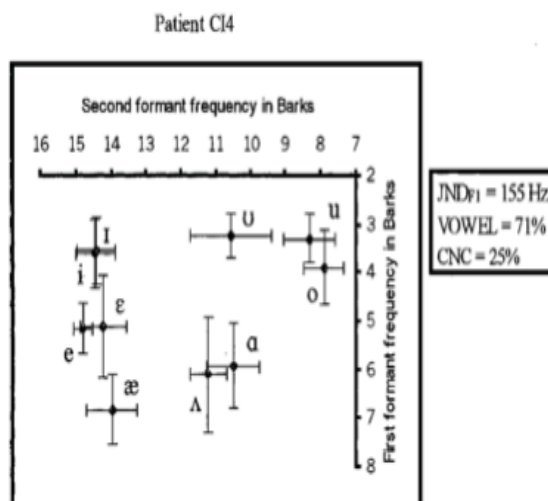


FIG. 6. The vowel space of patient CI4.

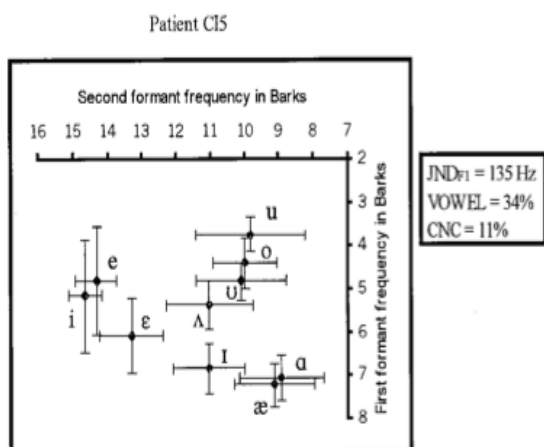


FIG. 7. The vowel space of patient CI5.

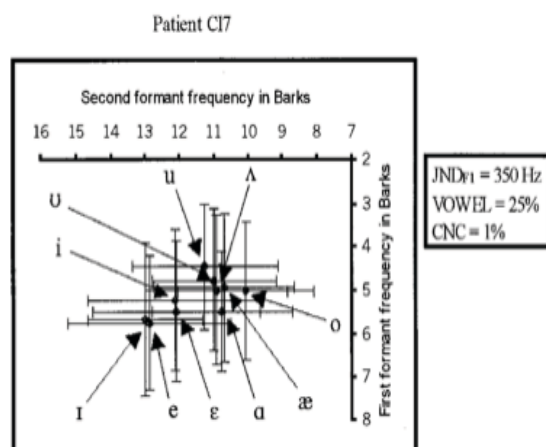


FIG. 9. The vowel space of patient CI7.

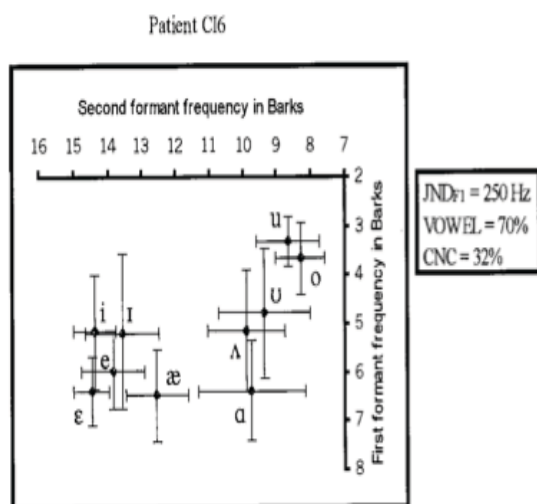


FIG. 8. The vowel space of patient CI6.

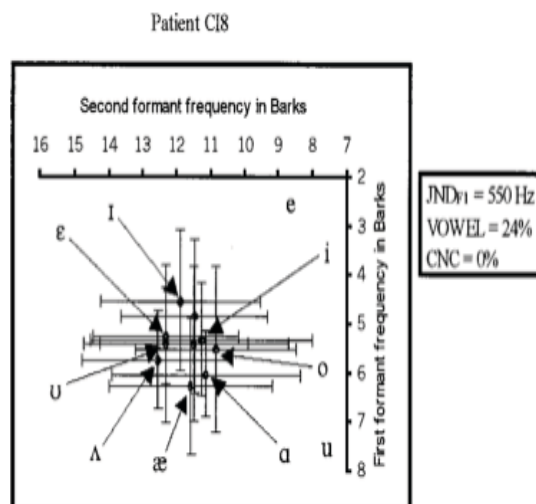


FIG. 10. The vowel space of patient CI8.

Figure 49 : Espaces perceptuels selon *Method of adjustment* (MOA). Pour chaque voyelle cible, l'auditeur choisit l'exemplaire synthétique (parmi 330 voyelles synthétisées au total) qui lui semble le plus prototypique. Résultats pour huit adultes implantés cochléaires (CI1 à CI8). Les flèches noires en CI1 indiquent le déplacement attendu de l'espace perceptuel en cas de *basalshift*. Tiré de Harnsberger et al. (2001).

Dans l'ensemble, les espaces vocaliques ne semblent pas être régis par les effets du décalage fréquentiel, hormis peut-être pour le sujet CI-1 (Figure 49). Bien que les espaces vocaliques des huit adultes implantés cochléaires ne soient pas identiques à ceux des 43 sujets normo-entendants, il n'est pas possible d'extraire une tendance commune car ils peuvent être soit plus dispersés (CI3), soit plus compacts (CI5), avec des places attendues ou non (par exemple, [o] pour CI2 est centralisé) et des zones de chevauchement entre phonèmes plus ou

moins importantes (CI6, CI7 et CI8). Cependant, dans l'étude d'Harnsberger et al. (2001), les adultes testés étaient implantés depuis plusieurs mois et il a été suggéré qu'ils s'étaient peut-être déjà habitués au décalage fréquentiel. Svirsky et al. ont donc décidé, en 2004, de reprendre la même méthode MOA chez 4 adultes implantés, 2 anglophones et 2 hispanophones (dont un présentant une surdité prélinguale) afin de suivre leur adaptation, dès l'activation de l'implant et jusqu'à 24 mois post-implant. Lors de l'activation, les espaces vocaliques sont effectivement anormaux mais ne vont toujours pas dans le sens d'un décalage fréquentiel. Les 3 sujets postlinguaux s'adaptent plus ou moins rapidement (l'un en 1 journée, l'autre en 1 mois, le troisième en 3 mois) tandis que le sujet prélingual a besoin de 2 ans pour que son espace perceptuel se normalise. Svirsky et al. (2004) expliquent donc les espaces perceptuels vocaliques anormaux non pas par le *basalshift* mais par une dégradation des modèles phonologiques en mémoire. Ceci rejoint les travaux de Lazard et al. (2010b) qui montrent que les performances phonologiques, évaluées par des tâches de jugement de rimes, se détériorent avec l'augmentation de la durée de surdité et que ces compétences sont corrélées au résultat de l'implant.

(3) *Faut-il adapter la répartition fréquentielle du processeur à la profondeur d'insertion ?*

Pour une configuration d'électrodes donnée, les meilleures performances de reconnaissance de voyelles sont obtenues avec les processeurs ayant une répartition fréquentielle adaptée à chaque patient, en fonction de l'insertion de l'électrode dans leur cochlée (Fu et Shannon, 1999, anglais, IC). Cependant, Faulkner et al. (2003, anglais, vocodeurs chez des normo-entendants), sur de la parole vocodée montrent qu'adapter à outrance la répartition fréquentielle sur l'insertion réelle de l'électrode peut s'avérer délétère. Si l'on simule, avec un vocodeur 8 canaux, plusieurs profondeurs d'insertion, allant de 25 mm (fréquence de coupure: 502 Hz) à 17 mm (fréquence de coupure: 1851 Hz), par pas de 2 mm, on constate une dégradation de l'identification des voyelles (Figure 50). Cette simulation induit en effet une suppression des informations de basses fréquences et non pas juste un décalage de celles-ci vers les plus hautes fréquences. Cette diminution de la compréhension de la parole est majorée pour les voix d'hommes dont les formants sont plus graves.

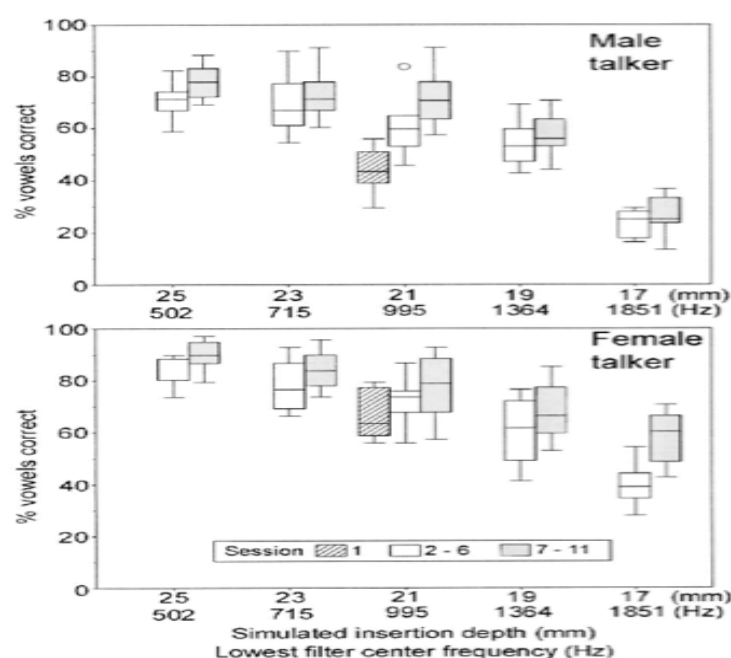


Figure 50 : Simulation d'une répartition fréquentielle alignée sur la fréquence caractéristique réelle induite par l'insertion de l'électrode. Résultats pour l'identification de voyelles. Tiré de Faulkner et al. (2003).

Pour les insertions les moins profondes (21, 19 et 17 mm pour les hommes), l'identification de voyelles diminue significativement. Pour le locuteur homme, l'identification de voyelle est identique à 25 et 23 mm mais diminue significativement dès 21 mm d'insertion (Figure 50). Pour la locutrice femme, la reconnaissance de voyelle diminue significativement à chaque pas de 2 mm d'insertion. Pour la condition, la plus difficile (17 mm), la reconnaissance de voyelles est moins bonne pour la voix masculine que pour la voix féminine (Faulkner et al., 2003).

Baskent et Shannon (2005, anglais chez 4 adultes implantés cochléaires) précisent les résultats de Faulkner et al. (2003). Pour les insertions complètes (20 à 25 mm de la fenêtre ronde), l'appariement entre la fréquence d'entrée acoustique et la fréquence caractéristique des fibres nerveuses stimulées en fonction du lieu de l'électrode dans la cochlée produit une meilleure reconnaissance de la parole (voyelles, consonnes et phrases) que la compression de l'étendue complète de la parole sur le faisceau d'électrodes. Par contre, pour des insertions moins profondes (16,8 mm et 19,2 mm), conserver une plage de compression fréquentielle du signal est préférable à la troncation des fréquences graves juste dans le but de faire coïncider la fréquence du canal du processeur avec la fréquence caractéristique des fibres du nerf

auditif. Cependant, comme nous l'avons vu, ces résultats sur les longueurs d'électrodes sont à mettre en lien avec la taille de la cochlée.

Peu d'études s'intéressent au décalage vers l'apex, qui code pour les basses fréquences. Gani et al. (2007, français, IC) ont étudié l'insertion profonde avec l'électrode longue Combi40+ (Med-El®). Cette électrode, d'une longueur totale de 26,7 mm peut être insérée jusqu'à environ deux tours de spire dans le but de couvrir le plus grand intervalle de fréquences disponibles dans la cochlée. La conséquence attendue est un codage des fréquences graves au plus près des fibres du nerf auditif codant ces fréquences à l'apex. Cependant, il y a des risques d'interactions entre les électrodes, si deux électrodes adjacentes excitent des populations de fibres qui se recouvrent car cette partie de la cochlée a une forte densité de fibres neurales. Chez les implantés cochléaires expérimentés avec des profondeurs d'insertion de 605 à 720 degrés, Gani et al. ont testé pendant plusieurs semaines la désactivation de 1, 2 à 5 électrodes les plus apicales. Pour ces profondeurs d'insertion très importantes, les cinq adultes implantés cochléaires ont eu une meilleure identification de voyelles (+5% à +18%) et de consonnes (+2% à +13%) lorsque l'on a désactivé au moins une électrode apicale. Selon Gani et al., pour les utilisateurs d'implant ayant une insertion du porte-électrodes supérieure à 500 degrés, la non-activation d'électrodes apicales devrait permettre de faire coïncider la fréquence du filtre et la fréquence caractéristique stimulée par l'électrode.

f) Résolution fréquentielle requise pour l'identification des voyelles

La question de la résolution fréquentielle préoccupe depuis l'époque des implants monoélectrode. Selon plusieurs auteurs (Holmes et al., 1987, anglais ; Geier et Norton, 1992 ; Kileny et al., 1992), la reconnaissance de la parole s'améliore lorsque l'on augmente le nombre d'électrodes. La lecture des différentes études semble cependant montrer qu'il existe un effet de « saturation » pour la perception de la parole dans le silence, c'est-à-dire qu'à partir d'un certain nombre de canaux, l'ajout d'informations spectrales n'améliore plus les performances, du moins dans le silence. Nous verrons cependant que l'identification des voyelles semble profiter davantage d'une augmentation du nombre de canaux que celle des autres supports verbaux.

C'est l'étude de Shannon et al. (1995, anglais) qui fait référence sur la question de la résolution fréquentielle. Huit voyelles anglaises de type [hVd] vocodées dans 1 à 4 canaux de bruits modulés (Figure 51) ont été soumises pour identification à 8 adultes normo-entendants.

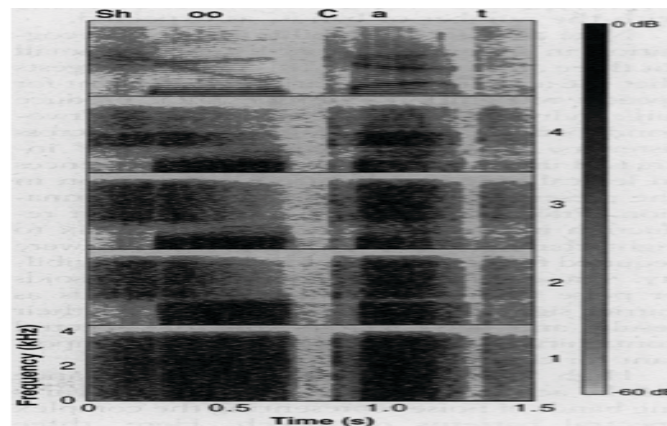


Figure 51 : Exemple de la réduction spectrale pour le stimulus « shoo cat ». En haut, le signal original en bande étroite. Puis de haut en bas, les stimuli traités avec 4 (Fréquence de coupure : 800 Hz, 1500 Hz et 2500 Hz), 3 (Fc : 800 et 1500 Hz), 2 (Fc : 1500 Hz) et 1 canal. Tiré de Shannon et al. (1995).

Les résultats ont montré que quatre canaux suffisent à reconnaître 100% des 8 voyelles dans le silence (Figure 52).

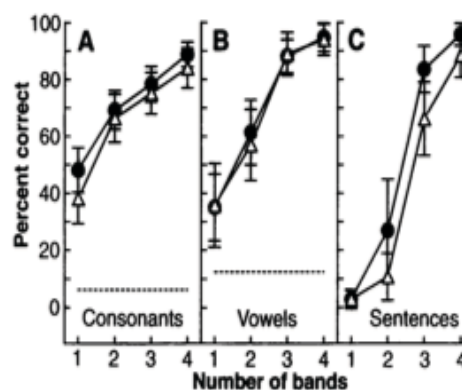


Figure 52 : Taux d'identification des consonnes, voyelles et phrases chez huit adultes normo-entendants soumis à des vocodeurs 1, 2, 3 ou 4 canaux reproduisant l'enveloppe temporelle. Tiré de Shannon et al. (1995).

Chez les adultes implantés cochléaires, Fishman et al. (1997, anglais) a comparé le score d'identification avec 1, 2, 4, 7, 10 et 20 électrodes. En situation spectrale très dégradée

(1,2 et 4 électrodes), le taux d'identification est significativement plus faible qu'en condition optimale (20 électrodes). Cependant, il n'y a pas de différence de performances entre la condition « 7 électrodes » et la condition « 20 électrodes » (Figure 53). Ces résultats suggèrent que les implantés cochléaires ne parviennent pas à faire usage de l'information spectrale fournie par 20 électrodes pour identifier les voyelles dans le silence.

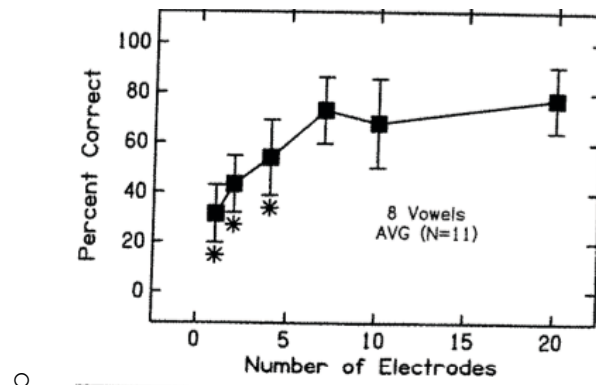


Figure 53 : Identification de voyelles en fonction du nombre de canaux (de 1 à 20) par 11 adultes implantés cochléaires. A partir de 7 canaux, il n'y a plus d'amélioration de l'identification de voyelles. Tiré de Fishman et al. (1997).

La comparaison des résultats de Shannon et al. (1995, vocodeurs, anglais) à ceux des sujets implantés cochléaires de Fishman et al. (1997, anglais, Figure 54), montre que les implantés cochléaires les plus performants ont des résultats proches de la moyenne des adultes normo-entendants à qui l'on propose des sons vocodés. Pourquoi les adultes implantés les moins performants n'y parviennent-ils pas ?

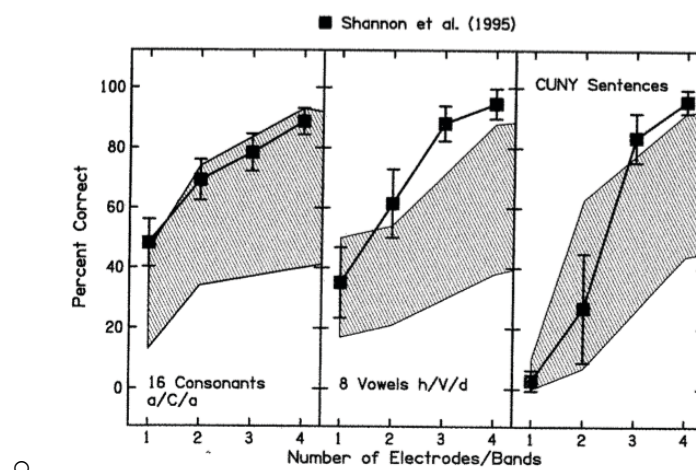


Figure 54 : Comparaison de l'identification de consonnes, voyelles et phrases par 8 normo-entendants en situation de simulation par vocodeur (Shannon et al., 1995 en carrés pleins) et par 11 implantés cochléaires. Tiré de Fishman et al. (1997).

Friesen et al. (2001, anglais) ont proposé des tests d'identification de voyelles dans le bruit pour évaluer le nombre de canaux nécessaires chez 5 normo-entendants et 19 implantés cochléaires. Douze voyelles ont été proposées en contexte [hVd] à un rapport signal/bruit de +15dB (le signal de parole est présenté 15 dB au dessus du bruit), +10dB, +5dB, et 0dB avec 2-4-7-10 et 20 canaux actifs. Chez les sujets implantés, l'identification de voyelles dans le bruit atteint une fois encore un plateau dès que 7 électrodes sont activées. Par contre, les performances des sujets normo-entendants en condition de simulation d'implant par vocodeur continuent à s'améliorer jusqu'à 20 canaux effectifs (Figure 55).

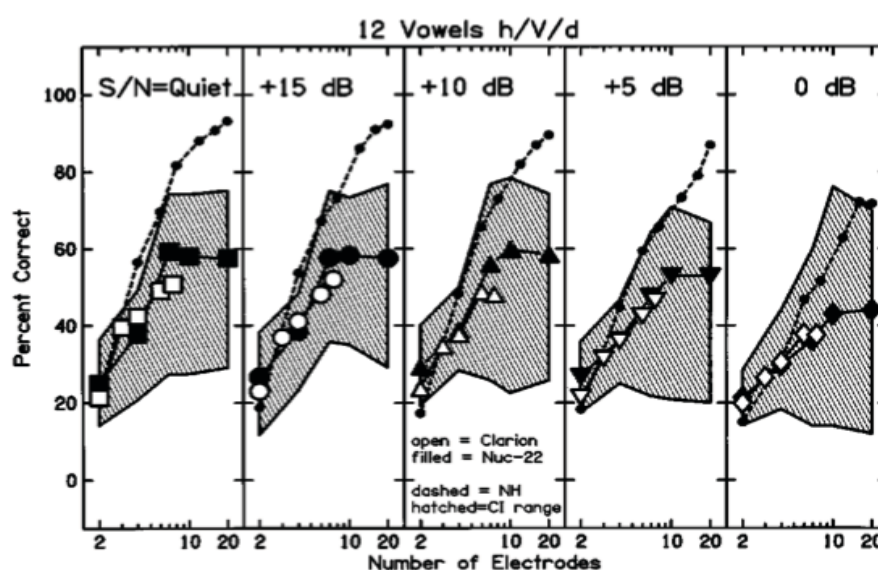


Figure 55 : Identification des voyelles dans le silence (gauche) et dans le bruit de SNR+15 dB à SNR 0dB (droite), par 5 normo-entendants soumis à des vocodeurs de 2 à 20 canaux (petits cercles noirs), 19 implantés cochléaires Clarion®/A.B® (symboles blancs) et Cochlear® (symboles noirs). Les normo-entendants tirent bénéfice d'une augmentation du nombre d'électrodes jusqu'à 20. Pour les implantés cochléaires il y a un plateau des performances autour de 7 électrodes. Tiré de Friesen et al. (2001).

Shannon et al. (2010) retrouve également que le taux d'identification de voyelles par des implantés cochléaires augmente significativement entre 4 à 8 mais aucune amélioration n'est montrée entre 8,12 et 16 électrodes (Figure 56).

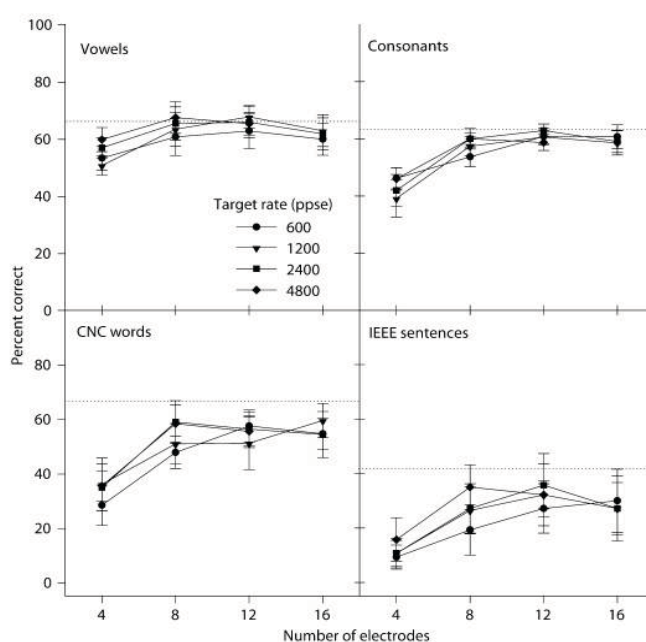


Figure 56 : Taux de reconnaissance de voyelles, consonnes, mots monosyllabiques et phrases en fonction du nombre d'électrodes (de 4 à 16) et de la vitesse de stimulation (de 600 à 4800 pulse par seconde et par électrode). Tiré de Shannon et al. (2010).

Cependant, dans le silence, le nombre de canaux permettant d'atteindre un plateau des performances est plus élevé pour les voyelles (12) que pour les consonnes (autour de 8), (Xu et al., 2005, anglais). Dans le bruit, le nombre de canaux à partir duquel un plateau des performances d'identification de voyelles est atteint passe à 16 voire 24. Par contre, le plateau reste le même dans le silence et le bruit pour l'identification des consonnes (Xu et Zheng, 2007).

Baskent (2006) s'est justement demandé pour quelle raison les adultes implantés cochléaires semblaient « saturer » à partir d'une certaine quantité d'informations spectrales transmises, contrairement aux normo-entendants soumis à des stimuli vocodés qui, eux, continuent à améliorer leurs performances lorsque l'on augmente le nombre le canaux. L'hypothèse de Baskent (2006) est que l'adulte implanté est également malentendant, et l'atteinte neurosensorielle a pu entraîner, au fil du temps, des modifications dans le traitement périphérique et central des informations acoustiques. Pour tester cette hypothèse, Baskent a donc comparé la reconnaissance de stimuli vocodés par des adultes normo-entendants et des adultes malentendants. Les résultats montrent qu'en présence d'un bruit environnant fort, les performances des sujets malentendants saturent autour de 8 canaux tandis que les

performances des normo entendants continuent à progresser avec 12–16 canaux pour les voyelles et 10–12 canaux pour les consonnes. Une fois de plus, la perception des voyelles bénéficie davantage d'une augmentation de la résolution fréquentielle que les autres supports verbaux.

g) Rôle des informations spectrales et temporelles pour l'identification des voyelles

Selon Xu et al. (2005 et 2007, anglais) les informations spectrales et temporelles sont toutes les deux importantes pour l'identification des voyelles et des consonnes dans le silence et dans le bruit, avec cependant plus d'importance des indices spectraux pour les voyelles. Nie et al. (2006) ont tenté de faire la part des choses entre l'effet de la résolution spectrale (nombre de canaux de 4 à 12) et de la résolution temporelle (vitesse de stimulation de 1000 à 4000 Hertz) pour la reconnaissance de voyelles, consonnes et phrases dans le silence et dans le bruit chez des sujets implantés cochléaires. Les résultats montrent que la reconnaissance des consonnes est moins dépendante des informations spectrales que la reconnaissance des voyelles. Entre 8 à 12 électrodes, l'identification de voyelles s'améliore encore de 7% tandis que l'identification de consonnes plafonne. La reconnaissance des consonnes est indépendante du nombre d'électrodes mais est améliorée par une augmentation de la vitesse de stimulation. De façon un peu contradictoire, dans l'étude de Shannon et al. (2010, anglais) seule l'identification des voyelles semble profiter de l'augmentation de la vitesse de la stimulation (4800>600 Hertz) contrairement à l'identification de consonnes, mots, phrases.

h) La bimodalité permet-elle d'améliorer l'identification des voyelles avec l'implant ?

La bimodalité permet d'apporter des informations de basses fréquences et d'améliorer l'identification du F₁, voire du F₂ dans certains cas. En effet, depuis plusieurs années, les indications d'implant se sont élargies aux adultes présentant une audition résiduelle du côté de l'implant (technique électro-acoustique) ou sur l'oreille controlatérale. Il a été montré chez les sujets entendants soumis à des vocodeurs et chez les sujets implantés cochléaires que la bimodalité permettait d'améliorer l'identification des voyelles (Kong et Braida, 2011 ; Sheffield et Zeng, 2012 ; Hay-McCutcheon et al., 2014) davantage que celle des consonnes (Kong et Braida, 2011, anglais). Si les indices acoustiques extraits de l'implant cochléaires et de la prothèse controlatérale dans le silence sont hautement redondants pour les consonnes, ils sont complémentaires pour les voyelles (Kong et Braida, 2011). L'ajout des basses fréquences

améliore la perception des informations liées au F_1 (Kong et Braida, 2011 ; Sheffield et Zeng, 2012). Cependant, une amélioration pour F_2 est également observée par certains auteurs (Sheffield et Zeng, 2012) mais pas par d'autres (Kong et Braida, 2011). Plusieurs auteurs trouvent une corrélation entre l'intégration électro-acoustique, c'est-à-dire la sommation et l'optimisation des informations électriques et acoustiques, et les seuils auditifs résiduels, pour l'identification des voyelles. Plus les seuils auditifs sont bas, moins l'intégration électro-acoustique serait bonne (Yang et Zeng, 2013). Le seuil d'audition à 1000 Hertz serait corrélé à l'amélioration apportée par la situation bimodale vs. unimodale (Sheffield et Zeng, 2012). La sommation des informations électriques et acoustiques serait plus importante quand les seuils audiométriques appareillés moyens sont inférieurs à 55 dB que lorsqu'ils sont supérieurs à 55 dB (Yoon et al., 2012). Il y a également un effet de la durée de surdité du côté implanté sur l'intégration électro-acoustique (Yang et Zeng, 2013). Si l'on compare les résultats obtenus chez les normo-entendants en situation de simulation par vocodeur et les implantés cochléaires, il semble que les normo-entendants intègrent mieux les informations électriques et acoustiques que les implantés cochléaires (Kong et Braida, 2011). Pour les voyelles, les résultats dans le silence décrivent un bénéfice important de la stimulation bimodale chez les normo-entendants soumis au simulateur mais pas chez les implantés cochléaires dont les résultats montrent un effet plafond avec l'implant cochléaire. Dans le bruit, il y a un bénéfice significatif pour les deux groupes mais plus évident chez les normo-entendants soumis au vocodeur (Sheffield et Zeng, 2012). Dans certains cas, pour les auditeurs implantés cochléaires, l'ajout des informations acoustiques peut même s'avérer délétère. Dans l'étude de Yang et Zeng (2013), les sujets ont des performances similaires qu'ils soient testés indépendamment en modalité électrique (côté IC) ou en modalité acoustique (côté prothèse controlatérale) mais dégradent significativement leurs performances d'identification de voyelles en stimulation combinée. Cette étude de Yang et Zeng (2013) consiste à reproduire auprès de sujets implantés cochléaires une précédente expérience de Qin et Oxenham (2006) qui consistait en une identification de voyelles concurrentes (voyelles différentes présentées simultanément) vocodées par des sujets normo-entendants en situation simulée électrique, acoustique et électro-acoustique. L'étude de Qin et Oxenham (2006) auprès des normo-entendants montrait une bonne intégration des informations électro-acoustiques. En répliquant l'expérience auprès de patients implantés, Yang et Zeng (2013) trouvent les mêmes résultats que Qin et Oxenham (2006) en modalité électrique et acoustique seules mais par contre, l'intégration électro-acoustique est beaucoup moins bonne chez les

participants implantés cochléaires avec un système électro-acoustique que chez les normo-entendants en condition équivalente simulée.

i) **L'adaptation et l'entraînement auditif**

Bien qu'une adaptation « naturelle » aux voyelles spectralement dégradées et décalées en fréquence soit possible, un entraînement auditif ciblé peut optimiser leur identification. Plusieurs observations sur l'apprentissage ont pu être faites à partir des résultats obtenus auprès de sujets normo-entendants soumis à des voyelles vocodées. On observe dans certains cas, une amélioration des performances entre deux sessions d'évaluation, alors qu'il n'y a eu aucun entraînement entre les deux sessions (Faulkner et al., 2003 ; McGettigan et al., 2014, anglais). Chez Faulkner et al. (2003), c'est pour l'insertion la moins profonde (17 mm, avec suppression des informations sous 1851 Hertz), c'est-à-dire la condition la plus difficile, que l'on observe des améliorations importantes (15% à 20%) de l'identification de voyelles (prononcées par la locutrice), au fil des sessions espacées de plusieurs jours et sans entraînement intermédiaire. A l'inverse, d'autres auteurs, (Fu et al., 2005a) ont montré que ne proposer que des itérations d'évaluations ne suffisait pas à améliorer les performances mais qu'un entraînement ciblé sur la discrimination de contrastes vocaliques (versus un entraînement sur la simple répétition de phrases ou de voyelles) était nécessaire pour améliorer l'identification de voyelles. De plus, l'amélioration se généralise à l'identification de consonnes alors que seule la discrimination de contrastes vocaliques a été travaillée. Dans une autre étude, les mêmes auteurs (Fu et al., 2005b, anglais) ont montré qu'un entraînement adaptatif ciblé avec des mots monosyllabiques spectralement décalés améliorait la reconnaissance des autres phonèmes isolés spectralement décalés. Pour les voyelles, les indices acoustiques que les auteurs ont fait varier sont le F_1 , le F_2 et la durée. Les résultats montrent une amélioration des performances chez tous les patients, après quatre semaines d'entraînement. L'approche accompagnant le patient vers la perception du contraste minimal phonémique semble donc efficace. Utiliser des exemplaires de voyelles prononcées par différents locuteurs aide le patient à mieux saisir les patterns généraux de chaque phonème. Fu et Galvin (2007, anglais), proposent un entraînement spécifique pour les implantés cochléaires, pour la perception de voyelles modifiées en termes de durée et de fréquence et ont créé un logiciel d'auto-entraînement aux contrastes spectraux. Zhang et al. (2012, anglais) ont proposé un entraînement intensif d'un mois sur la perception de contrastes vocaliques afin d'optimiser l'intégration des informations électriques et acoustiques chez des utilisateurs

d'implants cochléaires associés à une prothèse controlatérale. Après l'entraînement, l'identification des voyelles s'améliore en condition bimodale (+8,6%) mais également en condition « électrique seul » (+9,6%). La perception du F_2 s'améliore également après l'entraînement à la fois en condition bimodale et en condition « électrique seule ».

3. La perception des voyelles nasales avec l'implant cochléaire

A notre connaissance, peu d'études se sont intéressées à la perception des voyelles nasales par les adultes implantés cochléaires ou implantés du tronc cérébral. L'étude de Master, préliminaire à ce travail a montré une difficulté pour identifier les voyelles nasales par 14 adultes récemment implantés cochléaires, en contexte CVC (Borel, 2007). Chez l'enfant implanté, Bouton et al. (2012) ont évalué, entre autres, la perception du trait de nasalité vocalique et consonantique en français. Pour les consonnes, les enfants implantés ont plus de difficultés à percevoir le trait de nasalité (« moule » vs. « boule » ou de lieu (« pou » vs. « tout ») que celui de mode (« poule » vs. « foule ») ou de voisement (« poule » vs. « boule »). Pour les voyelles, la différence entre enfants implantés cochléaires et normo-entendants est moins importante pour l'aperture et l'antériorité que pour la nasalité, c'est-à-dire que pour la nasalité vocalique, les enfants implantés ont des performances qui restent éloignées de celles des normo-entendants.

L'identification auditive des voyelles nasales par les adultes implantés cochléaires sera étudiée dans le prochain chapitre. Trois études apporteront de nouvelles données à discuter en regard des connaissances sur l'acoustique et la perception des voyelles nasales du français présentées dans les chapitres précédents et les données de la littérature sur l'identification des voyelles orales par les adultes implantés cochléaires présentées dans ce chapitre.

V. Chapitre 4: Perception des voyelles nasales par les adultes implantés cochléaires

A. Etude n°3 : Identification de voyelles et de consonnes nasales par 82 adultes implantés cochléaires à un délai post-implant précoce et tardif

Le taux d'identification de voyelles en contexte CV C = [p] et V = [a, o, i, u, y, ø, e, ε, ǣ, ɔ̃, ẽ], et le taux d'identification de consonnes en contexte CV avec C=[p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, l, m, n, ʋ] et V=[a] et C = à voix directe de femme, sans répétition, ont été calculés à un délai post-implant « précoce », entre 1 et 4 mois post-implant (MOY±SEM=2,6±0,01 mois) et « tardif », entre 12 et 120 mois post-IC (MOY=35±0,3 mois). La réponse « je ne sais pas » était autorisée. Les résultats confirment que les voyelles nasales sont significativement moins bien reconnues que les voyelles orales, précocement après l'implantation (36% vs. 77%, $p<0.05$) et plus tardivement (57% vs. 87%, $p<0.05$). Les consonnes nasales, par contre, sont aussi bien reconnues que les consonnes orales, à la fois précocement (67% vs. 67%, $p>0,05$) et tardivement (74% vs. 79%, $p>0,05$) bien que l'on observe quelques confusions de [n] vers [m]. Les voyelles [ǣ], [ẽ] et [ɔ̃] sont parmi les 4 voyelles les moins bien reconnues. Une amélioration significative de l'identification des voyelles nasales (+21%, $p<0,05$) est cependant observée à distance de l'implantation. Dans 98% des cas (84/86 des confusions exprimées) au stade précoce et 94% des cas (64/68 des confusions exprimées) au stade tardif, les confusions s'orientent vers une voyelle orale: [ǣ] est majoritairement confondu avec [a] (69% des confusions exprimées au stade précoce/60% au stade tardif), [ɔ̃] avec [o] (73%/92%), [ẽ] avec [e] (61%/70%).

Pour le même groupe d'adultes implantés cochléaires ($n=80$), la difficulté à percevoir les voyelles nasales n'influence pas les résultats aux tests cliniques de répétition de mots triphonémiques des listes cochléaires de Lafon (1964) et dissyllabiques de Fournier (1951). Chez ces patients, et pour ce corpus de mots, la difficulté précédemment montrée à identifier les voyelles nasales isolément semble être compensée par l'accès au sens du mot (la suppléance mentale) puisque les mots de Fournier comprenant au moins une voyelle nasale sont aussi bien reconnus que ceux n'en contenant pas.

1. Objectifs

Cette étude s'intéresse à l'identification des trois voyelles nasales [ã, õ, ê] par les adultes implantés cochléaires. Il s'agit d'une étude rétrospective longitudinale à partir des résultats aux évaluations orthophoniques de suivi post-implant effectuées dans le service d'ORL du Pr. O. Sterkers à l'hôpital Beaujon (Clichy, AP-HP), désormais Unité *Otologie, Implants auditifs, Chirurgie de la base du crâne* de la Pitié-Salpêtrière

Quatre questions sont posées :

1. Le trait nasal des voyelles nasales et des consonnes nasales est-il bien identifié ?
2. Quelles sont les confusions des voyelles nasales les plus fréquentes ?
3. Quels facteurs influencent l'identification des voyelles nasales : délai post-implant, âge, sexe, durée de surdité avant l'implant, étiologie, côté implanté, port d'une aide auditive controlatérale ou non, type de stratégie de codage, vitesse de stimulation ?
4. Une difficulté à identifier les voyelles nasales aura-t-elle un impact sur la reconnaissance de mots de Lafon et de Fournier proposés lors des évaluations orthophoniques ?

2. Méthode

a) Population

Nous avons consulté les dossiers de 228 patients implantés entre novembre 1996 et avril 2007. Les patients implantés à partir de 2008 n'ont pas été inclus dans l'étude puisque depuis 2008, l'évaluation proposée dans le service n'intègre plus de test de perception de phonèmes.

146 patients n'ont pu être inclus pour l'analyse des résultats, pour les raisons suivantes :

- bilan non complet soit au stade précoce soit au stade tardif = 64
- langue maternelle autre que le français = 36
- surdité pré/pérlinguale = 22
- troubles associés = 13 (dont : psycho-affectif = 9 ; neurologique = 4)
- implant électro-acoustique = 5
- perdu de vue = 3
- complication = 2 (dont ; cutanée = 1 ; panne = 1)
- non utilisateur = 1

L'analyse a donc porté sur 82 adultes implantés cochléaires (Tableau 25), soit 36% des adultes implantés dans le service entre 1997 et 2007. Le recul moyen au plus près de l'implantation, nommé « précoce » est de $2,6 \pm 0,01$ (MOY $\pm$ SEM) mois [1 ; 4 mois] [min ; max] et le recul moyen le plus à distance de l'implantation, nommé « tardif » est de $35 \pm 0,3$ mois [12 ; 120 mois]. L'échantillon est constitué de 52 femmes et 30 hommes, implantés entre 1997 et 2007, âgés de $56 \pm 0,2$ ans en moyenne [26 ; 82 ans] lors de l'évaluation précoce et de $58 \pm 0,2$ ans [29 ; 83 ans] lors de l'évaluation tardive. Afin d'évaluer le facteur « âge », les patients ont été distribués en deux catégories : >65 ans (n=27 au stade précoce et n=32 au stade tardif) et moins de 65 ans (n=55 au stade précoce et n=50 au stade tardif). La durée moyenne depuis le début de la surdité neurosensorielle est de $20 \pm 0,12$ ans [0 ; 65 ans].

Etiologie	Délai depuis le début de l'atteinte auditive	Statut de l'oreille controlatérale	Processeur	Stratégies de codage
Inconnue : 25 Otospongiose : 15 Surdité brusque : 9 Congénitale : 6 Ménière : 5 Trauma sonore/ bruit : 4 Otites chroniques : 4 Génétique : 4 Méningite : 3 Trauma : 2 Auto-immune : 1 Cytomégalovirus : 1 Infection virale : 1 Mastoïdite : 1 NF2 : 1	0-9 ans : 18 10-20 ans : 31 > 20 ans : 33	Implant cochléaire : 6 Pas d'audition résiduelle, ni appareillage : 33 (34) Aide auditive controlatérale : 43 (42)	DigiSP : 3 E3G : 36 (38) Esprit : 7 (9) Freedom : 6 Harmony : 2 Opus : 1 Spectra : 6 Sprint : 10 (6) Tempo : 11	ACE : 40 SPEAK : 25 CIS : 12 MPIS : 3 HiRes : 2

Tableau 25: Population de l'étude n°3 (entre parenthèses, le nombre de patients au stade tardif lorsque celui-ci est différent du nombre de patients au stade précoce).

Parmi les 82 patients implantés, 37 sont implantés à droite, 39 à gauche et 6 de façon bilatérale. La répartition en fonction de la marque d'implant est Cochlear=65, Med-el=12, MXM-Neurelec=3, Clarion-Advanced Bionics=2.

b) Stimuli

	Stimuli	Contexte syllabique
16 consonnes	[p,t,k,b,d,g,f,s,ʃ,v,z,ʒ,l,m,n,ʁ]	CV avec V=[a]
10 voyelles (système phonologique minimal)	[i,e,ɛ,a,y,ø,œ,ã,ẽ, õ]	CV avec C=[p]
3 semi-voyelles	[w,ɥ,j]	CVV avec C=[p]
1 liste cochléaire de Lafon (1964, voir Annexe C)	17 Mots triphonémiques	CVC, CVV, VCV ou CCV
A liste de mots de Fournier (1951, voir Annexe D)	10 Mots dissyllabiques masculins précédés de substantif « le »	Selon les listes : CVCV, CCVCV, CVCCV, CCVCVV, CVCCV, CVVCVV, CVCVV, CCVCCV

Tableau 26: Stimuli de l'étude n°3.

Tous les stimuli (Tableau 26) sont proposés à « voix directe » par l'orthophoniste, en environnement calme, en modalité « implant seul ». En cas d'audition résiduelle controlatérale, l'aide auditive est éteinte et/ou l'oreille bouchée avec un bouchon d'oreille. En cas d'échec, une seconde écoute de la syllabe est possible. Ces évaluations ont été faites par trois orthophonistes (femmes) de l'équipe du centre d'implant.

c) Traitement des données

Le traitement des données a été effectué au moyen des logiciels Excel pour Mac 2011, version 14.4.3 et Statview 5.0. SAS Institute Inc. Certaines données quantitatives âge (<65ans ; >65 ans), durée de surdité (0-9 ans ; 10-20 ans ; >20 ans) et vitesse de stimulation (<900 Hertz ; >900 Hertz) ont été regroupées en classes. Suivant les données, une analyse ANOVA ou un test-t de student ont été effectués.

3. Résultats

a) Résultats généraux

Au stade « précoce », 2,6 mois après l'implantation en moyenne, le score moyen en reconnaissance de mots dissyllabiques de Fournier (1951, voir Annexe D) est de $61,6\% \pm 1,8\%$ [0 ; 100]. Au stade « tardif », 35 mois après implantation en moyenne, le score moyen en reconnaissance de mots dissyllabiques est amélioré ($72,7\% \pm 0,3\%$) mais présente toujours une étendue maximale des résultats [0 ; 100]. Ces résultats témoignent autant de la bonne récupération globale avec l'implant cochléaire que de la variabilité interindividuelle.

b) Identification de phonèmes

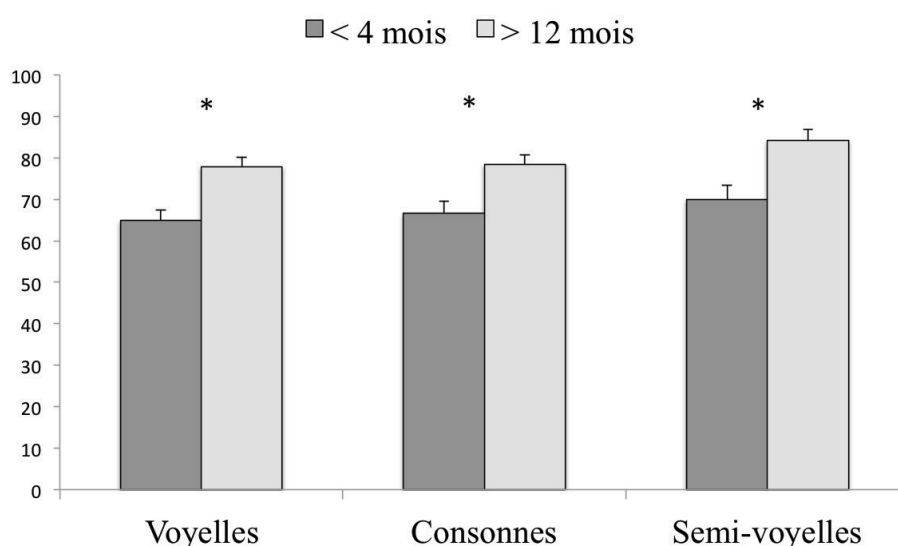


Figure 57: Identification de voyelles, consonnes et semi-voyelles lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).

MOY±SEM	< 4 mois	> 12 mois	Test t apparié
Voyelles	64,9±2,6	77,9±2,2	t=-5,610 ; p<0,0001
Consonnes	66,6±2,9	78,5±2,2	t=-5,006 ; p<0,0001
Semi-voyelles	69,9±3,5	84,1±2,8	t=-4,346 ; p<0,0001

Tableau 27: Identification de voyelles, consonnes et semi-voyelles lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).

L'identification des voyelles, des consonnes et des semi-voyelles s'améliore significativement entre la première (< 4 mois) et la dernière évaluation (> 12 mois).

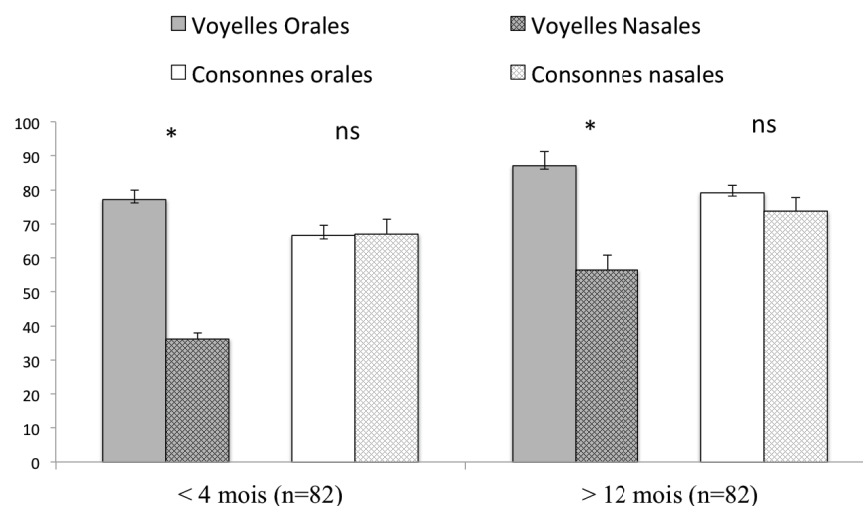


Figure 58: Score d'identification comparé des voyelles et des consonnes orales et nasales lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).

MOY±SEM	Voy. orales	Voy. nasales	Test t non apparié	Cons. orales	Cons. nasales	Test t non apparié
< 4 mois (n=82)	77,2±2,7	36,2±4,2	t=-8,269 p<0,0001	66,6±3,0	67,1±4,3	t=0,1 p>0,05
> 12 mois (n=82)	87,1±1,8	56,5±4,2	t=-6,647 p<0,0001	79,2±2,1	73,8±4,0	t=-1,194 p>0,05

Tableau 28: Identification des voyelles et des consonnes selon la nasalité lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).

Aussi bien très précocement qu'à distance de l'implantation, les trois voyelles nasales sont significativement moins bien identifiées que les dix voyelles orales. Par contre, il n'y a pas de différence d'identification entre les consonnes nasales [m,n] et les 14 autres consonnes (orales) testées (Tableau 28 et Figure 58).

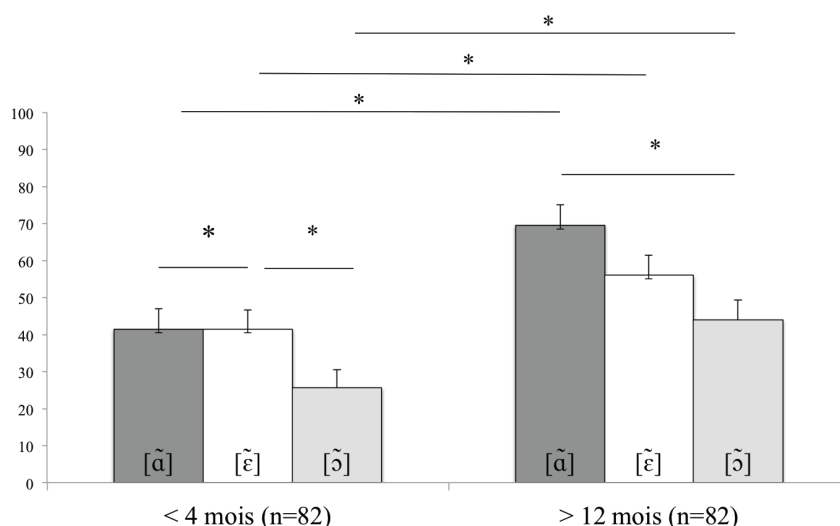


Figure 59: Identification des trois voyelles nasales aux délais post-implant précoce (<4 mois) et tardif (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM)

MOY±SEM	[ã]	[ẽ]	[õ]	ANOVA
< 4 mois (n=82)	41,5±5,5	41,5±5,5	25,6±4,9	F(2,243)=3,012 ; p=0,051 <i>Test PLSD de Fisher</i> [ã] vs. [õ] p=0,0346 [ẽ] vs. [õ] p=0,0346
> 12 mois (n=82)	69,5±5,2	56±5,5	43,9±5,5	F(2,243)=5,66 ; p<0,004 <i>Test PLSD de Fisher</i> [ã] vs. [õ] p=0,0009

Tableau 29: Identification des trois voyelles nasales aux délais post-implant précoces et tardifs, (n=82; MOY±SEM).

Un test t apparié met en évidence une différence significative entre le score au délai précoce et le score au délai tardif pour chacune des trois voyelles nasales : [ã] : $t=-4,614$, $p<0,0001$; [õ] : $t=-2,710$, $p<0,0082$; [ẽ] $t=-2,100$, $p<0,0388$. La voyelle [ã] est la mieux identifiée et la voyelle [õ] la moins bien identifiée (Tableau 29 et Figure 59).

(1) Score d'identification des phonèmes au stade précoce et au stade tardif

	MOY±SEM (< 4 mois)	MOY±SEM (> 12 mois)		MOY±SEM (< 4 mois)	MOY±SEM (> 12 mois)
[a]	90,2±3,3	96,3±2,1	[o]	95,1±2,4	93,9±2,7
[ã]	41,5±5,5	68,3±5,2	[ø]	72,0±5,0	73,2±4,9
[b]	67,1±5,2	78,0±4,6	[õ]	25,6±4,8	42,7±5,5
[d]	57,3±5,5	65,9±5,3	[p]	81,7±4,3	86,6±3,8
[e]	80,5±4,4	90,2±3,3	[k]	73,2±4,9	90,2±3,3
[ɛ]	67,1±5,2	78,0±4,6	[s]	75,6±4,8	86,6±3,8
[ẽ]	41,5±5,5	56,1±5,5	[ʃ]	91,5±3,1	91,5±3,1
[f]	61,0±5,4	75,6±4,8	[t]	62,2±5,4	74,4±4,8
[g]	62,2±5,4	79,3±4,5	[u]	47,6±5,5	67,1±5,2
[i]	80,5±4,4	96,3±2,1	[v]	61,0±5,4	72,0±5,0
[k]	79,3±4,5	87,8±3,6	[y]	74,4±4,8	91,5±3,1
[l]	65,9±5,3	84,1±4,1	[z]	42,7±5,5	57,3±5,5
[m]	70,7±5,1	76,8±4,7	[ʒ]	51,2±5,6	75,6±4,8
[n]	63,4±5,4	70,7±5,1			

Tableau 30: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant précoce (<4mois) et tardif (>12 mois).

Au stade précoce (<4 mois), les trois voyelles nasales sont les 3 phonèmes les plus mal identifiés parmi les 27 voyelles et consonnes testées. Au stade tardif (>12 mois), les voyelles [ẽ] et [õ] restent les phonèmes les plus mal identifiés. Par contre la voyelle [ã] est mieux identifiée que les phonèmes [u], [d], [z] (Tableau 30 et Figure 60 et 61).

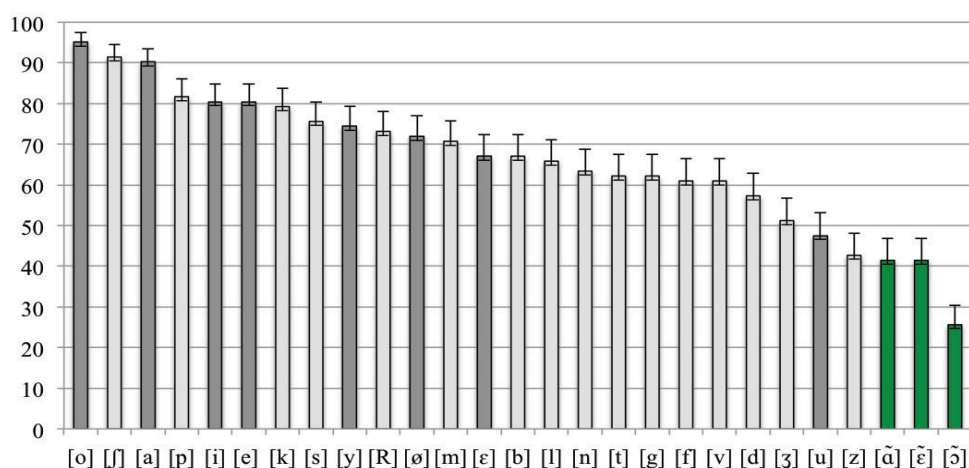


Figure 60: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant précoce (<4mois). gris foncé: voyelles orales, gris clair: consonnes, orange: voyelles nasales.

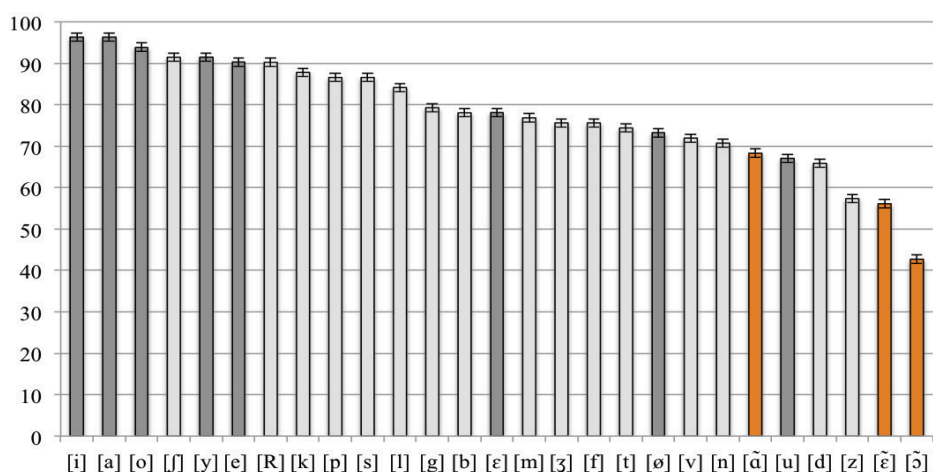


Figure 61: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant tardif (>12 mois). gris foncé: voyelles orales, gris clair: consonnes, orange: voyelles nasales.

(2) *Matrices de confusion*

La réponse « je ne sais pas » étant acceptée, beaucoup d'informations sur les confusions sont manquantes. Les résultats sont présentés en termes de « confusions exprimées ».

n=82 CI < 4 mois	[i]	[e]	[ɛ]	[a]	[u]	[y]	[o]	[ɔ]	[ø]	[œ]	[ã]	[õ]	[ẽ]	NR	total
[ã]			1	18			2	1	1	2	34		1	22	82
[õ]					1		27	4	3	1	1	21		24	82
[ẽ]		1	5	14			1			2			34	25	82
total	0	1	6	32	1	0	30	5	4	5	35	21	35	71	246

Tableau 31: Matrice de confusions des voyelles nasales au stade précoce (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).

n=82 IC > 12 mois	[i]	[e]	[ɛ]	[a]	[u]	[y]	[o]	[ɔ]	[ø]	[œ]	[ã]	[õ]	[ẽ]	NR	total
[ã]				9			3	2	1		57			10	82
[õ]			1	2			25	2			3	36		13	82
[ẽ]			4	14			1				1		47	15	82
total	0	0	5	25	0	0	29	4	1	0	61	36	47	38	246

Tableau 32: Matrice de confusions des voyelles nasales au stade tardif (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).

Pour les voyelles, dans 98% des cas au stade précoce (84/86 des confusions exprimées) et 94% des cas au stade tardif (64/68 des confusions exprimées), les confusions s'orientent vers une voyelle orale. Les confusions les plus fréquentes sont les mêmes au stade précoce et au stade tardif: [ã] est majoritairement confondu avec [a], [õ] avec [o], [ẽ] avec [a] (Tableaux 31 et 32).

n=82 IC<4 mois	[m]	[n]	[l]	Autre	NR	Total
[m]	58	1	2	1	20	82
[n]	12	41	9	1	19	82
[l]	1	3	54	1	23	82
total	71	45	65	3	62	

Tableau 33: Matrice de confusions des consonnes nasales au stade précoce (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).

n=82 IC>12 mois	[m]	[n]	[l]	Autre	NR	Total
[m]	63	3	5	3	8	82
[n]	16	46	3	2	15	82
[l]	3	3	69	1	6	82
total	82	52	77	6	29	

Tableau 34: Matrice de confusions des consonnes nasales au stade tardif (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).

Au stade précoce et au stade tardif, la consonne [m] est bien identifiée et peu de confusions sont exploitables. Par contre, la consonne [n] est confondue dans 12/22 (57% des confusions exprimées au stade précoce) et 16/21 (76% des confusions exprimées au stade tardif) des confusions exprimées avec l'autre nasale [m]. Les confusions vers une consonne orale sont marginales.

(3) *Facteurs influençant l'identification des voyelles nasales*

Facteur étudié	Test	Stade précoce (<4mois post-IC)	Stade tardif (>12 mois post-IC)
Sexe Femme (n=52) Homme (n=30)	Test t non apparié	NS	NS
Age à l'évaluation < 65 ans (n=55 au stade précoce et 50 au stade tardif) > 65 ans (n=27 au stade précoce et 32 au stade tardif)	Test t non apparié	NS	NS
Etiologie (n=82)	Non testé Effectifs trop réduits dans chaque groupe		
Durée de surdité avant IC 0-9 ans (n=18) 10-20 ans (n=31) >20 ans (n=33)	ANOVA 1 facteur	NS	NS
Type de stratégie N of M (n=68) Séquentielle (n=14)	Test t non apparié	NS	NS
Vitesse de stimulation < 900 Hertz (n=34) > 900 Hertz (n=48)	Test t non apparié	NS	NS
Nombre d'électrodes activées* (n=76) <i>*97% des patients ont plus de 85% d'électrodes activées</i>	Corrélation de Pearson	NS	NS
Côté implanté Gauche (n=39) Droit (n=37) Bilatéral (n=6)	ANOVA	F(2,79)=3,33 ; p=0,0407 Tests PLSD de Fisher D> G ; p=0,0139 NS pour voyelles orales, consonnes, Lafon et Fournier	NS
Aide auditive controlatérale Oui (n=43) Non (n=33)	Test t non apparié	NS	NS

Tableau 35: Identification des voyelles nasales en fonction des facteurs démographiques, audiolinguistiques et techniques pour 82 adultes implantés cochléaires à un stade précoce et à un stade tardif. NS :non significatif.

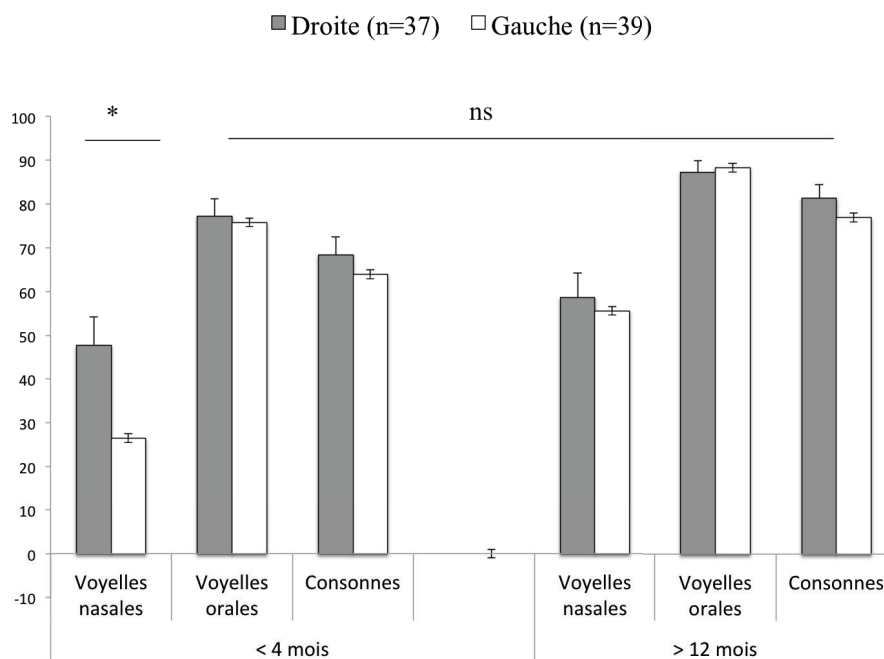


Figure 62: Identification des voyelles orales, voyelles nasales et consonnes en fonction de l'oreille implantée (n=76 ; MOY±SEM).

Parmi les facteurs démographiques audiolinguistiques et techniques testés, seul le côté implanté au stade précoce montre un effet (tableau 35). Les adultes implantés à droite identifient mieux les voyelles nasales au stade précoce. Aucun autre support verbal testé ne montre de lien avec le côté implanté. Cet effet n'est pas retrouvé au stade tardif (Tableau 35, Figure 62).

c) **Lien entre le score d'identification de voyelles nasales isolées et le score de reconnaissance de mots de Lafon et Fournier ?**

(1) Objectif

L'objectif est d'étudier le score de reconnaissance de mots de Lafon et de Fournier en fonction de la présence ou non de voyelle nasale dans ces mots.

(2) Analyse linguistique des corpora de 20 listes cochléaires de Lafon et de 30 listes de mots dissyllabiques de Fournier

Chez la personne normo-entendantes comme chez la personne devenue sourde, deux facteurs linguistiques influencent la reconnaissance des mots : la fréquence lexicale et le nombre de voisins phonologiques (Howes, 1957 ; Luce et Pisoni, 1998 ; Dirks et al, 2001). Plus un mot se rencontre fréquemment dans la langue, plus il a de chance d’être correctement identifié.

Mot cible	Fréquence lexicale par million d’occurrences	Nombre de voisins phonologiques
Le donjon	2,94	3
Le sergent	26,48	5
Le refrain	1,98	0
Le veston	1,66	3
Le forban	0,03	3
Le râteau	0,77	16
Le crémier	0,12	2
Le niveau	45,46	5
Le bûcher	3,43	14
La cachot	3,01	20

Tableau 36: Exemple d’analyse du corpus de la liste de Fournier n°2. La fréquence lexicale est relevée sur la base des sous-titres de films (New et Pallier, lexique.org, 2004).

Par exemple, dans la liste de Fournier n°2 (Tableau 36), le mot « niveau » est très fréquent tandis que le mot « forban » est très rare. Il est attendu, au niveau de la fréquence lexicale, que « niveau » soit plus facile à identifier que « forban ». Un voisin phonologique est un mot constitué par l’ajout, la suppression, l’inversion ou la substitution d’un phonème du mot cible. Par exemple, le mot râteau à 16 voisins phonologiques, dont « bateau », « gâteau », « rameau », « raton »... Le mot « refrain » n’a aucun voisin phonologique. Plus un mot cible a de voisins phonologiques, plus il y a de risque de confusions perceptives entre ce mot cible et ses voisins phonologiques qui sont des mots proches, a fortiori si ces derniers ont une fréquence lexicale plus élevée que le mot cible.

(a) *Liste des mots dissyllabiques de Fournier (1951)*

Les listes de Fournier (1951) sont composées de substantifs dissyllabiques masculins se terminant par une voyelle (Annexe D). Trente listes de 10 mots (300 mots au total) ont été téléchargées à partir du site du Collège Français d'Audioprothèse (<http://www.college-nat-audio.fr/listes-cd-audiometrie-vocale.html>). A partir de la base de données lexique.org 3.8 (New et Pallier, 2004), la fréquence lexicale orale (à partir de sous-titres de films) a été relevée pour chaque mot (la forme orthographique exacte de chaque mot au singulier a été choisie comme entrée car l'article « le » sous-entend qu'il s'agit bien d'un nom, masculin et singulier).

171 mots (57%) ne contiennent pas de voyelle nasale

129 mots (43%) contiennent au moins une voyelle nasale

- 103 contiennent une voyelle nasale sur la deuxième syllabe
- 19 contiennent une voyelle nasale sur la première syllabe
- 7 contiennent deux voyelles nasales, une dans chaque syllabe

La fréquence n'est pas en moyenne significativement différente entre le groupe des mots comprenant une voyelle nasale ($12,6 \pm 2,2$; [0,01-188]) et celui des mots n'en comprenant pas ($15,90 \pm 2,6$ [0-277]) avec test t non apparié : $t = -0,92$, $p = 0,36$. Par contre, il y a significativement moins de voisins phonologiques dans le groupe des mots comprenant une voyelle nasale ($7,5 \pm 0,5$ [0-26]) que dans le groupe des mots ne comprenant pas de voyelles nasales ($9,7 \pm 0,5$ [0-32]) avec $t = 2,87$; $p = 0,0045$. Il n'y a pas d'effet du N° de liste sur la fréquence lexicale moyenne de la liste (ANOVA : $F(29,270) = 0,96$; $p = 0,53$), ni sur le nombre de voisins phonologiques (ANOVA : $F(29,270) = 0,60$; $p = 0,95$).

Au total, on observe une représentativité importante des voyelles nasales dans les listes de Fournier car près de la moitié des mots (43%) contiennent une voyelle nasale. Cela a-t-il une influence sur le score des patients aux listes de Fournier ?

(b) *Listes cochléaires de Lafon (1964)*

Les listes de Lafon sont composées de 20 listes de 17 mots triphonémiques (Annexe C) de type CVC, CVV, VCV ou CCV. Sur les 340 mots totaux, 49 mots (14%) contiennent une voyelle nasale et 291 (86%) n'en contiennent pas. A partir de la base de données lexique.org 3.8 (New et Pallier, 2004), la fréquence lexicale orale (à partir de sous-titres de

film) de chaque mot des listes a été relevée. Nous avons tenu compte de la fréquence lexicale des homophones du mot cible et conservé la fréquence la plus élevée. Par exemple, une liste de Lafon contient le mot « foc » (0,29/1000000 d'occurrences) mais nous avons utilisé la fréquence lexicale du mot « phoque » (2,24/1000000 d'occurrences) puisque ces mots sont présentés à l'oral. Le nombre de voisins phonologiques a également été reporté pour chaque mot.

La fréquence lexicale n'est pas significativement différente entre le groupe des mots comprenant une voyelle nasale (MOY=110±SEM=85,9, [MIN=0,02;MAX=4214]) et celui n'en comprenant pas (93±26,9, [0;7079]) avec test t non apparié : $t=0,23$; $p=0,82$. Par contre, le groupe des mots contenant une voyelle nasale présente en moyenne moins de voisins phonologiques (14,7±0,5 [8;23]) que le groupe des mots ne contenant pas de voyelles nasales (19,9±0,4, [6-36]), avec test t non apparié $t=-5,6$; $p<0,0001$. Il n'y a pas d'effet du n° de liste sur la fréquence lexicale moyenne (ANOVA : $F(19,320)=0,86$; $p=0,63$) ou sur le nombre de voisins phonologiques (ANOVA : $F(19,320)=0,97$; $p=0,5$).

(3) Reconnaissance de mots de Fournier et de Lafon en fonction de la présence ou non d'une voyelle nasale

(a) Méthode

Pour chaque liste de mots dissyllabiques (Fournier, 1951) ou triphonémiques (listes cochléaires de Lafon, 1964), la répartition entre les mots contenant une voyelle nasale et ceux n'en contenant pas a été calculée. Il a ensuite été calculé le score de reconnaissance des mots contenant une voyelle nasale et de ceux n'en contenant pas.

(b) Résultats

Evaluation < 4 mois n=80 patients	Mots de Fournier ne contenant aucune voyelle nasale	Mots de Fournier contenant au moins une voyelle nasale
Listes testées (répartition théorique)	470 59%	330 41%
Score de bonnes réponses (répartition observée)	291 60%	196 40%

Evaluation > 12 mois n=80 patients	Mots de Fournier ne contenant aucune voyelle nasale	Mots de Fournier contenant au moins une voyelle nasale
Listes testées (répartition théorique)	463 58%	337 42%
Score de bonnes réponses (répartition observée)	310 56%	239 44%

Tableau 37: Comparaison des scores d'identification des mots dissyllabiques de Fournier contenant une voyelle nasale et de mots n'en contenant pas, au stade précoce (haut) et au stade tardif (bas) pour 80 adultes implantés cochléaires.

Evaluation < 4 mois n=77 patients	Mots de Lafon ne contenant aucune voyelle nasale	Mots de Lafon contenant au moins une voyelle nasale
Listes testées (répartition théorique)	1148 82%	254 18%
Score de bonnes réponses (répartition observée)	582 83%	120 17%

Evaluation > 12 mois n=77 patients	Mots de Lafon ne contenant aucune voyelle nasale	Mots de Lafon contenant au moins une voyelle nasale
Listes testées (répartition théorique)	1099 84%	215 16%
Score de bonnes réponses (répartition observée)	603 83%	125 17%

Tableau 38: Comparaison des scores d'identification des mots triphonémiques des listes cochléaires de Lafon contenant une voyelle nasale et de mots n'en contenant pas, au stade précoce (haut) et au stade tardif (bas) pour 77 adultes implantés cochléaires.

Au total, il n'y a aucune différence d'identification entre les mots comprenant une voyelle nasale et les mots n'en comprenant pas, aussi bien pour les listes de Fournier que pour les listes de Lafon testées.

4. Discussion

Le premier point concerne l'ancienneté des données. En effet, les patients de cette étude ont été implantés avant 2008 et un certain nombre d'entre eux utilise un système d'implant cochléaire d'ancienne génération. Les résultats ne peuvent donc que représenter les systèmes implantés avant 2008. Cependant, pour Cochlear®, bien que les processeurs aient changé, la stratégie de codage ACE est toujours la même. Par contre, pour Med-el®, Advanced Bionics® et Neurelec®, de nouvelles stratégies de codage ont été proposées depuis.

a) **Le trait nasal des voyelles nasales et des consonnes nasales est-il bien identifié ?**

Aussi bien très précocement qu'à distance de l'implantation, les trois voyelles nasales sont significativement moins bien identifiées que les dix voyelles orales. En complément de l'étude du Master (Borel, 2007) qui évaluait des patients récemment implantés, la présente étude retrouve une persistance de la difficulté à identifier les voyelles nasales au stade tardif, parfois plusieurs années après l'implantation. La difficulté apparaît d'emblée et est vraisemblablement liée au traitement des informations acoustiques par l'implant cochléaire. Bien que l'identification s'améliore significativement entre la première et la dernière évaluation, la difficulté persiste à distance de l'implantation, semblant ainsi résister à l'habituation et à la rééducation orthophonique. Au stade précoce (<4 mois), les trois voyelles nasales sont les 3 phonèmes les plus mal identifiés parmi les 27 voyelles et consonnes testées. Au stade tardif (>12 mois), les voyelles [ɛ̃] et [ɔ̃] restent les phonèmes les plus mal identifiés. Par contre, la voyelle [ɑ̃] est mieux identifiée que les phonèmes [u], [d], [z]. La voyelle [ã] est la mieux identifiée des nasales et la voyelle [ɔ̃] la moins bien identifiée.

Les consonnes nasales [m,n] sont, quant à elles, correctement identifiées comme nasales et les confusions vont plutôt dans le sens d'une confusion de lieu d'articulation, notamment pour la consonne [n] qui peut être confondue avec la consonne [m]. Par contre, il y a peu de confusions de [n] vers la consonne [l], qui s'opposent par l'indice de nasalité. Pour les consonnes nasales, les résonances naturelles du conduit pharyngo-nasal à 250-300 Hertz, 1000 Hertz, 2000 Hertz et 3000 Hertz (Fant, 1960 ; Fujimura, 1962 ; Stevens, 2000) sont atténuées par les antiformants de la cavité orale, entre 750 et 1250 Hertz pour la consonne [m] et entre 1450 et 2200 Hertz pour la consonne [n] (Clements et al., 2014). Le large pic très intense à 250-300 Hertz qui correspond à une résonance naturelle de la cavité principale, a une largeur de bande plus importante que celle de la voyelle [l]. Il semblerait donc que les adultes implantés cochléaires soient capables de percevoir ce large pic de résonance intense

autour de 250-300 Hertz mais pas les antiformants, surtout entre 1450 et 2200 Hertz pour la consonne [n].

b) Quelles sont les confusions les plus fréquentes ?

Dans 98% des cas (84/86 des confusions exprimées) au stade précoce et dans 94% des cas au stade tardif (64/68 des confusions exprimées), les confusions s'orientent vers une voyelle orale. Les confusions les plus fréquentes sont les mêmes au stade précoce et au stade tardif: [ã] est majoritairement confondu avec [a], [õ] avec [o], [ẽ] avec [a]. Contrairement aux confusions faites par les normo-entendants (Hall et Hume, 2013) et les sujets présentant une surdité neurosensorielle (Lefèvre, 2006) qui s'orientent préférentiellement vers des voyelles nasales, respectant ainsi le trait de nasalité, les adultes implantés cochléaires ne perçoivent pas la caractéristique acoustique qui permet de catégoriser la voyelle comme nasale. Les confusions de [õ] avec [o] et [ẽ] avec [a] rejoignent les résultats obtenus par une population normo-écoutante lorsqu'on lui fait écouter la portion non nasalisée de la voyelle nasale (Montagu, 2007). En effet, les normo-entendants perçoivent [o] et [a] lorsqu'on leur présente le début non nasalisé des voyelles [õ] et [ẽ] (en contexte [tV]). Les sujets implantés percevraient-ils une version non nasalisée de la voyelle nasale ? Leur manquerait-il des informations liées à la diminution de l'intensité des formants dans les basses fréquences : F₁ pour Delattre (1965) et Beddor et al. (1986), F₁ et/ou F₂ pour Maeda (1993), F₁ et F₃ pour Delvaux (2009) ? Pour les voyelles [õ] et [ẽ], les confusions retrouvées dans la présente étude dans des syllabes CV sont les mêmes que celles observées dans l'étude du Master (Borel, 2007) dans des syllabes CVC. Par contre, dans la présente étude, la voyelle [ã] est majoritairement confondue avec [a] ce qui ne correspond pas à la confusion [ɔ] retrouvée dans l'étude de 2007. Les confusions sont peut-être influencées par le contexte syllabique, qui est différent dans les deux études : dans la présente étude, la syllabe ouverte CV ne favorise pas la réponse [ɔ], puisque cette voyelle mi-ouverte ne se rencontre jamais en syllabe CV en français. Il y a peut-être un biais phonotactique interdisant à l'auditeur de percevoir [pɔ], et l'obligeant à le réparer¹⁶ en [pa]. Afin de s'affranchir de ces éventuels biais phonotactiques, la prochaine étude (étude n°3) proposera une tâche de discrimination de voyelles isolées, afin

¹⁶ *Réparer* est employé ici au sens développé par C. Paradis (1987) de réparation perceptive par l'auditeur des violations des règles phonotactiques de sa langue, notamment dans les mots empruntés à d'autres langues.

de confirmer que les confusions s'orientent davantage vers les voyelles orales selon la description actualisée ([ã]-[ɔ], [õ]-[o], [ẽ]-[a]).

Comme suggéré par Dupont et Lejeune (2010), la présente étude confirme que la voyelle [õ] est la plus difficile à identifier, aussi bien au stade précoce qu'au stade tardif. Par contre, pour toutes les voyelles nasales, Dupont et Lejeune (2010) décrivent des confusions vers d'autres voyelles nasales, ce qui n'est retrouvé ni dans l'étude précédente (Borel, 2007), ni dans la présente étude. Cependant, les propositions faites par Dupont et Lejeune (2010) concernent le français de Belgique.

La difficulté à percevoir le trait nasal des voyelles nasales touche chacune des trois voyelles nasales. Pourtant, les modifications acoustiques provoquées par la nasalité dépendent surtout de la configuration du conduit vocal donc du timbre de la voyelle (Maeda, 1993) et il n'a pas été décrit d'indice unique de nasalité valable pour toutes les voyelles.

c) Quels facteurs influencent l'identification des voyelles nasales ?

L'analyse des facteurs influençant les résultats de l'implant cochléaire est complexe et requiert des modèles statistiques multivariés. Dans la présente étude, nous avons analysé chaque facteur de façon indépendante et certaines interactions de deux facteurs ensemble. Les résultats ne peuvent donc être considérés que comme des tendances à valider ultérieurement avec des modèles multivariés.

Le premier facteur influençant l'identification des voyelles nasales est le délai post-implant. Au-delà de la première année post-implant, les voyelles nasales sont significativement mieux identifiées qu'avant le quatrième mois post-implant.

Un seul parmi tous les autres paramètres étudiés s'est révélé être significatif : le côté implanté. Au stade précoce, l'identification de voyelles nasales est meilleure chez les patients implantés à droite que chez les patients implantés à gauche (cette différence ne se retrouve pas au stade tardif). Ce résultat n'est retrouvé que pour les voyelles nasales. La présente étude n'ayant pas pour objectif de tester l'effet du côté implanté sur la perception de la parole, le protocole mis en place n'est ni adapté, ni suffisamment rigoureux pour considérer ce résultat au-delà d'une simple tendance soulevant plusieurs questions qui feront peut-être un jour l'objet d'une étude dédiée. On sait que, chez les droitiers, la discrimination de structures phonétiques tend à augmenter l'activité de l'aire de Broca dans l'hémisphère gauche suggérant

le rôle du recodage articuloire dans la perception phonétique (Zatorre et al., 1992). Du fait du croisement des voies auditives afférentes et efférentes, l'oreille droite serait alors prépondérante pour le traitement des informations de liées à la parole. Chez le sujet normo-entendant, le « right ear advantage » a été mis en évidence par des tâches d'écoute dichotique, qui consistent à présenter simultanément deux signaux acoustiques différents dans chaque oreille (Lazard et al., 2010c) et à déduire, selon la rapidité ou la qualité du traitement auditif, quel hémisphère traite préférentiellement le type de matériel auditif testé (voix, parole, musique...). Cependant la supériorité de l'oreille droite pour l'implantation cochléaire n'a pas été mise en évidence de façon systématique (Morris et al., 2007 ; Roman et al., 2004 pour la détection du voisement des occlusives mesurée en électrophysiologie ; Francis et al., 2005) même si certains auteurs la signale, comme Henkin et al. (2008) chez les enfants présentant une surdité prélinguale et surtout Budenz et al. (2011) chez des adultes âgés de plus de 70 ans. En effet, Budenz et al. (2011) n'observe cette asymétrie que pour le groupe de patients les plus âgés et pour les tâches auditives les plus complexes (mots monosyllabiques et phrases dans le bruit, l'asymétrie n'étant pas retrouvée pour les phrases dans le silence). Nous nous sommes alors demandé s'il y avait une interaction entre l'âge et le côté implanté pour l'identification des voyelles nasales au stade précoce. Nous avons proposé une seconde analyse, ANOVA à deux facteurs, avec âge*côté. Il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs ($F(2,76)=2,5$; $p=0,0856$) au stade précoce. Nous ne pouvons conclure sur un éventuel effet du côté implanté. Une des limites de cette analyse est que nous n'avons pas d'information sur la main dominante des patients, facteur ayant une influence sur leur traitement central de l'audition.

Concernant les paramètres techniques, aucune influence n'est ressortie. Le nombre d'électrodes, représentant la résolution fréquentielle, est un facteur important pour l'identification des voyelles (Xu et al., 2005 et 2007 ; Nie et al., 2006). Cependant, dans la présente étude, 97% des patients ont plus de 85% d'électrodes du porte électrodes activées, ce qui favorise une bonne compréhension de la parole (Lazard et al., 2012) et ne suscite pas suffisamment de variabilité pour être étudié en tant que facteur. Par ailleurs, seuls 8 patients étudiés sur 76 ont des systèmes avec un porte-électrodes de moins de 20 électrodes (Med-el[®] et Advanced Bionics[®]), ce qui ne permet pas, encore une fois, d'évaluer l'effet du nombre total d'électrodes du système sur l'identification des voyelles nasales. La vitesse de stimulation n'est pas non plus retrouvée comme étant un facteur favorisant dans la présente étude. L'identification de voyelle repose davantage sur les informations spectrales (le nombre

d'électrodes) que sur les informations temporelles, codées par vitesse de stimulation, (Xu et al., 2005 et 2007 ; Nie et al., 2006), même si Shannon et al. (2010) rapportent que l'identification de voyelles bénéficierait d'une augmentation de la vitesse de stimulation (4800 Hertz vs. 600 Hertz).

d) Une difficulté à identifier les voyelles nasales a-t-elle un impact sur la reconnaissance de mots de Lafon et de Fournier proposés lors des évaluations orthophoniques ?

L'analyse linguistique du corpus de 30 listes de Fournier a permis de mettre en évidence une représentation très élevée des voyelles nasales dans ces listes puisque 43% des mots en contiennent au moins une, pour des voyelles [ã, õ, ê, œ] qui ne représentent pourtant à elle quatre que 5,1% (Chavasse, 1948) à 7,4% (Valdman, 1976) des phonèmes du français. Ces deux pourcentages ne peuvent cependant pas être comparés strictement car ils ne représentent pas la même chose. La fréquence d'occurrence est la fréquence à laquelle un phonème se rencontre dans une langue, tandis que nous avons calculé le pourcentage de mots comprenant une voyelle nasale. Cependant, on pourrait s'attendre à une difficulté supplémentaire pour les adultes implantés cochléaires pour percevoir les mots contenant une voyelle nasale. Pourtant, les mots (Lafon et Fournier) contenant au moins une voyelle nasale ne sont pas moins bien reconnus que les autres mots, quel que soit le délai post-implant. Pour les 80 patients testés et pour ce corpus, la difficulté précédemment mise en évidence à identifier les voyelles nasales isolées semble se compenser par l'accès au sens du mot, la suppléance mentale. Dans les listes de Lafon et Fournier, les mots contenant une voyelle nasale peuvent cependant être considérés comme plus faciles à reconnaître car ils contiennent, en moyenne, moins de voisins phonologiques (Dirks et al. 2011).

Doit-on pour autant arrêter d'étudier la perception des voyelles nasales par les adultes implantés, puisqu'elle semble n'avoir aucun effet sur leur reconnaissance de la parole ? Il nous semble que toute démarche visant à comprendre et améliorer la perception périphérique d'éléments de parole avec l'implant cochléaire est intéressante. Si la suppléance mentale semble effectivement compenser la difficulté à percevoir les voyelles nasales isolément, ceci n'est, pour le moment montré que dans le silence. Que se passerait-il dans le bruit où les informations temporelles et spectrales sont davantage dégradées et où les ressources cognitives et exécutives de l'auditeur sont également sollicitées pour localiser la source de

parole en faisant abstraction de signaux distracteurs ? Plus généralement, les ressources cognitives, si elles ne servaient pas à compenser le problème d'identification de voyelles nasales pourraient être utilisées à d'autres tâches. Enfin, il serait intéressant d'évaluer la reconnaissance de mots sur un corpus élaboré à partir de mots composant des paires minimales pour les oppositions [ã]-[a], [õ]-[o], [ẽ]-[e] et [ä]-[ɔ], [ö]-[o], [ë]-[a] en contrôlant la fréquence lexicale et le nombre de voisins phonologiques pour chaque paire.

En conclusion, les voyelles nasales posent un problème d'identification par les adultes implantés cochléaires, du moins ceux implantés avant 2008. Les confusions s'orientent clairement vers des voyelles orales et suggèrent une difficulté spécifique à percevoir la nasalité vocalique. Les deux prochaines études auront pour objectifs de déterminer quelles informations acoustiques manquent aux adultes implantés cochléaires pour percevoir la nasalité vocalique. La difficulté à identifier les voyelles nasales isolées n'influence pas les résultats aux tests de l'audiométrie vocale de Fournier, listes présentant une surreprésentation de voyelles nasales.

B. Etude n°4 : Discrimination des paires orale-nasale phonologiques et phonétiques

L'étude n°4 est composée d'une expérience perceptive de détection de voyelles intruses et d'une analyse acoustique des stimuli utilisés dans l'expérience perceptive. L'objectif de l'expérience perceptive est d'évaluer la discrimination de voyelles nasales parmi des voyelles orales. Deux exemplaires des voyelles [i, a, ε, ɔ, o, ɔ̃, ɑ̃, ɛ̃] prononcées par deux locutrices francophones parisiennes ont été utilisées pour tester la discrimination des 9 paires de voyelles orale-nasale : trois « paires contrôles » associant les voyelles nasales [ɑ̃], [ɔ̃] et [ɛ̃] à la voyelle [i], trois « paires phonologiques » correspondant aux trois alternances morpho-phonologiques classiques ([ɑ̃]-[a], [ɔ̃]-[ɔ], [ɛ̃]-[ε]) et trois paires, nommées « paires phonétiques » ([ɑ̃]-[ɔ], [ɔ̃]-[o], [ɛ̃]-[a]), prenant en compte la distance phonétique entre les voyelles et les confusions les plus fréquentes retrouvées dans les précédentes études. Ce corpus a été présenté à 15 auditeurs implantés cochléaires, 11 femmes et 4 hommes, âgés de 26 à 79 ans ($\text{moy}=61\pm4,3$), et 6 auditeurs normo-entendants, 4 femmes et 2 hommes âgés de 22 à 72 ans ($48\pm9,7$ ans). Les auditeurs devaient répondre à la question suivante : « Parmi ces quatre voyelles, y a-t-il une voyelle nasale ? et si oui désignez sa place dans la séquence. » L'hypothèse est que la détection sera meilleure pour les « paires phonologiques », que pour les « paires phonétiques », au sein desquelles les voyelles sont acoustiquement plus proches. Les résultats confirment les hypothèses : la paire [ɑ̃]-[ɔ] est significativement moins bien différenciée que la paire [ɑ̃]-[a] ($44\%\pm6,7$ vs. $67\%\pm6,9$, $p=0,0038$). La paire [ɔ̃]-[o] est significativement moins bien différenciée que la paire [ɔ̃]-[ɔ] ($53\%\pm6,9$ vs. $76\%\pm6,0$, $p=0,0109$). La paire [ɛ̃]-[a] est significativement moins bien différenciée que la paire [ɛ̃]-[ε] ($56\%\pm6,2$ vs. $74\%\pm5,9$, $p=0,0476$). L'objectif de l'analyse acoustique est de comparer acoustiquement les voyelles orales et les voyelles nasales des deux locutrices utilisées pour l'expérience perceptive. La fréquence moyenne des quatre premiers pics spectraux des quatre occurrences de chaque voyelle (2 locutrices * 2 répétitions) a été calculée. On observe une proximité des deux premiers pics spectraux de [ɔ̃] et de [o] et des premier et quatrième pics spectraux de [ɑ̃] et [ɔ]. Ces proximités pourraient expliquer nos résultats précédents. Par contre, les confusions entre [ɛ̃] et [a] ne semblent pas pouvoir s'expliquer par une proximité acoustique d'un ou plusieurs des pôles spectraux.

1. Objectifs

Cette étude a pour objectif de comparer la détection de voyelles nasales dans neuf paires orale-nasale (Tableau 39) correspondant, soit aux alternances phonologiques ([ã]-[a], [õ]-[o], [ẽ]-[e]) décrites dans le chapitre 1, ici nommées « paires phonologiques », soit aux paires prenant en compte la courte distance phonétique entre les voyelles ([ã]-[ɔ], [õ]-[o], [ẽ]-[a]), et correspondant davantage aux descriptions phonétiques actuelles des voyelles nasales, ici nommées « paires phonétiques ». Un troisième type de paires, nommées « paires contrôles » associe les voyelles nasales à [i], la voyelle la plus facile à percevoir par les adultes implantés cochléaires, afin de vérifier que la tâche est accessible au patient aux niveaux perceptif et cognitif.

Paires contrôles	Paires phonologiques	Paires phonétiques
[i] vs. [ã]	[a] vs. [ã]	[ɔ] vs. [ã]
[i] vs. [ẽ]	[e] vs. [ẽ]	[a] vs. [ẽ]
[i] vs. [õ]	[ɔ] vs. [õ]	[o] vs. [õ]

Tableau 39: Description des paires contrôles, phonologiques et phonétiques de l'étude n°4.

2. Etude perceptive

L'objectif est de montrer que le score de discrimination des « paires phonologiques » est plus élevé que celui des « paires phonétiques » attestant ainsi d'une plus grande proximité perceptive pour les « paires phonétiques » que pour les « paires phonologiques ».

a) Méthode

(1) Locuteurs et stimuli

Deux locutrices, francophones parisiennes âgées de 24 et 30 ans, ont enregistré dans une pièce calme 4 répétitions de 13 voyelles isolées [a, i, u, y, e, ε, o, ɔ, ø, œ, ã, õ, ẽ]. Pour la présente étude seules les voyelles [a], [i], [ε], [o], [ɔ], [ã], [õ] et [ẽ] ont été utilisées. Le matériel d'enregistrement est composé d'un microphone serre-tête AKG C520 et d'une carte son EDIROL UA25. Les phrases sont directement enregistrées sur un ordinateur

portable Mac (Apple) via le logiciel Audacity 2.0.4 (<http://audacity.sourceforge.net/>). La fréquence d'échantillonnage est fixée à 44100 Hz et la quantification est de 16 bits.

La consigne était la suivante:

- Les phrases qui vous seront proposées sont construites de la manière suivante :
- Exemple : « Ville, il a dit <i> comme dans ville »
- La voyelle qui apparaît entre crochets est celle du mot de référence qui apparaît au début et à la fin de la phrase. Détachez bien cette voyelle du mot précédent et suivant.
- Essayez de lire cette phrase et on vous dira si vous avez bien compris le fonctionnement.

Après une phase d'entraînement sur 5 phrases, l'enregistrement du corpus a commencé. Les stimuli ont été segmentés et étiquetés sous Praat 5.3.40 (Boersma et Weenink) et un Textgrid a été créé. Un test préliminaire d'identification auprès de trois auditeurs, deux hommes et une femme, normo-entendants âgés de 36, 39 et 48 ans a permis d'exclure les exemplaires qui n'étaient pas identifiés à 100%. Puisque que seuls deux exemplaires de chaque voyelle étaient nécessaires pour le test perceptif, lorsqu'il en restait davantage que deux, la deuxième et la quatrième itération ont été exclues arbitrairement.

(2) *Elaboration du test de perception*

Le test de perception inspiré des tests de type « Oddity Task », une tâche de détection d'intrus, proposée par Bradley et Bryant (1983) pour l'évaluation des compétences phonologiques chez les enfants. La tâche Oddity est dérivée du paradigme Oddball qui consiste à proposer des séquences répétitives de stimuli auditifs ou visuels identiques, interrompues ponctuellement de façon aléatoire par un stimulus déviant. La tâche consiste alors à demander au sujet de signaler lorsque le stimulus déviant apparaît et/ou à enregistrer les réponses électrophysiologiques cérébrales induites par le changement de stimulus (*mismatch negativity* par exemple) qu'elles soient conscientes ou inconscientes. La tâche « Oddity » ou « détection d'intrus », consiste en une séquence de stimuli réduite (ici quatre) à détecter de façon active la présence d'un stimulus déviant et à pointer sa position dans la séquence. Dans la présente étude, le stimulus répété est une voyelle orale et l'intrus est une voyelle nasale. Pour chacune des neuf paires testées (Tableau 39), des séquences de 4

voyelles sont proposées selon la matrice présentée dans le Tableau 40. Le niveau de chance est à 20% (5 réponses possibles).

8 séquences ne contenant pas de stimulus déviant			
"a11,a12,a22,a21"	a21,a12,a22,a11"	"a21,a22,a12,a11"	"a12,a22,a21,a11"
"a21,a22,a12,a11"	"a12,a22,a11,a21"	"a11,a12,a21,a22"	"a22,a11,a12,a21"
16 séquences contenant un stimulus déviant [ã] survenant en 1 ^{ère} , 2 ^{ème} , 3 ^{ème} ou 4 ^{ème} position			
" an11 ,a12,a22,a21"	"a21, an11 ,a22,a11"	"a21,a22, an11 ,a11"	"a12,a22,a21, an11 "
" an21 ,a22,a12,a11"	"a12, an21 ,a11,a21"	"a11,a12, an21 ,a22"	"a22,a11,a12, an21 "
" an12 ,a12,a22,a21"	"a21, an12 ,a22,a11"	"a21,a22, an12 ,a11"	"a12,a22,a21, an12 "
" an22 ,a22,a12,a11"	"a12, an22 ,a11,a21"	"a11,a12, an22 ,a22"	"a22,a11,a12, an22 "

Tableau 40: 24 séquences proposées aux auditeurs pour la paire [a] vs. [ã] telles que codées dans le script Praat (Annexe F). a12 correspond à la deuxième occurrence de la locutrice n°1, a21 à la première occurrence de la locutrice n°2. Les séquences sont proposées en ordre aléatoire.

Pour chacune des 9 paires, 24 séquences sont proposées. 8 séquences sont identiques et proposent 4 exemplaires différents de la même voyelle orale, prononcée par les deux locutrices. 16 séquences proposent une voyelle nasale intruse qui peut survenir en 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} ou 4^{ème} position, avec un intervalle inter-stimulus de 700 ms. La variabilité induite par le contexte multi locuteurs contraint l'auditeur à se concentrer sur des différences phonétiques en faisant abstraction de la variabilité inter-locutrices et/ou inter-occurrence d'une même locutrice. Cette tâche oblige à catégoriser la voyelle à un niveau phonologique. Initialement, la répétition de 2 occurrences de chaque voyelle par deux locutrices différentes a été préférée à la répétition d'une seule occurrence par 4 locutrices différentes afin de pouvoir étudier les variations intra-locutrices dans les corrélations perceptivo-acoustiques. Cependant, les corrélations perceptivo-acoustiques n'ont pas pu être menées car le nombre de séquences était finalement trop réduit.

Le test de perception est programmé sous Praat 5.3.40 (Boersma et Weenink) et proposé en ordre aléatoire (voir script en Annexe F) aussi bien pour l'ordre des 9 paires que pour l'ordre des 24 séquences au sein des 9 paires.

(3) *Déroulement du test de perception*

Le test est proposé sur ordinateur, au moyen d'un casque Sennheiser HD 280 pro, dont la sortie audio a été mesurée à 65 dB (A) au moyen d'un sonomètre. Le son n'est adressé que du côté implanté afin d'éviter toute contribution de l'oreille controlatérale quand celle-ci comportait encore une audition résiduelle. L'auditeur écoute une séquence de 4 voyelles séparées par une pause de 700 ms. Soit il croit entendre 4 fois la même voyelle orale et il clique alors sur l'icône « c'est la même voyelle ». Soit il pense qu'une voyelle nasale « intrusive » s'est glissée parmi les 4 voyelles et clique alors sur l'icône associée à la position (1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} ou 4^{ème}) dans laquelle la voyelle nasale lui semble être apparue. La consigne générale de détection d'intrus, est présentée à l'écrit avant le commencer le test :

« Bonjour et merci de participer à cette étude. Nous allons faire 10 petits tests de 2 minutes. A chaque fois la consigne est la même. Vous allez entendre 4 voyelles à la suite.

Soit il s'agit des 4 mêmes voyelles → Vous cliquez dans la case « c'est la même voyelle ».

Soit il y a une voyelle différente (« an », « on » ou « in ») qui s'est glissée parmi les quatre → vous cliquez sur le numéro correspondant à la position de la voyelle « intrus ».

Un entraînement sur la paire [i]-[ĩ] a été proposé avant de débiter le test. Les résultats de l'entraînement n'ont pas été traités. Puis pour chaque paire proposée, le stimulus cible et le stimulus déviant sont énoncés à l'oral et sur support écrit. La consigne reste visible en haut de l'interface de test. Pour chacune des neuf paires testées, le stimulus cible et le stimulus déviant sont rappelés en haut de l'écran lors de toute la durée du test (Figure 63).

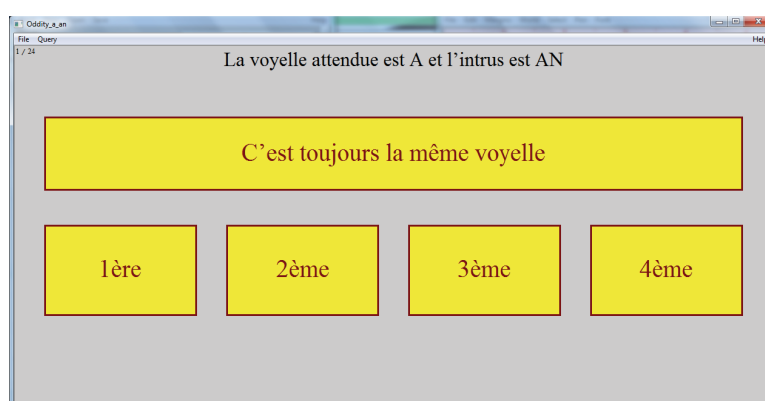


Figure 63: Interface du test de perception de l'étude n°4.

(4) Population

Ce test a été proposé lors d'une visite des patients dans le service d'ORL de l'hôpital Beaujon (Clichy, AP-HP) ou de l'unité *Otologie, implant auditifs, chirurgie de la base du crâne* de la Pitié-Salpêtrière (Paris, AH-HP), dans le cadre de leur suivi clinique. Tous les patients ont lu une lettre d'information et signé un consentement. Les sujets témoins ont été recrutés dans l'entourage personnel et professionnel de l'évaluateur.

Quinze adultes implantés cochléaires (11 femmes, 4 hommes, Tableau 41), âgés de 26 à 79 ans (MOY $\pm$ SEM: 61 $\pm$ 4,3 ans) et six sujets témoins normo-entendants n'ayant jamais consulté pour un trouble auditif et ne signalant aucune gêne particulière, 4 femmes et 2 hommes âgés de 22 à 72 ans (48 $\pm$ 9,7 ans). Le délai post-implant moyen est de 32 $\pm$ 8,2 mois avec [min ; max] : [4 ; 105]. Les scores de reconnaissance de mots de Lafon, mots de Fournier dans le silence et de phrases MBAA à un rapport signal/bruit de 10 dB sont respectivement de : 57 $\pm$ 7% [18 ; 98], 77 $\pm$ 7% [10-100] et 70 $\pm$ 8% [20 ; 100]. Neuf patients sur quinze utilisent une aide auditive controlatérale (AA. contro.).

N°	Age	Sexe	Système	Recul post IC	Etiologie	AA. contr o.	LAFON	FOURNIER	MBAA SNR 10
1	72	m	Med-el	16	Inconnue	non	18	10	20
2	73	f	Med-el	18	Inconnue	oui	41	70	93
3	64	f	Cochlear	82	Otospongiose	non	88	100	93
4	58	f	Cochlear	105	Inconnue	oui	35	40	80
5	68	f	Med-el	12	Génétique	oui	53	70	47
6	64	f	Neurelec	15	Inconnue	oui	82	90	80
7	75	f	Cochlear	76	Méningite	non	92	100	100
8	26	m	Cochlear	42	Ototoxique	oui	98	100	95
9	76	f	Neurelec	16	Génétique	non	24	70	20
10	60	m	Med-el	4	Ototoxique	non	60	90	20
11	55	f	Med-el	53	Inconnue	oui	85	100	88
12	68	f	Cochlear	9	Otospongiose	oui	29	50	67
13	29	f	Cochlear	9	Inconnue	oui	32	100	60
14	41	m	Cochlear	20	Inconnue	oui	65	80	87
15	79	f	Cochlear	9	Neurinome	non	47	90	100

Tableau 41: Données démographiques et techniques relatives aux quinze sujets implantés cochléaires de l'étude n°3.

(5) *Traitement des données*

Le traitement des données a été effectué au moyen des logiciels Excel pour Mac 2011 (Apple), version 14.4.3 et Statview 5.0. SAS Institute Inc. Un test non paramétrique d'analyse de la variance (Kruskal-Wallis) a été proposé afin de mettre en évidence l'effet du type de paire sur la détection de voyelles nasales dans les séquences. Des tests PLSD de Fisher ont permis de mesurer les différences par couples de paires.

3. Résultats

a) Sujets normo-entendants

Les six adultes normo-entendants ont obtenu un score de détection supérieur à 97% sauf pour les deux paires [ã]-[ɔ] (94%) et [ẽ]-[a] (93%). Ces résultats attestent de la faisabilité de la tâche aussi bien au niveau procédural que perceptif mais montrent également une certaine fragilité pour les paires phonétiques, même pour les sujets normo-entendants.

b) Sujets implantés cochléaires

(1) Influence de la position de la nasale dans la séquence des orales

Toutes paires confondues, pour les sujets implantés, il n'y a pas d'effet de la position de survenue de la voyelle nasale (Kruskal-Wallis : $H=1,836$, $p<0,6071$) sur le score, avec respectivement : $42,1\pm2,2\%$, $45,8\pm1,8\%$, $43,8\pm1,9\%$, $44,6\pm2,8\%$ pour la 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} position.

(2) Influence de la locutrice

Les voyelles nasales prononcées par la locutrice n°1 (L1) ont été mieux détectées que celles prononcées par la locutrice n°2 (L2), pour les trois « paires phonétiques » ($8,2\pm0,4$ sur 15 vs. $6,1\pm0,3$ sur 15, test de Mann-Whitney : $U=62$; $p=0,0013$), c'est-à-dire pour la condition considérée comme la plus difficile.

(3) Voyelle [ã]

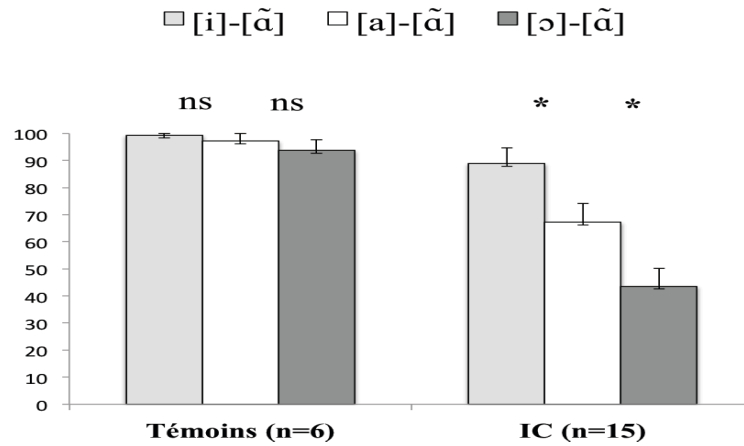


Figure 64: Détection de la voyelle [ã] parmi les voyelles [i], [a] et [ɔ]. Test PLSD de Fisher avec * si $p < 0,05$.

MOY±SEM	[i]-[ã]	[a]-[ã]	[ɔ]-[ã]	Test non paramétrique de Kruskal-Wallis
Témoins (n=6)	99±0,7	97±2,8	94±4,0	H=0,9 ; p=0,6 N.S
IC (n=15)	89±5,7	67±6,9	44±6,7	H=17,4 ; p=0,0002 *

Tableau 42: Détection de la voyelle [ã] parmi les voyelles [i], [a] et [ɔ].

Il y a un effet du type de paire sur la détection de la voyelle [ã] parmi des voyelles orales. La voyelle [ã] est significativement moins bien détectée dans les « paires phonétiques » que dans les « paires phonologiques » (Tableau 42, Figure 64).

(4) Voyelle [ẽ]

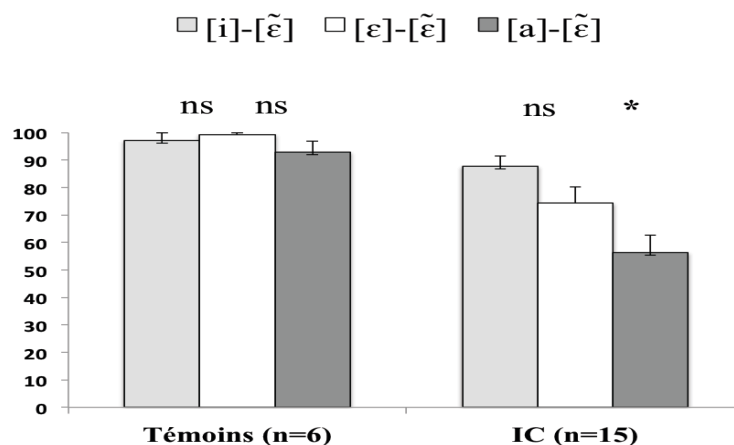


Figure 65: Détection de la voyelle [ẽ] parmi les voyelles [i], [ɛ] et [a]. Test PLSD de Fisher avec * si $p < 0,05$.

MOY±SEM	[i]-[ɛ̃]	[ɛ]-[ɛ̃]	[a]-[ɛ̃]	Test non paramétrique de Kruskal-Wallis
Témoins (n=6)	97±2,8	99±0,7	93±3,9	H=2,4 ; p=0,3 N.S
IC (n=15)	88±3,6	74±5,9	56±6,2	H=12,9 ; p=0,0016 *

Figure 66: Détection de la voyelle [ɛ̃] parmi les voyelles [i], [ɛ] et [a]

Il y a un effet du type de paire sur la détection de la voyelle [ɛ̃] parmi des voyelles orales. La voyelle [ɛ̃] est significativement moins bien détectée dans les paires phonétiques que dans les paires phonologiques (Figure 65 et 66).

(5) Voyelle [ɔ̃]

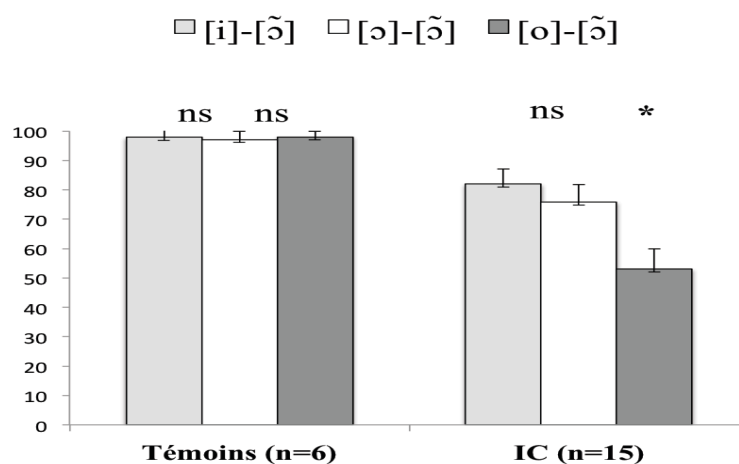


Figure 67: Détection de la voyelle [ɔ̃] parmi les voyelles [i], [ɔ] et [o]. Test PLSD de Fisher avec * si p<0,05.

MOY±SEM	[i]-[ɔ̃]	[ɔ]-[ɔ̃]	[o]-[ɔ̃]	Test non paramétrique de Kruskal-Wallis
Témoins (n=6)	98±2,8	97±2,8	98±2,0	H=0,3 ; p=0,7 N.S
IC (n=15)	82±5,2	76±6,0	53±6,9	H=9,5 ; p=0,0086 *

Tableau 43: Détection de la voyelle [ɔ̃] parmi les voyelles [i], [ɔ] et [o]

Il y a un effet du type de paire sur la détection de la voyelle [ɔ̃] parmi des voyelles orales (Tableau 43 et Figure 67). La voyelle [ɛ̃] est significativement moins bien détectée dans les « paires phonétiques » que dans les « paires phonologiques ». Par ailleurs, la paire contrôle

[i]-[ɔ̃] est moins bien détectée que les autres paires contrôles ($82 \pm 5,2\%$ pour [i]-[ɔ̃] vs. $88 \pm 3,6\%$ pour [i]-[ɛ̃] et $89 \pm 5,7\%$ pour [i]-[ɑ̃]).

4. Analyse acoustique

La seconde partie de l'étude consiste en une analyse acoustique des stimuli utilisés pour le test de détection d'intrus. On compare les caractéristiques acoustiques des voyelles orales et nasales pour les différentes paires orale-nasale, pour chacune des deux locutrices et pour les deux locutrices confondues.

a) Pré-étude : analyse qualitative des coupes spectrales des stimuli utilisés pour le test perceptif

Rappel : pour les paires phonétiques [ɑ̃]-[ɔ], [ɔ̃]-[o] et [ɛ̃]-[a], les voyelles de la locutrice n°1 sont mieux détectées.

(1) Voyelle [ɔ̃] versus [ɔ]

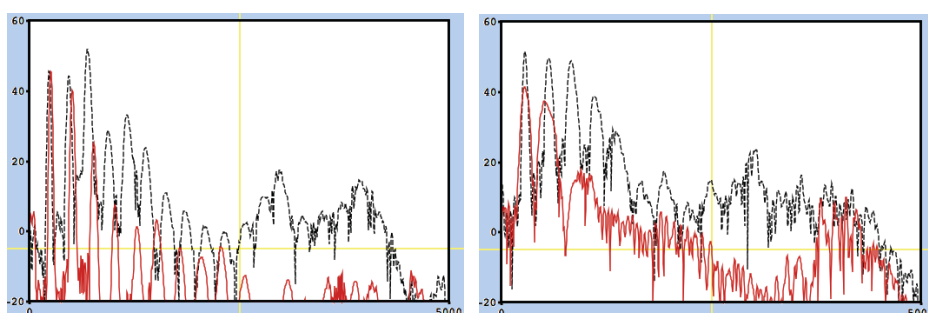


Figure 68: Coupe spectrale de la voyelle [ɔ̃] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ɔ] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et pour la locutrice n°2 à droite.

La Figure 63 ci-dessus illustre la coupe spectrale de la voyelle [ɔ̃] et de la voyelle [ɔ] pour les deux locutrices. On observe que [ɔ̃] et [ɔ] se différencient acoustiquement par une intensité globale plus élevée pour [ɔ]. Les 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} harmoniques (700-1400 Hertz) sont plus intenses pour la voyelle orale et l'on observe une zone de renforcement au dessus de 2500 Hertz pour la voyelle orale (correspond à F₃) non observée pour la voyelle nasale de la locutrice n°1. Ceci correspond à un effacement du troisième formant pour la nasale qui est couramment appelé « oeil nasal » en lecture de spectrogrammes, et qui permet de repérer visuellement le caractère nasal de la voyelle.

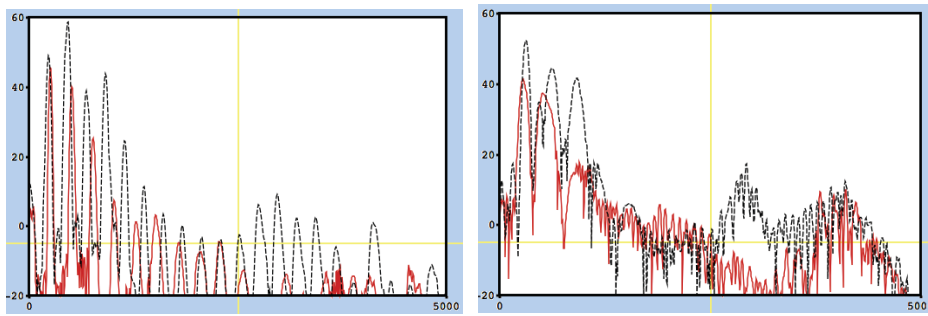


Figure 69 : Coupe spectrale de la voyelle [ɔ̃] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [o] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et pour la locutrice n°2 à droite.

La Figure 64 ci-dessus illustre la coupe spectrale de la voyelle [o] et de la voyelle [ɔ̃]. Pour les deux locutrices [ɔ̃] et [o] se différencient acoustiquement par l'amplitude du 2^{ème} et surtout du 3^{ème} harmoniques qui sont plus faibles pour la nasale (500-900 Hertz) ainsi que des différences d'amplitude entre 2500 et 3750 Hertz, avec affaiblissement autour du F₃ pour la nasale.

(2) Voyelle [ɛ̃] versus [ɛ]

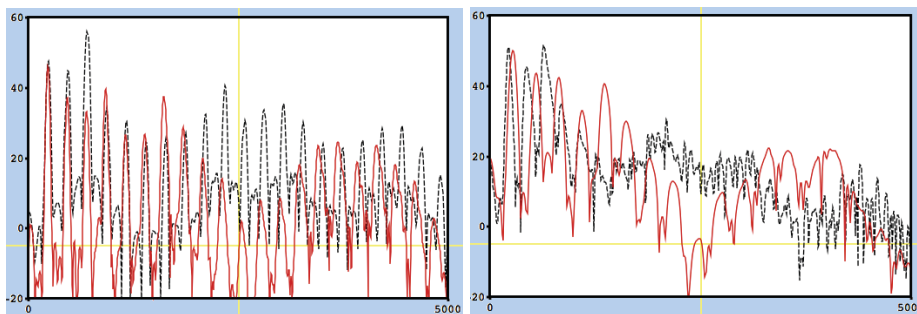


Figure 70: Coupe spectrale de la voyelle [ɛ̃] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ɛ] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.

Pour les deux locutrices, [ɛ̃] et [ɛ] se distinguent acoustiquement par l'affaiblissement du 3^{ème} harmonique (700-850 Hertz). Il y a deux pics au lieu d'un seul dans la zone du premier formant pour la nasale de la locutrice n°2. La nasale est plus faible que l'orale entre 2200 et 3200 Hertz, zone du F₃ (Figure 70).

(3) Voyelle [ɛ̃] versus [a]

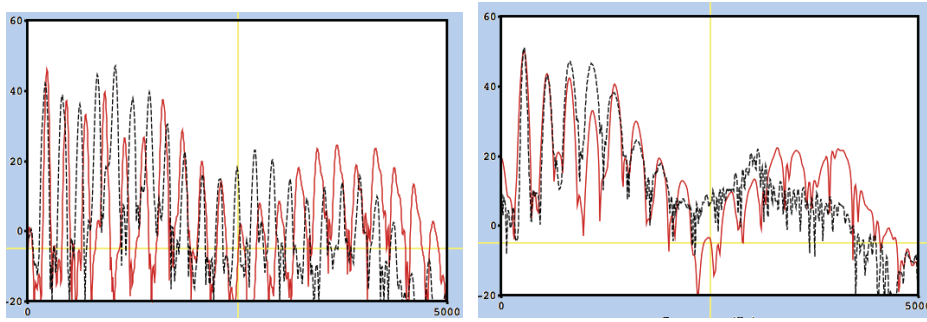


Figure 71: Coupe spectrale de la voyelle [ɛ̃] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [a] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.

Pour les deux locutrices [ɛ̃] et [a] sont très proches (voir Figure 71). Un affaiblissement du 5^{ème} (Loc1) ou du 4^{ème} harmonique (Loc2) (1100-1200 Hertz) peut être observé pour la nasale ainsi qu'un affaiblissement autour de la zone de 2500 Hertz, cependant moins marqué que celui observé pour la paire [ɛ̃]-[ɛ]. Une fois de plus, on observe la présence d'un antiformant pour la nasale dans la zone du troisième formant de l'orale.

(4) *Voyelle [ã] versus [a]*

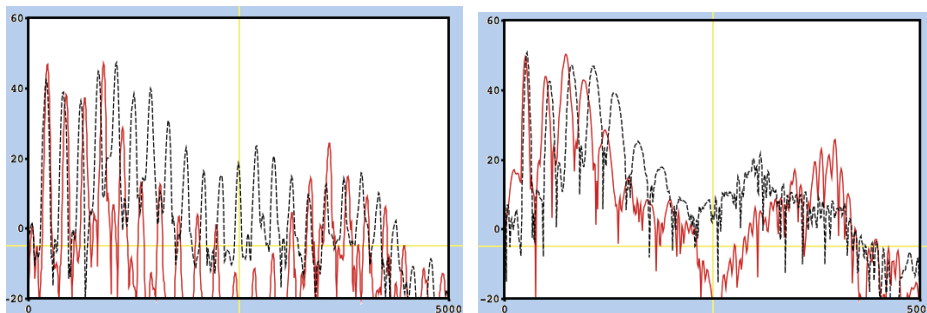


Figure 72: Coupe spectrale de la voyelle [ã] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [a] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.

La Figure 72 illustre les coupes spectrales de [ã] et de [a] pour les deux locutrices. Acoustiquement on observe une différence globale d'intensité sur la zone située entre 1000 et 3500 Hertz, où la voyelle orale est plus intense que la voyelle nasale. Par ailleurs, la nasale est plus intense que l'orale autour de 3750 Hertz mais dans une moindre mesure que pour les voyelles précédentes.

(5) *Voyelle [ã] versus [ɔ]*

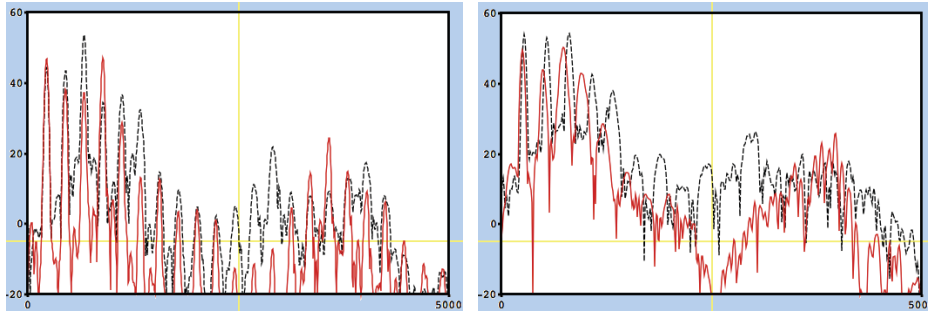


Figure 73 : Coupe spectrale de la voyelle [ã] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ɔ] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.

Pour la locutrice n°1 les deux voyelles sont acoustiquement très proches. Seuls les harmoniques n°3 et n°6 et autour de l'intervalle 700-1500 Hertz, sont affaiblis pour [ã], de même que l'intervalle autour de 2400-3000 Hertz. Pour la locutrice n°2, le profil est similaire à celui observé pour la paire [ã]-[a] avec un affaiblissement important dans la zone du F3. Pour les deux locutrices, la nasale est renforcée entre 3500 et 4000 Hertz.

Le Tableau 44 résume les observations faites à partir des coupes spectrales.

	[õ]	[ã]	[ẽ]
[o]	↓ 500-900 Hz ↓ F3		
[ɔ]	↓ global ↓ 700-1400 Hz ↓ F3	↓ 700-1500 Hz ↓ 2400-3000 Hz ↓ F3 ↑ F4	
[a]		↓ 1000-3500 Hz ↑ F4	↓ 1100-1200 Hz ↓ F3
[ε]			↓ 700-850 Hz ↓ F3

Tableau 44: Caractéristiques spectrales de la voyelle nasale par rapport à la voyelle orale pour les deux locutrices de l'étude perceptive. ↓: diminution de l'intensité pour la voyelle nasale; ↑: augmentation de l'intensité pour la voyelle nasale.

b) Méthode

(1) Mesure des pics spectraux

Les pics spectraux dans les voyelles nasales sont le résultat des résonances (pôles) de la cavité orale associée aux pôles et antirésonances dus à la cavité nasale. Pour chaque voyelle, la fréquence des quatre premiers pôles spectraux a été mesurée semi-

automatiquement sous Praat 5.3.40 (Boersma et Weenink). Les voyelles ont été étiquetées au moyen d'une Textgrid et analysés avec le script « analyse tout » (Gendrot, 2009, en Annexe B). Les valeurs de F₁, F₂, F₃ et F₄ ont été relevées. Etant donné le risque d'erreurs important dans la prise de mesure sur des voyelles nasales, les valeurs de pics spectraux des voyelles nasales ont été vérifiées et comparées à celles des pics spectraux proposés par Calliope (1989) d'après Lonchamp (1988) (Tableau 45). Lorsque la valeur était trop déviante, une mesure manuelle a alors été effectuée.

	F _{1n}	F' ₁	F' ₂	F _{2n}	F' ₃
[ã]	650 Hz	800 Hz	1000 Hz	1850 Hz	2300 Hz
[ẽ]	600 Hz	1000 Hz	1500 Hz	2200 Hz	2700 Hz
[õ]	700 Hz	500 Hz	(950 Hz)	2000 Hz	2800 Hz

Tableau 45: Valeurs fréquentielles représentatives des pôles spectraux des voyelles nasales du français. Tiré de Calliope (1989), page 90, d'après Lonchamp (1988). F_n = formant nasal; F'_i=formant oral modifié par le couplage nasal.

Pour l'analyse des résultats, ont été considérés comme « proches » deux pics spectraux contenus dans un intervalle de 100 Hertz. L'indice de compacité a été mesuré en calculant la distance acoustique entre les deux premiers pôles spectraux : Pôle 2 – Pôle 1 en Hertz.

(2) *Représentations perceptives des valeurs des pôles spectraux*

Afin de faire le lien en les valeurs acoustiques des voyelles et les résultats perceptifs des adultes implantés cochléaires, les valeurs en Hertz ont été converties en Bark selon la formule de Traunmüller (1990) :

$$Bark = [(26,81 * f) / (1960 + f)] - 0,53$$

Dans certains cas, pour la mesure de F₁-F₀ de la voyelle fermée [i], la valeur en Bark était inférieure à 2 et la formule complémentaire a été appliquée :

Si résultat inférieur à 2, appliquer la seconde formule : 0,15(2-résultat)*

Des représentations F₁/F₂, F₁-F₀/F₂-F₁ et F₁-F₀/F₃-F₂ ont été créées afin de représenter l'espace perceptuel lié à l'identification de l'aperture et du lieu d'articulation.

(3) *Amplitude relative des harmoniques*

Pour chacun des deux exemplaires de [ɔ], [ã], [a], [o], [õ], [ẽ] et [ɛ] produits par chacune des deux locutrices, la valeur en Hertz et l'amplitude en dB SPL de chaque harmonique, de H_0 (F_0) à H_9 , a été relevés manuellement. Pour chaque locutrice, les valeurs de ses deux occurrences produites ont été moyennées. Ces valeurs ont été comparées ensuite dans chaque trio de voyelles ([ɔ]-[ã]-[a], [o]-[õ]-[ɔ] et [a]-[ẽ]-[ɛ]) afin de montrer les différences d'amplitude relative des harmoniques entre les voyelles nasales et les voyelles orales sur les coupes spectrales.

5. Résultats

a) Différences acoustiques entre les productions des deux locutrices

Les voyelles nasales prononcées par la locutrice L1 ont été mieux détectées que celles prononcées par la locutrice L2, pour les trois « paires phonétiques » ($8,2 \pm 0,4$ sur 15 vs. $6,1 \pm 0,3$ sur 15, test de Mann-Whitney : $U=62$; $p=0,0013$), c'est-à-dire pour la condition la plus difficile. Les voyelles nasales de la locutrice n°1 sont en moyenne significativement plus longues, moins intenses et ont une fréquence fondamentale significativement moins élevée que celles de la locutrice n°2. Toutes les voyelles ont été prononcées avec une intonation montante, surtout pour la locutrice n°2 (Figure 74).

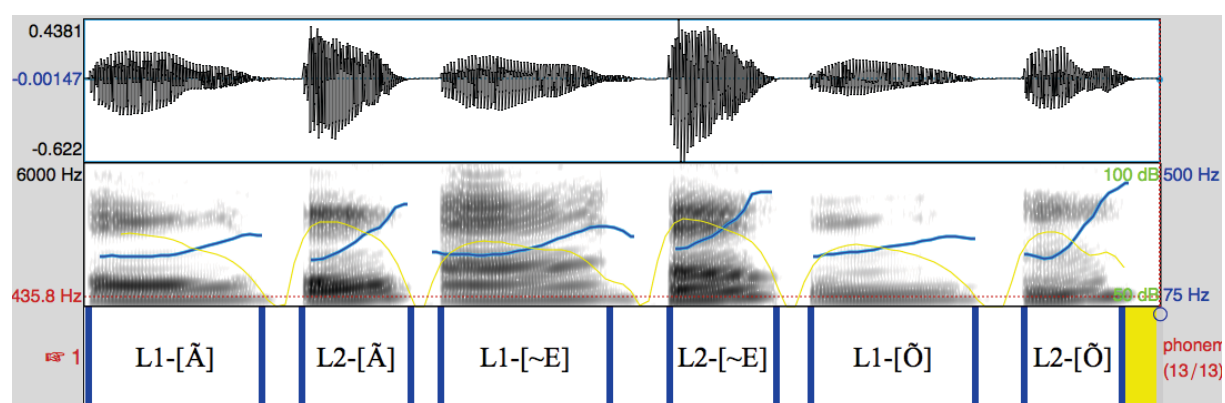


Figure 74: Oscillogramme et spectrogramme des voyelles nasales [ã], [ẽ] et [õ] (ici transcrites en code sampa [Ã], [~E] et [Õ]) prononcées par la locutrice n°1 (L1) et la locutrice n°2 (L2). La courbe bleue correspond à la fréquence fondamentale et la courbe jaune à l'intensité (lecture des valeurs sur l'échelle à droite du spectrogramme).

F ₀	L1=244±2 Hz < L2=282±2,2 Hz ; p<0,0001
Intensité	L1=71±0,3 dB < L2=76±0,6 dB ; p<0,0001
durée	L1=216±2,7ms > L2=144±2,8 ms ; p<0,0001

Tableau 46: Différences de F₀, intensité et durée entre les voyelles de la locutrice n°1 et celles de la locutrice n°2 pour les « paires phonétiques » (Test Mann-Whitney).

b) Mesure des pics spectraux

(1) Voyelle [ɔ̃]

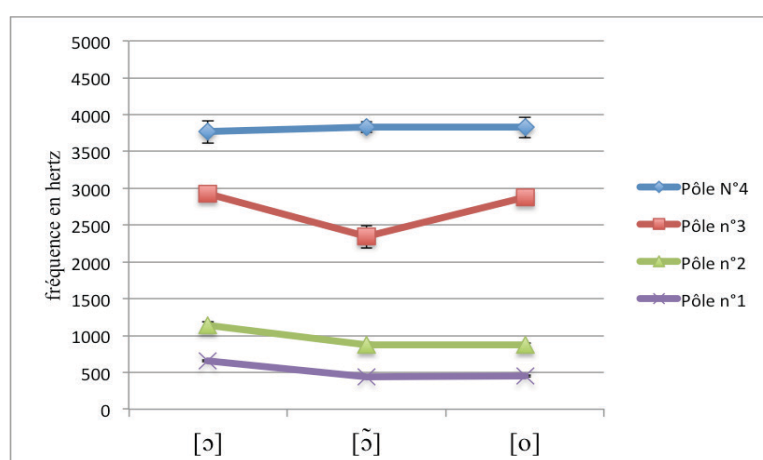


Figure 75: Pôles spectraux moyens ±SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɔ̃] et des voyelles orales [ɔ] et [o] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.

MOY±SEM en Hertz	[ɔ]	[ɔ̃]	[o]
pôle n°4	3765±155	3830±71	3828±141
pôle n°3	2931±32	2342±155	2876±31
pôle n°2	1138±56	870±46	870±28
pôle n°1	657±11	435±7	450±15

Tableau 47: Valeurs moyennes ± erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɔ̃] et des voyelles orales [ɔ] et [o] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.

Entre la voyelle nasale [ɔ̃] et la voyelle orale [o] on observe une proximité importante des premier (435 vs. 450 Hertz), deuxième (870 vs. 870 Hertz) et quatrième (3830 vs. 3828

Hertz) pôles spectraux. Entre la voyelle nasale [ɔ̃] et la voyelle orale [ɔ], seul le quatrième pic spectral est proche (3830 vs. 3828 Hertz).

(2) Voyelle [ɑ̃]

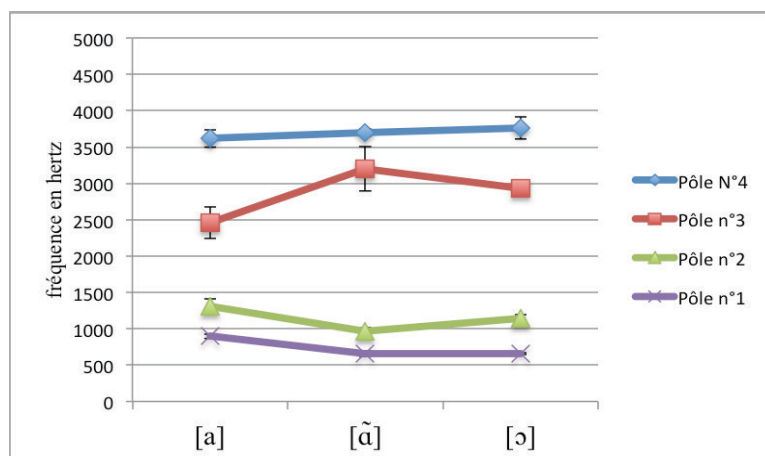


Figure 76: Pôles spectraux moyens $\pm$ SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɑ̃] et des voyelles orales [a] et [ɔ] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.

MOY $\pm$ SEM en Hertz	[a]	[ɑ̃]	[ɔ]
pôle n°4	3619$\pm$120	3699 $\pm$ 50	3765$\pm$155
pôle n°3	2459 $\pm$ 216	3198 $\pm$ 303	2931 $\pm$ 32
pôle n°2	1314 $\pm$ 102	966 $\pm$ 44	1138 $\pm$ 56
pôle n°1	898 $\pm$ 32	655 $\pm$ 36	657$\pm$11

Tableau 48: Valeurs moyenne $\pm$ erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɑ̃] et des voyelles orales [a] et [ɔ] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.

Entre la voyelle nasale [ɑ̃] et la voyelle orale [ɔ] on observe une proximité importante des premier (655 vs. 657 Hertz) et quatrième (3699 vs. 3765 Hertz) pôles spectraux. Entre la voyelle nasale [ɑ̃] et la voyelle orale [a], seul les quatrième pôles spectraux sont proches (3699 vs. 3619 Hertz).

(3) Voyelle [ɛ̃]

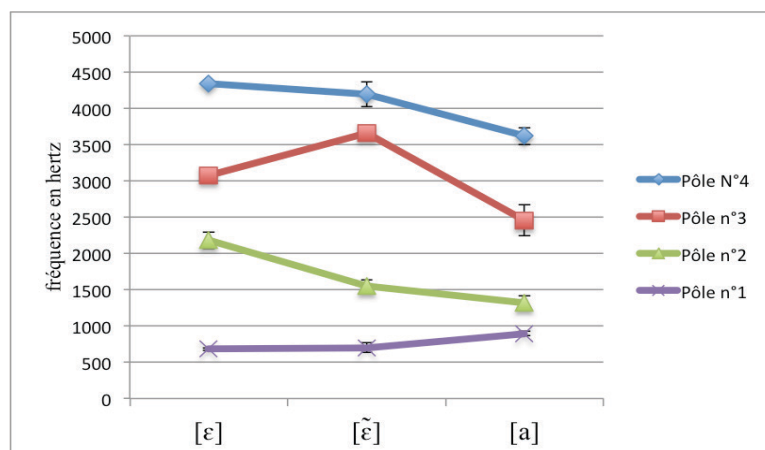


Figure 77: Pôles spectraux moyens $\pm$ SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɛ̃] et des voyelles orales [ɛ] et [a] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.

MOY $\pm$ SEM en Hertz	[ɛ]	[ɛ̃]	[a]
pôle n°4	4341 $\pm$ 31	4195 $\pm$ 173	3619 $\pm$ 120
pôle n°3	3075 $\pm$ 66	3662 $\pm$ 59	2459 $\pm$ 216
pôle n°2	2184 $\pm$ 115	1547 $\pm$ 86	1314 $\pm$ 102
pôle n°1	683$\pm$18	702$\pm$68	898 $\pm$ 32

Tableau 49: Valeurs moyenne $\pm$ erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɛ̃] et des voyelles orales [ɛ] et [a] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.

Entre la voyelle nasale [ɛ̃] et la voyelle orale [a] on n'observe aucune proximité entre les pics spectraux. Par contre, entre la voyelle nasale [ɛ̃] et la voyelle orale [ɛ], les pôles n°1 sont proches (702 Hz vs. 683 Hz).

(4) *Compacité*

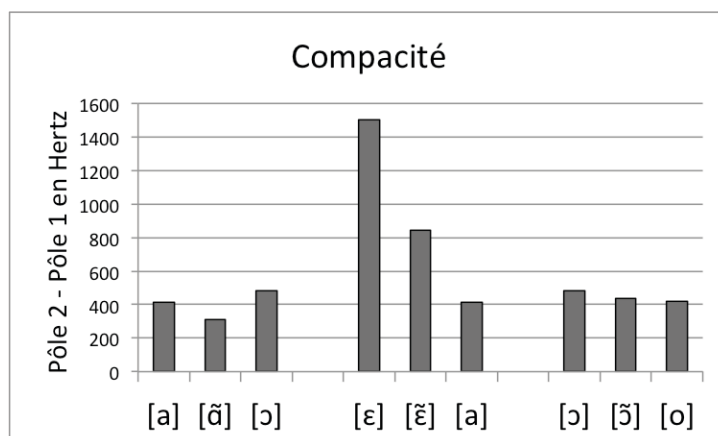


Figure 78: Indice de compacité : distance entre le premier et le deuxième pôle spectral pour les voyelles orales et nasales (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle).

c) Représentations perceptuelles des valeurs des pôles spectraux

Des représentations « perceptives » ont été élaborées, en faisant varier sur les différents axes, non pas les valeurs absolues des formants, mais les distances entre eux, selon les travaux de Ménard et al. (2002) pointant, pour les voyelles françaises, l'importance de la distance entre F_1 et F_0 pour la perception de l'aperture et de la distance F_1-F_2 (ou F_2-F_3 dans certains cas) pour l'identification du lieu d'articulation de la voyelle.

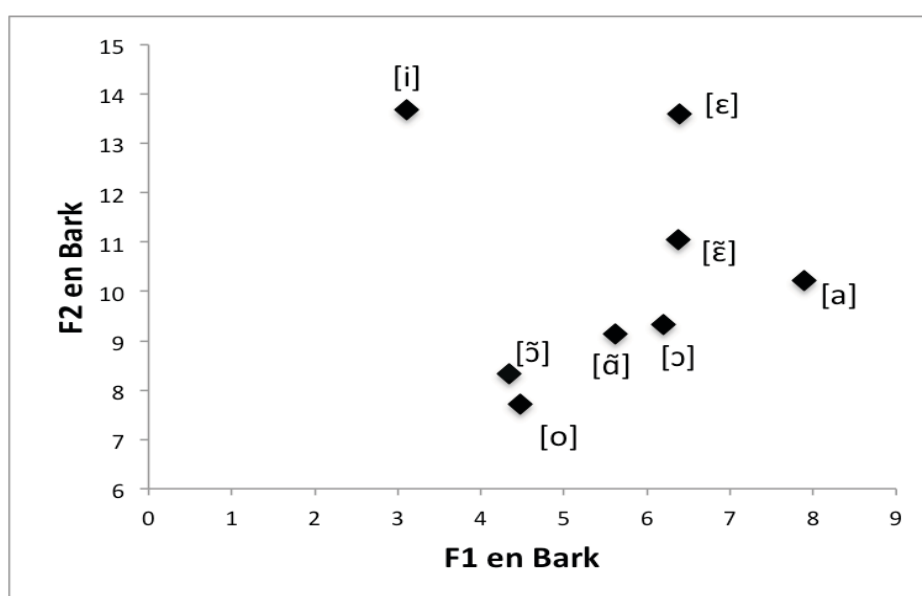


Figure 79: Représentation F_1/F_2 en Bark (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle).

Sur la représentation F_1/F_2 en Bark, on remarque la proximité acoustique entre [ã] et [ɔ] ainsi qu'entre [õ] et [o].

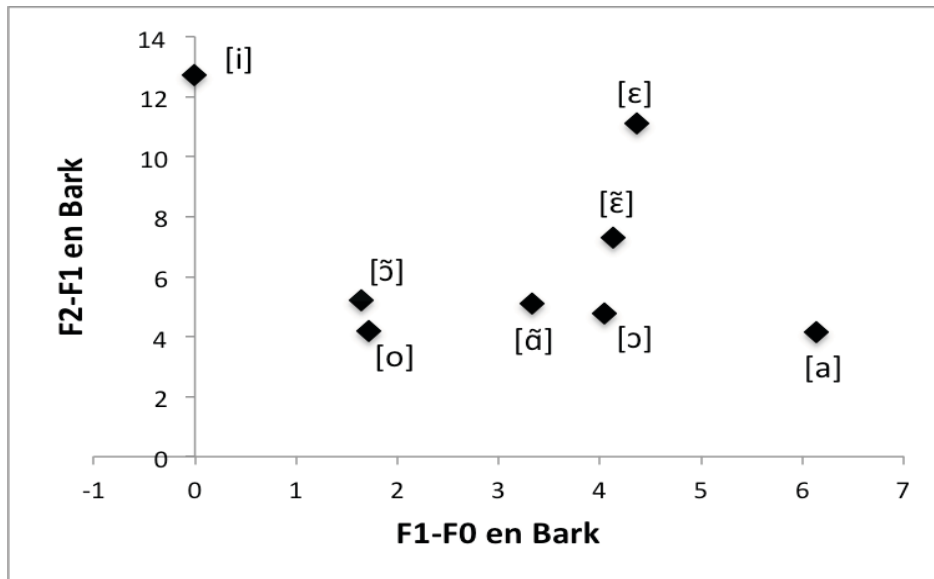


Figure 80: Distances acoustiques F_1-F_0 et F_2-F_1 en Bark (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle).

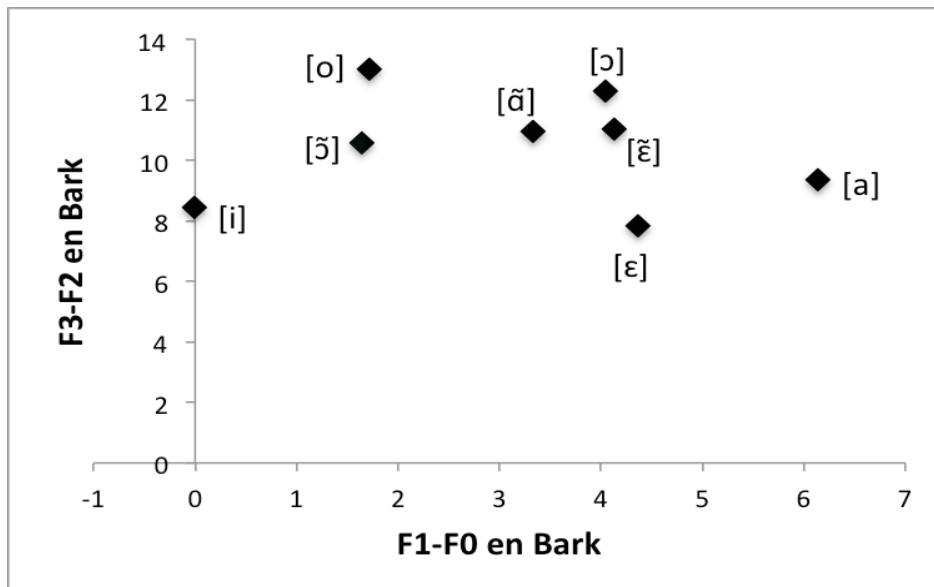


Figure 81: Distances acoustiques F_1-F_0 et F_3-F_2 en Bark. Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.

d) Amplitude des harmoniques

(1) Voyelle [ɔ]

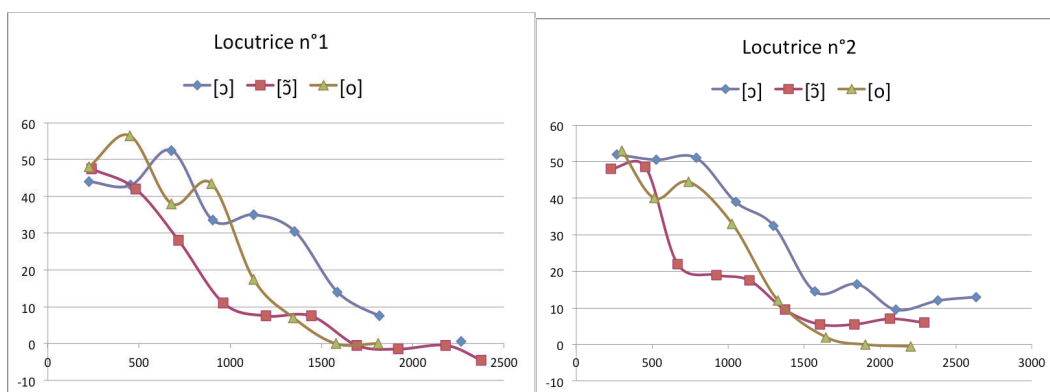


Figure 82: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [o]-[ɜ]-[ɔ] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.

(2) Voyelle [ɑ]

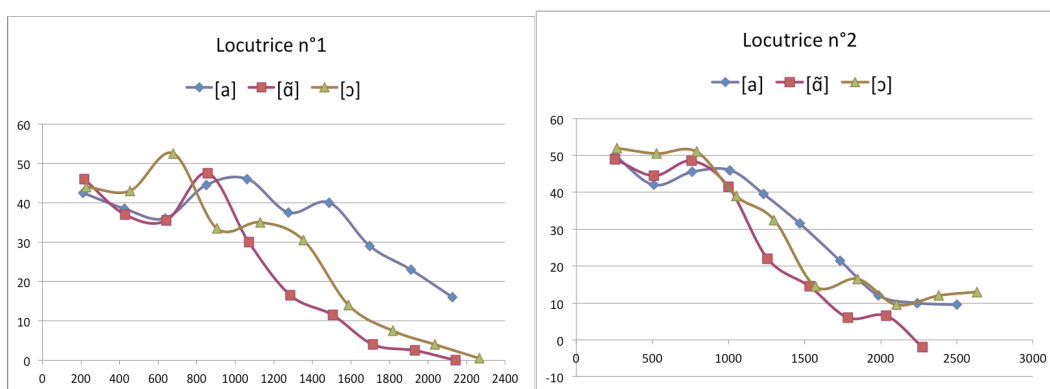


Figure 83: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [ɔ]-[ã]-[ɑ] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.

(3) Voyelle [ɛ]

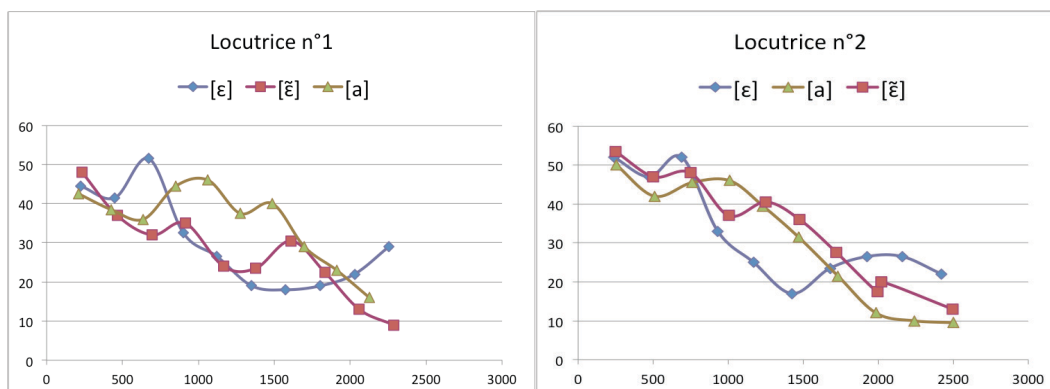


Figure 84: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [a]-[ẽ]-[ɛ] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.

6. Discussion

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence la proximité perceptive des « paires phonétiques », ([ã]-[ɔ], [ɔ̃]-[o], [ẽ]-[a]), par rapport au « paires phonologiques », ([ã]-[a], [ɔ̃]-[ɔ], [ẽ]-[ɛ]). Les résultats du test perceptif confirment cette hypothèse pour les trois voyelles nasales. L'analyse acoustique met en avant des paramètres pouvant expliquer les confusions. Dans les « paires phonétiques », les voyelles nasales prononcées par la locutrice n°1 sont mieux détectées que celles prononcées par la locutrice n°2. Trois indices acoustiques au moins distinguent les voyelles nasales des deux locutrices: la durée, l'intensité globale et la fréquence fondamentale. Les voyelles nasales de la locutrice n°1 sont en moyenne plus longues que celles de la locutrice n°2, ce qui correspond à une caractéristique fréquemment attribuée aux voyelles nasales et favorisant certainement leur identification auditive d'après Delattre et Monnot (1968). L'intensité des voyelles nasales de la locutrice n°1 est moins élevée que celle de la Locutrice n°2. Or nous savons que l'intensité des voyelles nasales est globalement plus faible que celle des voyelles orales (Bernthal et Beukelman, 1977) bien que nous ne sachions pas si cet indice est perceptivement important. La fréquence fondamentale de la locutrice n°1 est en moyenne moins élevée (Tableau 46) et plus plate (Figure 74) que celle de la locutrice n°2. Ce paramètre acoustique n'est pas connu comme interagissant sur l'identification des voyelles nasales. Au total, la durée plus longue et l'intensité plus faible des voyelles nasales de la locutrice n°1, peuvent peut-être expliquer les meilleurs scores de détection de ses voyelles cibles.

L'analyse des Figures 82 à 84, représentent les différences d'intensité de F_0 au 9^{ème} harmonique entre les voyelles orales et les voyelles nasales. Ces données sont à considérer les unes par rapport aux autres et non en valeur absolue car nous n'avons pas utilisé de système de calibration de l'intensité lors de l'enregistrement. montre des différences d'intensité plus marquées pour la Locutrice n°1, dont les voyelles nasales des « paires phonétiques » sont les mieux identifiées. Pour [o]-[ɔ̃], la nasale est affaiblie sous 500 et sous 1000 Hertz. Pour [ɔ]-[ã], la nasale est affaiblie autour de 600 Hertz. Pour [a]-[ẽ], la nasale est affaiblie dans la zone 1000-1500 Hertz. Ces différences d'intensité entre les voyelles orales et nasales des « paires phonétiques » sont moins marquées pour la locutrice n°2.

a) **Voyelle [ɔ̃]**

Nous observons une proximité des deux premiers pôles spectraux entre les voyelles [ɔ̃] et [o] pouvant expliquer leur confusion. Ceci rejoint les résultats d'études précédentes: le premier pôle de [ɔ̃] est plus bas que celui de [ɔ] (Montagu, 2007 ; Carignan, 2012) et se rapproche de [o] (Montagu, 2007). Le deuxième pôle de [ɔ̃] est plus bas que celui de [ɔ] (Montagu, 2007 ; Carignan, 2012), et proche de celui de [o] chez les hommes (Montagu, 2007). Sur le plan de la compacité, [ɔ̃], [ɔ] et [o] sont toutes les trois compactes. Sur le plan de l'intensité, l'observation des coupes spectrales révèle, comme indice commun aux deux locutrices, un affaiblissement des harmoniques autour de 800-900 Hertz pour la voyelle [ɔ̃] par rapport à la voyelle [o]. Ceci peut s'observer de façon plus proéminente chez la locutrice n°1 (Figure 82) dont les voyelles nasales ont été mieux détectées par les auditeurs.

Sur les représentations acoustico-perceptives en deux dimensions [ɔ] et [o] sont proches pour F_1/F_2 et pour F_1-F_0/F_2-F_1 .

b) **Voyelle [ɑ̃]**

On retrouve également une proximité du premier pôle spectral entre la voyelle nasale [ɑ̃] et la voyelle orale [ɑ], permettant ainsi d'expliquer les confusions plus fréquentes entre ces deux voyelles qu'entre [ɑ̃] et [a]. Sur le plan acoustique, le premier pôle spectral de [ɑ̃] est, selon les auteurs, observé plus haut (Delvaux et al., 2002) ou plus bas (Carignan, 2012, chez 2/3 des locuteurs) que le premier pôle de [a]. Selon, Montagu (2007) les premiers et deuxièmes pôles spectraux de la voyelle [ɑ̃] sont proches de ceux de la voyelle [ɑ] (Montagu, 2002). Sur le plan de la compacité, [ɑ̃], [ɑ] et [a] sont proches. Sur le plan de l'intensité, l'observation qualitative des coupes spectrales montre, comme point commun aux deux locutrices, des harmoniques autour de 700 Hertz et 1200 Hertz moins intenses pour la nasale que pour l'orale.

c) **Voyelle [ɛ̃]**

Par contre, les confusions entre [ɛ̃] et [a] ne semblent pas pouvoir s'expliquer par une proximité spectrale. Pourtant, certaines études ont pu mettre en évidence la proximité acoustique entre [ɛ̃] et [a]. Le premier pôle spectral de [ɛ̃] est plus haut que celui de [ɛ] selon Delvaux et al. (2002) et Carignan (2012) et proche de celui de [a] chez la femme selon Montagu (2007). Le deuxième pôle spectral, est plus bas que celui de [ɛ] (Delvaux et al.,

2002 ; Carignan, 2012), se rapprochant également de celui de [a] (Montagu, 2007). Sur le plan perceptif, une fois encore, les résultats de Montagu (2007) rejoignent les données acoustiques de la littérature et les résultats de la présente étude, puisque les sujets normo-entendants, lorsqu'on leur présente le début non nasalisé de la voyelle [ɛ̃] (en contexte [tV]), identifient la voyelle comme étant [a]. Sur le plan de la compacité, [ɛ̃], [ɛ] et [a] sont très éloignées les unes des autres, [a] étant la plus compacte, [ɛ̃] intermédiaire et [ɛ] non compacte. Sur le plan de l'intensité, un point commun aux deux locutrices est l'aspect moins intense des harmoniques autour de 1000-1200 Hertz pour la voyelle [ɛ̃] par rapport à la voyelle [a]. Ceci s'observe, encore une fois, de façon plus accentuée chez la locutrice n°1 (Figure 84) dont les voyelles nasales sont mieux détectées par les auditeurs.

En conclusion, les confusions entre les voyelles orales et nasales faites par les adultes implantés cochléaires sont en accord avec les descriptions phonétiques actuelles des voyelles nasales. Les confusions des adultes implantés cochléaires entre voyelles nasales et voyelles orales respectent les distances acoustiques des pics spectraux dans les basses fréquences pour [ã] et [õ]. La voyelle [ɛ̃] est perceptivement proche de [a] sans qu'aucun indice acoustique ne puisse clairement l'expliquer dans cette étude. Nous avons observé des différences d'intensité dans des zones spectrales qui permettent peut-être de différencier les paires orale-nasale proches. L'indice d'intensité relative des pôles spectraux est peut-être l'indice manquant aux adultes implantés cochléaires pour catégoriser la voyelle comme nasale. L'étude n°5 étudiera spécifiquement cet aspect.

C. Etude n°5 : Perception de l'amplitude relative des formants par les adultes implantés cochléaires

Lors des tests d'identification, ce sont les confusions des voyelles nasales vers des voyelles orales qui prédominent : il y a peu de confusions des voyelles nasales entre elles. Plusieurs auteurs ont pointé l'affaiblissement de F_1 (Delattre, 1965), F_1 , F_2 et F_3 (Smith, 1951) F_1 et F_2 (Maeda, 1993) ou de F_1 et F_3 (Delvaux, 2009). Nous posons donc l'hypothèse que les patients implantés cochléaires sont moins sensibles à l'intensité relative des formants et notamment à l'affaiblissement du F_1 . La présente étude, de nature psychoacoustique, porte sur la sensibilité à l'amplitude des formants. Une voyelle neutre [ə] d'une durée de 250 ms a été générée par synthèse à formants (Klatt), en branchement parallèle, sans ajustement automatique de l'amplitude des formants. Six autres voyelles ont été créées en faisant varier de 8 dB (Flanagan, 1957) l'amplitude des F_1 , F_2 , F_3 et F_4 . La largeur de bande des formants n'a pas été manipulée. La tâche consiste à détecter l'intrus parmi 4 exemplaires présentés, 3 fois la voyelle de référence et une quatrième voyelle, en 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} ou 4^{ème} position, dont l'amplitude d'un formant a été modifiée. Dix auditeurs n de 23 à 72 ans (moy=39±5,1) normo-entendants et 10 auditeurs de 19 à 76 ans (moy=55 ans±6,1) implantés cochléaires depuis 4 à 105 mois (moy=42 mois±11) ont participé à l'étude. La tâche est accessible à des patients implantés puisqu'ils obtiennent en moyenne un score de 72±4% [min :46 ; max :89], non significativement différent du score des sujets normo-entendants qui obtiennent 82±2,4% [71 ; 96]. L'affaiblissement de 8 dB du F_2 et le renforcement de 8 dB du F_4 sont significativement moins bien détectés par les implantés cochléaires que par les témoins normo-entendants. Ces résultats confirment l'hypothèse d'un manque de sensibilité aux variations d'intensité des formants mais seulement pour le F_2 et le F_4 .

1. Objectifs

Lors des tests d'identification, les confusions des voyelles nasales vers des voyelles orales prédominent et il y a peu de confusions des voyelles nasales entre-elles. Plusieurs modifications acoustiques sont induites par le passage de l'air dans la cavité nasale : déplacement du centre de gravité (Beddor, 1984), abaissement en fréquence du F_2 (Delvaux, 2009), affaiblissement de F_1 (Delattre, 1965), de F_1 ou F_2 (Maeda, 1993) voire de F_1 et F_3 (Delvaux 2009) semblent porter en grande partie le caractère nasal de ces voyelles.

Pour les voyelles orales, l'amplitude relative des formants est perçue par les auditeurs et peut être associée au caractère plus ou moins naturel de la voyelle voire à son identité (Jacewicz, 2005, pour la différence entre /i/ et /I/ en anglais).

Nous posons l'hypothèse que les patients implantés cochléaires percevront moins bien les différences d'amplitude que les entendants, surtout lorsque ces différences concernent F_1 puisque c'est l'indice cité le plus souvent (Delattre, 1965 ; Maeda, 1993 ; Delvaux 2009). Selon James Flanagan (1957), le seuil perceptif minimal d'amplitude du F_2 est de 3 dB pour la voyelle [æ] par les normo-entendants et lorsque la différence atteint 8 dB, les auditeurs ne font plus d'erreur de discrimination. La valeur de 8 dB a donc été choisie comme valeur de renforcement ou d'affaiblissement de chaque formant. A partir de la méthodologie proposée par Flanagan (1957) pour le F_2 , la présente étude propose un test de discrimination des différences d'amplitude des 4 premiers formants sur la voyelle neutre [ə].

2. Méthode

Le synthétiseur à formants Klatt a été utilisé dans une version gratuite en ligne (<http://www.asel.udel.edu/speech/tutorials/synthesis/Klatt.html>).

a) Stimulus de référence

Une voyelle neutre centrale [ə] a été choisie comme stimulus de référence. D'une durée de 500 ms, avec $F_0=180\text{Hz}$, $F_1=500\text{ Hz}$ (A_1 amplitude de $F_1=60$), $F_2=1500\text{ Hz}$ ($A_2=56$), $F_3=2500\text{ Hz}$ ($A_3=52$) et $F_4=3500\text{ Hz}$ ($A_4=48$), l'amplitude de voisement AV a été fixée à 70. Le branchement en parallèle (SW=2), avec désactivation de l'ajustement d'amplitude des formants, a été préféré afin d'éviter toute modification automatique non contrôlée de l'amplitude des formants. L'amplitude des formants est donc contrôlée de façon indépendante. Le contrôle global du gain (GAI) a été fixé à 75. Les autres paramètres n'ont

pas été modifiés et respectent les valeurs par défaut, téléchargeables au <http://www.asel.udel.edu/speech/tutorials/synthesis/gensyn.htm>.

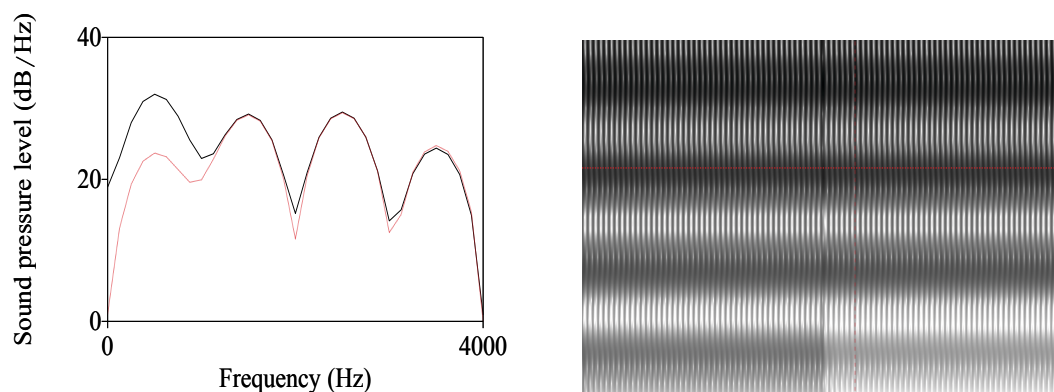


Figure 85: Exemple de stimulus déviant $F1_{\min}$ avec $F1$ diminué de 8 dB par rapport au stimulus référence. A gauche : coupe spectrale, stimulus déviant en rouge. A droite : spectrogramme, stimulus déviant à droite.

b) Stimuli déviants

Six stimuli déviants ont été créés en augmentant ou diminuant de 8 dB (Flanagan, 1957) l'amplitude des $F1$, $F2$, $F3$ et $F4$. Les stimuli déviants sont ainsi nommés en fonction de la manipulation apportée : par exemple $F2_{\min}$ correspond à une diminution du $F2$ de 8 dB. La largeur de bande des formants n'a pas été manipulée (Figures 85 et 86).

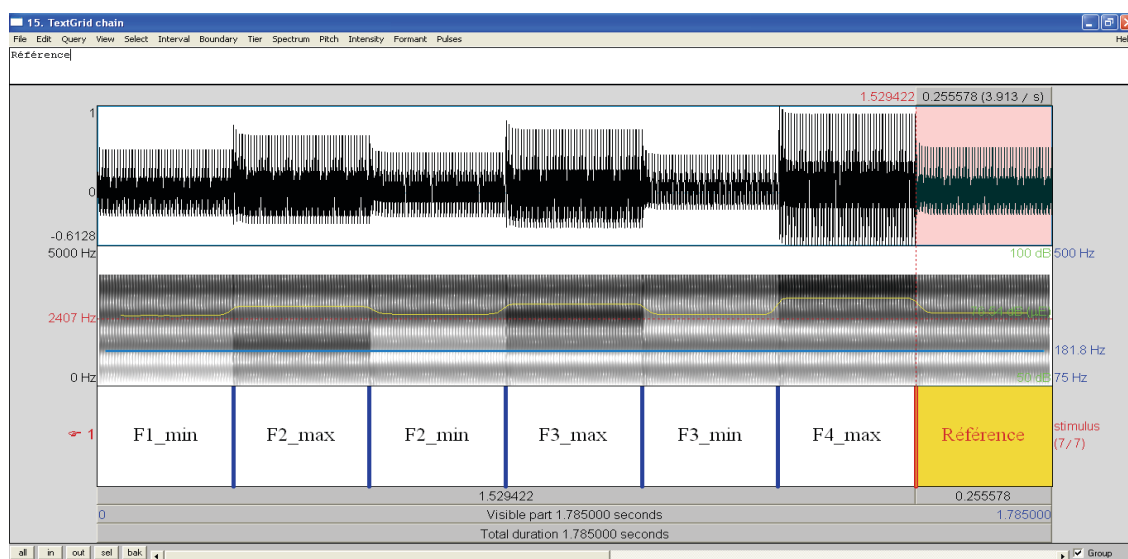


Figure 86: Oscillogramme et spectrogramme des stimuli synthétiques de l'étude n°5. Malgré un gain global fixe (overall gain control fixé à 75), on remarque une différence d'amplitude entre certains stimuli. Les stimuli pour lesquels l'amplitude d'un formant a été augmentée apparaissent globalement plus intenses que le stimulus référence et les stimuli pour lesquels un formant a été diminué.

c) Procédure

Un test de perception de type « détection d'intrus » (décrit dans l'étude n°4) ou stimulus déviant (oddbity) a été élaboré au moyen du logiciel Praat 5.3.40 (script en Annexe H), avec un casque Sennheiser HD 280 pro, à une intensité de 65 dB(A). Le son n'est adressé que du côté implanté afin d'éviter toute contribution de l'oreille controlatérale quand celle-ci comportait encore une audition résiduelle. Trente deux séquences de stimuli ont été proposées. Chaque séquence comporte 4 stimuli. Dans chaque séquence, soit les 4 stimuli sont strictement identiques (8 cas sur 32) soit un stimulus déviant apparaît (1 fois dans chacune des positions, soit 4 fois pour chaque stimulus déviant, 24 fois sur 32 au total). Les séquences sont présentées en ordre aléatoire. Un entraînement est proposé avant l'expérience sur 16 séquences. Le niveau de hasard est à 20%.

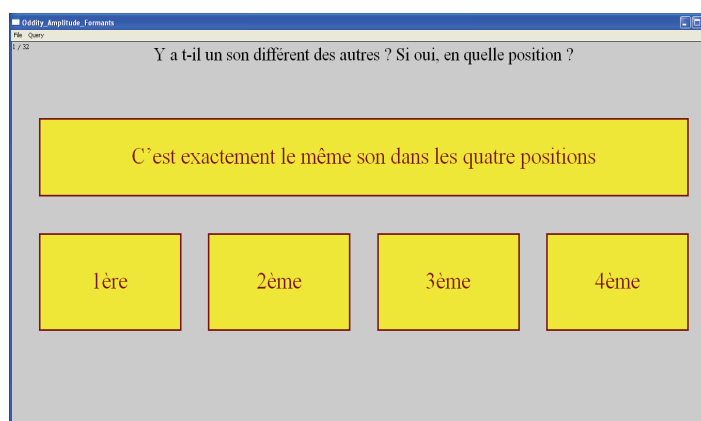


Figure 87: Interface du test de perception (Praat). Le sujet entend 4 stimuli. S'ils sont identiques, le sujet clique sur la case « C'est exactement le même son dans les quatre positions ». Si l'un des quatre sons est différent, le sujet clique sur la position du stimulus déviant dans la série.

d) Population

Le groupe témoin est composé de 10 adultes n'ayant jamais consulté pour troubles de l'audition. Il comprend 9 femmes pour 1 homme, âgés de $39 \pm 5,1$ ans [23 ; 72] (MOY $\pm$ SEM [min ; max]). Le groupe expérimental (Tableau 50) est composé de 10 adultes devenus sourds implantés cochléaires. Il comprend 8 femmes pour 2 hommes, âgés de $55 \text{ ans} \pm 6,3 \text{ ans}$ [19 ; 76]. Le délai post-implant moyen est de 42 ± 11 mois [4 ; 105].

N°	Age	Sexe	Recul post- IC	Système	AA contro.	Etiologie	Lafon	Fournier	MBAA bruit	Score ampl. formant
1	58	f	105	Cochlear	oui	Inconnue	35	40	80	46
2	68	f	12	Med-el	oui	Génétique	53	70	47	64
3	26	m	42	Cochlear	oui	Ototoxique	98	100	95	63
4	76	f	16	Neurelec	non	Génétique	24	70	20	79
5	55	f	53	Med-el	oui	Inconnue	85	100	88	71
6	75	f	76	Cochlear	non	Méningite	92	100	100	86
7	64	f	82	Cochlear	non	Otospongiose	88	100	93	75
8	64	f	15	Neurelec	oui	Inconnue	82	90	80	89
9	48	f	18	Cochlear	non	Méningite	60	30	49	70
10	60	m	4	Med-el	non	Ototoxique	60	90	20	77

Tableau 50: Informations démographiques et techniques relatives aux 10 adultes implantés cochléaires. Recul post-IC en mois ; A.A contro. = port d'une aide auditive controlatérale : Lafon= listes cochléaires de Lafon, score exprimé en phonèmes ; MBAA bruit = phrases de la batterie MBAA à un rapport signal/bruit de 10 dB, score exprimé en phrases.

Ce test a été proposé dans le cadre d'une visite des patients dans le service d'ORL de l'hôpital Beaujon (Clichy, AP-HP) ou de l'unité *Otologie, implant auditifs, chirurgie de la base du crâne* de la Pitié-Salpêtrière (Paris, AP-HP), dans le cadre de leur suivi clinique. Tous les patients ont lu une lettre d'information et signé un consentement. Les sujets témoins ont été recrutés dans l'entourage personnel et professionnel de l'évaluateur.

e) **Traitement des données**

Le traitement des données a été effectué au moyen des logiciels Excel pour Mac 2011, version 14.4.3 et Statview 5.0. SAS Institute Inc. En raison de la faible taille de l'échantillon, un test non paramétrique de Mann Whitney a été utilisé pour comparer les résultats des patients et des sujets témoins.

3. Résultats

Le score moyen est de $82\% \pm 2,4$ [71 ; 96] dans le groupe témoin et de $72\% \pm 4$ [46 ; 89] dans le groupe expérimental. La différence entre les deux moyennes n'est pas significative

(Mann Whitney, $U=25$; $p=0,053$). Certains patients ont un score plus élevé que certains témoins.

	Normo-entendants (n=10)	Implantés Cochléaires (n=10)	test de Mann Whitney	
F1-min	93%±5,3	83%±8,3	$U=39,5$; $p=0,3$	NS
F2-max	80%±7,3	88%±4,2	$U=42,5$; $p=0,5$	NS
F2-min	75%±9	43%±11	$U= 24$; $p=0,04$	$p<0,05$
F3-max	90%±5,5	85%±6,7	$U= 44$; $p=0,6$	NS
F3-min	50%±9,9	60%±9,3	$U= 40$; $p=0,4$	NS
F4-max	93%±7,5	55%±12,2	$U=21$; $p=0,0131$	$p<0,02$
Référence	95%±2,7	91%±6,1	$U=49,5$; $p=0,9$	NS

Tableau 51 : Détection de différences d'intensité de formant par 10 sujets témoins normo-entendants et 10 sujets implantés cochléaires.

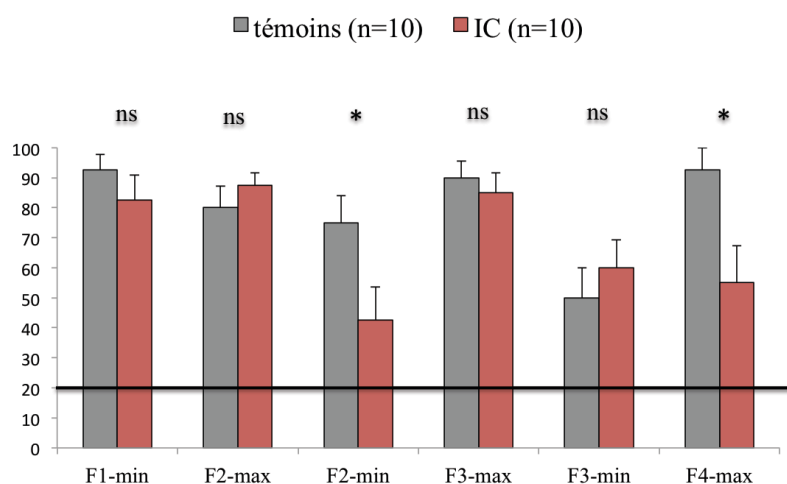


Figure 88: Détection de différence d'intensité des formants par 10 auditeurs normo-entendants et 10 auditeurs implantés cochléaires. La ligne noire correspond au niveau de hasard.

Certains patients implantés cochléaires obtiennent de meilleurs résultats que certains témoins et il y a une tendance (non significative) à une meilleure sensibilité à la détection du renforcement du F_2 (1500 Hertz) et de l'affaiblissement du F_3 (2500 Hertz) chez les adultes

implantés cochléaires que chez les témoins. L'affaiblissement de 8 dB du F_2 et le renforcement de 8 dB du F_4 (3500 Hertz) sont significativement moins reconnus par les implantés cochléaires que par les témoins entendants.

4. Discussion

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence une difficulté pour les adultes implantés cochléaires à percevoir de faibles différences d'intensité des formants, surtout lorsque la différence concerne F_1 , F_2 ou F_3 (Smith, 1951 ; Delattre, 1965 ; Maeda, 1993 ; Delvaux, 2009).

La première remarque que nous pouvons faire est d'ordre méthodologique : malgré la diminution progressive de l'amplitude des formants de 4 dB d'un formant à l'autre, lorsque l'on observe la coupe spectrale de la voyelle de référence, cette diminution progressive n'est pas ou peu visible. Pourtant, Fant (1960) décrit une diminution de 6 dB/octave. De même, la largeur de bande paraît beaucoup plus importante qu'attendu (Figure 85). Ce sont pourtant les paramètres par défaut qui ont été choisis pour l'amplitude et la largeur de bande de la voyelle de référence. Il nous est difficile d'estimer l'impact de ces effets sur les résultats.

La seconde remarque concerne la tâche. Neuf patients de la présente étude ont également participé à l'étude n°4 de discrimination de voyelles orale-nasale. Nous avons été étonné lors des passations, de constater que la présente tâche, reposant sur des différences acoustiques très fines, était globalement ressentie comme moins difficile pour les patients que la même tâche proposée dans l'étude n° 4 sur du matériel verbal naturel et présentant davantage de différences acoustiques. Une des explications possibles est que (bien que la présente tâche soit plus difficile d'un point de vue psychoacoustique), la tâche de discrimination de voyelle demande à la fois des compétences en perception fine, une normalisation (car il s'agit d'exemplaires différents de la même voyelle prononcés par deux locutrices différentes) et un étiquetage phonologique. La normalisation et/ou l'étiquetage semble poser problème aux adultes devenus sourds et implantés cochléaires. Ceci rejoint les résultats de Chang et Fu (2006) qui montrent que l'identification des voyelles est plus difficile en condition multi locuteurs et ceux de Lazard et al. (2010b) qui a mis en évidence une dégradation des compétences phonologiques (jugement de rimes) chez les adultes devenus sourds. Ce point nous semble particulièrement intéressant car il semble montrer l'intérêt, de

proposer en rééducation des supports verbaux multi locuteurs, afin que le patient puisse s'habituer à la variabilité et améliorer ses compétences de normalisation et d'étiquetage phonologique. D'autre part, évaluer les compétences en conscience phonologique en début de prise en charge orthophonique de l'adulte devenu sourd afin de déterminer si un travail cognitif spécifique sur cet aspect est à proposer.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les adultes implantés cochléaires ont des difficultés à percevoir les variations d'amplitude des formants mais pas celle selon laquelle cette difficulté se situe essentiellement au niveau du F_1 . Les résultats ne confirment les hypothèses que pour le F_{2min} (autour de 1500 Hertz) qui est moins bien détecté par les adultes implantés cochléaires que par les normo-entendants. Ceci rejoint les conclusions de Maeda (1993) pour qui l'affaiblissement de F_2 peut être l'indice de nasalité pour certaines voyelles en fonction du timbre de celles-ci.

La difficulté à détecter le renforcement du F_4 autour de 3500 Hertz n'était pas attendue pour deux raisons. D'une part, les études publiées (en anglais essentiellement) sur la perception des voyelles orales par les adultes implantés cochléaires mentionnent plutôt une perception en lien avec F_1 ou F_2 . D'autre part, le rôle du F_4 pour l'identification des voyelles est plutôt considéré comme marginal, sauf pour [i] en français (Vaissière, 2007). Le quatrième formant contribuerait plutôt à donner caractère naturel à la voyelle. Il est particulièrement important pour la voix chantée. Cependant, Smith, en 1951, proposait, entre autres, l'affaiblissement du F_2 et le renforcement du F_4 comme indices de la nasalité vocalique.

Le traitement du signal acoustique par l'implant cochléaire a peut-être un effet sur le traitement des hautes fréquences. La taille de l'échantillon étant réduite, nous n'avons pas pu faire de comparaison en fonction du système d'implant, ce qui nous aurait permis de mener une réflexion sur les différences de traitement du signal, notamment pour l'intensité. Ces résultats demanderaient donc à être répliqués sur une population plus large, permettant notamment de contrôler d'autres paramètres comme la stratégie de codage et la répartition fréquentielle.

VI. Chapitre 5 : Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles avec l'implant du tronc cérébral

L'implant du tronc cérébral (ITC) est un implant auditif placé sur le noyau cochléaire du tronc cérébral, indiqué en cas de surdité acquise bilatérale profonde ne pouvant bénéficier d'aides auditives conventionnelles ou d'une implantation cochléaire, pour des raisons de malformation/ossification cochléaire ou à cause d'une lésion du nerf auditif liée à l'ablation d'un schwannome vestibulaire. En fonction du positionnement de la palette d'électrodes sur le noyau cochléaire, de 0 à n électrodes pourront être activées (sur 12, 15 ou 20 électrodes) donnant des sensations auditives soit très distinctes les unes des autres en termes de fréquences soit à l'inverse très proches. Les réglages ont pour objectif de reconstruire une tonotopie aussi cohérente que possible (du plus grave vers le plus aigu) et suffisamment distinctive. Le bénéfice de l'ITC est en général limité à la perception des sons de l'environnement et l'amélioration de la lecture labiale pour favoriser la communication quotidienne et l'autonomie. Compte-tenu du nombre limité d'utilisateurs de cette technique et de la variabilité importante des profils, la perception de la parole avec l'implant du tronc cérébral est encore relativement méconnue. Cette étude consiste à évaluer la perception auditive, visuelle et audiovisuelle de la parole, et plus particulièrement des voyelles, par 13 adultes devenus sourds utilisateurs d'un implant du tronc cérébral. En modalité auditive, les phonèmes sont les seuls supports verbaux identifiés au-dessus du hasard ($20 \pm 4,9\%$ pour les voyelles ; $22,6 \pm 4,1\%$ pour les consonnes). Pour les voyelles, les erreurs respectent l'aperture, le lieu d'articulation et la labialité au-dessus du seuil de hasard, mais pas la nasalité. Comme attendu, les voyelles sont moins bien reconnues par les 13 utilisateurs d'implant du tronc cérébral que par les 82 adultes implantés cochléaires de l'étude n°3. Contrairement à ce qui est observé pour les mots ou les phrases, l'implant du tronc cérébral ne permet pas d'améliorer la lecture labiale pour la perception des voyelles ($+7,7\%$, $p > 0,05$ en condition audiovisuelle par rapport à la condition visuelle) hormis pour l'aperture des voyelles moyennes ($+11\%$) et le lieu des voyelles postérieures ($+13\%$). Le score d'identification de voyelles est corrélé ($\rho = 0,62$; $p < 0,05$) au nombre d'électrodes activées, contrairement au score d'identification de consonnes, mots et phrases, ce qui confirme la sensibilité de l'identification des voyelles à la résolution fréquentielle.

A. Compréhension de la parole avec l'implant du tronc cérébral

Le premier implant du tronc cérébral (ITC) a été posé en 1979 (Sanna et al., 2012). Depuis environ trente ans, l'implantation auditive du tronc cérébral constitue une modalité de réhabilitation auditive réservée à des patients présentant une surdité acquise bilatérale profonde et ne pouvant bénéficier d'aides auditives conventionnelles ou d'une implantation cochléaire. Il s'agit principalement de patients atteints de neurofibromatose de type 2 (NF2), maladie caractérisée par la présence de schwannomes vestibulaires bilatéraux dont l'exérèse a habituellement pour conséquence une surdité profonde bilatérale ainsi que l'impossibilité de conserver le nerf cochléaire et donc de poser un implant cochléaire (Bouccara et al., 2013). Au vu des résultats obtenus dans certains cas, les indications de l'implantation auditive du tronc cérébral ont été élargies à des cas de NF2 traités préalablement par radiothérapie et/ou chirurgie, et à d'autres pathologies que la NF2. Il s'agit de pathologies au cours desquelles une implantation cochléaire est impossible ou n'a pas donné le résultat fonctionnel escompté. Ces situations sont essentiellement des ossifications et malformations cochléaires majeures, des aplasies ou traumatismes du nerf cochléaire, et des associations de schwannomes vestibulaires à des atteintes auditives controlatérales (Sanna et al., 2012 ; Colletti et al., 2005a). Plusieurs équipes ont développé cette modalité de réhabilitation, avec différents modèles d'implants auditifs du tronc cérébral ou ITC (Colletti et al., 2005a ; Behr et al., 2007).

1. Fonctionnement de l'implant du tronc cérébral

Une palette de plusieurs électrodes (21, 12 ou 15 selon les systèmes, Cochlear®, Med-el® ou Neurelec®) est positionnée au contact du noyau cochléaire, à la surface du tronc cérébral. Comme l'implant cochléaire, l'ITC fonctionne avec un récepteur sous cutané et un processeur externe. L'implantation du tronc cérébral apparaît comme une technique fiable, avec peu de complications (Otto et al., 2002 ; Colletti et al., 2005a-b ; Behr et al., 2007 ; Bozorg-Grayeli et al., 2008 ; Colletti et al., 2009 ; Siegbahn et al., 2014). L'implant du tronc cérébral peut également être posé de façon bilatérale (Skarzynski et al., 2009). Contrairement à l'implant cochléaire, dont le faisceau d'électrodes respecte la tonotopie cochléaire, la palette d'électrodes (Figure 89) au contact du noyau cochléaire (Figure 90) n'attribue pas par défaut une électrode donnée à un canal fréquentiel. Les réglages ont pour objectif de reconstruire une tonotopie autant que possible cohérente (du plus grave vers le

plus aigu) et suffisamment distinctive. Certaines électrodes peuvent provoquer des sensations non auditives (stimulations faciales, vertiges, sensations de fourmillement dans les membres...) par stimulations des structures adjacentes au noyau cochléaire. Ces électrodes sont alors désactivées. Pour le cas du système Nucleus de Cochlear®, il peut donc y avoir de 0 à 21 électrodes activées.

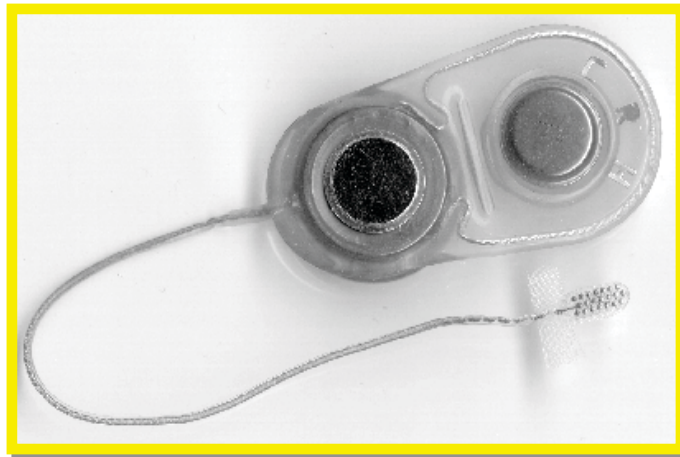


Figure 89 : Récepteur et porte électrodes de l'implant auditif du tronc cérébral Cochlear®. Document fourni avec courtoisie par la Société Cochlear®.

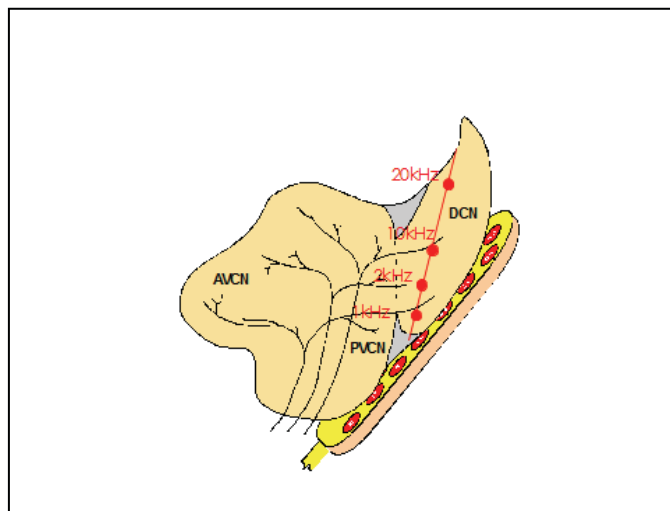


Figure 90 : Représentation de la position du porte-électrodes et de la tonotopie des noyaux cochléaires. Document fourni avec courtoisie par la Société Cochlear®.

2. Résultats pour la compréhension de la parole

a) Résultats généraux

Bien qu'il existe de rares échecs, sans aucune réponse des électrodes, le plus souvent l'implant donne des sensations auditives : dans 85% des cas chez Ebinger et al. (2000) ; 92%

chez Lenarz et al. (2001) ; plus de 98% des cas chez Colletti (2006) avec, en moyenne, entre $8,6 \pm 4,2$ sur 21 (41% de la palette du système Cochlear[®]) chez Nevison et al. (2002) et $8,8 \pm 2,2$ (70% de la palette du système Med-el[®]) chez Matthies et al. (2014). Certaines électrodes ne peuvent pas être activées parce qu'elles n'ont pas donné de réponse auditive et/ou ont provoqué des stimulations non auditives indésirables : vertige, stimulation faciale, stimulation dans le bras ou la jambe (pour une revue des types de stimulations non auditives les plus fréquentes voir Matthies et al., 2014).

Il est désormais tout à fait admis que les performances obtenues avec l'ITC n'atteignent que rarement celles obtenues avec l'implant cochléaire et qu'il existe d'importantes variations des résultats entre les patients. L'ITC permet de restaurer chez la plupart des personnes implantées une conscience des sons de l'environnement (alerte) et d'apporter des informations auditives complémentaires à la lecture labiale, entraînant une amélioration de la communication en face-à-face (Matthies et al., 2000 ; Ebinger et al., 2000 ; Otto et al., 2002 ; Behr et al., 2007 ; Schwartz et al., 2008 ; Bozorg-Grayeli et al., 2008 ; Sanna et al., 2012 ; Siegbahn et al., 2014). Behr et al. (2007) rapportent également une diminution des acouphènes. Par contre, en condition auditive seule, sans lecture labiale, il est habituel de dire que les résultats sont beaucoup plus modérés (Laszig et Aschendorff, 1999 ; Ebinger et al., 2000 ; Nevison et al., 2002 ; Schwartz et al., 2008). Il est à noter que pour l'accès à la compréhension de la parole en liste ouverte (sans support écrit et sans thème prédéfini), il existe une forte variabilité (Bozorg-Grayeli et al., 2008 ; Colletti et al., 2009) allant de la non-utilisation de l'implant par absence de bénéfice à l'utilisation du téléphone avec l'implant (Sanna et al., 2012). Plusieurs études récentes présentent malgré tout des résultats encourageants avec, par exemple, un utilisateur d'implant du tronc cérébral (bilatéral) capable de répéter 70% de mots monosyllabiques dans le silence et 50% avec un rapport signal/bruit de 10 dB (Skarzynski et al., 2009), un groupe présentant 12 patients ITC (NF2) sur 16, c'est-à-dire 75%, capables de répéter des phrases en liste ouverte (Matthies et al., 2014), et enfin, un utilisateur d'ITC capable de téléphoner (Sanna et al., 2012). La question actuelle est donc de déterminer les facteurs prédictifs de cette capacité à comprendre la parole sans lecture labiale en liste ouverte.

b) Facteurs prédictifs

Sanna et al. (2012) ne trouvent pas de facteurs prédictifs des résultats dans une analyse multivariée. D'autres auteurs ont pu mettre en évidence des facteurs prédictifs mais en général de façon isolée.

(1) Tumeur versus non-tumeur

Les patients implantés après une ablation d'un schwannome vestibulaire, dans la majorité des cas dans le cadre d'une NF2, ont en moyenne de moins bons résultats que ceux implantés dans le cadre d'une ossification cochléaire ou malformation. Certains patients dont l'étiologie n'est pas tumorale atteignent un niveau d'audition proche des meilleurs résultats des utilisateurs d'implant cochléaire, avec y compris une utilisation du téléphone (Colletti et al. 2005a-b, 2006 et 2009 ; Bozorg-Grayeli et al., 2006). En cas de cochlée ossifiée post-méningitique, le résultat obtenu avec l'ITC est similaire à celui attendu avec un implant cochléaire (Bouccara et al., 2007). Cependant, des études récentes avancent de très bons résultats, même chez des patients porteurs d'une NF2 (Matthies et al., 2014).

(2) La taille de la tumeur

Selon certains auteurs, il n'y a pas d'effet de la taille de la tumeur (du schwannome) ôtée avant la mise en place de l'implant (Otto et al., 1990 ; Lesinski-Schiedat et al., 2000 ; Matthies et al., 2014). Selon Bouccara et al. (2007), les résultats sont meilleurs quand la taille du schwannome vestibulaire, ôté avant la mise en place de l'implant est inférieure à 30 mm.

(3) La durée de surdité

Comme pour l'implant cochléaire, une durée courte de surdité présage de meilleurs résultats auditifs post-implant (Bouccara et al., 2007 pour une durée inférieure de surdité à 10 ans ; Colletti et al., 2009; Matthies et al., 2000 et 2014). Dans la cohorte de Matthies et al. (2014), les excellents résultats (> 50% de reconnaissance en liste ouverte) sont en général associés à une durée de surdité très courte (< 2 ans). Cependant, une durée de surdité courte ne garantit pas à elle seule un bon résultat de l'ITC et, de plus, selon Matthies et al. (2014), il est important de tenir compte à la fois de la durée de surdité ipsilatérale et de la surdité controlatérale à l'implant. Matthies et al. proposent d'ailleurs de prendre en compte la durée de surdité cumulée des deux oreilles. D'autres auteurs ne trouvent pas de corrélation entre la durée de surdité et le résultat de l'implant (Lesinski-Schiedat et al., 2000).

(4) Le nombre d'électrodes activées

La réponse à cette question est à mettre en rapport avec le nombre d'électrodes disponibles pour chaque système actuellement utilisé : 21 pour Cochlear[®], 12 pour Med-el[®], 15 pour Neurelec[®], 8 pour certains systèmes plus anciens. Le nombre d'électrodes est donc exprimé en valeur absolue et en pourcentage d'électrodes disponibles. Dans la cohorte de Matthies et al. (2014), un nombre d'électrodes de 8-9 sur 12 (67-75%) est plus souvent associé à une compréhension de la parole en liste ouverte. Cependant, à l'inverse, certains patients peuvent également comprendre la parole en liste ouverte avec 6 électrodes (50%). Selon Kutcha (2004), les meilleurs utilisateurs ont au moins 3/8 (38%) électrodes activées, entre 4 et 8 pour la reconnaissance de voyelles et consonnes. Pour Grayeli et al., (2008) les résultats sont moins bons pour les patients ayant moins de 10 électrodes sur 21 (48%). La question de la résolution fréquentielle est particulièrement intéressante pour la présente étude puisque nous avons vu dans le Chapitre 3, pour l'implant cochléaire et les simulations par vocodeurs, que l'identification des voyelles était plus sensible à la résolution spectrale et bénéficiait davantage de l'augmentation du nombre de canaux/électrodes que les autres supports verbaux (Xu et al., 2005 ; Baskent et al., 2006 ; Nie et al., 2006).

(5) *Le délai post-implant*

Alors que la compréhension de la parole avec l'implant cochléaire s'améliore rapidement, l'utilisation d'un implant du tronc cérébral nécessite une période d'habituation plus importante (Lenarz et al., 2002) et les résultats continuent d'évoluer bien au-delà de la première année (Lesinski-Schiedat et al., 2000 ; Lenarz et al., 2001 ; Otto et al., 2002 ; Maini et al., 2009). De plus, lorsque le patient présente une NF2, compte-tenu de l'évolutivité de la maladie, le suivi (réglages, rééducation, évaluation) peut être compliqué par des épisodes d'altération de l'état général et/ou d'hospitalisations répétées pour intervention chirurgicales (Matthies et al., 2013). Malgré les résultats de l'ITC, que l'on pourrait juger modérés, on constate, aussi bien cliniquement que dans les différentes études, que la majorité des patients utilisent très régulièrement leur processeur (Ebinger et al. 2000 ; Siegbahn et al. 2014) avec une forte satisfaction (Ebinger et al., 2000) sans corrélation avec leur résultats auditifs objectifs (Lenarz et al., 2002). Au-delà des résultats mesurés lors des évaluations, l'ITC permet au patient de se maintenir dans le monde sonore, d'augmenter sa conscience des mouvements des objets et des personnes autour de lui et de distinguer sa propre voix des sons environnants (Lenarz et al., 2002) afin d'en contrôler l'intensité (Matthies et al., 2013). La capacité à reconnaître des mots en liste fermée trois mois après l'activation est corrélée à la capacité à percevoir des phrases en liste ouverte 24 mois après l'activation (Matthies et al.,

2013). Des informations sur le résultat définitif seraient donc en fait quantifiables à un stade très précoce de la prise en charge. Par ailleurs, il existe une corrélation significative, chez les utilisateurs d'ITC, entre la capacité à détecter des modulations d'amplitudes et la reconnaissance de voyelles (Colletti et al., 2005b). La stratégie de codage (ACE, SPEAK ou CIS) et, plus généralement, le système d'implant utilisé sont des facteurs prédictifs évoqués (Golfinos et al., 2013) mais pour lesquels il n'existe pas d'évidence pour le moment. Azadpour et McKay (2014) ont comparé le traitement des informations spectro-temporelles par cinq sujets implantés cochléaires et quatre sujets implantés du tronc cérébral. Les auteurs ont comparé les scores d'identification de voyelles et de consonnes quand une seule électrode (de tonie grave, medium ou aiguë), 2 électrodes, 4 électrodes ou l'intégralité des électrodes disponibles dans le réglage habituel du patient sont activées. Dans le groupe de sujets implantés cochléaires, le score d'identification des consonnes est quasiment aussi élevé avec 4 électrodes qu'avec l'intégralité des électrodes. Par contre, pour les voyelles, 4 électrodes ne suffisent pas à obtenir des résultats aussi élevés qu'avec l'intégralité des électrodes. Le groupe de sujets ITC a des résultats très hétérogènes, d'une intelligibilité nulle pour l'un à une intelligibilité proche des sujets implantés cochléaires pour un autre. L'identification de voyelles et consonnes avec une seule électrode est aussi limitée pour les IC que les ITC (quasi nulle). Encore une fois, les auteurs rapportent une variabilité importante des résultats des ITC : les ITC les plus performants sont proches des IC mais les plus faibles n'ont pas accès à l'information fournie par chaque électrode et/ou à l'information temporelle transmise par les variations d'amplitudes entre les électrodes. L'hypothèse est posée par les auteurs que les sites de stimulation différents entre l'implant cochléaire (ganglion spiral) et l'implant du tronc cérébral (noyau cochléaire du tronc cérébral) diffèrent dans leur habilité à transmettre les informations spectro-temporelles.

B. Etude n°6 : Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles par les adultes devenus sourds utilisateurs d'un implant du tronc cérébral

Remarque préliminaire

Les données de cette étude ont été colligées dans le cadre du mémoire d'orthophonie « Evaluation après implantation auditive du tronc cérébral et bénéfice pour la communication verbale » de Dorothee Jacob et Marine Pasquet (Jacob & Pasquet, 2012) dirigé par Emmanuèle Ambert-Dahan et Stéphanie Borel dans le service d'ORL du Pr. O. Sterkers à l'Hôpital Beaujon et soutenu en 2012 au DUEFO, UMPC, Paris. Les résultats généraux font l'objet d'un article en préparation « Evaluation après implantation auditive du tronc cérébral et bénéfice pour la communication verbale » Ambert-Dahan, E., Borel, S., Jacob, D., Pasquet, M., Bouccara, D., Kalamarides, M., Sterkers, O. Les données ont bénéficié d'une seconde analyse dans le cadre de cette thèse afin de répondre aux hypothèses spécifiques à la phonétique clinique et à la perception des voyelles.

1. Objectifs

- Déterminer si les adultes utilisateurs d'un implant du tronc cérébral font les mêmes confusions phonétiques que les utilisateurs d'implant cochléaire pour la perception des voyelles
- Evaluer la complémentarité entre les informations auditives transmises par l'implant du tronc cérébral et les informations visuelles transmises par la lecture labiale
- Evaluer le lien entre la perception des voyelles et le nombre d'électrodes activées.

2. Méthode

a) Stimuli

Seize consonnes [p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, l, m, n, r, ɲ] associées à la voyelle [a] et dix voyelles [i, y, u, e, ø, o, a, ɔ̃, ɛ̃ et ɛ̃] associées à la consonne [p] dans une syllabe de type CV sont prononcées par une locutrice dans trois modalités : ITC seul, lecture labiale seule, ITC+lecture labiale. L'évaluation est proposée à voix directe, avec un cache incliné devant les lèvres pour la modalité auditive seule. La voix directe est préférée à un support enregistré afin de faciliter la réponse des patients dont les résultats en modalité auditive peuvent être très

limités et ainsi éviter un effet plancher. Les évaluations dans les deux autres modalités ont donc également été proposées directement, sans vidéo afin que les trois modalités puissent être comparées, toutes choses égales par ailleurs. Notons que suite à une erreur dans la constitution du corpus, la consonne [ʒ] est manquante. Un support écrit reprenant l'ensemble des consonnes et voyelles du test est proposé. Afin de pouvoir les comparer entre-elles, les trois modalités ont bénéficié de la même grille de cotation : en modalité visuelle, les réponses proposant un sosie labial (par exemple, [b] à la place de [p]) n'ont donc pas été acceptées.

Une épreuve de reconnaissance de 20 mots dissyllabiques de Fournier et de phrases MBAA en liste ouverte (sans support écrit) a également été proposée dans les trois modalités. Les listes de Fournier de Cousin-Boschetti et De Laubier (2008) ont été préférées car elles ont été réagencées avec respect de la fréquence d'occurrence des phonèmes dans la langue, de la proportion de mots comportant un groupe consonantique et de la fréquence lexicale actuelle. Trois listes de 15 phrases de la batterie MBAA, adaptation française du protocole anglais *CUNY*, lui-même inspiré d'un autre protocole anglais, *The Everyday Sentences*, ont été proposées. Ce dernier a été adapté en français en 1992 par Xavier Cormary, orthophoniste au CHU de Purpan à Toulouse, dans le cadre d'un protocole d'étude supporté par Cochlear®.

Patient	Sexe	Age	Etiologie	Délai post-implant (en mois)	Durée de la privation auditive (en mois)	Nombre d'électrodes	Utilisation
1	F	48	NF2	3	132	19	Q
2	F	23	NF2	12	12	9	Q
3	F	23	NF2	72/24	12	5/16	Q
4	F	49	Inconnue	7	48	14	I
5	H	31	NF2	24/12	60	9/11	Q
6	H	49	Méningite	79	11	12	Q
7	H	43	NF2	168	84	7	Q
8	F	35	NF2	18	72	6	I
9	F	44	NF2	76	84	12	Q
10	F	67	NF2	159	240	8	Q
11	F	62	NF2	168	24	13	Q
12	H	23	NF2	22	12	11	Q
13	H	61	Méningite	153	36	11	Q

Tableau 52 : Données démographiques des 13 adultes implantés du tronc cérébral de l'étude n°6. Q : quotidienne, I : irrégulière. Délai post-implant et nombre d'électrodes quand bilatéral D/G.

b) Population

Treize adultes présentant une surdité acquise postlinguale, utilisateurs d'un implant du tronc cérébral ont participé à l'étude. Tous sont implantés avec un ITC Nucleus (Cochlear®). Les patients présentant une audition résiduelle ou un implant cochléaire controlatéral ont été exclus. Une patiente de langue maternelle portugaise (Brésil) n'a pas été exclue car son niveau de français a été jugé suffisant par les évaluateurs. La population comprend 8 femmes et 5 hommes ; 6 sont implantés à droite, 5 à gauche et 2 de façon bilatérale. L'âge moyen au moment de l'évaluation était de (MOY±SEM) 43±4,2 ans [23 ; 67], la durée de privation auditive du côté implanté de 64±17,9 mois [11 ; 240], et la durée moyenne d'expérience avec

l'ITC de $74 \pm 18,4$ mois [3 ; 168]. Dix patients suivent une rééducation orthophonique, deux l'ont terminée, un n'en a jamais bénéficié.

3. Résultats

a) Reconnaissance de la parole

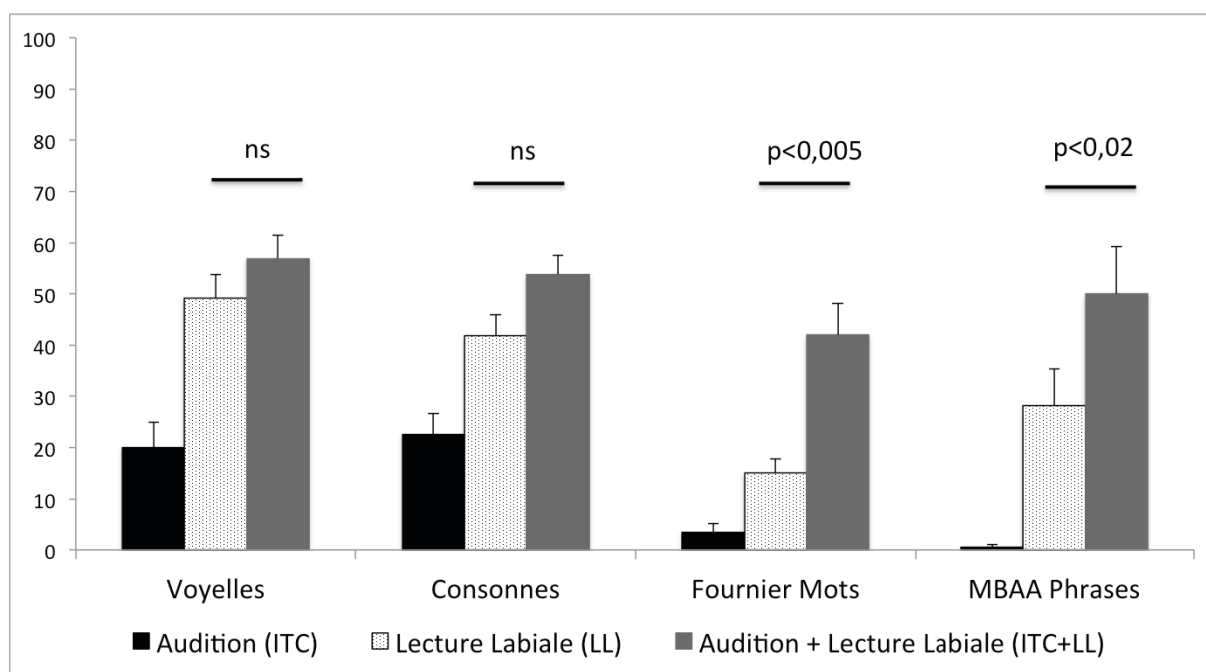


Figure 91 : Reconnaissance de la parole en modalités auditive, visuelle et audiovisuelle par 13 adultes devenus sourds utilisateurs d'un implant du tronc cérébral (test non paramétrique apparié de Wilcoxon entre la condition LL et la condition ITC+LL).

b) Identification des voyelles

(1) Comparaison entre implant cochléaire et implant du tronc cérébral

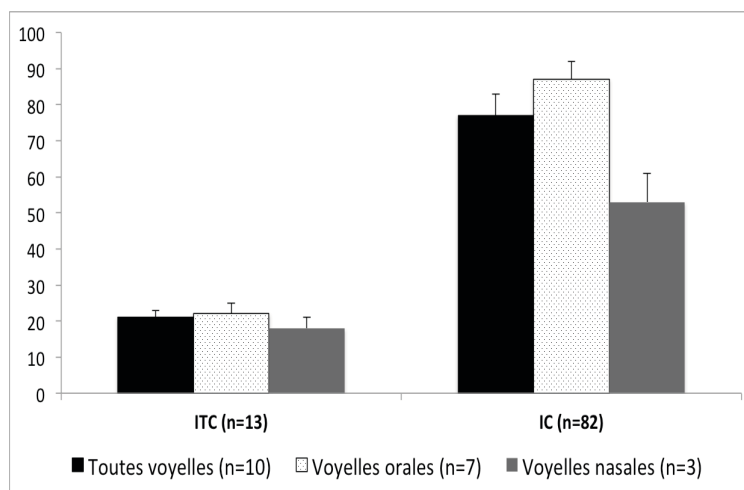


Figure 92 : Score moyen d'identification des voyelles [i, y, u, e, ø, o, a, ă, 3, ę] en contexte [pV], à voix directe en modalité auditive seule chez 13 adultes utilisateurs d'implant du tronc cérébral à un délai post-implant moyen de 74±18,4 mois à gauche, et 82 adultes utilisateurs d'implant cochléaire à un délai post-implant moyen de 35±0,3 mois.

(2) *Corrélations entre la reconnaissance de la parole avec l'ITC et le nombre d'électrodes activées :*

	Rho	p-value
Voyelles	0,61	p=0,0359
Consonnes	0,26	p=0,36 <i>N.S</i>
Fournier mots	0,11	p=0,71 <i>N.S</i>
MBAA phrases	0,23	p=0,42 <i>N.S</i>

Tableau 53 : Corrélation entre le score de reconnaissance de la parole, avec l'implant du tronc cérébral, en modalité auditive seule, et le nombre d'électrodes activées (test non paramétrique de Spearman).

Seule l'identification des voyelles est corrélée au nombre d'électrodes (Tableau 53 et Figure 93).

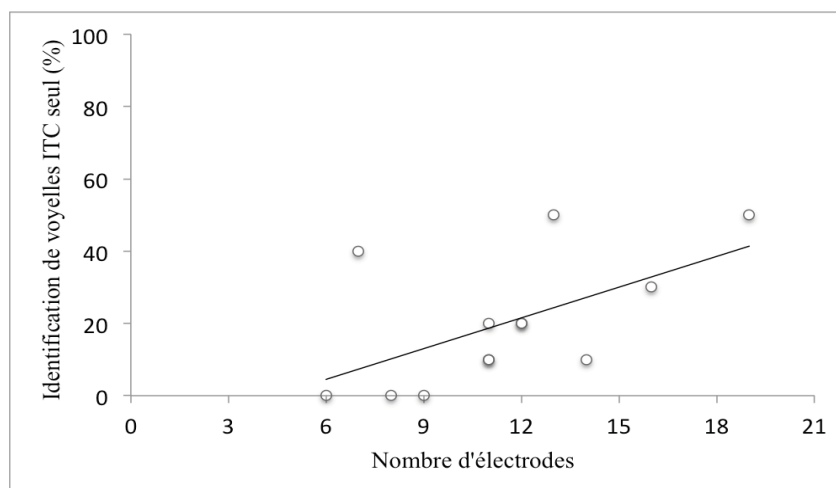


Figure 93 : Corrélation entre le score d'identification de voyelles avec l'implant du tronc cérébral en modalité auditive seule et le nombre d'électrodes activées (rho de Spearman=0,62, $p<0,05$)

(3) Complémentarité entre les informations auditive et visuelle pour l'identification des voyelles

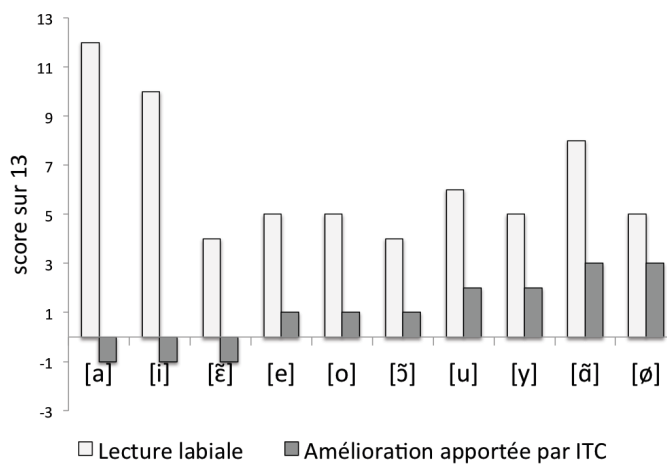


Figure 94 : Amélioration apportée par l'implant du tronc cérébral en fonction du score initial en lecture labiale pour 13 adultes implantés du tronc cérébral.

Les voyelles arrondies bénéficient davantage de l'amélioration apportée par l'implant du tronc cérébral (Figure 94).

	[i]	[y]	[u]	[e]	[ø]	[o]	[a]	[ɔ̃]	[ɑ̃]	[ɛ̃]	NR	T
[i]	4		1	2	1		3				2	13
[y]		2	2	1	2		1	1		2	2	13
[u]		1	3		2	6	1					13
[e]	2			4	1	1				4	1	13
[ø]		1	1	2	2			3	1		3	13
[o]	1			1	2	3	1	2		1	2	13
[a]					1	1	2	2	5	1	1	13
[ɔ̃]	1	2	1		2	1		3		1	2	13
[ɑ̃]	1	1	1	1	4	1		2	2			13
[ɛ̃]			1	1	1	1	5		1	2	1	13
T	9	7	10	12	18	14	13	13	9	11	14	130

Figure 95 : Matrice de confusions en modalité auditive (ITC) : 13 voyelles*10 auditeurs*1 répétition=13 réponses pour chaque voyelle

Si l'on compare les résultats avec ceux des adultes implantés cochléaires, des points communs et des différences émergent :

- Le [i] n'est pas unanimement reconnu mais reste la voyelle la mieux identifiée, autant que le [e], 4 fois sur 13.
- Il y a des confusions entre des voyelles éloignées : [i] reconnu [a] dans 3/13 cas.
- On retrouve la confusion de [ɛ̃] vers [a], fréquemment observée chez les implantés cochléaires, dans 5 cas sur 13
- Il y a des confusions des voyelles orales vers les voyelles nasales [a] vers [ɑ̃] dans 5 cas sur 13, [e] vers [ɛ̃] dans 4 cas sur 13, ce qui n'est pas observé chez les adultes implantés cochléaires.

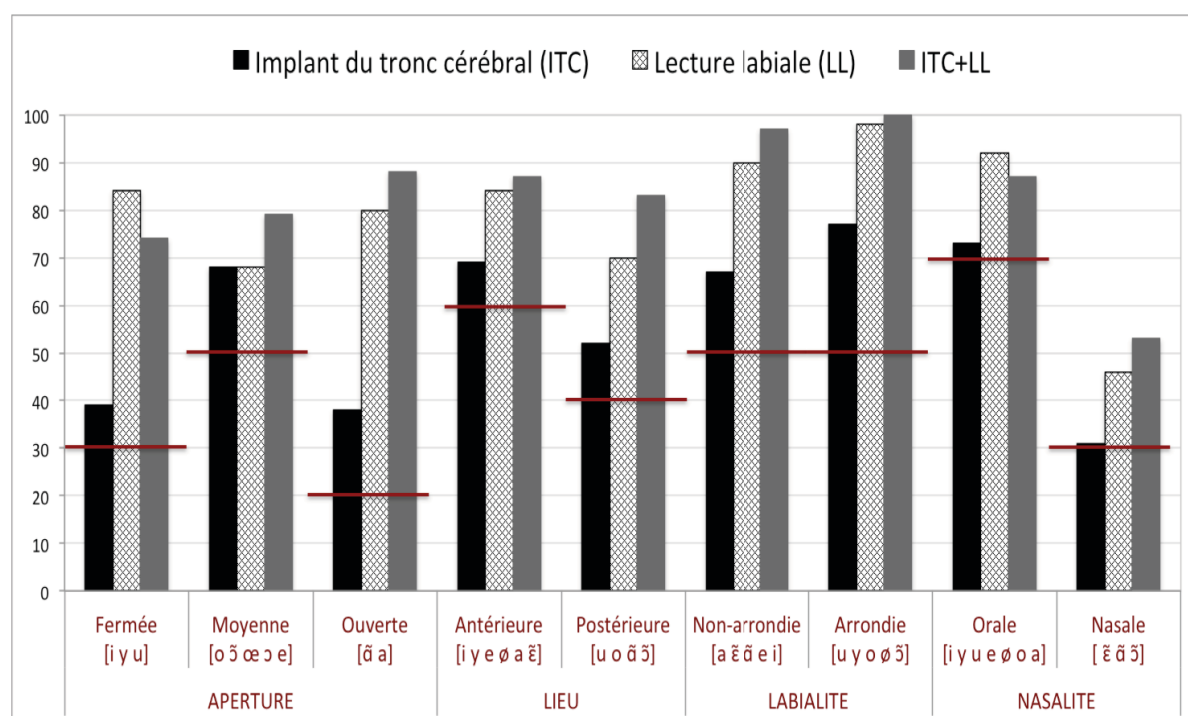


Figure 96 : Taux d'identification en fonction des traits articulatoires des voyelles en modalité auditive, visuelle et audiovisuelle. La barre horizontale correspond au niveau de hasard.

4. Discussion

En modalité auditive seule, seule la perception auditive analytique des consonnes et des voyelles est possible et se situe au-dessus du niveau de hasard (Figure 96). Ceci s'observe aussi bien pour l'aperture, le lieu d'articulation que pour la labialité. Par contre, la perception du trait de nasalité ne se situe pas au-dessus du hasard.

La perception auditive des voyelles avec un implant du tronc cérébral est significativement moins bonne qu'avec un implant cochléaire. On n'observe pas de dissociation entre la perception des voyelles orales et la perception des voyelles nasales mais ceci est peut-être du à un effet plancher. Le nombre d'électrodes activées n'est corrélé qu'avec l'identification de voyelles (Figure 93) et pas avec les scores de reconnaissance de consonnes, ni de mots ou de phrases. Ceci rejoint les travaux précédemment cités (Xu et al., 2005 ; Baskent, 2006 ; Nie et al., 2006) sur la résolution fréquentielle, puisqu'une fois encore, les voyelles sont les plus sensibles à l'ajout d'informations spectrales, contrairement aux consonnes qui reposent à la fois sur des informations spectrales et temporelles. La reconnaissance de mots et de phrases est, quant à elle, à la fois sous-tendue par les

informations auditives périphériques et par les inférences cognitives. Il n'est donc pas surprenant qu'elle ne soit pas corrélée au nombre d'électrodes activées.

Cependant, les indices auditifs ne permettent pas de compléter les informations visuelles apportées par la lecture labiale et il y a très peu fusion des informations auditives et visuelles pour la perception des voyelles (+7,7%, $p > 0,05$), en condition audiovisuelle par rapport à la condition visuelle (Figure 91), hormis pour l'aperture des voyelles moyennes (+11%) et le lieu d'articulation des voyelles postérieures (+13%).

A l'inverse, si la perception de mots et de phrases en modalité auditive seule est limitée, il y a, pour ces éléments de parole plus globaux, un apport significatif de l'implant du tronc cérébral en modalité audiovisuelle pour la reconnaissance de mots de Fournier (+27%, $p < 0,05$) et de phrases MBAA (+21%, $p < 0,02$) (Figure 91). La première explication possible est le fait que les patients ont besoin d'un matériel verbal plus long pour faire des inférences et mettre en jeu leurs suppléances mentales et le traitement multimodal de la parole. De plus, les mots et les phrases sont les supports verbaux de leur communication quotidienne et leur perception audiovisuelle est alors entraînée dans tous les actes de communication. Ce n'est pas le cas pour des éléments plus analytiques comme les consonnes et les voyelles.

En conclusion, l'étude approfondie de l'identification des voyelles permettrait une analyse fine du type d'indices spectraux transmis par l'implant du tronc cérébral. Une réflexion sur la raison pour laquelle audition et vision ne fusionnent pas pour l'identification des voyelles chez les implantés du tronc cérébral pourrait peut-être ouvrir vers de nouvelles pistes rééducatives.

VII. Chapitre 6: Applications de la thèse, conclusion générale et perspectives

Le chapitre 6 est composé d'une enquête auprès des orthophonistes (étude n°7) et de la discussion générale de la thèse. L'étude n°7 présente les résultats d'un questionnaire (Annexe I) diffusé auprès des orthophonistes via internet. Le questionnaire, pour lequel nous avons les réponses de 179 orthophonistes, comportait 22 questions sur le parcours professionnel et le mode d'activité de l'orthophoniste interrogé, ses connaissances et pratiques des oppositions de voyelles orales-nasales en production (retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie) et/ou sosies labiaux, et pour 21 orthophonistes (parmi les 179) ayant déjà suivi des adultes sourds, leur pratique en rééducation orthophonique post-implantation.

Par exemple, une question de la partie B était : « *Quel mot opposeriez-vous à « Monde » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? « Mode » ou « Maude » (prénom) ?* ». La même question a été posée pour les trois voyelles nasales ainsi qu'avec des mots de type CV. Les réponses montrent qu'en contexte CV comme CVC, les orthophonistes associent majoritairement la nasale [ã] à l'orale [a] (77-79% en CVC), la nasale [ɔ̃] à l'orale [o] (88% en CV, 75-82% en CVC) et la nasale [ɛ̃] à l'orale [ɛ] (54% en CV/82% en CVC). Une question de la partie B était par exemple : « *Si un patient implanté a des difficultés à percevoir le trait de nasalité des voyelles, quelle voyelle orale utiliserez-vous en opposition de la voyelle nasale [ã], [ɔ̃] ou [ɛ̃] afin de ne travailler perceptivement que le trait de nasalité?* ». Pour la voyelle [ã], 71% l'opposent à [a] et 19% seulement l'opposent à [ɔ]. De même, pour la voyelle [ɛ̃], 57% l'opposent à [ɛ] et 19% l'opposent à [a]. Pour la voyelle [ɔ̃], 76% l'opposent à [o] et 19% à [ɔ]. Ces résultats confirment que l'alternance phonologique est privilégiée dans le choix des paires orale-nasale utilisées en rééducation, du moins pour les voyelles [ɛ̃] et [ã]. Une information sur le décalage articulatoire phonétique propre aux voyelles nasales du français parisien permettrait d'affiner la prise en charge. Comme application rééducative, nous proposons un corpus de paires minimales spécifiques pour le travail perceptif des oppositions de voyelles orales vs. nasales et une classification de visèmes.

A. Etude n°7 : Enquête auprès des orthophonistes

1. Objectifs

L'objectif de cette étude est d'interroger les orthophonistes sur leurs pratiques des oppositions entre les voyelles orales et nasales, aussi bien dans leur prise en charge orthophonique sur le versant expressif (trouble de la parole, dysarthrie, insuffisance vélaire) que, pour la prise en charge de l'adulte sourd, sur le versant perceptif visuel (description des sosies labiaux) et auditif (rééducation auditive post-implant).

2. Méthode

a) Questionnaire

Un questionnaire (Annexe I) a été élaboré au moyen de l'interface *Google Documents* et mis en ligne le 23/09/2012. Le questionnaire comportait 22 questions dont 8 (partie A) concernaient le parcours professionnel et le mode d'activité de l'orthophoniste interrogé, 9 (partie B) s'intéressaient ses connaissances et pratiques des oppositions des voyelles orales-nasales en production (retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie) et/ou sosies labiaux et 5 (partie C) portaient sur la rééducation orthophonique post-implant. La demande de participation à l'enquête a été diffusée via les réseaux sociaux par le syndicat professionnel (FNO) et les listes de diffusion professionnelles, afin d'être proposée au plus grand nombre d'orthophonistes possible, sur l'ensemble du territoire.

b) Participants

Du 23/09/12 au 01/11/12, 199 orthophonistes ont répondu au questionnaire. Dix-neuf d'entre eux estiment avoir l'accent du sud. Ils sont exclus du traitement des données puisque la prononciation des voyelles nasales en français méridional diffère de celle en français septentrional que nous étudions spécifiquement dans cette thèse (Fagyal et al., 2006). Les réponses des 180 orthophonistes restants ont été analysées.

- Les dates d'obtention du diplôme d'orthophonie allaient de 1968 à 2012
- 110 participants exercent en libéral, 38 en salariat, 32 en exercice mixte.
- 9 exercent dans un centre spécialisé dans l'implantation cochléaire.
- 159 ne prennent pas en charge d'adultes sourds tandis que 21 suivent plus ou moins régulièrement des patients sourds : 9 d'entre eux ont une expérience limitée à quelques

patients, pour 5 d'entre eux les patients sourds constituent moins de 25% de leur patientèle, pour 3, 25 à 50% de la patientèle et pour 4 plus de 50% de la patientèle.

- 33 ont suivi un cursus complémentaire en sciences du langage (19 Licence, 9 Master 1/Maîtrise, 5 Master 2/DEA). 103 exercent en Ile-de-France, 9 dans le centre, 33 dans le Sud, 32 dans le Nord, 2 à l'étranger (Québec et Belgique) et 1 participant n'a pas renseigné ce champ.

3. Résultats

a) **Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales en production (retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie) et/ou sosies labiaux (n=180 réponses).**

Question : Dans le cadre d'une prise en charge de retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie, lecture labiale (sosies labiaux) ou autre, quelles voyelles orales opposez-vous à chacune des voyelles nasales afin de ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais ? En d'autres termes, quelle est, pour vous, la voyelle orale correspondante à chacune des voyelles nasales (d'un point de vue articulatoire) ?

(1) En contexte de syllabe ouverte (CV)

(a) Voyelle [ɔ̃]

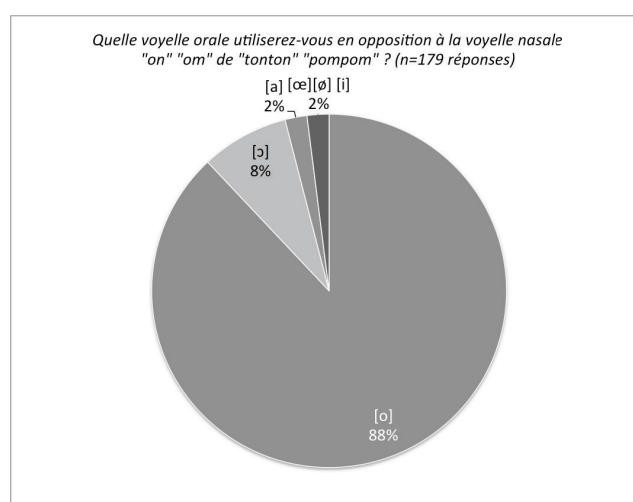


Figure 97: Voyelle orale opposée à la voyelle nasale [ɔ̃] en contexte CV pour ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).

(b) *Voyelle [ã] :*

Nous n'avons pas trouvé de paires minimales opposant [ã] et [ɔ] en syllabe ouverte. Il n'y avait donc pas de question portant sur l'opposition de la voyelle [ã] en CV.

(c) *Voyelle [ɛ̃]*

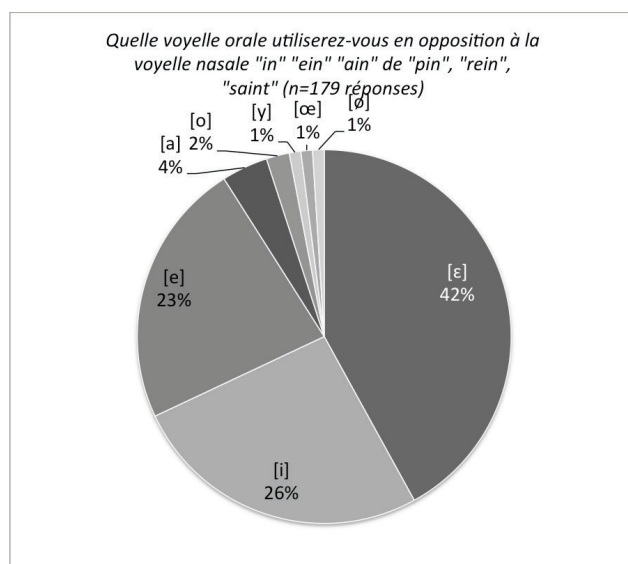


Figure 98: Voyelle orale opposée à la voyelle nasale [ɛ̃] en contexte CV pour ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).

(2) *En contexte de syllabe fermée (CVC)*

(a) *Voyelle [ɔ̃]*

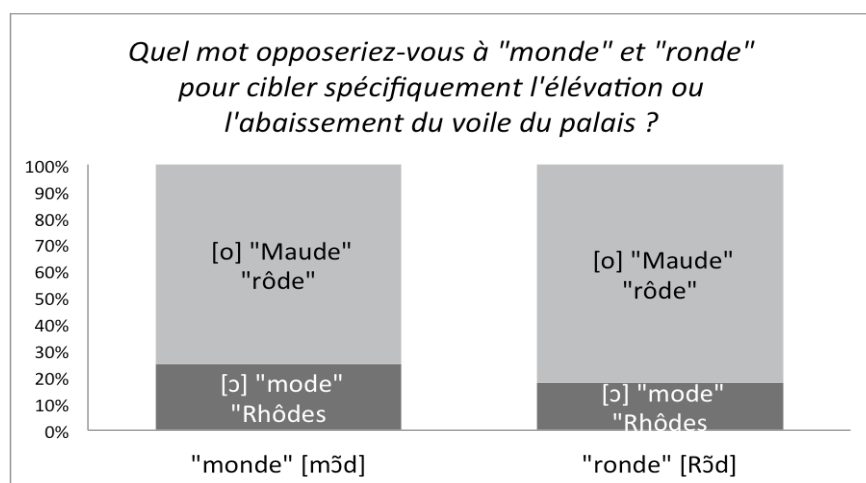


Figure 99: Mot opposé aux mots « monde » et « ronde » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).

(b) *Voyelle [ã] :*

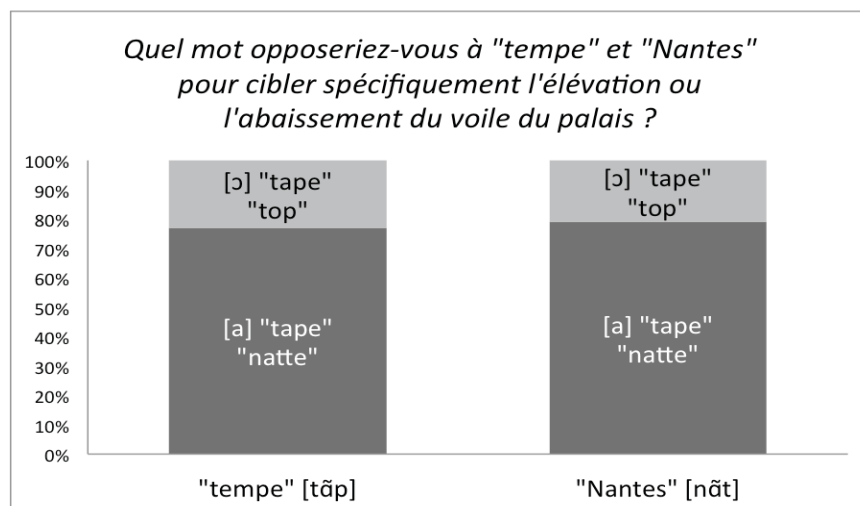


Figure 100: Mot opposé aux mots « tempe » et « Nantes » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).

(c) *Voyelle [ẽ]*

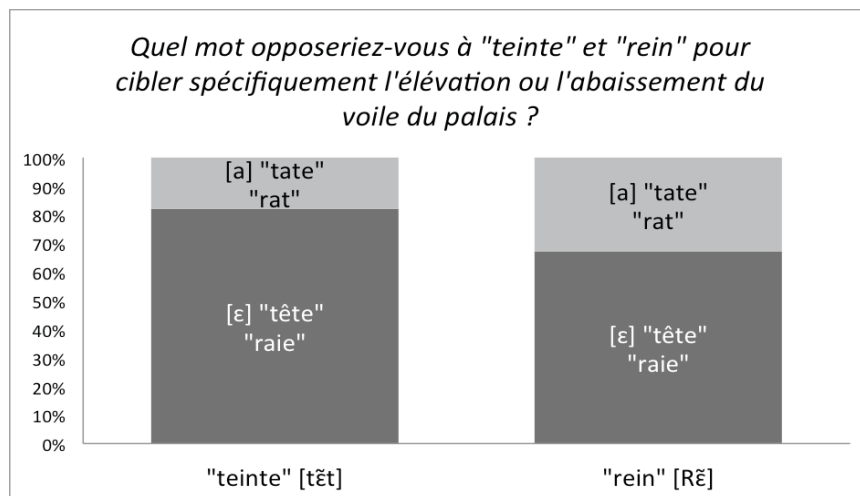


Figure 101: Mot opposé aux mots « teinte » et « rein » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).

(3) *Synthèse des oppositions de voyelles nasales-orales faites par les orthophonistes interrogés dans le cadre d'une prise en charge de retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie, lecture labiale (sosies labiaux) ou autre.*

	[ã]	[õ]	[ẽ]
CV- Syllabe ouverte	Non évalué	[o]	[ε]
CV- Syllabe fermée	[a]	[o]	[ε]

Tableau 54: Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales, en production, dans le cadre des retards de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie et/ou sosies labiaux (n=179 orthophonistes interrogés).

b) Rééducation des adultes implantés cochléaires

(1) Caractéristiques linguistiques les plus difficiles à percevoir d'après les orthophonistes

D'après vous, quelle est la caractéristique la plus difficile à percevoir par les adultes implantés (en modalité auditive sans lecture labiale) ?

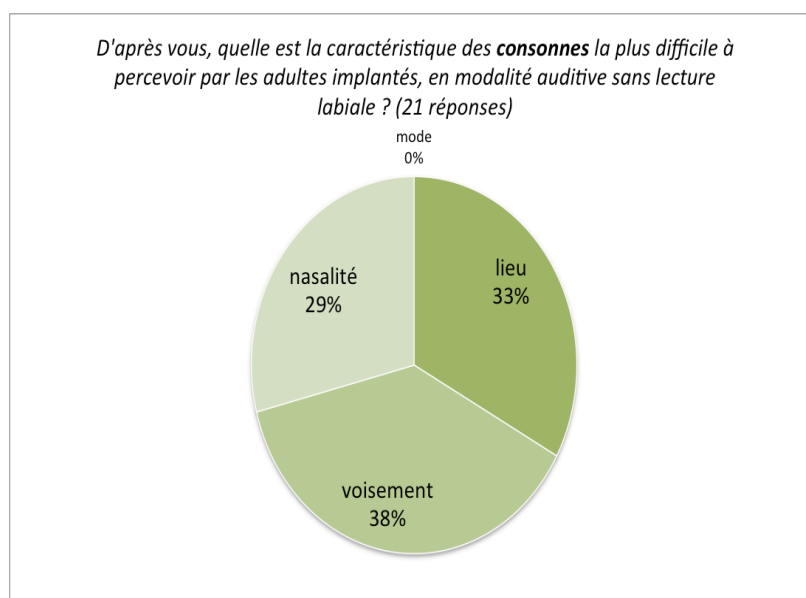


Figure 102: Trait articulatoire des consonnes les plus difficiles à percevoir auditivement par les adultes implantés cochléaires, d'après 21 orthophonistes pratiquant régulièrement des rééducations post-implant.

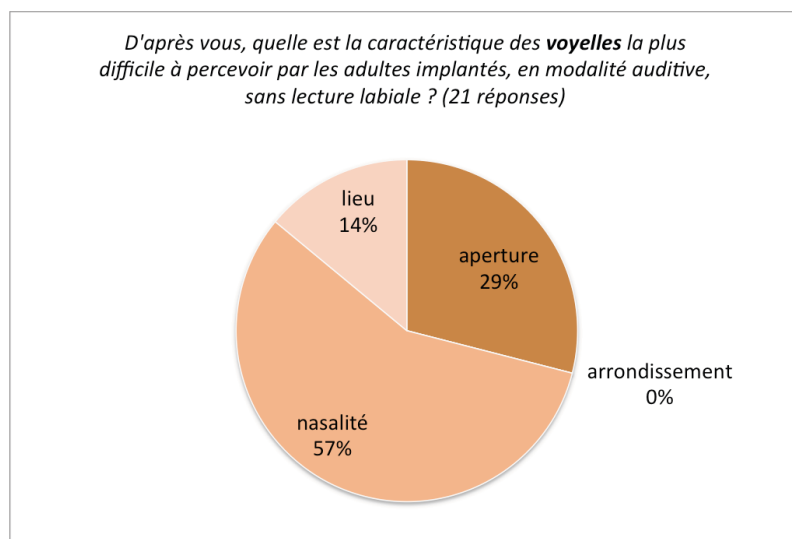


Figure 103: Trait articulatoire des voyelles les plus difficiles à percevoir auditivement par les adultes implantés cochléaires, d'après 21 orthophonistes pratiquant régulièrement des rééducations post-implant.

(2) Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés)

(a) Voyelle [ɔ̃]

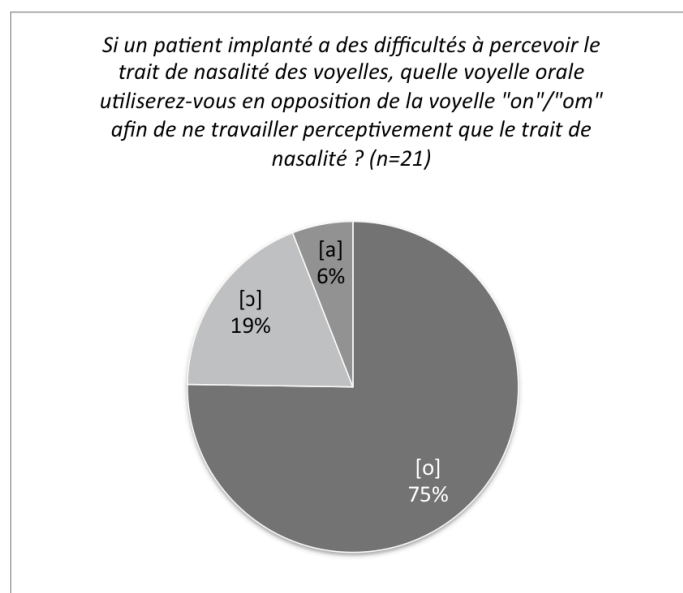


Figure 104: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɔ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés).

(b) Voyelle [ɑ̃] :

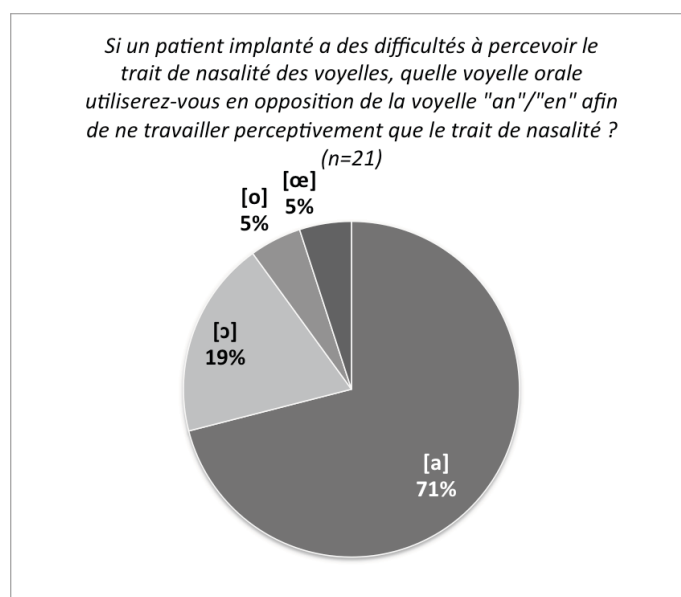


Figure 105: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɑ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés).

(c) *Voyelle [ɛ̃]*

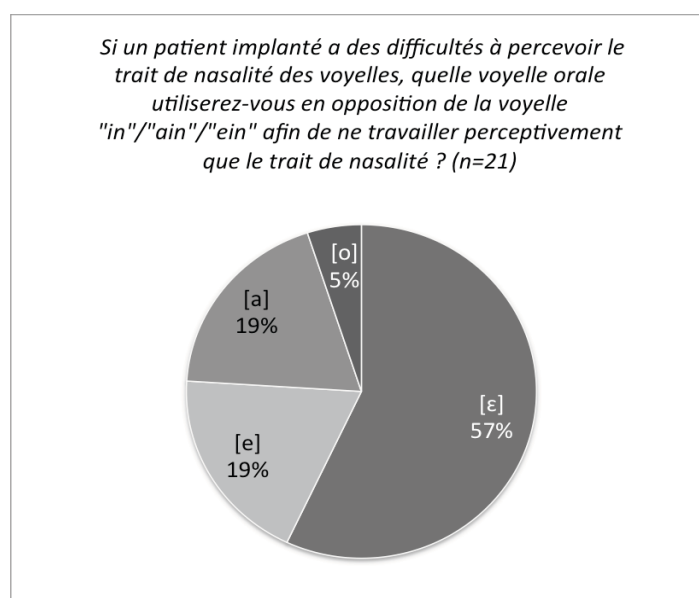


Figure 106: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɛ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés).

(3) *Synthèse des oppositions de voyelles nasales-orales faites par les orthophonistes interrogés dans le cadre de la rééducation auditive post-implant.*

	[ã]	[õ]	[ẽ]
CV- Syllabe ouverte	[a] 71%	[o] 76%	[ε] 57%

Figure 107: Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales pour la perception du trait de nasalité chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes expérimentés).

4. Discussion

Les orthophonistes privilégient pour le [ã], l'opposition avec le [a], de façon massive. Pour le [ẽ], l'opposition avec le [ε] est également choisie mais de façon moins nette. Par contre, pour le [õ], les orthophonistes s'orientent vers la voyelle [o], qui correspond effectivement à la description phonétique orale la plus proche de la voyelle [õ].

Pour la voyelle [õ], toutes les données concordent : confondue majoritairement avec le [u] et le [o] en lecture labiale (étude 1), et avec le [o] avec l'implant cochléaire (Borel, 2007 ; études 3 et 4), cette voyelle est effectivement associée à l'orale [o] et non pas à l'orale [ɔ] par les orthophonistes.

Pour la voyelle [ã], les données récoltées en lecture labiale et auprès des adultes implantés cochléaires s'opposent en partie à ce qui est proposé par les orthophonistes. En lecture labiale, [ã] est majoritairement confondue avec une voyelle arrondie. Avec l'implant cochléaire, les confusions semblent être influencées par le contexte syllabique de présentation de la voyelle (CVC, CV, ou en discrimination isolée). En CVC, [ã] est confondu avec [ɔ] (Borel, 2007), en CV avec [a] (étude n°3 du présent manuscrit) et sur une tâche de détection d'intrus en isolé avec [ɔ] (étude n°4 du présent manuscrit). Précisons que les protocoles étaient différents pour CV et CVC et que l'objectif de ces études n'était pas de comparer les résultats des patients implantés en fonction du contexte consonantique. Mais les confusions différentes entre l'étude du Master (Borel, 2007) et l'étude n° 3 de ce manuscrit sont selon nous en lien avec cette différence de structure syllabique. L'influence phonotactique (Hallé et al., 1998) semble jouer un rôle dans les confusions exprimées. Nous proposons l'idée que [ɔ] est la voyelle la plus proche de [ã] aux niveaux articulatoire et acoustique mais que cette proximité ne s'exprime pas en CV car elle n'a pas de fonction linguistique. En effet, il n'existe à notre connaissance aucune paire minimale opposant [ã] et [ɔ] en contexte CV. Ceci pointe justement à la fois l'intérêt et la limite du présent travail : être au plus proche de la

réalisation phonétique pour les aspects articulatoires et perceptifs, sans perdre d'esprit la fonction phonologique et linguistique de chaque opposition. Les deux aspects ne s'opposent pas mais sont au contraire complémentaires. L'orthophoniste peut jouer sur les deux tableaux. Plutôt utiliser les oppositions phonétiques, lorsqu'il souhaite travailler précisément, séparément la mobilisation du voile du palais (dans le cadre, par exemple, d'une insuffisance vélaire) ou pour un travail de précision visuelle en lecture labiale ou auditive avec l'implant. Et plutôt utiliser les paires phonologiques, dont certaines ont un rendement linguistique plus important que les paires phonétiques, pour un travail phonologique favorisant les oppositions les plus fréquentes dans le système vocalique.

La voyelle [ɛ̃] apparaît comme celle donnant les résultats les plus surprenants. En perception auditive avec l'implant cochléaire, elle est majoritairement confondue avec le [a], quel que soit le contexte consonantique. Par contre, seuls 19% des 21 orthophonistes spécialisés proposent la voyelle [a] comme étant la plus proche auditivement de [ɛ̃] pour les implantés cochléaires et 57% proposent la voyelle de l'alternance morpho-phonologique [ɛ], alors que la confusion [ɛ̃]-[ɛ] ne se rencontre quasiment jamais dans nos résultats. Nous pouvons pourtant attester de paires minimales opposant [ɛ̃] et [a] : par exemple, en CV, « bain » vs. « bas », « éteint » vs. « état », en CVC « cinq » vs. « sac », en CCVC « tringue » vs. « trac », CCV « brin » vs. « bra ». D'un point de vue articulatoire, les confusions faites par les labiolecteurs normo-entendants et sourds pour [ɛ̃] s'orientent vers les voyelles non arrondies d'apertures extrêmes [i] et [a]. Les orthophonistes font des propositions variées comme [ɛ], [i] et [e] mais ne proposent la voyelle [a] que dans 2% des cas.

Selon les orthophonistes expérimentés dans la prise en charge des adultes implantés cochléaires, la nasalité est le trait vocalique le plus difficile à percevoir par les adultes implantés cochléaires. Ceci rejoint nos observations et justifie le sujet de ce travail.

En conclusion, l'alternance phonologique est privilégiée dans le choix des paires orale-nasale utilisées en rééducation, du moins pour les voyelles [ɛ̃] et [ɑ̃]. Une information sur le décalage articulatoire phonétique propre aux voyelles nasales du français parisien permettrait de compléter la prise en charge.

B. Conclusion générale et perspectives

Le premier apport visé par cette thèse était l'amélioration de la connaissance de la perception de la parole avec un implant cochléaire. Nous savions que les implantés cochléaires éprouvaient des difficultés à percevoir les voyelles antérieures arrondies en finnois, peut-être en lien avec une difficulté à percevoir le troisième formant (Välimaa, 2002 et 2011). Nous pouvons désormais avancer qu'ils ont également des difficultés à percevoir les voyelles nasales du français septentrional, peut-être à cause de difficultés à percevoir l'amplitude relative des formants. Ces deux types de voyelles (arrondies et nasales) étant absentes du système vocalique de l'anglais, elles n'avaient pas été étudiées dans les publications précédentes, essentiellement anglophones. Nos résultats ne concernent cependant que les voyelles du français septentrional et il serait intéressant de mener une étude similaire auprès d'adultes francophones de France méridionale et du Canada. Dans le français méridional, la voyelle nasale est souvent composée d'une partie dénasalisée au début, d'une partie nasalisée intermédiaire et d'un appendice nasal à la fin. Au Québec, les voyelles nasales ont en plus tendance à être diphtonguées et à suivre un *Changement en Chaîne* inverse de celui du français septentrional (Fagyal et al., 2006). Par ailleurs, les voyelles nasales du Portugais et du Polonais pourraient également être étudiées. Ces études cross-régionales et cross-linguistiques pourraient permettre, grâce à la variabilité phonétique des voyelles nasales, d'approcher encore plus près les indices de la nasalité vocalique tout en permettant de mieux comprendre, les stratégies auditives des adultes implantés cochléaires pour la perception des voyelles.

Un point particulièrement intéressant est la dichotomie entre, d'une part les voyelles, pour lesquelles le trait de nasalité est mal identifié mais le lieu d'articulation bien identifié, et d'autre part les consonnes, pour lesquelles le trait de nasalité est bien identifié mais dont le lieu d'articulation, du moins pour [n], pose des problèmes d'identification avec des confusions vers [m]. Cette dissociation peut s'expliquer par le fait que le trait de nasalité ne s'exprime pas acoustiquement de la même façon pour les consonnes et les voyelles. Du point de vue buccal, les consonnes nasales [m] et [n] ont en commun avec les sonantes (comme [l]) et les voyelles la présence de formants. Elles peuvent se vocaliser et servir de noyau syllabique dans certaines langues comme en anglais (exemple : « button ») ; elles partagent avec les voyelles et toutes les consonnes voisées la présence d'une barre de voisement (pour une revue sur le trait nasal, Clements et al, 2014). Cependant, les confusions de [n] s'orientent

majoritairement vers [m] et non vers [l], ce qui atteste de la bonne perception du trait de nasalité, toutes choses égales par ailleurs. Ce trait de nasalité des consonnes est caractérisé par un murmure nasal intense autour de 250-300 Hertz, associé à des antiformants entre 750 Hz et 1250 Hz pour [m] et entre 1450 Hz and 2200 Hz pour [n] (Clements et al, 2014). La difficulté à percevoir l'antiformant du [n] entre 1450 et 2200 Hertz est en accord avec la difficulté à percevoir la diminution de l'intensité du F₂ autour de 1500 Hertz retrouvée dans l'étude n°6. Les voyelles nasales, quant à elles, ont la particularité d'être intrinsèquement plus longues (Delattre et Monnot, 1968) que les voyelles orales, ce qui pourrait également constituer un indice rythmique pour l'identification de cette catégorie de voyelles par les adultes implantés cochléaires. Ce n'est cependant pas le cas, et contrairement à ce qui est observé chez les normo-entendants (Hall et Hume, 2013) et malentendants non implantés (Adam, 2006), la quasi-totalité des confusions ne respectent pas le trait de nasalité. Nous l'avons vu, le spectre des voyelles nasales est complexe, rendant leur timbre moins distinctif, et il n'est finalement pas inattendu qu'elles soient moins bien identifiées que les voyelles orales, car c'est aussi le cas chez les normo-entendants (Del Fabro et Desmons, 2014). Malgré tout, la perception des implantés cochléaires est précise puisqu'ils identifient des éléments du timbre, en rapport avec l'articulation orale de la voyelle. La difficulté de notre travail est qu'il repose sur une double inconnue : la pertinence perceptive des indices constitutifs du trait de nasalité est encore discutée par les phonéticiens et la perception via l'implant cochléaire n'est pas encore entièrement comprise. De ce fait, plusieurs suppositions sont possibles. L'indice d'amplitude relative des formants est le plus avancé par les phonéticiens (Delattre, 1965 ; Beddor et al., 1986 ; Maeda, 1993 ; Delvaux, 2009). Nous avons effectivement observé chez les adultes implantés cochléaires un déficit de perception de l'affaiblissement formantique autour de 1500 Hertz et du renforcement autour de 3500 Hertz. Nous ne pouvons pas encore expliquer pourquoi la difficulté à percevoir un affaiblissement se concentre uniquement autour des 1500 Hertz et celle à percevoir un renforcement, autour de la zone des 3500 Hertz.

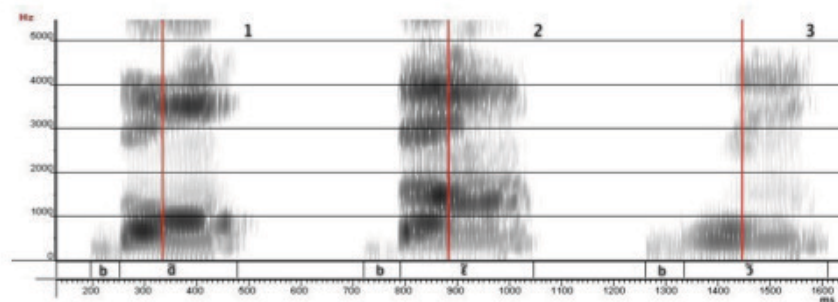


Figure 108: Spectrogramme des syllabes [bã bǣ] [bẽ] [bõ]. La première partie de la syllabe est orale et la nasalisation acoustique commence approximativement au trait vertical. Tiré de Clements et al (2014), page 193.

Une nouvelle observation du spectrogramme des voyelles nasales [ã] [ẽ] et [õ] associées à la consonne [b] (Figure 108) pourrait être instructive car la partie à gauche du trait rouge représente la voyelle non nasalisée et la droite la voyelle nasalisée. De façon très schématique, nous pourrions considérer que l'adulte implanté cochléaire continue à percevoir la partie gauche, ne percevant pas ou peu les manifestations acoustiques de la partie droite.

Pour la voyelle [ã], F_1 et F_2 semblent se concentrer pour former un pic très intense autour de 1000 Hertz, caractéristique du [a] postérieur (Vaissière, 2007) par exemple, qui est décrit par $(F_1F_2)^{1000\text{ Hz}}$. D'ailleurs, nous opposons dans les paires phonologiques la voyelle [ã] à la voyelle orale [a] centrale, ce qui est une imprécision car nous devrions l'opposer à la voyelle postérieure [ɑ]. Cependant cette voyelle ne se rencontrant quasiment plus dans la langue, nous lui préférons [a] par commodité. Pourtant, [ɑ] postérieur est plus proche de [ɔ] que ne l'est [a], et la vraie paire [ɑ]-[ã] est certainement phonétiquement plus proche que la paire [a]-[ã] que nous avons étudiée. Pour [ã], un pic intense est également observé autour de 3500 Hz.

Pour la voyelle [ẽ], F_1 sous les 1000 Hertz et F_3 vers les 3000 Hertz, sont littéralement « attaqués » par la nasalité. F_1 est « aplati » ou coupé en deux par la présence d'un antiformant, et F_3 peut disparaître complètement tandis que F_4 , sous 4000 Hertz, reste intense.

Pour la voyelle [õ], une fois encore, on observe un affaiblissement important sous les 1000 Hertz combiné à l'apparition de renforcement vers les 4000 Hertz générant ainsi un déséquilibre d'intensité entre les basses fréquences affaiblies et les hautes fréquences

renforcées. La combinaison de l'affaiblissement dans les basses fréquences et du renforcement dans les hautes fréquences suscite une sorte de déséquilibre non attendu puisque normalement, pour les voyelles orales, l'intensité des formants décroît au fur et à mesure que l'on monte dans l'échelle des fréquences (Fant, 1960).

Plus que la capacité à percevoir l'affaiblissement dans les basses fréquences, que nous avons invoqué en premier lieu, ce serait plutôt soit la capacité à percevoir l'amplification ou simplement le maintien de l'intensité vers 3000-4000 Hertz soit la combinaison des deux indices qui manquerait aux adultes implantés cochléaires.

La population testée dans l'étude n°6 n'était constituée que de 10 sujets, utilisateurs de systèmes implantés différents, avec des stratégies de codage et de répartitions fréquentielles différentes. Cette étude mériterait donc d'être reproduite, sur une population plus homogène en terme de systèmes d'implant et en contrôlant davantage la largeur de bande et l'atténuation de 6 décibels par octave des stimuli synthétiques.

1. L'apport des données cliniques aux théories phonétiques

Les résultats obtenus auprès des labiolecteurs normo-entendants et sourds montrent que la voyelle [ã] est visuellement perçue quasi unanimement comme une voyelle arrondie, ce qui est en accord avec les observations de Zerling (1984 et 1990).

2. L'apport des résultats phonétiques à la pratique clinique

a) Les sosies labiaux des voyelles nasales

L'étude des classifications et descriptions faites par les orthophonistes spécialistes de la lecture labiale (Garric, 1974 ; Istria et al., 1982 ; Dumont et Calbour, 2002; Haroutunian, 2007) et des erreurs faites par 22 adultes sourds nous a permis de proposer une nouvelle classification des visèmes vocaliques. Il s'agit de la classification d'Istria et al. (1982) qui est celle qui permettait au mieux d'expliquer les erreurs des labiolecteurs testés sauf pour [e] qui a été déplacé de la catégorie [i e] vers la catégorie [a ẽ ε e]. Ceci rejoint la classification de Dumont et Calbour (2002) pour laquelle [i] constitue également à elle seule une catégorie de

visème. Dans la nouvelle classification que nous proposons la catégorie [a ẽ ε e] comporte 3 degrés d'aperture différents, ce qui peut sembler discutable. Cependant, cette nouvelle affectation permet d'expliquer un plus grand nombre de confusions et devra être réévaluée.

Aperture perçue	Labialité perçue	Visèmes vocaliques	Paires minimales
non fermée	non arrondie	[a ẽ ε e]	la-lin-lait-les
ouverte et mi-ouverte	arrondie	[ã ɔ œ]	lent-lors-leurre
fermée et mi-fermée	arrondie	[o ɔ̃ u y ø]	lot-long-loup-lu-le
fermée	étirée	[i]	lit

Tableau 55: Adaptation de la classification des visèmes vocaliques d'Istria et al. (1982) à partir des résultats d'identification visuelle de voyelles, de 22 adultes sourds, en contexte CV avec C=[ptk] prononcées par deux locutrices.

b) Un corpus ciblé sur les oppositions de voyelles orale-nasale

La rééducation orthophonique post-implant s'appuie sur différents types de support verbaux (mots, phrases, textes) afin de solliciter le plus possible les suppléances mentales (Dumont, 2008 ; Ambert-Dahan, 2011). Cependant, de façon ponctuelle, l'orthophoniste peut être amené à proposer un travail fin de discrimination auditive sur des phonèmes bien spécifiques ayant été repérés comme posant difficulté. Ce travail a permis de mettre en évidence les confusions les plus fréquentes faites par les adultes implantés cochléaires et le fait que pour les voyelles [ã] et [ẽ], elles ne correspondaient pas à celles que les orthophonistes auraient abordées en rééducation. Dans le cadre de l'application clinique de cette thèse, afin, d'enrichir les supports de rééducation, nous proposons un corpus ciblé sur les difficultés auditives des adultes implantés cochléaires pour l'identification des voyelles nasales. Ce corpus pourra être utilisé dans le cadre de l'évaluation ou de la rééducation.

	Voyelle [ã]	Voyelle [ɔ̃]	Voyelle [ẽ]
En syllabe ouverte	[a] ban-bas taon-ta rang-rat étang-état errant-erra ment-ma lent-la vent-va sang-sa aimant-aima marchand-marcha	[o] pont-pot bon-beau ton-tôt rond-rot tronc-trot son-seau mont-mot bonbon-bobo raton-râteau ballon-ballot bâton-bateau longé-logé bonté-beauté sonda-soda traitons- tréteaux trions-trio longé-logé foncé-fossé ponton-poteau	[a] bain-bas lin-la vin-va sein-sa pain-pas grain-gras main-ma plein-plat rein-rat éteint-état teint-tas brin-bras
En syllabe fermée	[ɔ] tempe-top rente-rote vente-vote sente-sotte menthe-motte lente-lotte pente-pote Nantes-note arrange-arroge rance-rosse	[o] ronde-rote monde-Maude fonte-faute fonce-fosse songe-sauge	[a] cinq-sac trinque-trac peintre-pâtre rince-race dingue-dague mainte-mat teinte-tâte

Tableau 56: Corpus de paires minimales de voyelles orale-nasale pour la discrimination auditive du trait de nasalité par personnes implantées cochléaires.

c) **S'appuyer sur les voyelles bien perçues**

Un des apports complémentaires de cette thèse est le score moyen d'identification de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un temps précoce et à un

temps tardif de leur prise en charge (Tableau 30). A partir de ces résultats, corroborés par l'expérience clinique, nous pouvons avancer que [i, a, o] constituent un meilleur choix que [i, a, u] si l'on souhaite, dans les premiers temps, chez l'adulte en difficulté, travailler la discrimination ou l'identification de voyelles extrêmes. En effet, la voyelle [u] est très mal identifiée (sans doute du fait de sa faible intensité intrinsèque) tandis que [o] est bien identifiée, tout comme [i] et [a]. Dès que possible, la voyelle [u] pourra être réintroduite. L'autre fait important est l'identification quasi systématique en français (Borel, 2007 et étude n°3 du présent manuscrit) et quelle que soit la langue, de la voyelle [i] (Blamey, 1987 pour l'anglais ; Serniclaes, 1996 pour le français ; Välimaa, 2002 pour le finnois ; Rodvik, 2008 pour le norvégien). En cas de grandes difficultés et pour un travail perceptif fin, celle-ci peut être un bon point d'ancrage pour travailler des oppositions vocaliques.

d) Reconstruire des images phonologiques à partir de la variabilité des exemplaires

Nous avons été étonné, lors des passations, de constater que pour les deux corpus proposés pour la tâche de détection d'intrus, les sujets normo-entendants et implantés cochléaires exprimaient des difficultés opposées. Les sujets normo-entendants n'ont pas de difficulté à identifier une voyelle intruse parmi 4 voyelles, même si celles-ci sont prononcées par des locutrices différentes. Par contre, percevoir des différences fines de variation de 8 dB d'amplitude de formants leur demande davantage d'effort et les met plus en échec car les différences acoustiques entre les stimuli sont très réduites. Les sujets implantés cochléaires ont exprimé la difficulté inverse. Comme nous l'avons déjà abordé dans le Chapitre 3, cette observation nous semble particulièrement intéressante car elle pointe l'intérêt, d'une part, de proposer en rééducation des supports verbaux multi locuteurs afin que le patient puisse s'habituer à la variabilité des timbres de voix (homme, femme, enfant) et de position des formants sur l'échelle de fréquences (Ménard et al., 2002 ; Assman et Nearey, 2003) afin de renforcer ses compétences de normalisation et d'étiquetage phonologique grâce aux images présentes dans la mémoire phonologique (Svirsky et al., 2004 ; Lazard et al., 2010b). Ces suppositions devront faire l'objet d'études dédiées afin d'être confirmées.

Comme perspective d'application clinique, nous proposons, à partir des enregistrements des 10 locutrices de l'étude n°2 (auxquels nous ajouterons 10 locuteurs), de créer via Praat des exercices de détection d'intrus multi locuteurs, pour des séquences de 4 puis 5, 6 voyelles consécutives afin d'aider le patient implanté cochléaire à progressivement

consolider son image phonologique de chaque voyelle, en reconstruisant des règles internes d'invariance.

e) **L'implant du tronc cérébral**

Chez les utilisateurs d'implant du tronc cérébral, en modalité auditive, seule la perception analytique des consonnes et des voyelles semble accessible et se situe au-dessus du niveau de hasard, tandis que la perception de supports linguistiques plus globaux, comme les mots et les phrases, est la plupart du temps impossible. L'approche rééducative de l'adulte devenu sourd est multimodale et globale (Dumont, 2008 ; Ambert-Dahan, 2011). Chez l'adulte implanté du tronc cérébral, en modalité auditive, il serait peut-être intéressant de tester une approche analytique basée sur la discrimination de phonèmes acoustiquement très différents puis de plus en plus proches (Fu, 2005b, pour l'implant cochléaire). Par ailleurs, les voyelles constituent un support verbal simple et bien contrôlé qui permettrait, comme cela a été le cas lors des premières années de développement de l'implant cochléaire (Dent et al., 1982 ; Tong et al., 1988 ; Dorman et al., 1988; Tyler et al., 1992), de mieux comprendre comment les informations spectrales sont transmises et perçues par les patients. Par ailleurs, nous avons remarqué que les informations auditives et visuelles ne fusionnaient pas pour l'identification de voyelles. Afin de mieux comprendre les mécanismes de perception audiovisuelle de phonèmes, une étude proposant une tâche de type McGurk avec des stimuli audiovisuels congruents et non congruents (McGurk et MacDonald, 1976) permettrait de mieux différencier la part des choses entre les informations auditives et visuelles perçues par les adultes implantés du tronc cérébral.

En conclusion, cette thèse a mis en évidence la difficulté spécifique de l'adulte implanté cochléaire à percevoir la nasalité vocalique à la fois à un stade post-implantation précoce et à un stade tardif. La raison de cette difficulté pourrait être un déficit de perception de l'intensité relative entre les informations acoustiques dans les hautes et les basses fréquences. L'élargissement de notre travail à la problématique de la lecture labiale et de l'implant du tronc cérébral nous a permis de proposer une nouvelle classification des visèmes vocaliques et de pointer les difficultés de fusion des informations auditives et visuelles pour la perception des voyelles par les adultes implantés du tronc cérébral.

L'ensemble des résultats ouvrent des perspectives cliniques pour la rééducation avec l'élaboration de supports verbaux ciblés sur les difficultés des adultes implantés cochléaires et la proposition de création d'un logiciel d'entraînement auditif multi locuteurs qui pourrait permettre d'optimiser, à partir de la variabilité des exemplaires proposés, la reconstruction par l'adulte devenu sourd de ses propres règles d'invariance, afin d'améliorer la représentation phonologique de chaque voyelle préalablement dégradée par la privation neurosensorielle.

VIII. Références

Adam, A. (2006). Le test syllabique égalisé ou non égalisé en intensité : étude comparative dans le silence et dans le bruit. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'état d'audioprothèse, Paris VII.

Amar, D. (2014). Utilisation du Logiciel de réglage FOX auprès d'adultes utilisateurs depuis au moins un an d'implant cochléaire Advanced Bionics. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de Bachelier en Audiologie, Institut libre Marie Haps, Bruxelles.

Ambert-Dahan, E. (2011). Optimisation du mode de réhabilitation des surdités sévères et profondes de l'adulte : de nouveaux outils pour une réhabilitation auditive optimale. Actes pour les entretiens de Bichat d'orthophonie, Paris.

Assmann, P. F. et Nearey, T. M. (2003). Frequency shifts and vowel identification. In Proceedings of the 15th International Congress of Phonetic Sciences (pp. 1397-1400).

Agence Technique de l'information sur l'hospitalisation (ATIH). <http://stats.atih.sante.fr/mco/catalogmco.php>

Azadpour, M. et McKay, C. M. (2014). Processing of Speech Temporal and Spectral Information by Users of Auditory Brainstem Implants and Cochlear Implants. *Ear and hearing*, 35(5), 192-203.

Baken, R. J. et Orlikoff, R. F. (2000). Clinical measurement of speech and voice. Singular, San Diego, CA, 402-405.

Baskent, D. et Shannon, R. V. (2005). Interactions between cochlear implant electrode insertion depth and frequency-place mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(3), 1405-1416.

Baskent, D. (2006). Speech recognition in normal hearing and sensorineural hearing loss as a function of the number of spectral channels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2908-2925.

Battmer, R. D., Borel, S., Brendel, M., Buchner, A., Cooper, H., Fielden, C. ... Vanat, Z. (2014). Assessment of 'Fitting to Outcomes Expert'FOX® with new cochlear implant users in a multi-centre study. *Cochlear implants international*.

Beddor, P. S. et Strange, W. (1982). Cross-language study of perception of the oral-nasal

Beddor, P. S. (1984). Formant integration and the perception of nasal vowel height. Haskins laboratories : status report on speech research.

Beddor, P. S., Krakow, R. A. et Goldstein, L. M. (1986). Perceptual constraints and phonological change: a study of nasal vowel height. *Phonology*, 3(01), 197-217.

Beddor, P. S. (1993). The perception of nasal vowels. *Nasals, nasalization, and the velum*, 5, 171-196.

Beddor, P. S. et Krakow, R. A. (1999). Perception of coarticulatory nasalization by speakers of English and Thai: Evidence for partial compensation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(5), 2868-2887.

Behr, R., Müller, J., Shehata-Dieler, W., Schlake, H. P., Helms, J., Roosen, K. ... Lorens, A. (2007). The high rate CIS auditory brainstem implant for restoration of hearing in NF-2 patients. *Skull Base*, 17(2), 91.

Belmin, J., Oasi, C., Folio, P., et Pariel-Madjlessi, S. (2007). Codex, un test ultra-rapide pour le repérage des démences chez les sujets âgés. *La Revue de gériatrie*, 32(8), 627-631.

Benguerel, A. P., et Cowan, H. A. (1974). Coarticulation of upper lip protrusion in French. *Phonetica*, 30(1), 41-55.

Berit-Hansen, A. (1998). Les voyelles nasales du français parisien moderne: aspects linguistiques, sociolinguistiques et perceptuels des changements en cours (Vol. 40). Museum Tusculanum Press.

Berit-Hansen, A. (2001). Les changements actuels des voyelles nasales du français parisien: confusions ou changement en chaîne?. *La linguistique*, 33-47.

Bernthal, J. E. et Beukelman, D. (1977). The effect of changes in velopharyngeal orifice area on vowel intensity. *Cleft Palate Journal*, 14(1).

Bladon, A. et Fant, G. (1978). A two-formant model and the cardinal vowels. *Speech Transmission Laboratory Quarterly Progress and Status Report*, 19(1), 1-8.

Blamey, P. J., Martin, L. F. A. et Clark, G. M. (1985). A comparison of three speech coding strategies using an acoustic model of a cochlear implant. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 209-217.

Blamey, P. J., Dowell, R. C., Brown, A. M., Clark, G. M. et Seligman, P. M. (1987). Vowel and consonant recognition of cochlear implant patients using formant-estimating speech processors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(1), 48-57.

Blamey, P. J. et Clark, G. M. (1990). Place coding of vowel formants for cochlear implant patients. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(2), 667-673.

Blamey, P., Arndt, P., Bergeron, F., Bredberg, G., Brimacombe, J., Facer, G. ... Whitford, L. (1996). Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants. *Audiology and Neurotology*, 1(5), 293-306.

Blamey, P., Artieres, F., Baskent, D., Bergeron, F., Beynon, A., Burke, E. ... Lazard, D. S. (2012). Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants: an update with 2251 patients. *Audiology and Neurotology*, 18(1), 36-47.

Bloomer, H. et Peterson, G. (1955). A spectrographic study of hypernasality. *Cleft Palate Bulletin*, 5(5-6).

Borel, S. (2007). Etude des confusions de voyelles chez les adultes porteurs d'un implant cochléaire. Mémoire non publié de Master en phonétique, Paris-3.

Borel, S. (2013). La lecture labiale. In *Surdité et santé mentale-Communiquer au coeur du soin*. Ed : Qu rel, C. Lavoisier.

Borel, S. et De Bergh, M. (2013). Entraînement auditif pour les situations d'écoute complexes chez l'adulte implanté cochléaire:-Environnement bruyant-Téléphone-Musique. Actes pour les entretiens de Bichat d'orthophonie. Paris

Borel, S., Vaerenberg, B., De Ceulaer, G., Mosnier, I., Sterkers, O. et Govaerts, P. (2014). Etat des lieux des procédures de réglage d'implant cochléaire: une enquête auprès de 47 centres à travers le monde. *Les cahiers de l'audition. La revue du Collège National d'Audioprothèse*, Paris.

Bothorel, A. Simon, P., Wioland, F. et Zerling, JP. (1986). Cin rاديographie des voyelles et consonnes du français: recueil de documents synchronisés pour quatre sujets: vues latérales du conduit vocal, vues frontales de l'orifice labial, données acoustiques. TIPS.

Bouccara, D., Kalamarides, M., Bernardeschi, D., Ambert-Dahan, E., Borel, S. et Sterkers, O. (2013). Implant auditif du tronc cérébral. *EMC - Oto-rhino-laryngologie*;8(2):1-6

Bouccara, D., Kalamarides, M., Bozorg-Grayeli A., Ambert-Dahan, E., Rey, A. et Sterkers, O. (2007, July). [Auditory brainstem implant: indications and results]. In *Annales d'oto-laryngologie et de chirurgie cervico faciale: bulletin de la Société d'oto-laryngologie des hopitaux de Paris* (Vol. 124, No. 3, pp. 148-154).

Bouton, S., Serniclaes, W., Bertoncini, J. et Cole, P. (2012). Perception of speech features by French-speaking children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(1), 139-153.

Bozorg-Grayeli, A., Kalamarides, M., Bouccara, D., Ben Gamra, L., Ambert-Dahan, E. et Sterkers, O. (2006). Auditory brainstem implantation to rehabilitate profound hearing loss with totally ossified cochleae induced by pneumococcal meningitis. *Audiology and Neurotology*, 12(1), 27-30.

Bozorg-Grayeli, A. B., Kalamarides, M., Bouccara, D., Ambert-Dahan, E. et Sterkers, O. (2008). Auditory brainstem implant in neurofibromatosis type 2 and non-neurofibromatosis type 2 patients. *Otology & Neurotology*, 29(8), 1140-1146.

Brichler-Labaeye, C. (1970). Les voyelles françaises: mouvements et positions articulatoires à la lumière de la radiocinématographie (Vol. 18). Klincksieck.

Budenz, C. L., Cosetti, M. K., Coelho, D. H., Birenbaum, B., Babb, J., Waltzman, S. B., & Roehm, P. C. (2011). The effects of cochlear implantation on speech perception in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 59(3), 446-453.

Bureau international d'audiophonologie (BIAP): <http://www.biap.org/>

Butcher, A. (1978). The influence of the native language on the perception of vowel quality. *Arbeitsberichte Kiel*, (2), 1-137.

Calliope (1989). La parole et son traitement automatique, Collection Technique et Scientifique des télécommunications. Ed : Tubach, JP.

Carignan, C. (2012). Quand nasal est plus que nasal: L'articulation orale des voyelles nasales en français. Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL, volume 1: JEP, pages 747-754,

Carignan, C. (2013). When nasal is more than nasal: The oral articulation of nasal vowels in two dialects of French (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).

Caron, J. (1989). Précis de psycholinguistique (Vol. 102). Presses universitaires de France.

Carton, F. (1997). Introduction à la phonétique du français. Dunod, Paris. 1ère édition en 1974.

Chang, Y. P. et Fu, Q. J. (2006). Effects of talker variability on vowel recognition in cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 49(6), 1331-1341.

Chavasse, P. (1948). Essai sur la phonétique statistique de la langue française et son application à l'étude de l'intelligibilité d'une conversation. In *Annales Des Télécommunications* (Vol. 3, No. 1, pp. 5-23). Springer-Verlag.

Chen, M. Y. (1997). Acoustic correlates of English and French nasalized vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), 2360-2370.

Chen, M. Y. (2000). Acoustic analysis of simple vowels preceding a nasal in Standard Chinese. *Journal of Phonetics*, 28(1), 43-67.

Chistovich L.A. et Lublinskaja V.V. The Center of gravity effect in vowel spectra and critical distance between the formants: psychoacoustical study of the perception of vowel-like stimuli. *Hearing Research*. 1979. V. 1. P. 185-195.

Chlumsky, J., Pauphilet, A. et Polland, B. (1938). Radiographie des voyelles et des semi-voyelles françaises.

Clark, J. H., Yeagle, J., Arbaje, A. I., Lin, F. R., Niparko, J. K., et Francis, H. W. (2012). Cochlear implant rehabilitation in older adults: literature review and proposal of a conceptual framework. *Journal of the American Geriatrics Society*, 60(10), 1936-1945.

Clements, G.N., Amelot, A., Montagu, J., et Vaissière, J. (2014). The Feature [nasal]. *A paraître*.

Coez, A., Zilbovicius, M., Ferrary, E., Bouccara, D., Mosnier, I., Bozorg-Grayeli, A. ... Sterkers, O. (2011). A neuro-imaging approach to evidencing bilateral cochlear implant advantages in auditory perception. *Cochlear implants international*, 12(s1), S124-S126.

Colletti, V., Carner, M., Miorelli, V., Guida, M., Colletti, L. et Fiorino, F. (2005a). Auditory brainstem implant (ABI): new frontiers in adults and children. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 133(1), 126-138.

Colletti, V. et Shannon, R. V. (2005b). Open set speech perception with auditory brainstem implant?. *The Laryngoscope*, 115(11), 1974-1978.

Colletti, V. (2006). Auditory Outcomes in Tumor vs. Nontumor Patients Fitted with Auditory Brainstem Implants. *Adv Otorhinolaryngol*, 64, 167-185.

Colletti, V., Shannon, R. V., Carner, M., Veronese, S. et Colletti, L. (2009). Progress in restoration of hearing with the auditory brainstem implant. *Progress in brain research*, 175, 333-345.

Cousin-Boschetti, S., De Laubier, E. (2008). Lecture labiale et audiovision avant et après implantation cochléaire chez les adultes devenus sourds. Mémoire pour le certificat de Capacité en Orthophonie, UPMC, Paris.

Dang, J., Honda, K., et Suzuki, H. (1994). Morphological and acoustical analysis of the nasal and the paranasal cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 2088-2100.

Dang, J., et Honda, K. (1996). Acoustic characteristics of the human paranasal sinuses derived from transmission characteristic measurement and morphological observation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3374-3383.

Delattre, P., Liberman, A. M., Cooper, F. S. et Gerstman, L. J. (1952). An experimental study of the acoustic determinants of vowel color; observations on one-and two-formant vowels synthesized from spectrographic patterns. *Word*.

Delattre, P. (1954). Les attributs acoustiques de la nasalité vocalique et consonantique. *Stud. Linguistica*, 8, 103-109.

Delattre, P. (1965). Comparing the phonetic features of English, German, Spanish and French: An interim report. Julius Groos.

Delattre, P. (1968). Divergences entre nasalités vocalique et consonantique en français. *Word*, 24, 64-72.

Delattre, P. et Monnot, M. (1968). The role of duration in the identification of French nasal vowels. *IRAL-International Review of Applied Linguistics in Language Teaching*, 6(1-4), 267-288.

Del Fabro, E. et Desmons, C. (2014). AIRTAC2: Normalisation d'une évaluation des performances chez les patients atteints de troubles auditifs centraux. Mémoire pour le certificat de capacité en orthophonie, UPMC, Paris.

Delgutte, B. et Kiang, N. Y. (1984). Speech coding in the auditory nerve: I. Vowel-like sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75(3), 866-878.

Deltenre, P., Markessis, E., Colin, C., et Lopez-Crahe, J. (2007). La remédiation prothétique des surdités cochléaires: apport des nouvelles technologies. *Surdité et langage: prothèses, LPC et implants cochléaires*, 151-198.

Delvaux, V. (1999). A propos des voyelles nasales du français... *La linguistique*, 3-23.

Delvaux, V., Metens, T. et Soquet, A. (2002). Propriétés acoustiques et articulatoires des voyelles nasales du français. *XXIVèmes Journées d'étude sur la parole*, Nancy, 1, 348-

Delvaux, V. (2009). Perception du contraste de nasalité vocalique en français. *Journal of French Language Studies*, 19(01), 25-59.

Delvaux, V. (2012). Les voyelles nasales du français. GRAMM-R. Etudes de linguistique française n°15. Editions P.I.E Peter Lang. Bruxelles.

Demorest, M. E. et Bernstein, L. E. (1992). Sources of Variability in Speechreading Sentences A Generalizability Analysis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 35(4), 876-891.

Dent, L. J. (1982). Vowel discrimination with the single-electrode cochlear implant: a pilot study. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl.* 91(2 Pt 3):41-6.

Dickson, D. R. (1962). An acoustic study of nasality. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 5(2), 103-111.

Dirks, D. D., Takayana, S. et Moshfegh, A. (2001). Effects of lexical factors on word recognition among normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Journal of the American Academy of Audiology*, 12(5), 233-244.

Dorman, M. F., Hannley, M. T., McCandless, G. A. et Smith, L. M. (1988). Auditory/phonetic categorization with the Symbion multichannel cochlear implant. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 501-510.

Dorman, M. F. et Loizou, P. C. (1997). Mechanisms of vowel recognition for Ineraid patients fit with continuous interleaved sampling processors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(1): 581-587.

Dorman, M. F., Loizou, P. C. et Rainey, D. (1997). Simulating the effect of cochlear-implant electrode insertion depth on speech understanding. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(5), 2993-2996.

Drennan, W.R, Svirsky, M.A., Fitzgerald, M.B, Rubinstein, J.T. (2014). Mimicking normal auditory functions with cochlear implant sound processing; past, present and future. In *Cochlear Implants* by Susan B. Waltzman (Editor), J. Thomas Roland (Editor). Thieme, New-York

Dulguerov, P. et Remacle, M. (2005). Précis d'audiophonologie et de déglutition: Tome 1–L'oreille et les voies de l'audition (Vol. 1). Groupe de Boeck. with the Nucleus-22 cochlear implant. *Ear and hearing*, 20(4), 332.

Dumont, A. et Calbour, C. (2002). Voir la parole: lecture labiale, perception audiovisuelle de la parole. Masson.

Dumont, A. (2008). Orthophonie et surdité: communiquer, comprendre, parler. Elsevier Masson, Paris.

Dupont, M. et Lejeune, B. (2010). Rééducation de la boucle audio-phonatoire chez les adultes sourds porteurs d'un implant cochléaire. Elsevier Masson.

Ebinger, K., Otto, S., Arcaroli, J., Staller, S. et Arndt, P. (2000). Multichannel auditory brainstem implant: US clinical trial results. *Journal of Laryngology & Otology*, 114(S27), 50-53.

Escudé, B., James, C., Deguine, O., Cochard, N., Eter, E. et Fraysse, B. (2006). The size of the cochlea and predictions of insertion depth angles for cochlear implant electrodes. *Audiology and Neurotology*, 11(Suppl. 1), 27-33.

Fagyal, Z., Kibbee, D., et Jenkins, F. (2006). French: A linguistic introduction. Cambridge: Cambridge University Press.

Fallon, J. B. (2014). Consequences of deafness and electrical stimulation on the peripheral and central auditory system In *Cochlear Implants* by Susan B. Waltzman (Editor), J. Thomas Roland (Editor). Thieme, New-York

Fant, G. (1960). Acoustic theory of speech production. The Hague: Mouton

Faulkner, A., Rosen, S. et Stanton, D. (2003). Simulations of tonotopically mapped speech processors for cochlear implant electrodes varying in insertion depth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), 1073-1080.

Fisher, C. G. (1968). Confusions among visually perceived consonants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 11(4), 796-804.

Fishman, K. E., Shannon, R. V. et Slaterry, W. H. (1997). Speech recognition as a function of the number of electrodes used in the SPEAK cochlear implant speech processor. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 40(5), 1201-1215.

Flanagan, J. L. (1957). Difference Limen For Formant Amplitude. *J Speech Hear Disord* ; 22;205-212

Fonagy, I. (1989). Le français change de visage ? *Revue romane*, 2.

Fourakis, M. S., Hawks, J. W., Holden, L. K., Skinner, M. W. et Holden, T. A. (2004).

Effect of frequency boundary assignment on vowel recognition with the Nucleus 24 ACE speech coding strategy. *Journal of the American Academy of Audiology*, 15(4), 281-299.

Fournier, J.E. (1951). *Audiométrie vocale, les épreuves d'intelligibilité et leurs applications au diagnostic, à l'expertise et à la correction prothétique des surdités*, Eds : Maloine, Paris.

Francis, H. W., Yeagle, J. D., Bowditch, S., et Niparko, J. K. (2005). Cochlear implant outcome is not influenced by the choice of ear. *Ear and hearing*, 26(4), 7S-16S.

Friesen, L. M., Shannon, R. V., Baskent, D. et Wang, X. (2001). Speech recognition in noise as a function of the number of spectral channels: comparison of acoustic hearing and cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(2), 1150-1163.

Fry, D. B., Abramson, A. S., Eimas, P. D. et Liberman, A. M. (1962). The identification and discrimination of synthetic vowels. *Language and Speech*, 5(4), 171-189.

Fu, Q. J. et Shannon, R. V. (1999). Effects of electrode configuration and frequency allocation on vowel recognition with the Nucleus-22 cochlear implant. *Ear and hearing*, 20(4), 332.

Fu, Q. J. (2002). Temporal processing and speech recognition in cochlear implant users. *Neuroreport*, 13(13), 1635-1639.

Fu, Q. J., Nogaki, G. et Galvin III, J. J. (2005a). Auditory training with spectrally shifted speech: implications for cochlear implant patient auditory rehabilitation. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 6(2), 180-189.

Fu, Q. J., Galvin, J., Wang, X. et Nogaki, G. (2005b). Moderate auditory training can improve speech performance of adult cochlear implant patients. *Acoustics Research Letters Online*, 6(3), 106-111.

Fu, Q. J. et Galvin, J. J. (2007). Perceptual learning and auditory training in cochlear implant recipients. *Trends in Amplification*, 11(3), 193-205.

Fujimura, O. (1962). Analysis of nasal consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1865-1875.

Gani, M., Valentini, G., Sigrist, A., Kós, M. I. et Boëx, C. (2007). Implications of deep electrode insertion on cochlear implant fitting. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 8(1), 69-83.

Garric, J. (1974). *Lecture labiale et conservation de la parole : Pédagogie et méthode*. Editions du Fox. Réédition en 2011.

Geier, L. L. et Norton, S. J. (1992). The effects of limiting the number of Nucleus 22 cochlear implant electrodes programmed on speech perception. *Ear and hearing*, 13(5), 340-348.

Gendrot, C. et Adda-Decker, M. (2004). Analyses formantiques automatiques de voyelles orales: évidence de la réduction vocalique en langues française et allemande. In Workshop MIDL04.

Gentil, M. (1981). Etude de la perception de la parole : lecture labiale et sosies labiaux. IBM, France.

Georgeton, L., Paillereau, N., Landron, S., Gao, J., et Kamiyama, T. (2012). Analyse formantique des voyelles orales du français en contexte isolé: à la recherche d'une référence pour les apprenants de FLE. In Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2012 (pp. 145-152).

Gilbert, J. L. et Pisoni, D. B. (2013). Vowel perception in listeners with cochlear implants. *Handbook of Vowels and Vowel Disorders*, Psychology press, 2, 386.

Gnansia, D., Lazard, D. S., Léger, A. C., Fugain, C., Lancelin, D., Meyer, B. et Lorenzi, C. (2014). Role of slow temporal modulations in speech identification for cochlear implant users. *International journal of audiology*, 53(1), 48-54.

Goldsworthy, R. L., Delhorne, L. A., Braida, L. D. et Reed, C. M. (2013). Psychoacoustic and Phoneme Identification Measures in Cochlear-Implant and Normal-Hearing Listeners. *Trends in amplification*, 17(1), 27-44.

Golfinos, J. G., Roland, J. T Jr., Rodgers, S. D. (2014). Auditory brainstem implants. *Journal of neurosurgery*, 120(2), 543-44.

Govaerts, P. J., Vaerenberg, B., De Ceulaer, G., Daemers, K., De Beukelaer, C. et Schauwers, K. (2010). Development of a software tool using deterministic logic for the optimization of cochlear implant processor programming. *Otology & Neurotology*, 31(6), 908-918.

Greenwood, D. D. (1990). A cochlear frequency position function for several species—29 years later. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(6), 2592-2605.

Hall, K. C., et Hume, E. V. (2013, June). Perceptual confusability of French vowels. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 19, No. 1, p. 060113). Acoustical Society of America.

Hallé, P. A., Segui, J., Frauenfelder, U. et Meunier, C. (1998). Processing of illegal

consonant clusters: A case of perceptual assimilation?. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 24(2), 592.

Harnsberger, J. D., Svirsky, M. A., Kaiser, A. R., Pisoni, D. B., Wright, R. et Meyer, T. A. (2001). Perceptual « vowel spaces » of cochlear implant users: Implications for the study of auditory adaptation to spectral shift. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2135-2145.

Haroutunian, D. (2007). *Manuel pratique de lecture labiale*. Collection Tests et Matériels en Orthophonie. Editions Solal, Marseille. Deuxième Edition.

Hattori, S., Yamamoto, K. et Fujimura, O. (1958). Nasalization of vowels in relation to nasals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 30(4), 267-274.

Haute Autorité de Santé. (2007). *Le traitement de la surdité par implants cochléaires ou du tronc cérébral*. <http://www.has-sante.fr>

Hawkins, S. et Stevens, K. N. (1985). Acoustic and perceptual correlates of the non-nasal–nasal distinction for vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(4), 1560-1575.

Hawks, J. W., Fourakis, M. S., Skinner, M. W., Holden, T. A. et Holden, L. K. (1997). Effects of formant bandwidth on the identification of synthetic vowels by cochlear implant recipients. *Ear and hearing*, 18(6), 479-487.

Hay-McCutcheon, M. J., Peterson, N. R., Rosado, C. A. et Pisoni, D. B. (2014). Identification of Acoustically Similar and Dissimilar Vowels in Profoundly Deaf Adults Who Use Hearing Aids and/or Cochlear Implants: Some Preliminary Findings. *American journal of audiology*, 23(1), 57-70.

Henkin, Y., Taitelbaum-Swead, R., Hildesheimer, M., Migirov, L., Kronenberg, J., & Kishon-Rabin, L. (2008). Is there a right cochlear implant advantage?. *Otology & Neurotology*, 29(4), 489-494.

Hess, Z. (1975). *Typologischer Vergleich der romanischen Sprachen auf phonologischer Basis* (Vol. 8). Herbert Lang.

Higgins, K. M., Chen, J. M., Nedzelski, J. M., Shipp, D. B. et McIlmoyl, L. D. (2002). A matched-pair comparison of two cochlear implant systems. *The Journal of otolaryngology*, 31(2), 97-105.

Holmes, A. E., Kemker, E. J. et Merwin, G. E. (1987). The effects of varying the number of cochlear implant electrodes on speech perception. *Otology & Neurotology*, 8(3), 240-246.

House, A. S., et Stevens, K. N. (1956). Analog studies of the nasalization of vowels. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 21(2), 218-232.

Howes, D. (1957). On the relation between the intelligibility and frequency of occurrence of English words. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(2), 296-305.

Huffman, M. K. (1990). The role of F1 amplitude in producing nasal percepts. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(S1), S54-S54.

Istria, M., Nicolas-Jeantoux, C. et Tamboise, J. (1982). *Manuel de lecture labiale: exercices d'entraînement*. Masson.

Jacewicz, E. (2005). Listener sensitivity to variations in the relative amplitude of vowel formants. *Acoustics Research Letters Online*, 6(3), 118-124.

Jha, S. K. (1986). The nasal vowels un maithili : an acoustic study. *Journal of Phonetics*, 14(2), 223-230.

Kawasaki, H. (1986). Phonetic explanation for phonological universals: the case of distinctive vowel nasalization. *Experimental phonology*, 81-103.

Kent, R. D., Liss, J. M. et Phillips, B. J. (1989). *Acoustic analysis of velopharyngeal dysfunction in speech. Communication disorders related to cleft lip and palate*. 4th ed. Austin: Pro-Ed.

Kileny, P. R., Zimmerman-Phillips, S., Zwolan, T. A. et Kemink, J. L. (1992). Effects of channel number and place of stimulation on performance with the Cochlear Corporation multichannel implant. *Otology & Neurotology*, 13(2), 117-123.

Kong, Y. Y. et Braida, L. D. (2011). Cross-frequency integration for consonant and vowel identification in bimodal hearing. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 54(3), 959-980.

Krakow, R. A., Beddor, P. S., Goldstein, L. M. et Fowler, C. A. (1988). Coarticulatory influences on the perceived height of nasal vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(3), 1146-1158.

Kuhl, P. K. (1991). Human adults and human infants show a perceptual magnet effect for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & psychophysics*, 50(2), 93-107.

Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N. et Lindblom, B. (1992). Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science*, 255(5044), 606-608.

Laback, B., Deutsch, W. A. et Baumgartner, W. D. (2004). Coding of vowel-like signals in cochlear implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 1208-1223.

Lafon J.C. (1964). *Le test phonétique et la mesure de l'audition*. Centrex, Eindhoven, 1964.

Landron, S., Paillereau, N., Nawafleh, A., Exare, C., Ando, H., et Gao, J. (2010). Le corpus PhoDiFLE: un corpus commun de français langue étrangère pour une étude phonétique des productions de locuteurs de langues maternelles plurielles. *Cahiers de praxématique*, (54-55), 73-86.

Laszig, R. et Aschendorff, A. (1999). Cochlear implants and electrical brainstem stimulation in sensorineural hearing loss. *Current opinion in neurology*, 12(1), 41-44.

Lavrut, M. et Noiret, A. (2013). *Facteurs prédictifs pour l'acquisition d'une lecture labiale fonctionnelle chez l'adulte sourd*. Mémoire pour le certificat de capacité en orthophonie, Paris.

Lazard, D. S., Bordure, P., Lina-Granade, G., Magnan, J., Meller, R., Meyer, B. ... Truy, E.

(2010a). Speech perception performance for 100 post-lingually deaf adults fitted with Neurelec cochlear implants: comparison between Digisonic® Convex and Digisonic® SP devices after a 1-year follow-up. *Acta oto-laryngologica*, 130(11), 1267-1273.

Lazard, D. S., Lee, H. J., Gaebler, M., Kell, C. A., Truy, E. et Giraud, A. L. (2010b). Phonological processing in post-lingual deafness and cochlear implant outcome. *Neuroimage*, 49(4), 3443-3451.

Lazard, D.S, Collette, J.L., Sterkers, O., Perrot, X. (2010c). Conséquences et implications de l'asymétrie périphérique et hémisphérique du système auditif dans le traitement de la parole. *Les cahiers de l'audition*.

Lazard, D. S., Vincent, C., Venail, F., Van de Heyning, P., Truy, E., Sterkers, O., ... et Blamey, P. J. (2012). Pre-, per-and postoperative factors affecting performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants: a new conceptual model over time. *PloS one*, 7(11).

Lefèvre, F. (2008). Impact de la perte auditive sur la perception de la parole: Confusions phonétiques. Précis d'Audioprothèse: Production, phonétique acoustique et perception de la parole. Collège nationale d'audioprothèse. Elsevier, Masson, Issy-les-Moulineaux.

Lenarz, T., Moshrefi, M., Matthies, C., Frohne, C., Lesinski-Schiedat, A., Illg, A. ... Samii, M. (2001). Auditory brainstem implant: part I. Auditory performance and its evolution over time. *Otology & neurotology*, 22(6), 823-833.

Lenarz, M., Matthies, C., Lesinski-Schiedat, A., Frohne, C., Rost, U., Illg, A. ... Lenarz, T. (2002). Auditory brainstem implant part II: subjective assessment of functional outcome. *Otology & neurotology*, 23(5), 694-697.

Léon, P., Carton, F., Rossi, M., et Autesserre, D. (1983). Les accents des Français (collection dirigée par Pierre Léon). Paris, Hachette.

Lesinski-Schiedat, A., Frohne, C., Illg, A., Rost, U., Matthies, C., Battmer, R. D. ... Lenarz, T. (2000). Auditory brainstem implant in auditory rehabilitation of patients with neurofibromatosis type 2: Hannover. *Journal of Laryngology & Otology*, 114(S27), 15-17.

Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S. et Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of experimental psychology*, 54(5), 358.

Liberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P., et Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological review*, 74(6), 431.

Liberman, A. M., et Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.

Liénard, J. S. (1977). Les processus de la communication parlée: introduction à l'analyse et la synthèse de la parole. Masson.

Lindblom, B. (1986). Phonetic universals in vowel systems. In *Experimental Phonology*. Ed : J. J. Ohala, and J. J. Jaeger, Academic Press, New York, pages 13-44.

Loizou, P. C., Dorman, M. F. et Powell, V. (1998). The recognition of vowels produced by men, women, boys, and girls by cochlear implant patients using a six-channel CIS processor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(2), 1141-1149.

Loizou, P. C., Stickney, G., Mishra, L. et Assmann, P. (2003). Comparison of speech processing strategies used in the Clarion implant processor. *Ear and hearing*, 24(1), 12-19.

Lorenzi, C., Gilbert, G., Carn, H., Garnier, S. et Moore, B. C. (2006). Speech perception problems of the hearing impaired reflect inability to use temporal fine structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(49), 18866-18869.

Luce, P. A. et Pisoni, D. B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear and hearing*, 19(1), 1.

Maddieson, I. et Disner, S. F. (1984). *Patterns of sounds*. Cambridge university press.

Maeda, S. (1982). The role of the sinus cavities in the production of nasal vowels. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'82*. (Vol. 7, pp. 911-914). IEEE.

Maeda, S. (1993). Acoustics of vowel nasalization and articulatory shifts in French nasal vowels. In MK Huffman & RA Krakow (Eds.), *Nasals, nasalization, and the velum* (pp. 147-170).

Maini, S., Cohen, M. A., Hollow, R. et Briggs, R. (2009). Update on long-term results with auditory brainstem implants in NF2 patients. *Cochlear implants international*, 10(Supplement-1), 33-37.

Martinet, A. (1970). *Economie des changements phonétiques: traité de phonologie diachronique* (Vol. 10). Éditions A. Francke.

Marx, M., James, C., ElHadi, T., Martin-Dupont, N., Laborde, M.L., Deguine, O., Frayssé, B. (2011). Probability of improvement after cochlear implantation as a Function of Preoperative Residual Hearing. *Audiol Neurotol*. 16(suppl 1) :19-20

Matthies, C., Thomas, S., Moshrefi, M., Lesinski-Schiedat, A., Frohne, C., Battmer, R. D. ... Samii, M. (2000). Auditory brainstem implants: current neurosurgical experiences and perspective. *Journal of Laryngology & Otology*, 114(S27), 32-36.

Matthies, C., Brill, S., Varallyay, C., Solymosi, L., Gelbrich, G., Roosen, K ... Müller, J. (2014). Auditory brainstem implants in neurofibromatosis Type 2: is open speech perception feasible? *Journal of neurosurgery*, 120(2), 546-58

McGettigan, C., Rosen, S. et Scott, S. K. (2014). Lexico-semantic and acoustic-phonetic processes in the perception of noise-vocoded speech: implications for cochlear implantation. *Frontiers in systems neuroscience* (8) : 1-11.

McGurk, H., et MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746.

Ménard, L., Schwartz, J. L., Boë, L. J., Kandel, S. et Vallée, N. (2002). Auditory normalization of French vowels synthesized by an articulatory model simulating growth from birth to adulthood. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1892-1905.

Miller, G. A., et Nicely, P. E. (1955). An analysis of perceptual confusions among some English consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(2), 338-352.

Miller, G. A. et Isard, S. (1963). Some perceptual consequences of linguistic rules. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 2(3), 217-228.

Monguillot, G., Bertrand, E. (2005). Prise en charge orthophonique des adultes avec implant cochléaire. In *Précis d'audiophonologie et de déglutition: Tome 1—L'oreille et les voies de l'audition*. Solal, Marseille.

Monoyer, F. (1875). Echelle Typographique Décimale pour Mésurer l'Acuité de la Vue. *C. r. hbd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, 80(1137).

Montagu, J. (2002). L'articulation labiale des voyelles nasales postérieures du français: comparaison entre locuteurs français et anglo-américains. *XXIVèmes Journées d'Etude sur la Parole*.

Montagu, J. (2004). Les sons sous-jacents aux voyelles nasales en français parisien: indices perceptifs des changements. *Journées d'Étude sur la Parole*, 385-388.

Montagu, J. (2007). Analyse acoustique et perceptive des voyelles nasales et nasalisées du français parisien. *Thèse de Doctorat, Paris-3*.

Moore, B. C. (1989). *An introduction to the psychology of hearing* (Academic Press Limited, London).

Moore, B. C., Alcantara, J. I. et Dau, T. (1998). «Masking patterns for sinusoidal and narrow-band noise maskers» *The Journal of the Acoustical Society of America* 104, 1023-1038.

Moore, B. C. (2007). *Cochlear hearing loss: physiological, psychological and technical issues*. John Wiley & Sons. Hoboken.

Moore, B. C. (2008). The role of temporal fine structure processing in pitch perception, masking, and speech perception for normal-hearing and hearing-impaired people. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 9(4), 399-406.

Morris, L. G., Mallur, P. S., Roland Jr, J. T., Waltzman, S. B., et Lalwani, A. K. (2007). Implication of central asymmetry in speech processing on selecting the ear for cochlear implantation. *Otology & Neurotology*, 28(1), 25-30.

Mosnier, I., Ambert-Dahan, E., Smadja, M., Ferrary, E., Bouccara, D., Bozorg-Grayeli, A., et Sterkers, O. (2006). Performances et complications de l'implant cochléaire chez 134 patients adultes implantés depuis 1990. *Annales d'oto-laryngologie et de chirurgie cervico faciale: bulletin de la Société d'oto-laryngologie des hôpitaux de Paris* (Vol. 123, No. 2, pp. 71-78).

Mosnier, I., Sterkers, O., Bebear, J. P., Godey, B., Robier, A., Deguine, O. ... Ferrary, E. (2008). Speech performance and sound localization in a complex noisy environment in bilaterally implanted adult patients. *Audiology and Neurotology*, 14(2), 106-114.

Mosnier, I., Marx, M., Venail, F., Loundon, N., Roux-Vaillard, S. et Sterkers, O. (2014). Benefits from upgrade to the CP810™ sound processor for Nucleus® 24 cochlear implant recipients. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(1), 49-57.

Mourand-Dornier, L. (1980). Le rôle de la lecture labiale dans la reconnaissance de la parole. Thèse de Médecine, Besançon.

Munson, B., Donaldson, G. S., Allen, S. L., Collison, E. A. et Nelson, D. A. (2003). Patterns of phoneme perception errors by listeners with cochlear implants as a function of overall speech perception ability. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), 925-935.

Nevison, B., Laszig, R., Sollmann, W. P., Lenarz, T., Sterkers, O., Ramsden, R. ... Von Wallenberg, E. (2002). Results from a european clinical investigation of the Nucleus® multichannel Auditory Brainstem Implant. *Ear and hearing*, 23(3), 170-183.

New, B., Pallier, C., Brysbaert, M. et Ferrand, L. (2004). Lexique 2: A new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(3), 516-524. <http://www.lexique.org/>

Nguyen, N. (2005). La perception de la parole. *Phonologie et phonétique*, 425-447.

Nie, K., Barco, A., et Zeng, F. G. (2006). Spectral and temporal cues in cochlear implant speech perception. *Ear and hearing*, 27(2), 208-217.

Ostiguy, L., Sarrasin, R. et Irons, GH. (1996). Introduction à la phonétique comparée : les sons : le français et l'anglais nord-américain. Sainte-Foy : Presses de l'Université Laval.

Otto, S. R., House, W. F., Brackmann, D. E., Hitselberger, W. E. et Nelson, R. A. (1990). Auditory brain stem implant: effect of tumor size and preoperative hearing level on function. *The Annals of otology, rhinology, and laryngology*, 99(10 Pt 1), 789-790.

Otto, S. R., Brackmann, D. E., Hitselberger, W. E., Shannon, R. V. et Kuchta, J. (2002). Multichannel auditory brainstem implant: update on performance in 61 patients. *Journal of neurosurgery*, 96(6), 1063-1071.

Paliwal, K. K., Ainsworth, W. A. et Lindsay, D. (1983). A study of two-formant models for vowel identification. *Speech Communication*, 2(4), 295-303.

Paradis, C. (1987). On constraints and repair strategies. *The Linguistic Review*, 6(1), 71-97.

Pelizzzone, M., Cosendai, G. et Tinembart, J. (1999). Within-patient longitudinal speech reception measures with continuous interleaved sampling processors for ineraid implanted subjects. *Ear and hearing*, 20(3), 228.

Peterson, G. E. et Barney, H. L. (1952). Control methods used in a study of the vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 24(2), 175-184.

Petithomme, A. (2013). Étude préliminaire utilisant l'eye-tracking pour l'évaluation orthophonique des adultes implantés cochléaires. Mémoire pour le certificat de capacité en orthophonie, Paris.

Plomp, R. (1978). Auditory handicap of hearing impairment and the limited benefit of hearing aids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 533-549.

Pope, M. K. (1934). *From Latin to Modern French*. Manchester UP, Manchester.

Potard, B., et Laprie, Y. (2005). Using phonetic constraints in acoustic-to-articulatory inversion. arXiv preprint cs/0511076.

Praat: doing phonetics by computer. Auteurs: Paul Boersma and David Weenink, téléchargeable à l'adresse : <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

Pujol, R. (2013). <http://www.cochlea.org/> (grand public) <http://www.cochlea.eu/> (étudiants et professionnels)

Qin, M. K. et Oxenham, A. J. (2006). Effects of introducing unprocessed low-frequency information on the reception of envelope-vocoder processed speech. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(4), 2417-2426.

Reenen, P. V. (1985). La fiabilité des données linguistiques (à propos de la formation des voyelles nasales en ancien français). In A. Moll. XVI congrès internacional de lingüística i filologia romàniques, Actes, 37-51.

Rochet, B. L. (1976). The formation and evolution of the French nasal vowels (Vol. 153). Niemeyer.

Rodvik, A. K. (2008). Perception and confusion of speech sounds by adults with a cochlear implant. *Clinical linguistics & phonetics*, 22(4-5), 371-378.

Roman, S., Canévet, G., Lorenzi, C., Triglia, J. M., & Liégeois-Chauvel, C. (2004). Voice onset time encoding in patients with left and right cochlear implants. *Neuroreport*, 15(4), 601.

Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 336(1278), 367-373.

Rosen, S., Faulkner, A. et Wilkinson, L. (1999). Adaptation by normal listeners to upward spectral shifts of speech: implications for cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(6), 3629-3636.

Ruffin, C. V., Tyler, R. S., Witt, S. A., Dunn, C. C., Gantz, B. J. et Rubinstein, J. T. (2007). Long-Term Performance of Clarion 1.0 Cochlear Implant Users. *The Laryngoscope*, 117(7), 1183-1190.

Ruhlen, M. (1975). *A Guide to the Languages of the World*.

Ruhlen, M. (1979). On the Origin and Evolution of French Nasal Vowels. *Romance Philology*, 32, 3, p. 323.

Sanna, M., Di Lella, F., Guida, M. et Merkus, P. (2012). Auditory brainstem implants in NF2 patients: results and review of the literature. *Otology & Neurotology*, 33(2), 154-164.

Schwartz, K. C., Chatterjee, M. et Gordon-Salant, S. (2008). Recognition of spectrally degraded phonemes by younger, middle-aged, and older normal-hearing listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3972-3988.

Schwartz, J. L., Boë, L. J., Vallée, N. et Abry, C. (1997). The dispersion-focalization theory of vowel systems. *Journal of phonetics*, 25(3), 255-286.

Schwartz, M. S., Otto, S. R., Shannon, R. V., Hitselberger, W. E. et Brackmann, D. E. (2008). Auditory brainstem implants. *Neurotherapeutics*, 5(1), 128-136.

Schwartz, J. L., Basirat, A., Ménard, L., et Sato, M. (2012). The Perception-for-Action-Control Theory (PACT): A perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5), 336-354.

Serniclaes, W. (1987). Etude expérimentale de la perception du trait de voisement des occlusives du français. Thèse de Doctorat en sciences psychologiques. Université libre de Bruxelles.

Serniclaes, W., Guchteneere, R. D., Secqueville, T., Bachelot, G., Genin, J., Meyer, B. et Chouard, C. H. (1996). Objective evaluation of vowel identification with the Digisonic cochlear implant. *International Journal of Audiology*, 35(1), 23-36.

Serniclaes, W., Ouayoun, M., De Guchteneere, R., Secqueville, T., Bachelot, G., Genin, J. ... Chouard, C. H. (1998). Objective Assessment of Multichannel Cochlear Implants: Comparison Between Different Strategies for Vowel Recognition. *Acta Acustica united with Acustica*, 84(5), 918-928.

Serniclaes, W. (2000). La perception de la parole. La parole, des modèles cognitifs aux machines communicantes, 159-190.

Serniclaes, W., Meyer, B., Ouayoun, M., Genin, J., Limousi, Y., et Chouard, C. H. (2002). Assessing speech perception performances by means of computer simulations. *Etudes & travaux-Institut des langues vivantes et de phonétique*, (5), 187-204. Ed : W. Serniclaes.

Serniclaes, W. (2007). Le développement de la communication parlée avec implant cochléaire, surdité et langage. *Surdité et langage: prothèses, LPC et implant cochléaire*. Presses universitaires de Vincennes.

Shannon, R. V., Zeng, F. G., Kamath, V., Wygonski, J. et Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270(5234), 303-304.

Shannon, R. V., Cruz, R. J. et Galvin, J. J. (2010). Effect of stimulation rate on cochlear implant users' phoneme, word and sentence recognition in quiet and in noise. *Audiology and Neurotology*, 16(2), 113-123.

Shapiro, W. H. et Bradham, T. S. (2012). Cochlear implant programming. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 45(1), 111-127.

Sheffield, B. M. et Zeng, F. G. (2012). The relative phonetic contributions of a cochlear implant and residual acoustic hearing to bimodal speech perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 518-530.

Siegbahn, M., Lundin, K., Olsson, G. B., Stillesjö, F., Kinnefors, A., Rask-Andersen, H. et Nyberg, G. (2014). Auditory brainstem implants (ABIs)-20 years of clinical experience in Uppsala, Sweden. *Acta oto-laryngologica*, (0), 1-10.

Skarzynski, H., Behr, R., Lorens, A., Podskarbi-Fayette, R. et Kochanek, K. (2009). Bilateral electric stimulation from auditory brainstem implants in a patient with neurofibromatosis type 2. *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research*, 15(6), CS100.

Skinner, M. W., Fourakis, M. S., Holden, T. A., Holden, L. K., et Demorest, M. E. (1996). Identification of speech by cochlear implant recipients with the Multipeak (MPEAK) and Spectral Peak (SPEAK) speech coding strategies I. Vowels. *Ear and Hearing*, 17(3), 182-197.

Smith, S. (1951). Vocalization and added nasal resonance. *Folia Phoniatria et Logopaedica*, 3(3), 165-169.

Smith, Z. M., Delgutte, B. et Oxenham, A. J. (2002). Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 416(6876), 87-90.

Sterkers, O., Mosnier, I., Ambert-Dahan, E., Herelle-Dupuy, E., Bozorg-Grayeli, A., et Bouccara, D. (2004). Cochlear implants in elderly people: preliminary results. *Acta Oto-Laryngologica*, 124(S552), 64-67.

Stevens K. N. et House A. S. (1972). *Speech perception: foundation of modern auditory theory*. Tobias Ed Academy Press, USA

Stevens, K. N. (1985). Evidence for the role of acoustic boundaries in the perception of speech sounds. In V. Fromkin (ed.), *Phonetic Linguistics: Essays in honour of Peter Ladefoged*, 243–255. New York: Academic Press.

Stevens, K. N. (1998). *Acoustic Phonetics*. MIT Press.

Stevens, K. N. (2000). Diverse acoustic cues at consonantal landmarks. *Phonetica*, 57(2-4), 139-151.

Straka, G. (1955). Remarques sur les voyelles nasales, leur origine et leur évolution en français. *Société de Linguistique romane*.

Straka, G. (1979). *Les sons et les mots* (Vol. 42). C. Klincksieck.

Svirsky, M. A. (2002). The multidimensional phoneme identification (MPI) model: a new quantitative framework to explain the perception of speech sounds by cochlear implant users. *Etudes & travaux-Institut des langues vivantes et de phonétique*, (5), 143-186.

Svirsky, M. A., Silveira, A., Neuburger, H., Teoh, S. W. et Suarez, H. (2004). Long-term auditory adaptation to a modified peripheral frequency map. *Acta oto-laryngologica*, 124(4), 381-386.

Syrdal, A. K., et Gopal, H. S. (1986). A perceptual model of vowel recognition based on the auditory representation of American English vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79(4), 1086-1100.

Takemoto, H., Adachi, S., Kitamura, T., Mokhtari, P. et Honda, K. (2006). Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4), 2228-2238.

Takeuchi, S., Kasuya, H. et Kido, K. (1975). On the acoustic correlate of nasality. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 31, 298-309.

Tong, Y. C., Lim, H. H. et Clark, G. M. (1988). Synthetic vowel studies on cochlear implant patients. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(3), 876-887.

Traunmüller, H. (1990). Analytical expressions for the tonotopic sensory scale. *The Journal of the Acoustical Society of America* (88): 97-91.

Tseva, A. et Cathiard, M. A. (1990). Paroles vues: la dimension d'arrondissement dans l'identification visuelle des voyelles du français. *Le Journal de Physique Colloques*, 51(C2).

Tubach, J. P. et Boë, L. J. (1990). Un corpus de transcription phonétique (300 000 phones). Constitution et exploitation statistique.

Tyler, R. S., Preece, J. P., Lansing, C. R. et Gantz, B. J. (1992). Natural Vowel Perception by Patients with the Ineraid Cochlear Implant: Original Paper. *International Journal of Audiology*, 31(4), 228-239.

Vaerenberg, B., Smits, C., De Ceulaer, G., Zir, E., Harman, S., Jaspers, N. ... Govaerts, P. J. (2014). Cochlear implant programming: a global survey on the state of the art. *The Scientific World Journal*, 2014.

Vaissière, J. (1995). Nasalité et Phonétique In *Le voile du palais et la parole*. In *Colloque sur le voile pathologique*.

Vaissière, J. (2006). *La phonétique*. Que sais-je ? Presses universitaires de France.

Vaissière, J. (2007). Area functions and articulatory modeling as a tool for investigating the articulatory, acoustic and perceptual properties of sounds across languages. *Experimental approaches to phonology*, 54-71.

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 (ICPhS XVII)* (pp. 52-59).

Valdman, A. (1976). *Introduction to French phonology and morphology*. Rowley, MA: Newbury House.

Välimaa, T. T., Maatta, T. K., Lopponen, H. J. et Sorri, M. J. (2002). Phoneme Recognition and Confusions With Multichannel Cochlear Implants Vowels. *Journal of speech, language, and hearing research*, 45(5), 1039-1054.

Välimaa, T. T., Sorri, M. J., Laitakari, J., Sivonen, V., et Muhli, A. (2011). Vowel confusion patterns in adults during initial 4 years of implant use. *Clinical linguistics & phonetics*, 25(2), 121-144.

Vallée, N., Boë, L. J., et Stefanuto, M. (1999). Typologies phonologiques et tendances universelles. Approche substantialiste. *Linx. Revue des linguistes de l'université Paris X Nanterre*, (11), 31-54.

Van Wieringen, A. et Wouters, J. (1999). Natural vowel and consonant recognition by Laura cochlear implantees. *Ear and hearing*, 20(2), 89-103.

Vibert, J. F., Sébille, A., Boureau, F., et Mazières, L. (2011). *Neurophysiologie: de la physiologie à l'exploration fonctionnelle*. Elsevier Health Sciences.

Von Békésy, G. (1960). *Experiments in hearing* (Vol. 8). E. G. Wever (Ed.). New York: McGraw-Hill.

Wang, M. D. et Bilger, R. C. (1973). Consonant confusions in noise: A study of perceptual features. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(5), 1248-1266.

Warren, R. M. (1970). Perceptual restoration of missing speech sounds. *Science*, 167(3917), 392-393.

Warren, R. M. et Obusek, C. J. (1971). Speech perception and phonemic restorations. *Perception & Psychophysics*, 9(3), 358-362.

Wright, J. T. (1986). The behavior of nasalized vowels in the perceptual vowel space. *Experimental phonology*, 45-67.

Xu, L., Thompson, C. S. et Pfingst, B. E. (2005). Relative contributions of spectral and temporal cues for phoneme recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5), 3255-3267.

Xu, L. et Zheng, Y. (2007). Spectral and temporal cues for phoneme recognition in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(3), 1758-1764.

Yang, H. I. et Zeng, F. G. (2013). Reduced acoustic and electric integration in concurrent-vowel recognition. *Scientific reports*, 3.

Yoon, Y. S., Li, Y. et Fu, Q. J. (2012). Speech recognition and acoustic features in combined electric and acoustic stimulation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(1), 105-124.

Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E., & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256(5058), 846-849.

Zerling, J. P. (1984). Phénomènes de nasalité et de nasalisation vocalique: Étude cinéradiographique pour deux locuteurs. *Travaux de l'Institut de Phonétique de Strasbourg Strasbourg*, (16), 241-266.

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.

Zhang, T., Dorman, M. F., Fu, Q. J. et Spahr, A. J. (2012). Auditory training in patients with unilateral cochlear implant and contralateral acoustic stimulation. *Ear and hearing*, 33(6).

IX. Annexes

A. Transcriptions orthographiques possibles pour les voyelles nasales du français

[ã]	[õ]	[ẽ]	[œ]
AM <i>amputer</i>	OM <i>ombre</i>	AIM <i>essaim</i>	EUN <i>jeun</i>
AMP <i>champ</i>	OMB <i>coulomb</i>	AIN <i>craindre</i>	UN <i>brun</i>
AN <i>chanter</i>	OMP <i>compter</i>	AING <i>parpaing</i>	UM <i>parfum</i>
ANT <i>chant</i>	OMPT <i>prompt</i>	AINT <i>saint</i>	
ANC <i>franc</i>	ON <i>conter</i>	EIN <i>sein</i>	
AND <i>grand</i>	ONC <i>tronc</i>	EING <i>seing</i>	
ANG <i>sang</i>	OND <i>blond</i>	EINT <i>restreint</i>	
AON <i>faon</i>	ONG <i>oblong</i>	EM <i>sempiternel</i>	
EM <i>empaler</i>	ONT <i>pont</i>	EN <i>placenta</i>	
EMP <i>exempler</i>	UM <i>lumbago</i>	IM <i>imbiber</i>	
EMPT <i>exempt</i>	UN <i>acupuncteur</i>	ÏN <i>coïncider</i>	
EN <i>entailler</i>		INC <i>succinctement</i>	
END <i>différend</i>		INCT <i>instinct</i>	
ENG <i>hareng</i>		ING <i>coing</i>	
ENS <i>suspens</i>		INGT <i>vingt</i>	
ENT <i>comment</i>		INT <i>suint</i>	
		YM <i>sympathiser</i>	
		YN <i>lyncher</i>	
		<i>En cas de neutralisation de l'opposition [ã]- [ẽ]</i>	
		EUN <i>jeun</i>	
		UN <i>brun</i>	
		UM <i>parfum</i>	

B. *Script Praat Analyse tout (script fricative de Gendrot, 2009)*

```

form Name
comment indiquer ci-dessous le/les fichiers à analyser, par ex :      *.wav OU *ichier.wav
word regexp *d.wav
comment indiquer ci-dessous le chemin des fichiers à analyser
text      path      C:\Documents      and
Settings\Administrateur\Bureau\A_trier\script_fricatives_ameliore\script_analyse_tout
comment indiquer ci-dessous le chemin de destination du fichier résultat
text      path2      C:\Documents      and
Settings\Administrateur\Bureau\A_trier\script_fricatives_ameliore\script_analyse_tout
comment ci-dessous indiquer m (pour homme) ou f (pour femme)
text sex m
endform

# ce script permet d'analyser tous les segments d'un niveau 1 d'une grille de segmentation
# les mesures sont plus particulièrement adaptées pour les fricatives
# si la grille contient plusieurs niveaux ...
# le script permet d'indiquer le segment précédent sur la segmentation, cette information
n'est pertinente que si le segment est réellement immédiatement précédent ...
# beg et end sont mesurés à 1/3 du début et de la fin du phonème respectivement # midpt au
milieu

# ne pas oublier de changer les phonèmes à analyser dans le script "procedures"
# c:\praatcon.exe -a script_fricatives.praat *.wav "C:\Documents      and
Settings\Administrateur\Bureau\ESTER_TRS\DATA_50h" ""
#####

include procedures.praat
include mesures_spectrales.praat
include calculs.praat

#####

clearinfo
type$="" regexp$""

#####
outputfile$ = "'path2$" + "\" + "resultats_consonnes.txt"
#fileappend "'outputfile$" fic      label sex      tier2      hnr      cog      skewness
      kurtosis      sdev      f0      place_pmanner_p      voice_pplace_fmanner_f
      voice_f duree      duree_norm      fo_norm glissando      zcr      mot      mot_phon
      place_syll      pause_prec1      pause_prec2      pause_suiv1      pause_suiv2      intensite
      gramm      entour_prec      voy_prec      entour_foll      voy_foll      position_in_syllable
      position_phoneme_sur_total_phonemes 'newline$'
fileappend "'outputfile$" fic      label sex      tier2      hnr      cog      zcr      skewness
      kurtosis      sdev      beg_f0      mid_f0      end_f0      place_pmanner_p      voice_pplace_f
      manner_f      voice_f duree      duree_norm      fo_norm tier3      beg_intensite      mid_intensite
      end_intensite      intensite_rms      beg_F1      mid_F1      end_F1      beg_F2      mid_F2      end_F2      beg_F3
      mid_F3      end_F3      beg_F4      mid_F4      end_F4 'newline$'

#####

Create Strings as file list... liste 'path$'\type$'
string = selected("Strings")
nolifft = Get number of strings

for x from 1 to nolifft
  select 'string'
  line$ = Get string... x
  line_depart$ = line$

  file$ = path$ + "\" + line$
  Open long sound file... 'file$'
  sound = selected("LongSound")

  extension$ = right$(file$,3)

  grille$ = path$ + "\" + line$ - extension$ + "TextGrid"

  if fileReadable(grille$)
    Read from file... 'grille$'
    textgrid = selected("TextGrid")

```

```
call procedures
```

```
    endif  
endfor
```

```
#####
```

```
#select all  
#Remove  
printline Vos r  sultats ont   t   enregistr  s sous 'path2$'
```

C. Exemple de listes de Lafon

L'ensemble est téléchargeable à l'adresse: <http://www.college-nat-audio.fr/listes-cd-audiometrie-vocale.html>

Listes cochléaires		AUDIOMETRIE VOCALE					Test phonétique de J.-C. Lafon				
Patient											
Date	Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		
Audiomètre											
Opérateur	CD 1 piste										
Observations	1 5 25 35		2 6 26 36		3 7 27 37		4 8 28 38		5 9 29 39		
	buée		bile		rôde		abbé		baile		
	ride		dors		fente		sud		soude		
	foc		sage		tige		fausse		mur		
	agis		gaine		grain		joute		nef		
	vague		fil		cave		dogue		change		
	croc		cru		bulle		acquis		gage		
	lobe		boule		somme		ville		trou		
	mieux		cale		maine		mare		mal		
	natte		bonne		preux		noce		tonne		
	col		rive		bord		appas		peur		
	fort		sol		rouille		route		rampe		
	soupe		tempe		oser		cil		puce		
	tonte		fauve		site		fête		cor		
	vêle		phase		bouée		veule		vite		
	nage		mule		saue		chaise		rance		
	souche		chatte		chance		bâche		mouche		
	rogne		règne		gagne		souille		file		
	/ 50		/ 50		/ 50		/ 50		/ 50		
	Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		Voix M F E		
CD 1 piste											
6 10 30 40		7 11 31 41		8 12 32 42		9 13 33 43		10 14 34 44			
bille		brin		bol		bois		tube			
doute		faillie		rade		dard		dalle			
faine		sauge		touffe		faute		four			
longe		langue		gêne		amas		jante			
gave		sotte		raide		gîte		gaz			
seul		molle		étang		ganse		calisse			
ami		drap		roule		cahot		folle			
tasse		mille		mise		père		mainte			
chêne		naine		année		mine		saine			
pré		pire		pile		tronc		pris			
sur		tank		sort		passee		soute			
crin		pur		masse		tord		rite			
vol		suer		fève		élan		bave			
front		rêve		pince		voix		bouse			
ruse		vase		bac		pèse		nappe			
louche		mèche		manche		bûche		riche			
bagne		teigne		saigne		paille		peigne			
/ 50		/ 50		/ 50		/ 50		/ 50			

D. Exemple de listes de Fournier

AUDIOMETRIE VOCALE

Listes dissyllabiques

J.-E. Fournier

Patient

Date	Voix M F	Voix M F	Voix M F	Voix M F	Voix M F
Audiomètre					
Opérateur	CD 2 piste				
Observations	1 33 63 le bouchon soupper rondin grumeau rebut glapon réchaud coffret gamin clavier / 10	2 34 64 le râteau donjon sergent crémier niveau refrain veston forban bûcher cachot / 10	3 35 65 le souci tripot balai vallon saindoux brigand rouleau défi bambin secret / 10	4 36 66 le congé mouton roseau frelon lapin traité caillot radis bâton ruban / 10	5 37 67 le grillon terrain soulier gazon faisceau billet rabais plateau cordon ticket / 10

Voix M F	Voix M F	Voix M F	Voix M F	Voix M F
CD 2 piste				
6 38 68 le pigeon carnet noyau jardin portrait blason salut délai sabot jumeau / 10	7 39 69 le repas complot savon curé sanglot poulet chainon sachet remous coquin / 10	8 40 70 le dentier boulon hameau conflit bonnet fusil rayon bandeau relais canon / 10	9 41 71 le nougat devis baquet débris guichet bijou cahier goujon dessin coteau / 10	10 42 72 le poussin chevreau forfait mari bosquet garçon sifflet boîtier cahot taudis / 10

E. Population de l'étude n°1

n° du patient	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sexe	H	H	F	F	H	H	F	F	H	F	F
Âge En années	29	60	50	81	62	57	78	39	91	79	18
Niveau d'étude	Bac + 5	CAP	Bac + 5	CAP	BEPC	Bac + 2	BEPC	Bac + 4	Bac+ 8	< scol. oblig.	Bac + 1
Etiologie de la surdité	génét.	ototox.	génét.	incon.	incon.	incon.	incon.	incon.	incon.	otospo ng.	incon.
Mode d'entrée dans la surdité	évol.	brus.	évol.	brus.	évol.	évol.	évol.	congé.	évol.	évol.	évol.
Durée de surdité profonde	13 ans	8 mois	20 ans	18 mois	2 ans	2 ans	5 ans	4 ans	16 ans	4 ans	3 ans
% Fournier binaural	10%	0%	90%	50%	0%	30%	40%	100%	0%	10%	90%
Rééd. Ortho.	non	1 mois	5 mois	1 mois	non	non	2 ans	non	non	8 mois	non
n° du témoin	1 bis	2 bis	3 bis	4 bis	5 bis	6 bis	7 bis	8 bis	9 bis	10 bis	11 bis
Sexe	H	H	F	F	H	H	F	F	H	F	F
Âge	30	58	50	70	57	57	79	39	70	76	17
Niveau d'étude	Bac + 5	CAP	Bac + 5	Brevet	Certificat	Bac + 2	Scol. oblig.	Bac +4	Bac + 5	Scol oblig.	Bac +1

n°du patient	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Sexe	F	H	F	H	H	H	H	H	F	H	H
Âge	20	73	48	66	63	21	31	47	76	55	33
Niveau d'étude	BTS	Bac + 3	Bac+ 5	Bac + 5	Certificat	Bac	Bac + 5	Bac + 5	CAP	CAP	Bac + 5
Etiologie de la surdité	génét.	ménièr e	otospo ng.	otospo ng.	ménière	incon.	génét.	NF2	incon.	ménièr e	génét.
Mode d'entrée dans la surdité	congé.	évol.	évol.	évol.	évol.	congé.	congé.	brus.	évol.	évol.	congé.
Durée de surdité profonde	20 ans	4 ans	5 ans	49 ans	4 ans	6 mois	31 ans	8 ans	1 ans	2 ans	33 ans
% Fournier binaural	70%	50%	80%	100%	50%	0%	20%	0%	40%	80%	30%
Rééd. ortho.	non	2 ans	16 ans	10 ans	1 mois	1 an	non	6 ans	8 mois	non	15 ans
n° du témoin	12 bis	13 bis	14 bis	15 bis	16 bis	17 bis	18 bis	19 bis	20 bis	21 bis	22 bis
Sexe	F	H	F	H	H	H	H	H	F	H	H
Âge	21	75	47	63	63	22	32	53	93	62	25
Niveau d'étude	Bac + 1	Bac + 4	Bac + 5	Bac +5	Brevet	Bac	Bac + 5	Bac +5	Scol. oblig.	CAP	Bac + 5

F. Script Praat du test perceptif de l'étude n°4

```
"ooTextFile"

"ExperimentMFC 5"

stimuliAreSounds? <yes>

stimulusFileNameHead = "stimuli/"
stimulusFileNameTail = ".wav"

stimulusCarrierBefore = ""
stimulusCarrierAfter = ""

stimulusInitialSilenceDuration = 1 seconds
stimulusMedialSilenceDuration = 0.7 seconds

numberOfDifferentStimuli = 24

"a11,a12,a22,a21" "" "a21,a12,a22,a11" ""
"a21,a22,a12,a11" "" "a12,a22,a21,a11" ""
"a21,a22,a12,a11" "" "a12,a22,a11,a21" ""
"a11,a12,a21,a22" "" "a22,a11,a12,a21" ""
"an11,a12,a22,a21" "" "a21,an11,a22,a11" ""
"a21,a22,an11,a11" "" "a12,a22,a21,an11" ""
"an21,a22,a12,a11" "" "a12,an21,a11,a21" ""
"a11,a12,an21,a22" "" "a22,a11,a12,an21" ""
"an12,a12,a22,a21" "" "a21,an12,a22,a11" ""
"a21,a22,an12,a11" "" "a12,a22,a21,an12" ""

"an22,a22,a12,a11" "" "a12,an22,a11,a21" ""
"a11,a12,an22,a22" "" "a22,a11,a12,an22" ""

numberOfReplicationsPerStimulus = 1

breakAfterEvery = 20

randomize = <PermuteBalancedNoDoublets>

startText = "La voyelle attendue est A et l'intrus est AN Cliquez pour commencer le
test"

runText = "La voyelle attendue est A et l'intrus est AN"

pauseText = "Vous pouvez avoir une petite pause si vous voulez. Cliquez pour
continuer."

endText = "L'expérience est terminée"

maximumNumberOfReplays = 0

replayButton = 0 0 0 0 "" ""

okButton = 0 0 0 0 "" ""
```

```

oopsButton = 0 0 0 0 "" ""
responsesAreSounds? <no>
responseFileNameHead = ""
responseFileNameTail = ""
responseCarrierBefore = ""
responseCarrierAfter = ""
responseInitialSilenceDuration = 0
responseMedialSilenceDuration = 0
numberOfResponseCategories = 5
    0.04 0.24 0.25 0.5 "1Ère" 30 "" "1"
    0.28 0.48 0.25 0.5 "2Ème" 30 "" "2"
    0.52 0.72 0.25 0.5 "3Ème" 30 "" "3"
    0.76 0.96 0.25 0.5 "4Ème" 30 "" "4"
    0.04 0.96 0.6 0.8 "C'est toujours la même voyelle" 30 "" "0"
numberOfGoodnessCategories = 0

```

G. Configuration Klatt pour la génération des stimuli de l'étude n°5

L'interface est utilisable à l'adresse

<http://www.asel.udel.edu/speech/tutorials/synthesis/Klatt.html>

Configuration Klatt avec les paramètres par défaut

AV	AF	AH	AVS	F0	F1	F2	F3
					450	1450	2450
F4	FNZ	AN	A1	A2	A3	A4	A5
3300	250		60	56	52	48	44
A6	AB	B1	B2	B3	SW	FGP	BGP
40	36	50	70	110	0	0	100
FGZ	BGZ	B4	F5	B5	F6	B6	FNP
1500	6000	250	3850	200	4900	1000	250
BNP	BNZ	FRA	SR	NWS	GAI	NFC	
100	100	200	8000	40	78	4	

Paramètres utilisés pour le stimulus de référence.

AV	AF	AH	AVS	F0	F1	F2	F3
70				180	500	1500	2500
F4	FNZ	AN	A1	A2	A3	A4	A5
3500			60	56	52	48	
A6	AB	B1	B2	B3	SW	FGP	BGP
					2		
FGZ	BGZ	B4	F5	B5	F6	B6	FNP
BNP	BNZ	FRA	SR	NWS	GAI	NFC	
					75		

H. Script Praat du test perceptif de l'étude n°5

```
"ooTextFile"

"ExperimentMFC 5"

stimuliAreSounds? <yes>

stimulusFileNameHead = "stimuli/"
stimulusFileNameTail = ".wav"

stimulusCarrierBefore = ""
stimulusCarrierAfter = ""

stimulusInitialSilenceDuration = 1 seconds
stimulusMedialSilenceDuration = 0.7 seconds
numberOfDifferentStimuli = 32

"Reference,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,Reference" ""

"F1_min,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F1_min,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F1_min,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F1_min" ""

"F2_max,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F2_max,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F2_max,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F2_max" ""

"F2_min,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F2_min,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F2_min,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F2_min" ""

"F3_max,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F3_max,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F3_max,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F3_max" ""

"F3_min,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F3_min,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F3_min,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F3_min" ""

"F4_max,Reference,Reference,Reference" "" "Reference,F4_max,Reference,Reference" ""
"Reference,Reference,F4_max,Reference" "" "Reference,Reference,Reference,F4_max" ""

numberOfReplicationsPerStimulus = 1

breakAfterEvery = 20

randomize = <PermuteBalancedNoDoublets>

startText = "Click to start."

runText = "Y a t-il un son diffèrent des autres ? Si oui, en quelle position ?"

pauseText = "Vous pouvez avoir une petite pause si vous voulez. Cliquez pour continuer."

endText = "L'expérience est terminée"

maximumNumberOfReplays = 0
```

```

replayButton = 0 0 0 0 "" ""
okButton = 0 0 0 0 "" ""
oopsButton = 0 0 0 0 "" ""
responsesAreSounds? <no>
responseFileNameHead = ""
responseFileNameTail = ""
responseCarrierBefore = ""
responseCarrierAfter = ""
responseInitialSilenceDuration = 0
responseMedialSilenceDuration = 0
numberOfResponseCategories = 5
    0.04 0.24 0.25 0.5 "1Ère" 30 "" "1"
    0.28 0.48 0.25 0.5 "2Ème" 30 "" "2"
    0.52 0.72 0.25 0.5 "3Ème" 30 "" "3"
    0.76 0.96 0.25 0.5 "4Ème" 30 "" "4"
    0.04 0.96 0.6 0.8 "C'est exactement le même son dans les quatre positions" 30 "" "0"
numberOfGoodnessCategories = 0

```

I. Questionnaire (brut) de l'étude n°7

Enquête auprès des orthophonistes

Bonjour et Merci beaucoup de prendre le temps de répondre à ce questionnaire. Dans un premier temps, il s'agit de recueillir votre expérience et votre pratique sur l'évaluation et la rééducation de la production des voyelles nasales. Vous pouvez répondre à la première partie du questionnaire quel que soit votre domaine privilégié d'activité. Dans un second temps, je vous demanderai si vous avez une expérience dans le domaine de la prise en charge des adultes sourds implantés cochléaire et, le cas échéant, vous poserai des questions à ce sujet. Les résultats, tout à fait anonymes, seront très utiles pour le travail de thèse de phonétique que je poursuis à Paris-3. Merci de répondre même si vous n'êtes pas sûr(e) de la réponse ou que vous pensez ne pas savoir. Suivez votre intuition, elle m'intéresse aussi. N'hésitez pas à me laisser vos coordonnées si vous souhaitez être informé(e) des résultats. Le questionnaire peut être rempli en moins de 5 minutes. Merci encore.

Dans quel département exercez-vous ?

En quelle année avez-vous été diplômé(e) ?

Quel est votre type d'exercice ? Vous pouvez cocher plusieurs cases

Centre implantateur ou spécialisé dans l'implant cochléaire Autre activité salariée Activité libérale Autre :

Avez-vous suivi un cursus en sciences du langage en plus de votre diplôme d'orthophonie ?

Etes-vous bilingue ?

Si oui, quelle autre langue parlez-vous ?

Diriez-vous que vous avez "l'accent du sud" ?

Voici quelques questions sur les voyelles nasales ... Et leurs correspondantes orales. Dans le cadre d'une prise en charge de retard de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie, lecture labiale (sosies labiaux) ou autre, quelles voyelles orales opposez-vous à chacune des voyelles nasales afin de ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais ? En d'autres termes, quelle est, pour vous, la voyelle orale correspondante à chacune des voyelles nasales (d'un point de vue articulatoire)

Quelle voyelle orale utiliserez-vous en opposition à la voyelle nasale "on" "om" de "tonton" "pompom" ?

Le "o ouvert" de porc Le "i" de riz Le "ou" de toute Le "u" de rue Le "eu" de deux Le "o fermé" de pot
Le "a" de rat Le "é" de été Le "è" de "il était" Le "oe" de coeur Le "é" de "été" Le "è" de sait Le "i" de
riz Le "oe" de cœur

Si l'on se place maintenant au niveau du mot Quel mot opposeriez-vous à "monde" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? Mode ou Maud (le prénom)

Quel mot opposeriez-vous à "tempe" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? Top (top-model) ou Tape

Quel mot opposeriez-vous à "rein" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? rat ou raie

Quel mot opposeriez-vous à "ronde" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? Rôde (il rôde) ou Rhodes (le colosse de Rhodes)

Quel mot opposeriez-vous à "teinte" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? tête ou tate

Quel mot opposeriez-vous à "Nantes" pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais ? Natte ou Note

Dans votre activité, quelle proportion de patients adultes devenus sourds et implantés cochléaire suivez-vous ? Aucun
Expérience limitée à quelques patients
moins de 10% moins de 25% moins de 50% plus de 50%

Si vous avez répondu "Aucun" à la question précédente, le questionnaire est terminé. Merci de cliquer sur "envoyer" à la fin du questionnaire pour que vos réponses soient enregistrées. Merci encore de votre participation. Vous pouvez laisser votre mail si vous souhaitez être informé(e) des résultats.

Vous pouvez également laisser un commentaire libre. Si vous n'avez pas répondu "Aucun", vous pouvez répondre aux 5 questions suivantes.

Vous pouvez laisser un commentaire libre et/ou vos coordonnées

A propos de la perception des phonèmes par les adultes implantés cochléaires...

D'après vous, quelle est la caractéristique la plus difficile à percevoir par les adultes implantés (en modalité auditive sans lecture labiale). Pour les consonnes d'abord

Le lieu d'articulation = Confusions entre "ta" et "pa" Le mode d'articulation = Confusions entre "ta" et "sa" La nasalité = Confusions entre "da" et "na" Le voisement = Confusions entre "ta" et "da"

D'après vous, quelle est la caractéristique la plus difficile à percevoir par les adultes implantés (en modalité auditive sans lecture labiale). Puis pour les voyelles.

L'aperture = Confusions entre "ri" et "ré" Le lieu d'articulation = Confusions entre "rue" et "roue" La nasalité = Confusions entre "rot" et "rond" L'arrondissement = Confusions entre "ri" et "rue"

Si un patient implanté a des difficultés à percevoir le trait de nasalité des voyelles, quelle voyelle orale utiliserez-vous en opposition de la voyelle "an"/"en" afin de ne travailler perceptivement que le trait de nasalité ?

Le "u" de rue Le "o fermé" de pot Le "ou" de toute Le "a" de rat Le "eu" de deux Le "o ouvert" de porc
Le "é" de "été" Le "è" de "sait" Le "i" de riz Le "oe" de cœur

Si un patient implanté a des difficultés à percevoir le trait de nasalité des voyelles, quelle voyelle orale utiliserez-vous en opposition de la voyelle "on"/"om" afin de ne travailler perceptivement que le trait de nasalité ?

Le "u" de rue Le "o fermé" de pot Le "ou" de toute Le "a" de rat Le "eu" de deux Le "o ouvert" de porc
Le "é" de "été" Le "è" de "sait" Le "i" de riz Le "oe" de cœur

Si un patient implanté a des difficultés à percevoir le trait de nasalité des voyelles, quelle voyelle orale utiliserez-vous en opposition de la voyelle "in"/"ain"/"ein" afin de ne travailler perceptivement que le trait de nasalité ?

Le "u" de rue Le "o fermé" de pot Le "ou" de toute Le "a" de rat Le "eu" de deux Le "o ouvert" de porc
Le "é" de "été" Le "è" de "sait" Le "i" de riz Le "oe" de cœur

Cette fois, c'est bel et bien terminé. Merci de cliquer sur "envoyer" pour que vos réponses soient enregistrées. Vous pouvez laisser un commentaire libre et/ou vos coordonnées. Merci encore.

J. Publications et participation à des travaux d'équipe ayant donné lieu à des publications entre 2008 et 2014 dans les domaines de la phonétique et de l'audiologie.

2014

Borel, S., Vaerenberg, B., Amar, D., de Ceulaer, G., Mosnier, I., Sterkers, O. (2014). Etat des lieux des procédures de réglage d'implant cochléaire: une enquête auprès de 47 centres à travers le monde. Les cahiers de l'audition, revue du Collège Français d'Audioprothèse. A paraître.

Vaerenberg, B., Smits, C., De Ceulaer, G., Zir, E., Harman, S., Jaspers, N., ...Borel, S.... et Govaerts, P. J. (2014). Cochlear implant programming: a global survey on the state of the art. The Scientific World Journal

Battmer, R. D., Borel, S., Brendel, M., Buchner, A., Cooper, H., Fielden, C., ... & Vanat, Z. (2014). Assessment of 'Fitting to Outcomes Expert'FOX® with new cochlear implant users in a multi-centre study. Cochlear implants international.

Couloigner, V., Gratacap, M., Ambert-Dahan, E., Borel, S., Ettienne, V., Kerouedan, A., ... & Sterkers, O. (2014). [A report of three cases and review of auditory brainstem implants in children.]. Neuro-Chirurgie.

Borel, S. Les aides auditives : mieux les accepter. (2014). Cerveau & Psycho, n°, mars-avril 2014

2013

Esquia Medina, GN., Borel, S., Nguyen, Y., Ambert-Dahan, E., Ferrary, E., Sterkers, O., Grayeli, AB. (2013) Is Electrode-Modiolus Distance a Prognostic Factor for Hearing Performances after Cochlear Implant Surgery? Audiol Neurotol. Oct 23;18(6):406-413

Nguyen, Y., Mosnier, I., Borel, S., Ambert-Dahan, E., Bouccara, D., Bozorg-Grayeli, A., Ferrary, E., Sterkers, O. (2013). Evolution of electrode array diameter for hearing preservation in cochlear implantation. Acta Otolaryngol, 133(2):116-22

Bouccara, D., Bernardeschi, D., Mosnier, I., Ambert-Dahan, E., Carillo, C., Borel, S. Sterkers, O. Kalamarides, M. Ferrary, E.. (2013). Les implants auditifs du tronc cérébral. EMC, Encyclopédie Médico-Chirurgicale.

Ambert-Dahan, E. et Borel, S. (2013). Réadaptation à la communication dans les surdités acquises appareillées et/ou apprentissage de la lecture labiale. Approches Thérapeutiques en Orthophonie, In Gatignol, P., Rousseau, T., Topouzhanian, S. Ortho-Edition

Borel, S. (2013) «La lecture labiale» dans « Surdité et Santé Mentale », Collection Cahiers de Saint-Anne, C. Qu rel, Lavoisier

Borel, S., et De Bergh, M. (2013). Entraînement auditif pour les situations d'écoute complexes chez l'adulte implanté cochléaire:-Environnement bruyant-Téléphone-Musique.

2012

Mosnier, I., Felice, A., Esquia, G., Borel, S., Bouccara, D., Ambert-Dahan, E., Smadja, M., et al. (2012). New cochlear implant technologies improve performance in post-meningitic deaf patients. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 270(1):53-9

Degroote, G., Simon, J., Borel, S., & Crevier-Buchman, L. (2012). The French version of Speech Handicap Index: validation and comparison with the Voice Handicap Index. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 64(1), 20–25.

Tamir, S., Ferrary, E., Borel, S., Sterkers, O., Bozorg-Grayeli, A. (2012) Hearing preservation after cochlear implantation using deeply inserted flex atraumatic electrode arrays. *Audiology & Neurotology*. 17(5), 331-7

Richard, C., Ferrary, E., Borel, S., Sterkers, O., Grayeli, A. B. (2012). Interaction between electric and acoustic cues in diotic condition for speech perception in quiet and noise by cochlear implantees. *Otology & Neurotology*, 33(1), 30–37.

Borel, S. La voix et ses troubles. (2012). *Cerveau & Psycho*, n  54, novembre-décembre 2012

2009

Mosnier, I., Sterkers, O., Bebear, J.-P., Godey, B., Robier, A., Deguine, O., Fraysse, B., Bordure P., Mondain M., Bouccara D., Bozorg-Grayeli A., Borel S., Ambert-Dahan E., Ferrary E. (2009). Speech performance and sound localization in a complex noisy environment in bilaterally implanted adult patients. *Audiology & Neuro-Otology*, 14(2), 106–114.

X. Liste des tableaux

Tableau 1 : Architecture générale de la thèse.	19
Tableau 2 : Voyelles du français classées selon les quatre dimensions articulatoires : lieu d'articulation, aperture, labialité et nasalité (élaboré par l'auteur du manuscrit).....	27
Tableau 3 : Synthèse de la présence des consonnes et voyelles nasales dans les langues du monde. Tiré de Clements et al. (2014), page 184.	30
Tableau 4: Fréquence d'occurrence des voyelles nasales. Synthèse tirée de Carignan (2013) et complétée par Tubach et Boë (1990, cités par Vaissière (1995)) et Lexique.org (New et Pallier, 2014). Les fréquences (exprimées en pourcentages) des phonèmes d'après la dernière version de la base Lexique 3.8.	31
Tableau 5: Correspondances étymologiques entre les voyelles latines et les voyelles nasales du français moderne (selon Berit-Hansen, 1998, page 80, adapté de Rochet, 1976).....	33
Tableau 6: Etudes comparant l'articulation et/ou l'acoustique des voyelles nasales et orales du français.	34
Tableau 7: Résultats des études, décrites dans le Tableau 6, comparant l'articulation labio-linguale des voyelles nasales et des voyelles orales.....	34
Tableau 8 : Résultats de l'identification visuelle des voyelles nasales dans les études de Mourand-Dornier (1980, normo-entendants) et Gentil (1981, sourds prélinguaux) rapportés par Tseva et Cathiard (1990). Données analysées dans le cadre de cette thèse.	41
Tableau 9 : Description articulatoire utilisée pour le calcul du taux d'identification par trait articulatoire.....	46
Tableau 10 : Fréquence d'occurrence des voyelles orales arrondies du français en % du nombre total de phonèmes du français. Source: lexique 3.8 (New et Pallier, 2004).	51
Tableau 11: Lien entre articulation (lieu de la constriction) et acoustique (mouvement des formants) pour les voyelles. Tiré de Vaissière (2007, <i>Experimental approaches to phonology</i> , page 66). VT: vocal tract/conduit vocal; velar region/région vélaire, en arrière de la cavité buccale; lip rounding/ arrondissement des lèvres; bunching of the tongue/langue concave avec bord latéraux relevés; retroflexion/articulation par recourbement de la face inférieure de la pointe de langue; larynx lowering/abaissement du larynx.....	60
Tableau 12: Classification acoustique des voyelles selon Vaissière (2007), <i>Experimental approaches to phonology</i> , page 66. F ₃ F ₄ correspond au regroupement de ces deux	

formants. F ₃ souligné indique que ce formant dépend de la cavité antérieure. La flèche simple signifie que le formant est augmenté ou diminué. La flèche double signale que la position du formant est maximale haute ou basse dans l'échelle des fréquences. ...	62
Tableau 13: Effet de la nasalisation consonantique contextuelle sur l'amplitude des harmoniques auprès de 4 locuteurs enregistrés sur le corpus [did], [dad], [dud], [nin], [nan] et [nun].	67
Tableau 14: Indices spectraux de la nasalité vocalique dans diverses études. Reproduit de Delvaux (2012), page 130, à partir de Baken et Orlikoff (2000).	68
Tableau 15 : Synthèse des données fréquentielles comparatives entre voyelles orales et voyelles nasales. NB: Contrairement aux autres auteurs qui mesurent les pôles directement sur le spectre de la voyelle nasale, Montagu (2004) espère, à partir de l'analyse acoustique du début non nasalisé de la voyelle nasale, le <i>Nasal Onset Time</i> , mesurer le vocoïde sous-jacent à aux voyelles nasales.	71
Tableau 16: Valeurs (MOY±SEM) du premier pôle spectral (F ₁) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).	76
Tableau 17: Valeurs (MOY±SEM) du deuxième pôle spectral (F ₂) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).	77
Tableau 18: Valeurs (MOY±SEM) du troisième pôle spectral (F ₃) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).	78
Tableau 19: Valeurs (MOY±SEM) du quatrième pôle spectral (F ₄) pour les voyelles nasales et les voyelles orales associées (en Hertz).	79
Tableau 20: Voyelles acoustiquement proches des voyelles nasales en fonction du pôle spectral en Hertz. ANOVA et tests PLSD de Fisher sur 40 occurrences de chaque voyelle (4*10 locutrices). La voyelle est considérée comme proche quand la valeur de p>0,05. 81	81
Tableau 21: Voyelles acoustiquement proches des voyelles nasales en fonction du pôle spectral en Bark. ANOVA et tests PLSD de Fisher sur 40 occurrences de chaque voyelle (4*10 locutrices). La voyelle est considérée comme proche quand la valeur de p>0,05. 81	81
Tableau 22: Récapitulatif des indices acoustiques différents ou identiques pour chacune des paires de voyelles orale-nasale testées dans l'étude n°4.	81
Tableau 23 : Classification audiométrique des déficiences auditives du BIAP, Bureau International d'Audiophonologie, www.biap.org	103
Tableau 24 : Principaux résultats d'études ayant porté sur la perception des voyelles par les adultes implantés cochléaires.	113

Tableau 25: Population de l'étude n°3 (entre parenthèses, le nombre de patients au stade tardif lorsque celui-ci est différent du nombre de patients au stade précoce).....	140
Tableau 26: Stimuli de l'étude n°3.....	141
Tableau 27: Identification de voyelles, consonnes et semi-voyelles lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).	142
Tableau 28: Identification des voyelles et des consonnes selon la nasalité lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).	143
Tableau 29: Identification des trois voyelles nasales aux délais post-implant précoces et tardifs, (n=82; MOY±SEM).	144
Tableau 30: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant précoce (<4mois) et tardif (>12 mois)..	145
Tableau 31: Matrice de confusions des voyelles nasales au stade précoce (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).	147
Tableau 32: Matrice de confusions des voyelles nasales au stade tardif (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).	147
Tableau 33: Matrice de confusions des consonnes nasales au stade précoce (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).	148
Tableau 34: Matrice de confusions des consonnes nasales au stade tardif (n=82 adultes implantés cochléaires ; NR=non répondu).	148
Tableau 35: Identification des voyelles nasales en fonction des facteurs démographiques, audiolinguistiques et techniques pour 82 adultes implantés cochléaires à un stade précoce et à un stade tardif. NS :non significatif.	149
Tableau 36: Exemple d'analyse du corpus de la liste de Fournier n°2. La fréquence lexicale est relevée sur la base des sous-titres de films (New et Pallier, lexique.org, 2004).....	151
Tableau 37: Comparaison des scores d'identification des mots dissyllabiques de Fournier contenant une voyelle nasale et de mots n'en contenant pas, au stade précoce (haut) et au stade tardif (bas) pour 80 adultes implantés cochléaires.....	154
Tableau 38: Comparaison des scores d'identification des mots triphonémiques des listes cochléaires de Lafon contenant une voyelle nasale et de mots n'en contenant pas, au stade précoce (haut) et au stade tardif (bas) pour 77 adultes implantés cochléaires.....	155
Tableau 39: Description des paires contrôles, phonologiques et phonétiques de l'étude n°4.	165
Tableau 40: 24 séquences proposées aux auditeurs pour la paire [a] vs. [ã] telles que codées dans le script Praat (Annexe F). a12 correspond à la deuxième occurrence de la locutrice	

n°1, a21 à la première occurrence de la locutrice n°2. Les séquences sont proposées en ordre aléatoire.....	167
Tableau 41: Données démographiques et techniques relatives aux quinze sujets implantés cochléaires de l'étude n°3.	169
Tableau 42: Détection de la voyelle [ã] parmi les voyelles [i], [a] et [ã].	171
Tableau 43: Détection de la voyelle [ɔ̃] parmi les voyelles [i], [ɔ] et [o].....	172
Tableau 44: Caractéristiques spectrales de la voyelle nasale par rapport à la voyelle orale pour les deux locutrices de l'étude perceptive. ↓: diminution de l'intensité pour la voyelle nasale; ↑: augmentation de l'intensité pour la voyelle nasale.....	176
Tableau 45: Valeurs fréquentielles représentatives des pôles spectraux des voyelles nasales du français. Tiré de Calliope (1989), page 90, d'après Lonchamp (1988). F _n = formant nasal; F' _i =formant oral modifié par le couplage nasal.	177
Tableau 46: Différences de F ₀ , intensité et durée entre les voyelles de la locutrice n°1 et celles de la locutrice n°2 pour les « paires phonétiques » (Test Mann-Whitney).	179
Tableau 47: Valeurs moyennes ± erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ɔ̃] et des voyelles orales [ɔ] et [o] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.	179
Tableau 48: Valeurs moyenne ± erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ã] et des voyelles orales [a] et [ɔ] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.	180
Tableau 49: Valeurs moyenne ± erreur moyenne des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ẽ] et des voyelles orales [ɛ] et [a] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°2. En gras, apparaissent les valeurs des pôles des voyelles orales se situant à moins de 100 Hertz du pôle correspondant de la voyelle nasale.	181
Tableau 50: Informations démographiques et techniques relatives aux 10 adultes implantés cochléaires. Recul post-IC en mois; A.A contro. = port d'une aide auditive controlatérale : Lafon= listes cochléaires de Lafon, score exprimé en phonèmes ; MBAA bruit = phrases de la batterie MBAA à un rapport signal/bruit de 10 dB, score exprimé en phrases.	194

Tableau 51 : Détection de différences d'intensité de formant par 10 sujets témoins normo-entendants et 10 sujets implantés cochléaires.	195
Tableau 52 : Données démographiques des 13 adultes implantés du tronc cérébral de l'étude n°6. Q : quotidienne, I :irrégulière. Délai post-implant et nombre d'électrodes quand bilatéral D/G.	209
Tableau 53 : Corrélation entre le score de reconnaissance de la parole, avec l'implant du tronc cérébral, en modalité auditive seule, et le nombre d'électrodes activées (test non paramétrique de Spearman).	211
Tableau 54: Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales, en production, dans le cadre des retards de parole, insuffisance vélaire, dysarthrie et/ou sosies labiaux (n=179 orthophonistes interrogés).	223
Tableau 55: Adaptation de la classification des visèmes vocaliques d'Istria et al. (1982) à partir des résultats d'identification visuelle de voyelles, de 22 adultes sourds, en contexte CV avec C=[ptk] prononcées par deux locutrices.	233
Tableau 56: Corpus de paires minimales de voyelles orale-nasale pour la discrimination auditive du trait de nasalité par personnes implantées cochléaires.	234

XI. Liste des figures

Figure 1: <i>Changement en Chaîne</i> des voyelles nasales du français septentrional. Tiré de Fagyal et al. (2006), page 34.	16
Figure 2: Oscillogramme et spectrogramme du mot « susceptibilité » [syseptibilite]. Elaboré par l'auteur du manuscrit.....	24
Figure 3: Radiogrammes des voyelles du français moderne. Tiré de Fernand Carton (1974), Introduction à la phonétique du français, page 40.	26
Figure 4: <i>Changement en Chaîne</i> des voyelles nasales dans le système vocalique du français parisien (à gauche) et du français canadien (à droite). Un changement s'effectue dans les deux cas mais en sens opposés. Tiré de Fagyal et al. (2006), page 34.....	35
Figure 5 : Matrices de confusions pour la perception visuelle des voyelles : A gauche : données de Mourand-Dornier (1980) auprès de 30 adultes normo-entendants, sur un corpus de 5 listes cochléaires de Lafon, sur enregistrement vidéo d'une locutrice. A droite : données de Gentil (1981), auprès de 51 adolescents sourds, sur un corpus de 19 syllabes CV et CVC, sur enregistrement vidéo de deux locuteurs (1981). Données regroupées par Tseva et Cathiard (1990). Données brutes.....	41
Figure 6 : Identification visuelle de voyelles par 22 sujets sourds et 22 sujets normo-entendants appariés en sexe âge et niveau d'étude (13 voyelles * 3 contextes consonantiques * 2 locutrices).	43
Figure 7 : Identification visuelle de 13 voyelles par 22 adultes sourds et 22 adultes entendants (pour chaque voyelle : 3 contextes consonantiques * 2 locutrices).	44
Figure 8 : Matrice de confusion des 22 sujets sourds pour l'identification visuelle des voyelles dans trois contextes consonantiques prononcés par deux locutrices (13 voyelles * 3 contextes consonantiques [p,t,k] * 2 locutrices * 22 labiolecteurs sourds = 1716 réponses). En noir, les confusions entre les voyelles arrondies et non arrondies. Les stimuli présentés sont dans la colonne de gauche et les réponses des labiolecteurs sur la première ligne.....	45
Figure 9 : Matrice de confusion des 22 sujets normo-entendants pour l'identification visuelle des voyelles dans trois contextes consonantiques prononcés par deux locutrices. (13 voyelles * 3 contextes consonantiques [p,t,k] * 2 locutrices * 22 labiolecteurs normo-entendants = 1716 réponses). En noir, les confusions entre les voyelles arrondies et non arrondies. Les stimuli présentés sont dans la colonne de gauche et les réponses des labiolecteurs sur la première ligne.	45

Figure 10 : Identification visuelle de voyelles en fonction du trait articulatoire chez 22 adultes sourds (MOY±SEM). L'aperture est reconnue à 21% pour les voyelles nasales et 51% pour les voyelles orales.	47
Figure 11 : Identification visuelle de voyelles en fonction du trait articulatoire chez 22 adultes normo-entendants (MOY±SEM). L'aperture est reconnue à 15% pour les voyelles nasales et 38% pour les voyelles orales.	47
Figure 12 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Zerling (1990), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.	48
Figure 13 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Istria et al. (1982), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.	48
Figure 14 : Confusions visuelles de voyelles par 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite), réparties selon la classification de Dumont et Calbour (2002), cases noires : erreurs ne respectant pas la classification.	49
Figure 15 : Classification proposée après adaptation de la classification d'Istria et al. (1982) en regard des résultats de la présente étude auprès des 22 sujets normo-entendants (gauche) et 22 sujets sourds (droite) : la voyelle [e] est déplacée dans la catégorie [a ẽ ɛ] et la voyelle [i] est laissée seule dans une catégorie.	54
Figure 16: Schéma de la théorie Source-Filtre, d'après les travaux de Gunnar Fant (1960). Le signal acoustique de la voyelle est la combinaison du signal source, composé de la fréquence fondamentale F_0 et de ses harmoniques (à gauche, pour une voix d'homme en haut et une voix de femme en bas) et de la fonction de transfert, les résonances naturelles du conduit vocal (au milieu). A droite, le signal acoustique de la voyelle comporte des zones de renforcement d'harmoniques, les formants. Référence : http://www.haskins.yale.edu	59
Figure 17: Triangle vocalique des voyelles du français. Tiré de Calliope (1989), page 82.....	61
Figure 18: Comparaison des valeurs des formants pour les locutrices d'après les données de Calliope (1989, en contexte non uniforme, [pV] ou [pVɤ]), Gendrot et Adda-Decker (2004, parole radiophonique et radiotélévisée en contexte) et Georgetown et al. (2012, en isolé et dans des logatomes de type CVCVCVC). Tiré de Georgetown et al. (2012).	63
Figure 19: Configuration schématique du conduit vocal pour les voyelles nasales et les consonnes nasales bilabiale, apico-alvéolaire et palatal. La barre verticale noire indique	

le lieu d'articulation de la consonne. La flèche indique la direction du flux d'air. Tiré de Clements et al. (2014), page 188.....	64
Figure 20: Spectre de la voyelle [a] dans [dad] (courbe noire) et dans [nan] (courbe rouge). Lorsque la voyelle est nasalisée, on observe un affaiblissement du 3 ^{ème} (526 vs. 527 Hertz ; 26 vs. 20 dB) et du 4 ^{ème} harmonique (711 vs. 710 Hertz ; 37 vs. 30 dB). La locutrice est l'auteur du manuscrit, les mesures ont été prises au cœur de la voyelle, sur 8 périodes consécutives.....	66
Figure 21: Spectrogramme des syllabes [bã] [bê] [bõ]. La première partie de la syllabe est orale et la nasalisation acoustique commence approximativement au trait vertical. Tiré Clements et al. (2014), page 193.....	69
Figure 22: Spectrogrammes de la voyelle [ã] des 10 locutrices de l'étude n°2.....	70
Figure 23: Spectrogrammes de la voyelle [ê] des 10 locutrices de l'étude n°2.....	70
Figure 24: Spectrogrammes de la voyelle [õ] des 10 locutrices de l'étude n°2.....	70
Figure 25: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du premier pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).....	75
Figure 26: Fréquence du premier pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du <i>Changement en Chaine</i> (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$	76
Figure 27: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du deuxième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).....	77
Figure 28: Fréquence du deuxième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du <i>Changement en Chaine</i> (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$	77
Figure 29: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du troisième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).....	78
Figure 30: Fréquence du troisième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique	

du changement en chaine (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$	78
Figure 31: Voyelles orales (en noir) et nasales (en rouge) en fonction de la fréquence du quatrième pôle spectral. MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions).....	79
Figure 32: Fréquence du quatrième pôle spectral des voyelles nasales (en blanc) et des voyelles orales de l'alternance phonologique (en violet) ou de la description phonétique du <i>Changement en Chaine</i> (en vert). MOY±SEM de 40 occurrences par voyelle (10 locutrices * 4 répétitions), ANOVA et tests a posteriori PLSD avec * si $p < 0,05$ et ns si $p > 0,05$	79
Figure 33: Triangle vocalique obtenu à partir des moyennes en Hertz des F_1 et F_2 de 40 occurrences (10 locutrices * 4 répétitions) de chaque voyelle. Pour chaque voyelle, la barre verticale représente l'erreur moyenne du F_1 et la barre horizontale l'erreur moyenne du F_2	80
Figure 34: Triangle vocalique obtenu à partir des moyennes en Bark des F_1 et F_2 de 40 occurrences (10 locutrices * 4 répétitions) de chaque voyelle. Pour chaque voyelle, la barre verticale représente l'erreur moyenne du F_1 et la barre horizontale l'erreur moyenne du F_2	80
Figure 35 : Anatomie du système auditif périphérique. Tiré de Vibert et al. (2011), Neurophysiologie, page 64.....	85
Figure 36 : Section axiale de la cochlée : 1) canal cochléaire contenant de l'endolymphe 2) rampe vestibulaire contenant de la périlymphe 3) rampe tympanique contenant de la périlymphe 4) ganglion cochléaire ou spiral 5) fibres du nerf auditif. Tiré de Pujol et al. (2013) NeurOreille : Voyage au centre de l'audition (www.cochlea.eu).	86
Figure 37: L'organe de Corti. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie p.67, 2011.....	87
Figure 38 : Mouvement des osselets, de la fenêtre ovale, de la membrane basilaire et de la fenêtre ronde lors d'un son. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie, page 65. ...	88
Figure 39 : Illustration de la tonotopie cochléaire. La membrane basilaire, longue de 15 à 35 mm, épaisse d'environ 0,003 mm, est étroite ($\approx 0,04$ mm) et rigide à la base (répond aux hautes fréquences) et large ($\approx 0,36$ mm) et souple à l'apex (répond aux basses fréquences). Tirée de http://www.neuroreille.com	89
Figure 40 : Trajet du message sonore du nerf auditif au cerveau, voie auditive primaire (gauche) et non primaires (droite). Tiré de Pujol et al. (2013) www.cochlea.eu	89

Figure 41: Rôle des informations temporelles d'enveloppe, de périodicité et de structure fine pour la transmission des contrastes linguistiques segmentaux et suprasegmentaux. Tiré de Rosen (1992).	91
Figure 42: Interaction entre nasalité et aperture selon Beddor et al. (1986). L'ajout d'un pic spectral nasal FN entraîne le déplacement du F1 vers F1' et un aplatissement de la proéminence spectrale dans la zone du premier formant avec modification de la perception de l'aperture.....	100
Figure 43 : A droite : Audiométrie tonale représentant une audition normale (en vert). Une surdité de transmission causée par une atteinte de l'appareil de transmission et caractérisée par une élévation des seuils uniquement en conduction aérienne (en rouge). Une surdité neurosensorielle causée par une atteinte de l'appareil de transduction mécano-neurale ou des relais auditifs supérieurs et caractérisée par une élévation des seuils audiométriques à la fois en conduction osseuse et aérienne (en bleu). A gauche : Audiométrie vocale. Tiré de Vibert et al. (2011). Neurophysiologie, page 75.....	103
Figure 44 : Récepteur interne d'implant cochléaire (gauche) et processeur (droite). Document fourni avec courtoisie par la Société Advanced Bionics®	105
Figure 45 : L'implant cochléaire dans le système auditif. Document fourni avec courtoisie par la Société Med-el®	106
Figure 46 : Evolution de l'identification de voyelles de 4 jours à 4 ans post-activation. Par rapport à l'évaluation pré-implant, l'amélioration est significative dès les quatre premiers jours post-activation ainsi qu'entre l'évaluation post-4 jours et post 1 mois, entre post-1 mois et post-6 mois et entre post-6 mois et post-4 ans. Un plateau s'amorce à partir du 6 ^{ème} mois, même si l'amélioration entre le 6 ^{ème} mois et le 48 ^{ème} mois est significative. Tiré de Välimaa et al. (2011, finnois).	117
Figure 47 : Angle d'insertion, en degrés, pour une électrode de 20 mm en fonction de la taille de la cochlée. Pour une cochlée de petite taille (distance A = distance de la fenêtre ronde au mur latéral=8,25 mm), l'angle est d'environ 360 degrés tandis que pour une cochlée de grande taille (distance A=10,25mm) l'angle est de 260 degrés. Tiré de Escudé et al. (2006)	122
Figure 48 : Espaces perceptuels selon <i>Method of adjustment</i> (MOA). Pour chaque voyelle cible, l'auditeur choisit l'exemplaire synthétique (parmi 330 voyelles synthétisées au total) qui lui semble le plus prototypique. Résultat pour la population de 43 normo-entendants anglophones. L'espace perceptif respecte l'espace acoustique tel que l'on	

peut l'observer sur un triangle vocalique de l'anglais. Tiré de Harnsberger et al. (2001).	123
Figure 49 : Espaces perceptuels selon <i>Method of adjustment</i> (MOA). Pour chaque voyelle cible, l'auditeur choisit l'exemplaire synthétique (parmi 330 voyelles synthétisées au total) qui lui semble le plus prototypique. Résultats pour huit adultes implantés cochléaires (CI1 à CI8). Les flèches noires en CI1 indiquent le déplacement attendu de l'espace perceptuel en cas de <i>basalshift</i> . Tiré de Harnsberger et al. (2001).	125
Figure 50 : Simulation d'une répartition fréquentielle alignée sur la fréquence caractéristique réelle induite par l'insertion de l'électrode. Résultats pour l'identification de voyelles. Tiré de Faulkner et al. (2003).	127
Figure 51 : Exemple de la réduction spectrale pour le stimulus « shoo cat ». En haut, le signal original en bande étroite. Puis de haut en bas, les stimuli traités avec 4 (Fréquence de coupure : 800 Hz, 1500 Hz et 2500 Hz), 3 (Fc : 800 et 1500 Hz), 2 (Fc : 1500 Hz) et 1 canal. Tiré de Shannon et al. (1995).	129
Figure 52 : Taux d'identification des consonnes, voyelles et phrases chez huit adultes normo-entendants soumis à des vocodeurs 1, 2, 3 ou 4 canaux reproduisant l'enveloppe temporelle. Tiré de Shannon et al. (1995).	129
Figure 53 : Identification de voyelles en fonction du nombre de canaux (de 1 à 20) par 11 adultes implantés cochléaires. A partir de 7 canaux, il n'y a plus d'amélioration de l'identification de voyelles. Tiré de Fishman et al. (1997).	130
Figure 54 : Comparaison de l'identification de consonnes, voyelles et phrases par 8 normo-entendants en situation de simulation par vocodeur (Shannon et al., 1995 en carrés pleins) et par 11 implantés cochléaires. Tiré de Fishman et al. (1997).	130
Figure 55 : Identification des voyelles dans le silence (gauche) et dans le bruit de SNR+15 dB à SNR 0dB (droite), par 5 normo-entendants soumis à des vocodeurs de 2 à 20 canaux (petits cercles noirs), 19 implantés cochléaires Clarion®/A.B® (symboles blancs) et Cochlear® (symboles noirs). Les normo-entendants tirent bénéfice d'une augmentation du nombre d'électrodes jusqu'à 20. Pour les implantés cochléaires il y a un plateau des performances autour de 7 électrodes. Tiré de Friesen et al. (2001).	131
Figure 56 : Taux de reconnaissance de voyelles, consonnes, mots monosyllabiques et phrases en fonction du nombre d'électrodes (de 4 à 16) et de la vitesse de stimulation (de 600 à 4800 pulse par seconde et par électrode). Tiré de Shannon et al. (2010).	132
Figure 57: Identification de voyelles, consonnes et semi-voyelles lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).	142

Figure 58: Score d'identification comparé des voyelles et des consonnes orales et nasales lors de l'évaluation précoce (< 4 mois) et de l'évaluation tardive (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).....	143
Figure 59: Identification des trois voyelles nasales aux délais post-implant précoce (<4 mois) et tardif (> 12 mois), (n=82; MOY±SEM).....	144
Figure 60: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant précoce (<4mois). gris foncé: voyelles orales, gris clair: consonnes, orange: voyelles nasales.....	146
Figure 61: Identification (MOY±SEM) de 16 consonnes et 11 voyelles par 82 adultes implantés cochléaires à un stade post-implant tardif (>12 mois). gris foncé: voyelles orales, gris clair: consonnes, orange: voyelles nasales.....	146
Figure 62: Identification des voyelles orales, voyelles nasales et consonnes en fonction de l'oreille implantée (n=76 ; MOY±SEM).....	150
Figure 63: Interface du test de perception de l'étude n°4.	168
Figure 64: Détection de la voyelle [ã] parmi les voyelles [i], [a] et [ã]. Test PLSD de Fisher avec * si $p < 0,05$	171
Figure 65: Détection de la voyelle [ẽ] parmi les voyelles [i], [ε] et [a]. Test PLSD de Fisher avec * si $p < 0,05$	171
Figure 66: Détection de la voyelle [ẽ] parmi les voyelles [i], [ε] et [a]	172
Figure 67: Détection de la voyelle [õ] parmi les voyelles [i], [ɔ] et [o]. Test PLSD de Fisher avec * si $p < 0,05$	172
Figure 68: Coupe spectrale de la voyelle [õ] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ɔ] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et pour la locutrice n°2 à droite.	173
Figure 69 : Coupe spectrale de la voyelle [õ] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [o] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et pour la locutrice n°2 à droite.	174
Figure 70: Coupe spectrale de la voyelle [ẽ] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ε] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.....	174
Figure 71: Coupe spectrale de la voyelle [ẽ] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [a] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.....	175
Figure 72: Coupe spectrale de la voyelle [ã] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [a] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.....	175

Figure 73 : Coupe spectrale de la voyelle [ã] (ligne pleine rouge) superposée à celle de la voyelle [ɔ] (tirets noirs) pour la locutrice n° 1 à gauche et la locutrice n°2 à droite.....	176
Figure 74: Oscillogramme et spectrogramme des voyelles nasales [ã], [ẽ] et [õ] (ici transcrites en code sampa [Ã], [~E] et [Õ]) prononcées par la locutrice n°1 (L1) et la locutrice n°2 (L2). La courbe bleue correspond à la fréquence fondamentale et la courbe jaune à l'intensité (lecture des valeurs sur l'échelle à droite du spectrogramme).	178
Figure 75: Pôles spectraux moyens $\pm$ SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [õ] et des voyelles orales [ɔ] et [o] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.	179
Figure 76: Pôles spectraux moyens $\pm$ SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ã] et des voyelles orales [a] et [ɔ] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.	180
Figure 77: Pôles spectraux moyens $\pm$ SEM des 4 exemplaires (2 locutrices * 2 répétitions) de la voyelle nasale [ẽ] et des voyelles orales [ɛ] et [a] proposés dans le test de détection d'intrus de l'étude n°4.	181
Figure 78: Indice de compacité : distance entre le premier et le deuxième pôle spectral pour les voyelles orales et nasales (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle).	182
Figure 79: Représentation F_1/F_2 en Bark (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle)....	182
Figure 80: Distances acoustiques F_1-F_0 et F_2-F_1 en Bark (2 locutrices * 2 répétitions de chaque voyelle).	183
Figure 81: Distances acoustiques F_1-F_0 et F_3-F_2 en Bark. Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.	183
Figure 82: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [o]-[õ]-[ɔ] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.	184
Figure 83: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [ɔ]-[ã]-[a] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.	184
Figure 84: Valeurs en Hertz (abscisses) et en dB SPL (ordonnées) des 10 premiers harmoniques pour les voyelles [a]-[ẽ]-[ɛ] pour la locutrice n°1 (gauche) et la locutrice n°2 (droite). Moyenne de 2 exemplaires de la locutrice pour chaque voyelle.	184
Figure 85: Exemple de stimulus déviant F_{1min} avec F_1 diminué de 8 dB par rapport au stimulus référence. A gauche : coupe spectrale, stimulus déviant en rouge. A droite : spectrogramme, stimulus déviant à droite.	192

Figure 86: Oscillogramme et spectrogramme des stimuli synthétiques de l'étude n°5. Malgré un gain global fixe (overall gain control fixé à 75), on remarque une différence d'amplitude entre certains stimuli. Les stimuli pour lesquels l'amplitude d'un formant a été augmentée apparaissent globalement plus intenses que le stimulus référence et les stimuli pour lesquels un formant a été diminué.	192
Figure 87: Interface du test de perception (Praat). Le sujet entend 4 stimuli. S'ils sont identiques, le sujet clique sur la case « C'est exactement le même son dans les quatre positions ». Si l'un des quatre sons est différent, le sujet clique sur la position du stimulus déviant dans la série.	193
Figure 88: Détection de différence d'intensité des formants par 10 auditeurs normo-entendants et 10 auditeurs implantés cochléaires. La ligne noire correspond au niveau de hasard.	195
Figure 89 : Récepteur et porte électrodes de l'implant auditif du tronc cérébral Cochlear®. Document fourni avec courtoisie par la Société Cochlear®.	202
Figure 90 : Représentation de la position du porte-électrodes et de la tonotopie des noyaux cochléaires. Document fourni avec courtoisie par la Société Cochlear®.	202
Figure 91 : Reconnaissance de la parole en modalités auditive, visuelle et audiovisuelle par 13 adultes devenus sourds utilisateurs d'un implant du tronc cérébral (test non paramétrique apparié de Wilcoxon entre la condition LL et la condition ITC+LL).	210
Figure 92 : Score moyen d'identification des voyelles [i, y, u, e, ø, o, a, ã, õ, ê] en contexte [pV], à voix directe en modalité auditive seule chez 13 adultes utilisateurs d'implant du tronc cérébral à un délai post-implant moyen de 74±18,4 mois à gauche, et 82 adultes utilisateurs d'implant cochléaire à un délai post-implant moyen de 35±0,3 mois.	211
Figure 93 : Corrélation entre le score d'identification de voyelles avec l'implant du tronc cérébral en modalité auditive seule et le nombre d'électrodes activées (rho de Spearman=0,62, p<0,05)	212
Figure 94 : Amélioration apportée par l'implant du tronc cérébral en fonction du score initial en lecture labiale pour 13 adultes implantés du tronc cérébral.	212
Figure 95 : Matrice de confusions en modalité auditive (ITC) : 13 voyelles*10 auditeurs*1 répétition=13 réponses pour chaque voyelle.	213
Figure 96 : Taux d'identification en fonction des traits articulatoires des voyelles en modalité auditive, visuelle et audiovisuelle. La barre horizontale correspond au niveau de hasard.	214
Figure 97: Voyelle orale opposée à la voyelle nasale [ã] en contexte CV pour ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).	220

Figure 98: Voyelle orale opposée à la voyelle nasale [ɛ̃] en contexte CV pour ne cibler que l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).	221
Figure 99: Mot opposé aux mots « monde » et « ronde » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).	221
Figure 100: Mot opposé aux mots « tempe » et « Nantes » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).	222
Figure 101: Mot opposé aux mots « teinte » et « rein » pour cibler spécifiquement l'élévation/abaissement du voile du palais (n=179 orthophonistes interrogés).	222
Figure 102: Trait articulatoire des consonnes les plus difficiles à percevoir auditivement par les adultes implantés cochléaires, d'après 21 orthophonistes pratiquant régulièrement des rééducations post-implant.	223
Figure 103: Trait articulatoire des voyelles les plus difficiles à percevoir auditivement par les adultes implantés cochléaires, d'après 21 orthophonistes pratiquant régulièrement des rééducations post-implant.	224
Figure 104: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɔ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés). ...	224
Figure 105: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɑ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés). ...	225
Figure 106: Voyelle orale travaillée le plus souvent en opposition de la voyelle [ɛ̃] en perception chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes interrogés). ...	225
Figure 107: Voyelles orales travaillées le plus souvent en opposition des voyelles nasales pour la perception du trait de nasalité chez les adultes implantés cochléaires (n=21 orthophonistes expérimentés).	226
Figure 108: Spectrogramme des syllabes [bɑ̃ bɑ̃] [bɛ̃] [bɔ̃]. La première partie de la syllabe est orale et la nasalisation acoustique commence approximativement au trait vertical. Tiré de Clements et al (2014), page 193.	231

**Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds :
Lecture Labiale, Implant cochléaire, Implant du tronc cérébral**

Cette thèse porte sur la perception visuelle, auditive et audiovisuelle des voyelles nasales [ã] (« lent »), [ɔ̃] (« long ») et [ẽ] (« lin ») par des adultes devenus sourds, implantés cochléaires et implantés du tronc cérébral. L'étude sur la perception visuelle des voyelles, auprès de 22 adultes devenus sourds, redéfinit les sosies labiaux des voyelles nasales et propose une mise à jour de la classification des visèmes. Trois études sur l'identification auditive des voyelles nasales auprès de 82, 15 et 10 adultes implantés cochléaires mettent en évidence leur difficulté à reconnaître les trois voyelles nasales, qu'ils perçoivent comme des voyelles orales. Les analyses acoustiques et perceptives suggèrent que les adultes implantés cochléaires s'appuient sur les informations fréquentielles des deux premiers pics spectraux mais négligent les informations d'intensité relative de ces pics. D'après l'étude menée auprès de 13 adultes implantés du tronc cérébral, des informations acoustiques linguistiques sont transmises par l'implant du tronc cérébral mais la fusion entre les informations auditives et visuelles pourrait être optimisée pour l'identification des voyelles. Enfin, une enquête auprès de 179 orthophonistes pointe le besoin d'une information sur la définition phonétique articulatoire actualisée des voyelles [ã] et [ẽ].

Mots clés : phonétique, voyelle, nasalité, lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral

**Auditory, visual and auditory-visual perception of nasal vowels by deafened adults :
Speechreading, Cochlear Implant, Auditory Brainstem Implant**

This thesis focuses on the visual, auditory and auditory-visual perception of french nasal vowels [ã] (« lent »), [ɔ̃] (« long ») and [ẽ] (« lin ») by Cochlear Implant (CI) and Auditory Brainstem Implant (ABI) adults users. The study on visual perception of vowels, with 22 deafened adults, redefines the lip configuration of french nasal vowels and provides an update of the classification of vocalic visual phonemes. Three studies on auditory identification of nasal vowels with 82, 15 and 10 CI users highlight their difficulty in recognizing the three nasal vowels, which they perceive as oral vowels. Acoustic and perceptual analyzes suggest that adults with CI rely on frequency informations of the first two spectral peaks but miss the informations of relative intensity of these peaks. The study with 13 ABI users show that some linguistic acoustic cues are transmitted by the ABI but the fusion of auditory and visual features could be optimized for the identification of vowels. Finally, a survey of 179 Speech Language and Hearing Therapists show the need of an update on the phonetic articulation of french nasal vowels [ã] and [ẽ].

Key words : phonetics, vowel, nasality, speechreading, cochlear implant, auditory brainstem implant

UNIVERSITE SORBONNE NOUVELLE – PARIS 3

Ecole Doctorale 268 : « Langage et langues : description, théorisation, transmission »

Discipline: phonétique

Laboratoire d'Excellence : « Fondements empiriques de la linguistique »

Laboratoire de Phonétique et Phonologie – UMR 7018

Institut de Linguistique et Phonétique Générales et Appliquées, 19 rue des Bernardins, 75005, Paris