

Effet de l'input auditif sur la production de voyelles orales : étude acoustique chez des enfants normo-entendants et des enfants porteurs d'implants cochléaires âgés de 5 à 11 ans

Bénédicte Grandon, Anne Vilain

Gipsa-Lab, Université Grenoble Alpes, 1180 Avenue Centrale, 38040 Grenoble
Cedex 9, France

Benedicte.Grandon@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, Anne.Vilain@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

RESUME

Treize enfants porteurs d'implants cochléaires (CI) et vingt enfants normo-entendants (NH) ont été enregistrés dans deux conditions : répétition de mots avec un modèle audio et production des mêmes mots sans modèle audio. Notre but était d'étudier l'effet de l'input audio sur la hauteur, l'antériorité et la dispersion des dix voyelles orales du français chez ces deux populations d'enfants. Les résultats de notre étude acoustique indiquent que : (1) l'input immédiat n'influence que la hauteur du /a/ chez les enfants NH, (2) les enfants CI produisent des voyelles /y/, /ø/, /œ/ plus postérieures que les enfants NH mais que cette différence diminue à mesure que la durée d'utilisation de l'implant augmente, et (3) la dispersion de /y/, /ø/, /œ/ est plus grande chez les enfants CI que chez les enfants NH.

ABSTRACT

Effect of audio input on vowel production: an acoustic study in 5- to 11-year old normal-hearing and cochlear implanted children

Thirteen cochlear implanted children (CI) and twenty normal-hearing children (NH) were recorded in two conditions: repetition of words with an audio model, and production of the same words without audio model. Our goal was to study the effect of audio input on the height, anteriority and dispersion of the 10 French oral vowels in these two populations of children. The results of our acoustic study show that (1) immediate input only affects height in /a/ in NH children, that (2) CI children have a more posterior realization of /y/, /ø/, /œ/ than NH children, with this difference decreasing with a longer use of the cochlear implant and that (3) the dispersion of /y/, /ø/, /œ/ is bigger in CI children compared to NH children.

MOTS-CLES : voyelles, production, enfants, implant cochléaire.

KEYWORDS: vowels, production, children, cochlear implant.

1 Introduction

L'enjeu principal de l'implant cochléaire est de permettre à son utilisateur de percevoir des sons, en particulier des sons de parole, qu'il ne percevrait pas par ailleurs, pour ensuite pouvoir communiquer de façon intelligible. L'implant cochléaire capte et décompose les sons puis en transmet une reconstitution plus ou moins partielle vers le nerf auditif. L'implant cochléaire

pédiatrique permet ainsi à des enfants sourds pré-linguaux d'acquérir une représentation phonologique des sons de parole à partir des fréquences de sons codées par l'implant. Dans cette étude, nous nous intéressons à la production de voyelles par des enfants sourds pré-linguaux, porteurs d'implants cochléaires, âgés de 6 à 11 ans plusieurs années après implantation. Notre but est de comprendre quelles sont les difficultés persistantes rencontrées par ces enfants en comparant leurs productions à celles d'enfants normo-entendants du même âge.

La plupart des études acoustiques récentes sur la production de voyelles par des enfants implantés s'intéressent à l'évolution avant et dans la première année qui suit l'implantation (par exemple Ertmer, 2001, Hocevar-Bolthezar et al., 2008), avec implant activé ou désactivé (Poissant et al., 2006) ou en comparant leurs productions avec des groupes contrôles d'enfants normo-entendants (Horga, Liker, 2006, Baudonck et al., 2011). Ces études utilisent des techniques différentes d'élicitation de parole : répétition de mots ou de syllabes, lecture, parole spontanée, production de mots sans modèle audio... Ces études sur les productions de voyelles chez des enfants CI font le choix d'une méthode mais aucune ne compare des productions obtenues avec plusieurs méthodes. Les résultats de ces études sont assez disparates, pour les caractéristiques acoustiques étudiées (F1, F2 et taille de l'espace vocalique) : (1) F1 de /u/ plus variable chez les enfants porteurs d'implants que chez les enfants normo-entendants (Baudonck et al., 2011), distinction claire entre les F1 de /i-/u/ par rapport à ceux de /a-æ/ mais étendue plus grande entre /a/ et /æ/ qu'entre /i/ et /u/ (Ertmer, 2001), diminution des F1 de /u/ et /i/ après l'implantation (Hocevar-Bolthezar et al., 2008), (2) F2 de /a/ plus bas chez les enfants porteurs d'implants que chez les enfants normo-entendants, F2 de /i/ et /u/ similaires pour les deux groupes (Baudonck et al., 2011), étendue de F2 similaire pour /i/, /u/ et /æ/ et étendue de F2 de /a/ plus petite que celle de F2 de /i/, /u/ et /æ/ chez l'enfant porteur d'implant de l'étude (Ertmer, 2001), et (3) espace vocalique plus grand chez les enfants porteurs d'implants que chez les enfants normo-entendants (Baudonck et al., 2011) ou de taille comparable chez les deux groupes (Horga, Liker, 2006). Ces résultats disparates peuvent être expliqués à la fois par des méthodologies de collecte et d'analyses des données différentes (avec ou sans normalisation des formants) et par des systèmes vocaliques différents selon les langues (Anglais américain pour Ertmer, 2001 et Poissant et al., 2006, flamand pour Baudonck et al., 2011, slovène pour Hocevar-Bolthezar et al., 2008 et croate pour Horga, Liker, 2001).

A travers une étude acoustique de la production de voyelles, nous cherchons à comprendre quels sont les effets à long-terme de l'utilisation de l'implant cochléaire sur la production de voyelles, en nous intéressant en particulier aux capacités des enfants à utiliser l'input immédiat qu'ils reçoivent pour percevoir et reproduire des voyelles. La perception des voyelles est liée principalement à des caractéristiques acoustiques fréquentielles (formants), et l'implant cochléaire ne reproduit que partiellement l'étendue des fréquences des sons de parole. Nous pouvons donc nous attendre à une production de parole plus variable chez les enfants porteurs d'implants que chez des enfants normo-entendants de même âge, ainsi qu'à une production plus variable lorsque les enfants n'ont pas de modèle audio immédiatement à disposition. Plusieurs études sur la production de voyelles par des adultes porteurs d'implants (étude en allemand de Neumeyer et al., 2010) ou de consonnes par des enfants sourds utilisateurs d'aides auditives traditionnelles (étude en anglais américain de Geffner, 1980) ou d'implants cochléaires (étude en français québécois de Gaul-Bouchard et al., 2007) ont mis en évidence l'effet du degré de visibilité des phonèmes sur la production : des phonèmes (consonnes ou voyelles) dont la production est jugée ambiguë visuellement sont produits avec plus de difficultés par des personnes sourdes utilisant aides auditives traditionnelles ou implants cochléaires. Nous nous attendons donc à obtenir (1) des différences faibles de F1 entre les deux groupes, puisque la hauteur de la voyelle n'est pas une caractéristique visuellement ambiguë, (2) des différences marquées de F2 entre les deux groupes, qui seraient liées à l'ambiguïté visuelle entre

voyelles antérieures arrondies /y/, /ø/, /œ/, et leurs correspondantes postérieures /u/, /o/, /ɔ/, (3) une dispersion plus grande de chaque voyelle chez les enfants porteurs d'implants et (4) une variabilité plus grande pour les deux groupes lorsque la production se fait sans modèle audio immédiatement disponible mais à partir d'une représentation phonologique de la voyelle, cette variabilité pouvant être corrélée à l'âge à l'implantation ou à la durée d'utilisation de l'implant chez les enfants porteurs d'implants cochléaires.

2 Méthode

Pour cette étude, nous avons enregistré les productions de parole de deux groupes d'enfants (normo-entendants (NH) et porteurs d'implants (CI)), dans une tâche de répétition et une tâche de production. Notre but est de comprendre (1) quel est l'impact de l'implant (2) quel est l'effet de l'input immédiat sur la production de parole et (3) quels facteurs influencent la production de parole lorsque les enfants ont une perception partielle des sons.

2.1 Participants

Les participants étaient 20 enfants normo-entendants (NH, âge moyen : 7;8 ans (5;7-10;6 ans)) et 13 enfants sourds pré- ou périlinguistiques porteurs d'implants cochléaires (CI, âge moyen : 8;2 ans (6;6 -10;7 ans), âge moyen du diagnostic de la surdité : 1;6 ans (0;7 ans – 3 ans), âge à l'implantation moyen 3;1 ans (1;6-6;6 ans), durée moyenne d'utilisation de l'implant : 5;2 ans (2;2-9;1 ans)) : 7 enfants étaient porteurs d'un implant et 6 enfants étaient porteurs de deux implants. Les deux groupes d'enfants étaient appariés en âge (t-test : $p=0.3117$). Tous les enfants normo-entendants (20) étaient originaires d'Isère, et les enfants porteurs d'implants étaient originaires d'Isère (5), Rhône (5), Saône-et-Loire (2) et Haute-Savoie (1).

2.2 Tâches

Les enfants ont participé à deux tâches différentes : pour la tâche de répétition, un modèle audio des mots du corpus, produits par une locutrice francophone enregistrée préalablement était présenté avec une image et pour la tâche de production les mêmes images étaient présentées sans modèle audio. Chaque enfant a effectué chaque tâche deux fois, à l'exception d'un enfant CI qui a effectué chaque tâche une seule fois. Les mots étaient présentés en ordre aléatoire, l'ordre des tâches était le même (répétition, puis production) pour tous les enfants, la tâche de répétition servant également d'entraînement à la tâche de production.

2.3 Corpus

Le corpus était constitué d'une liste de 10 mots mono- et bisyllabiques du français (objets, animaux, etc.) connus d'enfants de 5 à 10 ans, comprenant les 10 voyelles orales du français /i, e, ε, y, ø, œ, a, u, o, ɔ/ dans une séquence CV initiale de mot. Le contexte des voyelles-cibles était soit /#b_/ soit /#b_C/ (ex : « bateau », « bœuf »). Les mots enregistrés pour être utilisés comme modèles audio étaient accentués sur la première syllabe, de façon à éliminer dans la mesure du possible une variation de production liée à des différences d'accentuation.

2.4 Enregistrements

Les enregistrements des enfants NH ont tous été réalisés en chambre sourde, au laboratoire Gipsa-Lab. Les enregistrements des enfants CI ont été réalisés au CHU de Grenoble (2 enfants) et à l'hôpital E. Herriot de Lyon (11 enfants). Les enregistrements ont été réalisés avec un enregistreur numérique de type Marantz PMD 670 (mono, fréquence d'échantillonnage 44100 Hz, 16 bits) et un microphone externe, placé à environ 40 cm des enfants.

2.5 Analyses des données

– Traitement des enregistrements

Les enregistrements ont été tout d'abord isolés en mots, puis segmentés et annotés sous Praat (Boersma, Weenink, 2003) : chaque voyelle-cible a été annotée, en utilisant une notation SAMPA (correspondance API-SAMPA: /i, e, ε, y, ø, œ, a, u, o, ɔ/ > /i, e, E, y, 2, 9, a, u, o, O/). Les productions inexploitablees de chaque mot et chaque voyelle ont également été identifiées (mot non-produit ou substitué par un autre mot, dévoisement ou élision de voyelle...), pour pouvoir être exclues des analyses acoustiques. Exemple de production inexploitable : substitution de « bœuf » /bœf/ par « vache » /vaʃ/.

– F1 et F2 : mesures et normalisation

A partir des annotations réalisées, nous avons mesuré le premier et le deuxième formant de chaque voyelle en un point, au centre de la voyelle. Ces mesures ont été réalisées automatiquement, à l'aide d'un script Praat (Boersma, Weenink, 2003), puis vérifiées manuellement, pour s'assurer de leur exactitude.

Les valeurs de F1 et F2 ainsi obtenues ont été normalisées selon la méthode des scores-z de Lobanov (Lobanov, 1971). Notre étude a pour but de comparer la production de voyelles chez deux groupes d'enfants ayant des capacités perceptives différentes, et nous avons donc choisi une méthode de normalisation qui nous permet d'éliminer toute variance liée à l'âge des enfants (résultant d'une différence de taille de conduit vocal), en conservant la variance liée aux capacités perceptives (Grandon et al., 2014). La méthode de Lobanov (Lobanov, 1971) consiste à calculer pour chaque formant une distance par rapport à la moyenne de ce formant pour toutes les voyelles de l'espace vocalique de ce locuteur, puis à diviser cette distance par l'écart-type de ce formant.

– Dispersion de chaque catégorie vocalique

Nous avons calculé, à partir des mesures normalisées de F1 et F2 de chaque occurrence, la distance euclidienne en deux dimensions (dans l'espace F1-F2) de cette occurrence par rapport au centre de la catégorie correspondante, pour chaque groupe et chaque condition (Répétition et Production), avec la formule suivante (avec x : occurrence de la voyelle, gr : groupe, $cond$: condition et i : catégorie vocalique) :

$$dist(x)_i = \sqrt{(F1(x)_i - F1(moy)_{gr, cond, i})^2 + (F2(x)_i - F2(moy)_{gr, cond, i})^2}$$

Cette distance euclidienne nous permet de comparer les dispersions de chaque catégorie vocalique pour chaque groupe et chaque condition. Toutes les analyses de la dispersion ci-après utilisent ces calculs de la distance euclidienne de chaque occurrence produite par rapport au centre de la catégorie vocalique correspondante.

2.6 Analyses statistiques

Tous les graphiques et analyses statistiques ont été réalisés avec le logiciel R (R Development Core Team, 2012). Nous avons dans un premier temps utilisé des modèles linéaires (fonctions *stepAIC* et *lme* sur R), pour étudier l'effet de plusieurs facteurs, seuls ou en interaction (hauteur/antériorité de la voyelle, condition, groupe, âge chronologique, âge à l'implantation, âge auditif) sur les variables à expliquer (F1, F2, dispersion F1-F2 de chaque catégorie vocalique). L'âge auditif correspond à la durée d'utilisation de l'implant par les enfants, c'est à dire la durée entre l'implantation et le moment où ils ont participé à notre étude. Nous avons regroupé les voyelles en quatre degrés de hauteur pour l'étude du F1 : voyelles hautes /i/, /y/, /u/ (/i/, /y/, /u/ en SAMPA sur les figures), voyelles mi-hautes /e/, /ø/, /o/ (/e/, /2/, /o/ en SAMPA), voyelles mi-basses /ɛ/, /œ/, /ɔ/ (/E/, /9/, /O/ en SAMPA), voyelle basse /a/ (/a/ en SAMPA), et en quatre degrés d'antériorité pour l'étude du F2 : voyelles antérieures non-arrondies /i/, /e/, /ɛ/ (/i/, /e/, /E/ en SAMPA), voyelles antérieures arrondies /y/, /ø/, /œ/ (/y/, /2/, /9/ en SAMPA), voyelle centrale /a/ (/a/ en SAMPA) et voyelles postérieures /u/, /o/, /ɔ/ (/u/, /o/, /O/ en SAMPA).

Ensuite, nous avons comparé, pour chaque voyelle, les moyennes des variables (F1, F2, dispersion F1-F2 de chaque voyelle) en fonction du groupe (CI vs NH), puis de la condition (production vs répétition). Pour ces comparaisons multiples, nous utilisons les fonctions *lsmeans* et *multcomp* sur R.

3 Résultats

3.1 F1

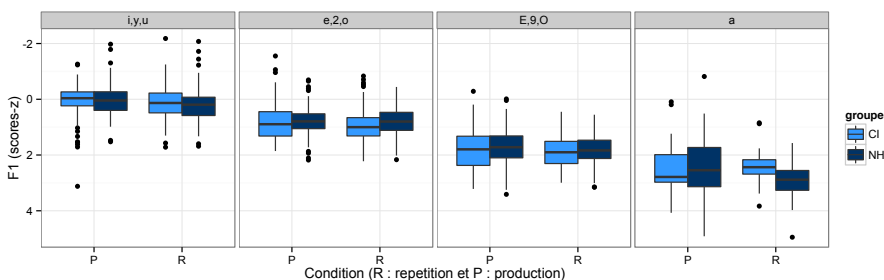


FIGURE 1: valeurs de F1 par groupe (enfants CI et NH), par condition (production et répétition), et par degré de hauteur de la voyelle

– Effets de la condition et du groupe sur la réalisation de la hauteur des voyelles

Les tests statistiques (modèle linéaire à effets mixtes, avec un effet aléatoire du sujet) indiquent un effet de la hauteur ($p < .0001$), de la condition ($p < .0001$), ainsi qu'un effet de l'interaction groupe:hauteur sur la réalisation du F1 ($p = 0.0473$). Les deux groupes d'enfants réalisent la hauteur différemment (les voyelles /i/, /y/ et /u/ sont plus hautes chez les enfants CI, les voyelles /e/, /ø/, /o/ et /i/, /e/, /ɛ/ sont plus basses chez les enfants CI que chez les enfants NH dans les deux conditions, le /a/ des enfants CI est plus bas que celui des enfants NH en production et plus haut en répétition) mais le test de comparaisons multiples indique que cette différence de hauteur entre les deux groupes n'est significative que pour la voyelle /a/, en répétition ($p = .0409$). De même, la condition (répétition vs production) n'influence que la production de la voyelle /a/, chez les enfants NH ($p = .0012$).

– Facteurs influençant la réalisation de la hauteur des voyelles

Les tests statistiques indiquent qu'il n'y a pas d'effet de l'âge chronologique sur le F1 des enfants NH ($p > .05$), ce qui était attendu en raison du choix d'une méthode de normalisation qui élimine la variance liée à l'âge chronologique.

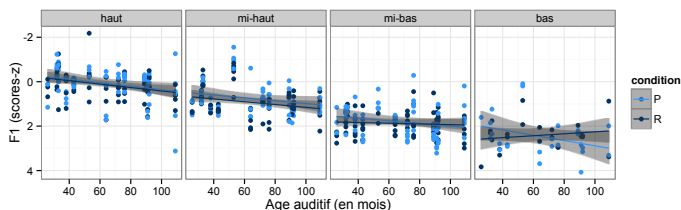


FIGURE 2 : F1 en fonction de l'âge auditif par condition et par degré de hauteur (enfants CI)

Chez les enfants CI, il n'y a pas d'effet global de l'âge chronologique sur le F1 ($p > .05$), mais un effet de l'interaction voyelle : âge auditif ($p = .0064$) et de l'interaction voyelle : âge à l'implantation ($p = .0295$) sur le F1. Ces effets ne sont pas les mêmes pour tous les degrés de hauteur. Pour les voyelles hautes /i/, /y/ et /u/, il y a un effet de l'âge d'audition sur le F1 ($p = .0325$), qui correspond à une augmentation du F1 et donc un abaissement de la hauteur des voyelles hautes. Pour les voyelles mi-hautes /e/, /ø/, /o/, nous observons un effet de la condition ($p = .0147$) ainsi que de l'interaction condition : âge à l'implantation ($p = .0034$) sur le F1, qui correspond à un abaissement des voyelles mi-hautes, qui est plus marqué en répétition. Pour les voyelles mi-basses /ɛ/, /œ/, /ɔ/, nous n'observons pas d'effet de l'âge à l'implantation ni de l'âge auditif sur le F1. Pour la voyelle /a/, nous observons un effet de l'interaction condition : âge auditif ($p = .0218$) sur le F1, ce qui correspond à un abaissement de la voyelle /a/ lors de la tâche de répétition.

3.2 F2

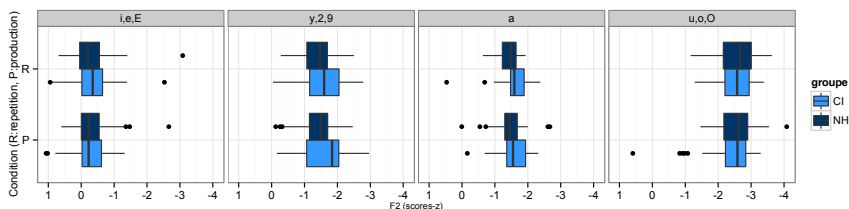


FIGURE 3 : valeurs de F2 par groupe (enfants CI et NH), par condition (production et répétition), et par degré d'antériorité de la voyelle

– Effets de la condition et du groupe sur la réalisation de l'antériorité des voyelles

Les tests statistiques (modèle linéaire à effets mixtes, avec un effet aléatoire du sujet) indiquent un effet de l'antériorité ($p < .0001$) et de l'interaction groupe:antériorité ($p = .0005$) sur la réalisation du F2 : la figure 3 indique que les enfants CI produisent les voyelles antérieures arrondies /y/, /ø/, /œ/ et la voyelle /a/ de façon plus postérieure que les enfants NH. Les tests de comparaisons multiples montrent que cette différence constatée graphiquement n'est pas significative pour /a/ ($p = .38468$) mais elle l'est pour le groupe des voyelles antérieures arrondies /y/, /ø/, /œ/ ($p = .00908$). A la différence des résultats sur le F1, la condition n'a pas d'effet sur la réalisation du F2.

– Facteurs influençant la réalisation de l'antériorité des voyelles

Comme pour le F1, il n'y a pas d'effet de l'âge chronologique sur le F2 des enfants NH ($p > .05$), en raison de la méthode de normalisation choisie.

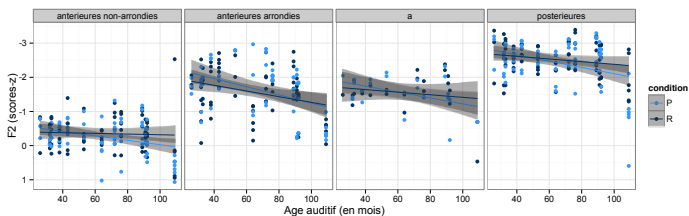


FIGURE 4 : F2 en fonction de l'âge auditif par condition et par degré d'antériorité (enfants CI)

Les tests statistiques ne montrent pas d'effet de l'âge chronologique, de l'âge auditif ni de l'âge à l'implantation sur le F2 des voyelles antérieures non-arrondies, les voyelles postérieures et la voyelle /a/. Cependant, nous observons un effet de l'âge auditif sur le F2 des voyelles antérieures arrondies ($p = .0343$) : le F2 augmente avec l'âge auditif, ce qui signifie que plus les enfants CI ont une utilisation longue de l'implant, plus le F2 de leurs voyelles /y/, /ø/, /œ/ se rapproche du F2 des mêmes voyelles produites par les enfants NH.

3.3 Dispersion de chaque catégorie vocalique

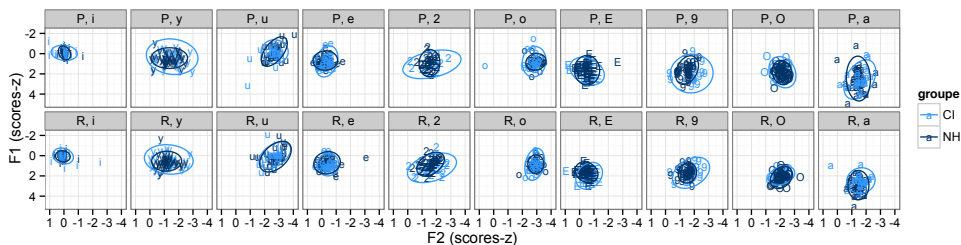


FIGURE 5 : représentation F1-F2 de chaque catégorie vocalique, par groupe (enfants CI et NH), par condition (production et répétition), ellipses à 95% de confiance.

Nous observons, sur la figure 5 des distributions spatiales différentes de certaines catégories vocaliques, selon les groupes et les conditions. Il semble que les catégories soient réalisées avec plus de variabilité lorsque les enfants n'avaient pas de modèle audio (tâche de production). Par ailleurs les voyelles produites par les enfants CI semblent avoir une plus grande dispersion que celles des enfants NH. Ces différences sont plus marquées pour certaines voyelles.

Les tests statistiques que nous avons effectués sur la dispersion des catégories vocaliques confirment certaines de ces observations : il y a une différence significative entre les enfants CI et NH pour les voyelles antérieures arrondies ($p < .0001$) : ces voyelles produites par les enfants CI ont une plus grande dispersion dans l'espace. Les productions des autres voyelles (antérieures non-arrondies, postérieures et voyelles /a/) ne sont pas significativement différentes entre les deux groupes., l'observation graphique de légères différences de dispersion entre les deux conditions ne se confirme pas statistiquement, et ce, pour toutes les voyelles.

– Facteurs influençant la dispersion des catégories vocaliques

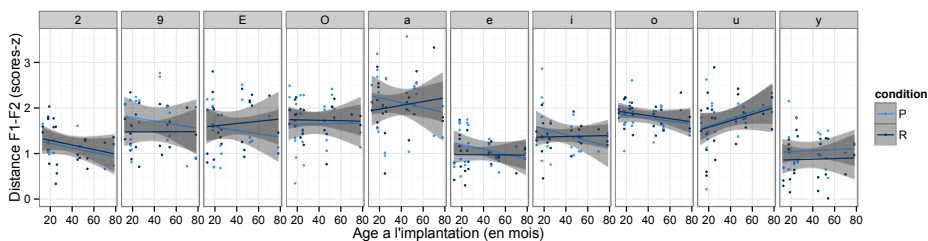


FIGURE 6 : dispersion des catégories vocaliques, en fonction de l'âge à l'implantation par condition et par catégorie (enfants CI)

Les tests statistiques montrent qu'il n'y a pas d'effet de l'âge chronologique sur la dispersion des catégories vocaliques. Seule la voyelle /u/ est affectée par une interaction condition : âge chronologique ($p=.018$) : la dispersion de la catégorie augmente légèrement chez les enfants NH mais diminue fortement chez les enfants CI en fonction de l'âge chronologique lors de la tâche de répétition. Par ailleurs, chez les CI, l'âge auditif n'a pas d'effet sur la dispersion des catégories vocaliques et seule la dispersion des voyelles /y/ et /o/ est affectée par l'âge à l'implantation : pour /y/, l'interaction condition : âge à l'implantation a un effet significatif sur la dispersion ($p=.0439$) et pour /o/, l'âge à l'implantation a un effet significatif sur la dispersion de la catégorie ($p=.0320$) : plus l'implantation est tardive, moins la dispersion de la voyelle /o/ est grande, alors que la voyelle /y/ est nettement plus dispersée en production qu'en répétition, et légèrement plus dispersée lorsque l'implantation est tardive.

4 Discussion/Conclusion

A travers cette étude acoustique, nous avons mis en évidence que (1) l'implantation permet aux enfants CI de percevoir certaines caractéristiques acoustiques des voyelles qui leur permettent ensuite de produire des voyelles globalement comparables en terme de hauteur, d'antériorité et de dispersion à celles d'enfants normo-entendants du même âge, sauf pour ce qui concerne la série des voyelles antérieures arrondies : les enfants CI ont tendance à produire ces voyelles de façon plus postérieure et avec plus de variabilité que les enfants NH. Une hypothèse explicative serait que ces voyelles sont mal distinguées phonologiquement chez les enfants CI des voyelles postérieures arrondies, en raison des similitudes en termes d'informations visuelles (2) l'input immédiat n'a que peu d'influence sur les productions de voyelles par les deux groupes, la voyelle /a/ étant la seule voyelle pour laquelle une différence de hauteur entre les deux conditions (production et répétition) est observée et statistiquement significative. Ceci semble indiquer que les patrons de production des catégories vocaliques sont bien stabilisés, autant chez les CI que les NH, dès l'âge de 5 ans, et (3) les différences observées au niveau de l'antériorité des voyelles antérieures arrondies ne semblent pas être dues à l'âge d'implantation mais à la durée d'utilisation de l'implant : la tendance des enfants CI à produire les voyelles antérieures arrondies de façon plus postérieure que les enfants NH tend à diminuer lorsque la durée d'utilisation de l'implant augmente.

Remerciements

Ce projet est financé par une Allocation Doctorale de Recherche de la Région Rhône-Alpes (projet ARC2, porté par A. Vilain et H. Loevenbruck). Nous remercions les Professeurs S. Schmerber (CHU Grenoble) et E. Truy (Hopital E. Herriot de Lyon), ainsi que les orthophonistes du CHU de

Grenoble et la coordinatrice du centre d'implantation de l'Hôpital E. Herriot de Lyon. Nous remercions également tous les enfants et leurs parents.

Références

- Baudonck N., Van Lierde K., Dhooge I., Corthals P. (2011). A comparison of vowel productions in prelingually deaf children using cochlear implants, severe hearing-impaired children using conventional hearing aids and normal-hearing children. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 63(3), 154-160.
- Boersma P., Weenink D. (2013). Praat: doing phonetics by computer (Version 5.3.80)
- Ertmer D. J. (2001). Emergence of a vowel system in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44(4), 803-813.
- Gaul-Bouchard M. E., Le Normand M. T., Cohen H. (2007). Production of consonants by prelinguistically deaf children with cochlear implants. *Clinical linguistics & phonetics*, 21(11-12), 875-884.
- Geffner D. (1980). Feature characteristics of spontaneous speech production in young deaf children. *Journal of Communication Disorders*, 13(6), 443-454.
- Grandon B., Vilain A., Løevenbruck H., Schmerber S. (2014). Vowel spaces in French children wearing cochlear implants. Actes de : *LSCD 2014 - Workshop on Late Stages in Speech and Communication Development*, 93-95.
- Hocevar-Boltezar I., Boltezar M., Zargi M. (2008). The influence of cochlear implantation on vowel articulation. *Wiener klinische Wochenschrift*, 120(7-8), 228-233.
- Horga D., Liker M. (2006). Voice and pronunciation of cochlear implant speakers. *Clinical linguistics & phonetics*, 20(2-3), 211-217.
- Lobanov B. M. (1971). Classification of Russian vowels spoken by different speakers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2B), 606-608.
- Neumeyer V., Harrington, J., Draxler, C. (2010). An acoustic analysis of the vowel space in young and old cochlear-implant speakers. *Clinical linguistics & phonetics*, 24(9), 734-741.
- Poissant S. F., Peters K. A., Robb M. P. (2006). Acoustic and perceptual appraisal of speech production in pediatric cochlear implant users. *International journal of pediatric otorhinolaryngology*, 70(7), 1195-1203.
- R Development Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R, Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.Rproject.org/>.