



HAL
open science

Production de parole chez l'enfant sourd : bénéfices de l'exposition à la Langue française Parlée Complétée associée à l'implantation cochléaire

Laura Machart

► To cite this version:

Laura Machart. Production de parole chez l'enfant sourd : bénéfices de l'exposition à la Langue française Parlée Complétée associée à l'implantation cochléaire. Linguistique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALS030 . tel-03959138

HAL Id: tel-03959138

<https://theses.hal.science/tel-03959138>

Submitted on 27 Jan 2023

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : ISCE – Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

Spécialité : PCN – Sciences cognitives, psychologie et neurocognition

Unité de recherche : Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (LPNC) et Laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique (GIPSA-lab)

Production de parole chez l'enfant sourd : bénéfices de l'exposition à la Langue française Parlée Complétée associée à l'implantation cochléaire

Speech production in deaf children: benefits of exposure to French Cued Speech in combination with cochlear implantation

Présentée par :

Laura MACHART

Direction de thèse :

Hélène LÖEVENBRUCK

Directrice de recherche, CNRS Délégation Alpes

Anne VILAIN

Maîtresse de conférence, Université Grenoble Alpes

Directrice de thèse

Co-encadrante de thèse

Rapporteurs :

Cécile COLIN

Professeure, Université Libre de Bruxelles

Marija TABAIN

Professeure, La Trobe University

Thèse soutenue publiquement le **12 octobre 2022**, devant le jury composé de :

Hélène LÖEVENBRUCK

Directrice de recherche, CNRS Délégation Alpes

Cécile COLIN

Professeure, Université Libre de Bruxelles

Marija TABAIN

Professeure, La Trobe University

Jacqueline LEYBAERT

Professeure émérite, Université Libre de Bruxelles

Pascal PERRIER

Professeur, Université Grenoble Alpes

Jean-Luc SCHWARTZ

Directeur de recherche, CNRS Délégation Alpes

Directrice de thèse

Rapporteure

Rapporteure

Examinatrice

Examinateur

Examinateur et Président

Invités :

Michel FRANÇOIS

Parent et administrateur de l'Association nationale pour la Langue française Parlée Complétée

Richard NOMBALLAIS

Enseignant spécialisé et chef de service du Pôle Transversal, INJS de Chambéry



*La sagesse, c'est d'avoir des rêves suffisamment grands
pour ne pas les perdre de vue lorsqu'on les poursuit.*

Oscar Wilde

RESUME

Mots clés : implant cochléaire, Langue française Parlée Complétée, production de parole chez l'enfant, représentations phonologiques, données acoustiques, données articulatoires

Bien que l'implant cochléaire (CI) améliore la perception de la parole chez les enfants sourds, la perception de certains traits acoustiques peut être altérée, le développement du langage oral impacté et les compétences phonologiques limitées. En complément des informations phonologiques manquantes, les gestes manuels de la Langue française Parlée Complétée (LfPC) peuvent être utilisés simultanément à la parole. Plusieurs études ont montré les apports de l'exposition à la LfPC sur la perception de parole et le développement phonologique en langue vocale de l'enfant sourd. Toutefois, peu d'études ont exploré le lien entre CI et LfPC. Cette thèse examine les bénéfices à long terme de l'exposition à la LfPC sur le développement phonologique des enfants avec CI. Notre hypothèse générale est que l'exposition à la LfPC améliore la perception de parole, ce qui favorise le développement des représentations phonologiques chez l'enfant avec CI. Nous supposons que les compétences phonologiques développées en perception, par le biais de l'exposition à la LfPC, se transfèrent à la production de parole, ce qui améliorerait la production de phonèmes. Pour caractériser cette amélioration, des données acoustiques et articulatoires ont été recueillies.

Dans un premier temps, la production de parole de 14 enfants avec CI et de 71 enfants normo-entendants, âgés de 60 à 140 mois, a été analysée à l'aide de la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES, qui est conçue pour tester la précision de la production spontanée (non imitative) de phonèmes dans un contexte de mots isolés. L'analyse de ces données a permis de montrer une production de phonèmes plus précise chez les enfants avec CI lorsqu'ils ont développé un niveau élevé de décodage de la LfPC, par rapport aux enfants dont les compétences de décodage sont plus limitées. Comme établi, nos résultats indiquent que l'implantation précoce facilite le développement des compétences phonologiques mais que la production de certains traits phonologiques, tels que le voisement, la nasalité, le mode ou le lieu d'articulation, restent dégradés même lors d'une implantation précoce. Par ailleurs, nos analyses révèlent qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC réduit le nombre d'erreurs sur ces traits phonologiques : nos données

suggèrent qu'une exposition adéquate à la LfPC améliore la production du voisement, du contraste de nasalité ainsi que du mode et du lieu d'articulation.

Dans un second temps, les productions acoustiques ainsi que les gestes articulatoires, recueillis par échographie linguale, de neuf enfants avec CI et exposés à la LfPC et de dix enfants normo-entendants, âgés de 51 à 137 mois, ont été étudiées. Les résultats suggèrent que l'exposition à la LfPC permet aux enfants avec CI de produire les gestes articulatoires linguaux de la même façon que leurs pairs normo-entendants, en particulier lorsqu'ils ont développé des compétences élevées de décodage de la LfPC. Les données montrent également qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC favorise la distinction de lieu d'articulation des plosives et des fricatives chez l'enfant avec CI.

Comme l'ont soutenu plusieurs équipes de recherche, l'exposition à la LfPC est fonctionnellement bénéfique pour la perception de parole puisqu'elle fournit un accès visuel à tous les phonèmes du français. Les résultats de nos deux études mettent en avant ses effets à plus long terme sur la production de parole, probablement expliqués par le fait qu'un meilleur accès perceptif fournit de meilleures représentations phonologiques.

Enfin, ce travail de thèse fournit deux corpus de données de référence sur la production de parole d'enfants au développement typique et d'enfants avec CI : un ensemble de données phonétiques ainsi qu'un ensemble de données acoustiques et articulatoires. Ces données peuvent informer la pratique clinique en fournissant des pistes d'intervention orthophonique pour faciliter la prise en charge de l'enfant avec CI mais également favoriser les interactions quotidiennes à domicile en confirmant le rôle crucial des repères visuels pour un développement optimal de la production et du traitement de la parole.

ABSTRACT

Key words: cochlear implants, French Cued Speech, speech production in children, phonological representations, acoustic data, articulatory data

Although cochlear implant (CI) improves speech perception in children with hearing impairment, the perception of some acoustic features may be impaired and oral language development impacted, with limited phonological skills. In order to supplement missing phonological information, the manual gestures of French Cued Speech or Langue française Parlée Complétée (LfPC) can be used simultaneously with speech. Several studies have shown the benefits of exposure to cued speech on speech perception and phonological development of the child with hearing impairment. However, few studies have examined the link between cochlear implantation and cued speech. This thesis proposes to investigate the long-term benefits of exposure to Cued French (CF) for the phonological development of children with cochlear implants. Our general hypothesis is that exposure to CF improves speech perception, which promotes the development of phonological representations in children with CI. We hypothesize that the phonological skills developed in perception, through exposure to CF, transfer to speech production, which would improve phoneme production. This improvement was demonstrated using acoustic data (picture naming task) and then characterized using articulatory data.

First, the speech production of fourteen children with cochlear implants and 71 children with normal hearing, aged 60-140 months, was analyzed using the EULALIES picture naming task, which is designed to test the accuracy of spontaneous (non-imitative) phoneme production in an isolated word context. Analysis of these data by expert phoneticians allowed us to show a significant improvement in the speech production abilities of eight children with cochlear implants when they developed a high level of CF reading skills, compared to six children who had little or no CF reading skills. Like many studies, our results indicate that early implantation facilitates the development of phonological skills, but that the production of some phonetic features, such as voicing and nasality contrasts and mode and place of articulation, remain impaired even in children with early implantation. On the other hand, our analyses show that a high level of CF reading skills reduces the number of errors on these phonetic features: our data highlight

that adequate exposure to CF seems to improve the production of voicing, nasality contrast and mode and place of articulation.

In a second step, the acoustic productions and articulatory gestures, collected by lingual ultrasound, of nine children with cochlear implants exposed to CF and ten children, aged 51-137 months, were studied. The results suggest that exposure to CF enables children with cochlear implants to produce articulatory language gestures in the same way as their normal hearing peers, especially when they have developed high CF reading skills. Our data also demonstrate that a high level of CF reading skills promotes place of articulation distinction in plosives and fricatives in children with CI.

As several research teams have argued, exposure to CF is functionally beneficial during communication as it provides visual access to all French phonemes. Furthermore, the results of these two studies highlight its longer-term effects on speech production, probably explained by the fact that better perceptual access provides better phonological representations.

This thesis also provides two sets of baseline data on the speech production of typically developing children and children with cochlear implants: a phonetic data set and an acoustic and articulatory data set. These data can inform clinical practice by providing guidance for speech and language therapy interventions to facilitate the care of children with cochlear implants, but also to support daily interactions at home by confirming the crucial role of visual cues for optimal development of speech production and processing.

FINANCEMENTS

Cette thèse a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet HEARCOG porté par Pascal Barone [ANR-17-CE28-0006].

Cette thèse a également bénéficié d'un financement Initiative D'Excellence (IDEX) de l'Université Grenoble Alpes dans le cadre d'un séjour de recherche de quatre mois dans le Laboratoire de Phonétique de l'UQAM à Montréal, sous la supervision de la Professeure Lucie Ménard.

Une bourse permettant de financer des contrats de vacation pour soutenir une partie du recueil et du traitement des données de cette thèse a été allouée par le Pôle Grenoble Cognition.

Enfin, une partie du recueil et du traitement des données a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet EULALIES porté par Anne Vilain [ANR-19-CE28-0016].

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail de thèse et je tiens ici à les remercier très sincèrement.

Tout d'abord, je souhaite remercier très chaleureusement les Docteur·e·s Cécile Colin, Jacqueline Leybaert, Pascal Perrier, Jean-Luc Schwartz et Marija Tabain d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je suis honorée de vous compter parmi les membres de mon jury de thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à Messieurs Michel François et Richard Nombalais, membres invités de mon jury de thèse. Je vous remercie vivement d'avoir accepté cette invitation et de permettre à mes travaux d'être mis en lien avec les acteurs directs de la surdité, par le biais de votre expertise professionnelle et personnelle.

Mes prochains remerciements s'adressent à mes directrices de thèse, Anne et Hélène. Merci infiniment de m'avoir accompagnée et formée pendant ces quatre années tout en me laissant l'autonomie dont j'avais besoin. Merci pour votre confiance, votre enthousiasme et votre encadrement tout au long de ce travail, particulièrement les dernières semaines. Merci, aussi, de m'avoir encouragée à traverser l'Atlantique à la rencontre de Lucie. Il est évident que cette thèse n'aurait pas été la même sans cette expérience professionnelle et humaine qui a fait émerger de nouvelles collaborations très enrichissantes. Merci, enfin, d'avoir si bien accueilli ma grossesse. Je ne vous remercierai jamais assez pour votre bienveillance, votre soutien et votre joie non dissimulée suite à cette annonce. Je me réjouis de poursuivre les travaux que nous avons entamés ensemble.

Un immense merci à Lucie Ménard de m'avoir accueillie dans son laboratoire pendant quatre mois. Ta rigueur, ton enthousiasme et ta bienveillance m'ont enrichie sur tous les plans. Merci de m'avoir fait confiance avec l'école St Jude et de m'avoir, ainsi, permis de rencontrer une équipe de professionnelles incroyable. Je suis impatiente de poursuivre mon travail avec toi.

A huge thank you to Mark Tiede for his patience, his availability but also his pedagogy with the matlab scripts. I thought I would never make it but thanks to your explanations my articulatory data was processed in record time.

Merci aussi à Silvain pour sa pédagogie, sa patience, les nombreux Zoom pour décortiquer toutes les données de l'article *picture naming*, pour toutes ces matrices que je maîtrise sur le bout des doigts maintenant. Merci d'avoir boosté ma confiance dans les moments moins faciles. Nos chemins ne se sont jamais croisés en Alsace mais je suis ravie qu'on se soit rencontrés sur la route grenobloise.

Un grand merci également à Yvan Rose pour sa disponibilité, sa réactivité et ses nombreuses explications et astuces avec le logiciel PHON.

Ce travail n'aurait, bien évidemment, jamais été le même sans la participation des enfants ainsi que de leurs familles. Je tiens à les remercier du fond du cœur pour leur investissement. Merci pour vos sourires, vos encouragements et votre patience. Merci, également, à tous les établissements scolaires, en France et au Québec, pour leur accueil et leur collaboration dans ce projet. Un merci tout particulier à Kathleen Bull, ainsi qu'à toutes les orthophonistes de l'école St-Jude à Montréal pour leur accueil et leur intérêt pour mes travaux. J'espère sincèrement que nos chemins se croiseront à nouveau.

Un grand merci, par ailleurs, à l'ALPC de m'avoir permis d'enregistrer un certain nombre d'enfants durant les stages d'été. Cela a été un plaisir pour moi de vous retrouver chaque année, d'échanger à bâtons rompus, de coder avec vous, mais aussi de coder pour vous. Merci pour tout ce que vous faites pour la LfPC.

Merci, bien entendu, à Clémence Bayard de m'avoir embarquée avec elle à mon premier stage d'été et de m'avoir fait découvrir la recherche sur la LfPC. Merci, aussi, de m'avoir fait confiance pour présenter une partie de tes travaux à de nombreuses reprises. Et, enfin, merci de m'avoir présentée à Jean-Luc qui n'a pas hésité une seconde à souffler mon nom à Anne et Hélène.

Je tiens à adresser un merci spécial à Emmanuelle et Jérôme Schultz sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci Emmanuelle de m'avoir plongée dans le grand bain de la LfPC, de m'avoir formée et de m'avoir fait confiance pour garder Aimé et « me faire la main ». Votre investissement sans faille est une source d'inspiration pour moi. J'espère profondément que ce travail vous permettra de trouver encore plus de soutien pour faire valoir vos choix dans l'accompagnement de vos enfants.

Merci bien entendu à tous les élèves que j'ai eu la chance d'accompagner durant ces quatre années de codeuse en LfPC. Ce travail de thèse est le fruit de toutes ces heures passées auprès de vous. Merci, également, à mes anciennes collègues du SSEFS 38 – PEP SRA, la « Team Force », j'ai énormément de chance de vous avoir rencontrées.

Merci aux étudiantes de Sciences du langage qui ont participé au traitement des données du projet EULALIES. Clin d'œil particulier à Clarisse, merci pour ta rigueur et ton efficacité, c'était un plaisir d'échanger avec toi durant toutes ces années.

J'adresse un immense merci à tous mes collègues doctorants du LPNC. Ces quatre années à vos côtés ont été d'une richesse énorme. La thèse n'est pas une étape facile mais il est évident que votre présence a très largement contribué à l'adoucir ! Un merci particulier à Brice, pour tous ces échanges qui m'ont encouragée à procrastiner de temps en temps et pour tes conseils toujours utiles et pertinents. Lucrèce, ma partenaire de galère. Je suis si fière de toi et de tout le travail que tu as accompli. Je suis admirative de ta ténacité et de ton courage. Merci pour tout. Je te souhaite énormément de bonheur et d'épanouissement pour ta suite. Tu vas beaucoup me manquer. Lucie, merci d'avoir amené un peu plus de « surdité » au labo. Je suis ravie de poursuivre un bout de chemin avec toi dans le cadre de nos travaux communs. Merci infiniment pour ton soutien sans faille les dernières semaines. Merci aussi à Élise, avec qui j'ai partagé mon séjour de quatre mois à Montréal. La salle de sport, les *avocado toasts*, le spectacle d'Halloween complètement WTF, New-York, Boston, le condo, le concert de Céline, et j'en passe...quelle aventure ! Merci énormément pour tout ce qu'on a partagé et pour nos discussions toujours très inspirantes.

Merci mille fois Camille, Camille et Cristina, pour votre accueil au Laboratoire de Phonétique de l'UQAM et pour toutes nos discussions passionnantes.

Un grand merci à tous mes amis, ils se reconnaîtront certainement. Les randos bivouac, les sorties vélo, les restos, les raclettes, les mercredis au bar (*long time no see...*) et autres joyusetés. Vous avez toutes et tous été une bouffée d'oxygène dans ce quotidien à mille à l'heure. Pensée particulière pour Amélie, Éléna, Elora et Manon, j'ai beaucoup de chance de vous compter parmi mes amies.

Cécile et Caro, mes copines « vintage ». Merci, déjà, de m'avoir prêté vos enfants pour me faire la main avec les passations de mes expériences. Merci, surtout, pour toutes ces soirées couture, pour nos weekends à gauche à droite, pour ces heures et ces heures de bavardages...j'ai une chance incroyable de vous avoir et je vous suis extrêmement reconnaissante de prendre soin de moi comme vous le faites.

Bien évidemment, merci du fond du cœur à ma famille, belle-famille incluse, pour leur soutien énorme depuis tant d'années. Plus particulièrement, merci Eve et Raoul pour tous ces moments partagés autour d'un morceau de fromage et d'une bière. Merci François pour les bouffées iodées au Brusco, notre petit coin de paradis. Merci Inès pour ton admiration sans faille. Merci à mon Papa de m'avoir transmis sa ténacité et son perfectionnisme. Merci pour tout à ma sœur, Julie ainsi qu'à ma Maman. Pour vos relectures bien sûr mais aussi – et surtout – pour notre lien unique dont la pudeur n'enlève rien à la valeur. Merci Julie d'avoir illustré ce travail de ta plume d'artiste.

Adrien, mon pilier. Les mots me manquent pour exprimer la gratitude que j'ai vis-à-vis de toi. Merci de me soutenir depuis toutes ces années, de me porter toujours plus loin et de croire en moi bien plus que je ne le fais moi-même. Je mesure chaque jour la chance que j'ai de t'avoir comme partenaire de vie. Merci d'être toi.

Enfin, Théodore, mon Théodoux. Quel bonheur de te dédier ces quelques lignes. Merci d'illuminer notre vie de tes milliers de sourires. Tu inondes mon cœur d'un amour indescriptible. Je suis si fière d'être ta Maman. Je te souhaite du plus profond de mon cœur de toujours pouvoir emprunter le chemin de tes rêves et je te fais la promesse de toujours être à tes côtés, quels que soient les détours que tu rencontreras.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
ABSTRACT	4
FINANCEMENTS	7
REMERCIEMENTS	9
TABLE DES MATIERES	14
LISTE DES FIGURES	18
LISTE DES TABLEAUX	22
LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS	23
INTRODUCTION	25
SECTION 1: PROBLEMATIQUE	30
CH1. SURDITE, IMPLANT COCHLEAIRE ET DEVELOPPEMENT DE LA COMMUNICATION EN LANGUE VOCALE	31
1.1. FONCTIONNEMENT TYPIQUE DU SYSTEME AUDITIF.....	31
1.2. FONCTIONNEMENT ATYPIQUE DU SYSTEME AUDITIF : CAS DE LA SURDITE	33
1.2.1. <i>Types de surdité</i>	34
1.2.2. <i>Degrés de surdité</i>	35
1.2.3. <i>Dispositifs de remédiation auditive</i>	35
1.3. L'IMPLANT COCHLEAIRE	37
1.3.1. <i>Description et fonctionnement</i>	37
1.3.2. <i>Difficultés et spécificités de la perception et de la production de parole chez l'enfant porteur d'implants cochléaires</i>	39
1.3.2.1. Perception de parole	40
1.3.2.2. Production de parole.....	42
CH2. LA LANGUE FRANÇAISE PARLEE COMPLETEE (LFPC), OUTIL D'AIDE AU DEVELOPPEMENT DE LA COMMUNICATION EN LANGUE VOCALE	46
2.1. PRINCIPES ET FONDEMENT.....	46
2.2. MECANISMES DE PRODUCTION ET DE PERCEPTION	50
2.2.1. <i>Production de la LfPC</i>	50
2.2.2. <i>Perception de la LfPC</i>	51
2.3. BENEFIGES DE L'EXPOSITION A LA LFPC.....	59
2.3.1. <i>Efficacité sur la perception de parole</i>	59
2.3.2. <i>Développement des représentations phonologiques et développement linguistique</i>	64
2.4. LA COMBINAISON DE L'IMPLANTATION COCHLEAIRE A L'EXPOSITION A LA LFPC.....	69

2.5.	QUESTION DE RECHERCHE.....	72
SECTION 2 : CREATION DE DEUX CORPUS DE PAROLE D'ENFANTS PORTEURS D'IMPLANTS COCHLEAIRES ET D'ENFANTS TYPIQUES		78
CH3. CORPUS EULALIES-SURDITE : DONNEES PHONETIQUES.....		79
3.1.	CRITERES D'INCLUSION	80
3.1.1.	<i>Test TERMO.....</i>	<i>80</i>
3.1.2.	<i>Test d'empan visuel : PathSpan.....</i>	<i>81</i>
3.1.3.	<i>Test de mémoire auditivo-verbale : empan droit.....</i>	<i>82</i>
3.1.4.	<i>Test de production de langage oral : ELO.....</i>	<i>82</i>
3.1.5.	<i>Test audiométrique.....</i>	<i>83</i>
3.1.6.	<i>Questionnaire de langage.....</i>	<i>84</i>
3.2.	LA BATTERIE EULALIES.....	85
3.2.1.	<i>Principes et fondements.....</i>	<i>85</i>
3.2.2.	<i>Dénomination d'images.....</i>	<i>87</i>
3.3.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	88
3.3.1.	<i>Déroulement de la passation.....</i>	<i>88</i>
3.3.2.	<i>Matériel.....</i>	<i>89</i>
3.4.	PARTICIPANTS	90
3.4.1.	<i>Groupe contrôle : participants normo-entendants.....</i>	<i>90</i>
3.4.2.	<i>Participants porteurs d'implants cochléaires.....</i>	<i>92</i>
3.5.	TRAITEMENT DES DONNEES	93
3.5.1.	<i>Tests d'inclusion.....</i>	<i>93</i>
3.5.2.	<i>Traitement des données de parole.....</i>	<i>93</i>
3.5.2.1.	<i>Organisation d'un corpus.....</i>	<i>94</i>
3.5.2.2.	<i>Annotation.....</i>	<i>95</i>
3.5.2.2.1.	<i>Première transcription.....</i>	<i>95</i>
3.5.2.2.2.	<i>Double annotation.....</i>	<i>96</i>
3.5.2.2.3.	<i>Consignes de transcription.....</i>	<i>97</i>
3.5.2.3.	<i>Validation de l'annotation.....</i>	<i>98</i>
3.5.2.4.	<i>Syllabation et alignement.....</i>	<i>99</i>
3.5.2.5.	<i>Extraction des données.....</i>	<i>101</i>
3.6.	ANALYSES STATISTIQUES.....	102
CH4. CORPUS ARTIMONTREAL : DONNEES ARTICULATOIRES ET ACOUSTIQUES		103
4.1.	CRITERES D'INCLUSION	103
4.1.1.	<i>Test de conscience phonologique.....</i>	<i>103</i>
4.1.2.	<i>Évaluation du niveau de décodage de la LfPC.....</i>	<i>104</i>
4.1.3.	<i>Évaluation du niveau de codage de la LfPC.....</i>	<i>104</i>
4.1.4.	<i>Test audiométrique.....</i>	<i>105</i>
4.1.5.	<i>Questionnaire de langage.....</i>	<i>105</i>

4.2.	TACHE DE DENOMINATION D'IMAGES	106
4.2.1.	<i>Création du corpus</i>	106
4.2.2.	<i>Conditions de passation</i>	107
4.3.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	108
4.3.1.	<i>Matériel</i>	108
4.3.2.	<i>Déroulement de la passation</i>	108
4.4.	PARTICIPANTS	109
4.4.1.	<i>Groupe contrôle</i>	109
4.4.2.	<i>Participants porteurs d'implants cochléaires</i>	110
4.5.	TRAITEMENT DES DONNEES	111
4.5.1.	<i>Traitement des données acoustiques</i>	111
4.5.2.	<i>Traitement des données articulatoires</i>	113
4.5.3.	<i>Tests d'inclusion</i>	115
4.6.	ANALYSES STATISTIQUES	115
SECTION 3 : ANALYSE DES DONNEES ET RESULTATS		117
CH5. EVALUATION DE LA PRODUCTION DE MOTS CHEZ L'ENFANT PORTEUR D'IMPLANTS COCHLEAIRES EXPOSE A LA LFPC		118
5.1.	OBJECTIFS ET HYPOTHESES	118
5.2.	ARTICLE	120
5.3.	SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS	158
CH6. ÉTUDE DES CORRÉLATS ACOUSTIQUES DES CONSONNES PLOSIVES ET FRICATIVES EN FRANÇAIS		160
6.1.	OBJECTIFS ET HYPOTHESES	160
6.2.	ARTICLE	161
6.3.	SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS	185
CH7. ÉTUDE DES CORRÉLATS ARTICULATOIRES DES CONSONNES PLOSIVES ET FRICATIVES EN FRANÇAIS		187
7.1.	OBJECTIFS ET HYPOTHESES	187
7.2.	ARTICLE	188
7.3.	SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS	225
SECTION 4 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		228
CH8. DISCUSSION GENERALE		229
8.1.	SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS	231
8.2.	LIMITES	236
8.3.	PERSPECTIVES	239
8.4.	CONCLUSIONS	240

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	244
APPENDICES	263
ANNEXES	274

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma de l'oreille. Adapté par nos soins avec l'aimable autorisation du SSEFS 38 PEP-SRA (document de travail interne).....	31
Figure 1.2 : Schéma représentant la cochlée (images cochlea.eu).....	33
Figure 1.3 : Schématisation de l'implantation cochléaire (image Medel, notre propre légende) 38	
Figure 2.1 : Les cinq positions de la main autour du visage et les huit configurations de la main en Langue française Parlée Complétée	49
Figure 2.2 : Exemples de syllabes de complexité différente en LfPC.....	50
Figure 2.3 : Exemple de découpage en six séquences de la syllabe [pɛ̃] (de gauche à droite et de haut en bas)	52
Figure 2.4 : Schématisation des étapes de perception d'une syllabe avec LfPC.....	52
Figure 2.5 : Exemple de stimuli présentés dans l'étude de Alegria & Lechat (2005)	53
Figure 2.6 : Réponse « compromis » vs réponse « combinaison » dans l'étude de Bayard et al. (2014).....	55
Figure 2.7 : Exemples de stimuli présentés dans l'étude de Bayard et al. (2015)	56
Figure 2.8 : Modèles de perception proposés par Bayard et al. (2015)	57
Figure 3.1 : Échelle de niveau de décodage de la LfPC.....	81
Figure 3.2 : Tâche d'empan visuel PathSpan.....	82
Figure 3.3 : Exemple d'item pour la tâche de production d'énoncés du test ELO	83
Figure 3.4 : Niveaux de surdité (source Advanced Bionics)	84
Figure 3.5 : Modèle de traitement de la parole proposé par Meloni (2022) et sur lequel est basée la batterie EULALIES (voir aussi Meloni et al., (2015, 2018)). Adapté de Stackhouse et Wells (1997), Terband et al. (2019), Grandchamp et al. (2019), Van der Merwe (2021).	86
Figure 3.6 : Schéma de la passation de l'étude EULALIES-Surdité	89
Figure 3.7 : Sélection du fichier à annoter en blind mode ((1) Corpus = tâche en cours de traitement ; (2) Session = liste des fichiers participants pour la tâche sélectionnée)	94
Figure 3.8 : annotation du fichier LM_018_Deno par la transcriptrice CP pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON	96
Figure 3.9 : exemple de validation pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON	99
Figure 3.10 : exemple de syllabation et d'alignement pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON	100
Figure 3.11 : liste des analyses proposées par le logiciel PHON (Analyses à gauche) et exemple d'analyse créée manuellement (Custom Settings à droite)	101
Figure 4.1 : Échelle de niveau de décodage de la LfPC.....	104
Figure 4.2 : Échelle de niveau de codage de la LfPC.....	105

Figure 4.3 : Schéma de l'installation de la sonde à ultrasons	109
Figure 4.4 : Exemple d'annotation sous PRAAT pour l'item « carotte »	112
Figure 4.5 : Points d'ancrage à la surface de la langue pour le traçage automatique du contour de langue avec le programme SLURP	113
Figure 4.6 : Représentations schématiques des mesures articulatoires effectuées dans l'étude 3	114
Figure 5.1: Mean number of errors by chronological age for consonant production in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation)	136
Figure 5.2: Mean number of errors for consonants (left panel), consonant clusters (middle panel) and vowels (right panel) in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation). Stars display significant differences in the multiple comparison tests (see section about Statistical analyses).....	142
Figure 5.3: Total number of over-prevoicing errors (left) and over-devoicing errors (right) by chronological age for consonant production in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation).....	144
Figure 5.4: Total number of over-nasalization (left) and denasalization errors (right) three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation). Stars display error rates significantly different from 0 in the multiple comparison tests (see section about Statistical analyses).....	146
Figure 5.5: Mean accuracy and percentage of substitutions for manner of articulation in the three groups of children (CF+ in orange dots (upper panel), CF- in dark purple triangles (middle panel) and TH in green squares (bottom panel)).....	147
Figure 5.6: Mean accuracy and percentage of substitutions for place of articulation in the three groups of children (CF+ in orange dots (upper panel), CF- in dark purple triangles (middle panel) and TH in green squares (bottom panel)).....	149
Figure 6.1: Distribution of the phonological awareness mean score by group (CS in red, TH in green). Each dot corresponds to the mean score of one given participant.....	174
Figure 6.2: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.....	175

Figure 6.3: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.....177

Figure 6.4: Mean center of gravity for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between centers of gravity are illustrated in the bottom right panel.....178

Figure 7.1: Set up of the experiment.....199

Figure 7.2: Difference between the two conditions (without the ultrasound probe in grey, and with the ultrasound probe in black). Mean of F1 is given in the upper panel, mean of F2 is given in the middle panel and mean of F3 is given in the bottom panel. Red stars indicate a significant difference.....203

Figure 7.3: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.204

Figure 7.4: Mean MCI values for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean MCI values are illustrated in the bottom right panel.....206

Figure 7.5: Mean x position of the highest point of the tongue for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.....207

Figure 7.6: Mean x position of the constriction place for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.....208

Figure 7.7: Difference between the two conditions (without the ultrasound probe in grey, and with the ultrasound probe in black). Mean of F1 is given in the upper panel, mean of F2 is given in the middle panel and mean of F3 is given in the bottom panel. Red stars indicate a significant difference whereas green triangles indicate a slight difference.....209

Figure 7.8: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.210

Figure 7.9: Mean center of gravity for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean centers are illustrated in the bottom right panel.....212

Figure 7.10: Mean MCI values for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean MCI values are illustrated in the bottom right panel.213

Figure 7.11: Mean x position of the highest point of the tongue for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.....214

Figure 7.12: Mean x position of the constriction place for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.215

Figure 7.13: Tongue contours for each plosive consonant (/t/ in brown, and /k/ in light green) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in dark green). In each group, participants are ranked by chronological age.218

Figure 7.14: Tongue contours for each fricative consonant (/s/ in pink, and /ʃ/ in blue) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in dark green). In each group, participants are ranked by chronological age.....220

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : liste des items pour la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES. La fréquence d'occurrence est indiquée entre parenthèses (un - indique l'inexistence de fréquence d'occurrence dans la base MANULEX pour les items sélectionnés).....	88
Tableau 3.2 : données démographiques des participants normo-entendants pour la tâche de dénomination d'images	91
Tableau 3.3 : données démographiques des participants porteurs d'implants cochléaires pour la tâche de dénomination d'images.....	92
Tableau 3.4 : règles générales pour la transcription sous PHON	97
Tableau 3.5 : liste des variations admises pour la tâche de dénomination d'images	98
Tableau 4.1 : données démographiques des participants normo-entendants pour l'étude ArtiMontréal.....	109
Tableau 4.2 : données démographiques des participants porteurs d'implants cochléaires pour l'étude ArtiMontréal.....	110
Table 5.1: Demographics of children with cochlear implants	132
Table 5.2: Estimates of the statistical power for the production errors analysis (percentage of cases in which results are similar in the simulated data sets and our data set).....	138
Tableau 5.3 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 1.....	159
Table 6.1: Demographics of children in the CS group	167
Table 6.2: Results of the phonological awareness test for each participant (children are ordered by chronological age). Grey boxes indicate tasks whose instructions were not understood by the participant.....	170
Table 6.3: Productions deemed perceptually acceptable for each consonant, by participants (classified by chronological age). Grey boxes indicate productions which are not part of the statistical analyses.	173
Tableau 6.4 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 2.....	186
Table 7.1: Demographics of children in the CI group	196
Table 7.2: Productions deemed perceptually acceptable for each consonant, by participants (classified by group and by chronological age). Grey boxes indicate productions which are not part of the statistical analyses.	202
Tableau 7.3 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 3.....	226

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

ALPC Association pour la Langue française Parlée Complétée

CERGA Comité d'Éthique de la Recherche Grenoble Alpes

CF *Cued French*

CI *Cochlear Implant*

CISIC Centre d'Information sur la Surdité et l'Implant Cochléaire

CCV Consonne-Consonne-Voyelle

CS *Cued Speech*

CV Consonne-Voyelle

CVC Consonne-Voyelle-Consonne

F *Female*

HI *Hearing Impairment*

LfPC Langue française Parlée Complétée

LPC Langue Parlée Complétée ou Langage Parlé Complété

LSF Langue des Signes Française

M *Male*

ODEDYS Outil de Dépistage des Dyslexies

OMS Organisation Mondiale de la Santé

ORL Oto-Rhino-Laryngologiste

OSF *Open Science Framework*

PCC *Pourcent Consonant Correct*

PCIC *Pourcent Cluster Correct*

PVC *Pourcent Vowel Correct*

RGPD Règlement Général sur la Protection des Données

TDSP Trouble du Développement des Sons de Parole

TH *Typical Hearing*

INTRODUCTION

La déficience auditive touche aujourd'hui plus de 5 % de la population mondiale avec environ 34 millions d'enfants atteints d'une perte auditive supérieure à 35 décibels (dB)¹. La prise en charge de la déficience auditive constitue un enjeu de santé publique majeur. Les répercussions d'une perte auditive touchent en effet toutes les sphères des relations sociales et des compétences cognitives, telles que la communication, le développement langagier, la scolarité ou encore l'emploi. Ces répercussions sont également susceptibles d'avoir un impact d'ordre métacognitif sur le développement psycho-affectif, la construction de soi, l'estime de soi ou encore la confiance en soi (Hintermair, 2014).

Les trajectoires développementales des enfants sourds sont variables et variées. De ce fait, depuis plus d'un siècle, de nombreux débats ont émergé concernant le développement langagier de l'enfant sourd, en particulier autour des choix linguistiques faits par les familles (Estève, 2011; Millet et al., 2008; Mugnier, 2006). Différentes modalités de communication peuvent, en effet, être adoptées par les personnes sourdes et leurs familles. Certains font le choix de privilégier la langue des signes, dont la perception et la production sont entièrement accessibles aux personnes sourdes, quand d'autres préfèrent privilégier la communication dans la langue vocale (ex : le français), surtout s'il s'agit de la langue des parents. En effet, il a été montré que 95% des enfants sourds naissent de deux parents normo-entendants (Hall et al., 2019). Dans le cas d'une communication vocale, certaines familles choisissent de compléter les informations audio-visuelles de la parole par des indices manuels, par exemple avec la Langue française Parlée Complétée (LfPC)² mais d'autres préfèrent investir uniquement la modalité auditive, sans aide visuelle ou gestuelle supplémentaire, comme dans le cas de l'Auditory Verbal Therapy par exemple (AVT ; AG Bell Academy (2018); Brennan-Jones et al. (2014)). Gravel & O'Gara (2003), par exemple, proposent une revue complète des modes de communication utilisés par les personnes sourdes et leurs familles.

¹ D'après le rapport de l'audition rédigé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et publié en mars 2021 : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

² Les principes fondateurs et le fonctionnement du *cued speech*, ainsi que de sa version francophone, la LfPC, sont détaillés dans le Chapitre 2

Par ailleurs, d'un point de vue plus médical, certaines familles font le choix de la réhabilitation de l'audition alors que d'autres ne souhaitent pas avoir accès à une audition restaurée. Toutefois, les technologies de réhabilitation disponibles actuellement sont de plus en plus utilisées et performantes³, et de plus en plus d'enfants reçoivent un implant cochléaire pour compenser leur déficience auditive.

Il est extrêmement difficile en France d'obtenir des données de santé précises et chiffrées concernant le nombre d'enfants porteurs d'implants cochléaires, leur niveau de langage, leur niveau scolaire, le milieu socio-économique dans lequel ils évoluent, les outils d'aide à la communication dont ils bénéficient, s'il y a lieu, etc. Une enquête récente du CISIC⁴ (2021) fait le point sur le parcours des enfants porteurs d'implants cochléaires en France. Des plus de 400 témoignages recueillis, il ressort que plus de 80% des enfants font état de difficultés de communication dans un environnement bruyant et plus de 60% s'appuient régulièrement, voire constamment, sur la lecture labiale pour compléter les informations auditives perçues via leur implant cochléaire. Par ailleurs, 44% des enfants interrogés présentent un retard de langage, 45% ont des difficultés de compréhension et 53% souffrent de difficultés d'expression. Plus frappant encore, 82% ressentent une fatigue intellectuelle et physique en fin de journée. Cet état des lieux met donc en évidence que parmi les enfants francophones porteurs d'implants cochléaires, un grand nombre présente des difficultés de communication et éprouvent une fatigabilité importante. Il est donc crucial d'identifier et d'évaluer les méthodes qui pourraient leur permettre un accès facilité au langage.

Il est également très difficile aujourd'hui de savoir combien d'enfants porteurs d'implants cochléaires sont exposés à la LfPC en France mais il ressort du rapport CISIC précédemment cité qu'un nombre important des enfants a été exposé à ce système manuel. En effet, 44% des enfants ayant participé à cette enquête ont bénéficié d'une exposition à la LfPC dans le cadre de leur projet thérapeutique, et 16% sont accompagnés par un-e codeur-se LfPC en classe. Toutefois, très peu de données sont disponibles sur l'utilisation effective de cette méthode par les professionnels, les familles et les enfants eux-mêmes, la quantité d'exposition la durée d'exposition, et les bénéfices à long terme

³ Le Chapitre 1, ci-dessous, propose une description détaillée du fonctionnement de l'implant cochléaire ainsi que des bénéfices observés sur le développement langagier de l'enfant sourd

⁴ Centre d'Information sur la Surdité et l'Implant Cochléaire

de cette utilisation. Une récente étude de Van Bogaert et al. (2021) a mis en évidence que parmi plus de 100 familles, 22% utilisent la LfPC avec leur enfant porteur d'implant cochléaire. L'usage de la LfPC avec des enfants porteurs d'implants cochléaires représente donc une situation largement répandue dans le paysage francophone, et qu'il est nécessaire de documenter avec une démarche scientifique dégagée des enjeux idéologiques.

Le projet de cette thèse est donc d'étudier précisément les enfants porteurs d'implants cochléaires exposés à la LfPC afin d'explorer l'impact de cette méthode sur leur développement de parole et d'apporter des preuves scientifiques aux professionnels et aux familles sur lesquelles appuyer leurs choix linguistiques.

Ce projet de thèse ainsi que l'intérêt pour cette population précise ont pris naissance à la croisée entre connaissances scientifiques et compétences de terrain. Dans le cadre d'un master en linguistique, mes travaux de recherche ont porté sur la question du développement des compétences linguistiques de l'enfant sourd. Par ce biais, j'ai eu la chance de rencontrer quelques enfants sourds bénéficiant d'un accompagnement en LfPC et dont les parents avaient investi cet outil à la maison, en complément de l'implantation cochléaire, pour favoriser le développement langagier de leurs enfants. Ces rencontres, ainsi que l'envie de construire mon propre cheminement vis-à-vis de la prise en charge de l'enfant sourd, ont alimenté le besoin de me confronter au terrain de la surdité, en étant directement au contact des enfants sourds et des professionnels les accompagnant. J'ai alors décidé de me former à cette pratique afin d'en mesurer davantage les bénéfices en y étant confrontée quotidiennement. Pendant quatre années, j'ai exercé le métier de codeuse en LfPC et accompagné de nombreux enfants sourds exposés à la LfPC de la maternelle aux études supérieures. Cette expérience ainsi que ma formation antérieure ont fait émerger divers questionnements scientifiques. En particulier, l'observation informelle d'une amélioration de la qualité des productions vocales chez de nombreux enfants lorsqu'ils bénéficiaient d'une exposition importante à la LfPC m'a conduite à vouloir creuser davantage cette question, et ce avec une démarche scientifique. En effet, les bénéfices de l'usage de la LfPC concomitamment avec la parole ont été montrés par de nombreuses études (Leybaert et al. (2016) pour une revue), mais au-delà de cette efficacité immédiate, quelques rares travaux ont révélé des bénéfices à plus long terme chez les enfants, sur leurs capacités de traitement audio-visuel de la parole, *en l'absence*

de gestes manuels (Aparicio et al. (2012) pour la lecture labiale ; Kos et al (2009) pour la perception auditive). Les résultats de ces dernières études semblent indiquer qu'une exposition à la LfPC contribuerait à offrir aux enfants des compétences phonologiques qui les rendraient plus autonomes et plus efficaces pour la plupart des interactions au cours de leur vie sociale ultérieure, c'est-à-dire des interactions *sans LfPC*.

L'objet de ce travail de thèse est d'évaluer quantitativement l'apport d'un accompagnement en LfPC dans le cas des enfants porteurs d'implants cochléaires, afin d'observer les effets de la combinaison de ces deux techniques, l'une auditive et l'autre visuelle, sur le développement de la parole. Il ne s'agit ni de faire le point sur les différents choix possibles suite à un diagnostic de surdité ni de préconiser un choix suite à ce diagnostic, mais de fournir des données probantes pour décrire une situation thérapeutique largement présente en France.

Plus spécifiquement, ce travail de thèse s'attache à décrire précisément les compétences de production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires lorsqu'ils ont été exposés à la LfPC. En effet, la qualité de la production vocale, qui reflète largement les compétences phonologiques, est un facteur déterminant de la qualité de vie et du bien-être psycho-social des individus. Il s'agit donc d'un sujet crucial pour la population des enfants sourds et de leurs familles, et qui n'a pas été abordé jusqu'ici dans la littérature scientifique.

Ce manuscrit fournira d'abord des éléments de contexte sur le développement de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires (Chapitre 1), puis sur les données scientifiques existantes à propos de la LfPC (Chapitre 2), avant de présenter les deux corpus recueillis au cours de ce travail de thèse : le corpus phonétique EULALIES-Surdité (Chapitre 3) et le corpus acoustique et articulatoire ArtiMontréal (Chapitre 4). Les chapitres suivants correspondent à trois articles scientifiques rapportant trois études expérimentales, utilisant trois méthodologies différentes, la première basée sur une évaluation perceptive des productions (Chapitre 5), la deuxième sur une analyse acoustique (Chapitre 6), et la troisième sur une analyse articulatoire échographique (Chapitre 7). Ces trois études apportent des données originales et complémentaires sur la production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires exposés à la LfPC. Enfin le dernier chapitre (Chapitre 8) proposera une synthèse des résultats obtenus et une réflexion sur leurs limites et leurs prolongements possibles.

Terminologie. Dans le cadre de ce travail, nous avons fait le choix d'employer le terme « enfant sourd » pour décrire l'enfant présentant une déficience auditive.

Les termes « surdité » et « d ficiency auditive » sont tous deux utilisés de manière identique et désignent une perte auditive supérieure à 35 dB.

Nous employons uniquement l'acronyme « LfPC » lorsque nous parlons du *cued speech* dans sa version francophone. Bien que cette appellation « Langue française Parl e Compl t e » ait été adopt e en 2005, nous ne faisons pas de différence avec la précédente appellation (i.e., LPC) même si les études dont nous parlons ont été r alis es à une date antérieure à 2005.

En contexte de surdité, la notion d'oralité est à dissoci e de la notion de vocalité. En effet, les compétences en langue orale de l'enfant sourd peuvent concerner à la fois la langue sign e et la langue vocale, comme c'est le cas dans le cadre d'une approche bilingue bimodale (Estève, 2011; Millet et al., 2008). Notre travail s'intéressant plus particulièrement aux compétences développées dans la modalité vocale, nous ne parlons ici que de « langue vocale » lorsque nous abordons les compétences langagières développées par l'enfant francophone porteur d'implants cochléaires et exposé à la LfPC. Plus particulièrement, les compétences en langue vocale développées dans notre propos concernent le développement de la parole, en perception et en production.

SECTION 1: PROBLEMATIQUE

CH1. SURDITE, IMPLANT COCHLEAIRE ET DEVELOPPEMENT DE LA COMMUNICATION EN LANGUE VOCALE

1.1. FONCTIONNEMENT TYPIQUE DU SYSTEME AUDITIF

Pour comprendre les difficultés induites par une audition dégradée, nous proposons, dans un premier temps, de décrire le fonctionnement typique du système auditif. Cette description s'appuie principalement sur les écrits de Borel (2015), Borel & Leybaert, (2020) et Grandon (2016).

Le système auditif périphérique se compose de trois niveaux distincts : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne (Figure 1.1).

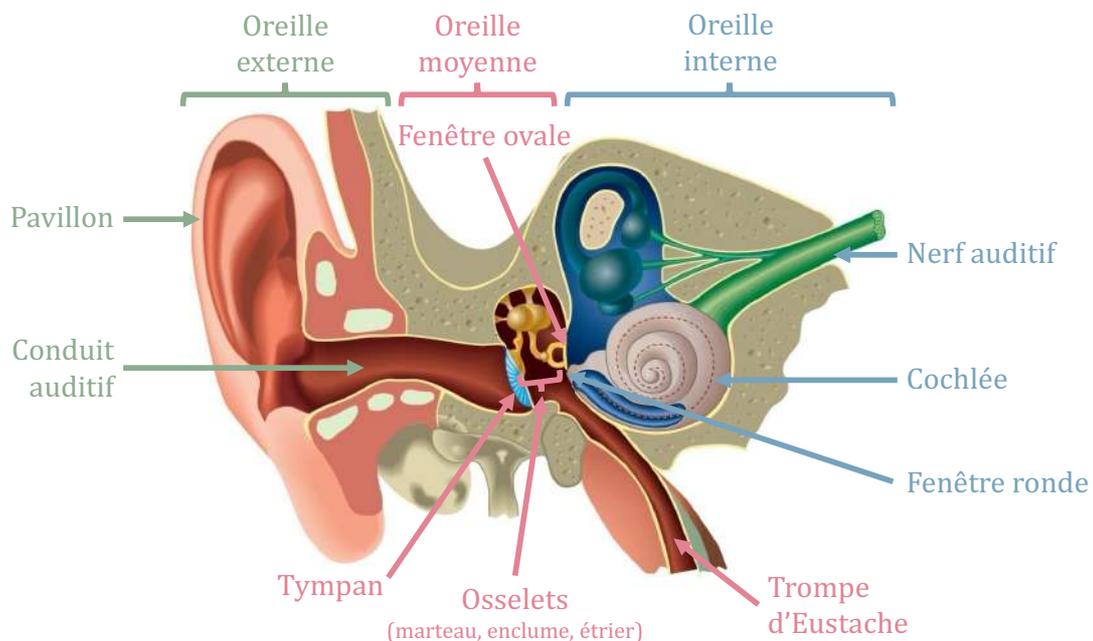


Figure 1.1 : Schéma de l'oreille. Adapté par nos soins avec l'aimable autorisation du SSEFS 38 PEP-SRA (document de travail interne)

L'oreille externe est constituée du pavillon qui permet de capter les sons de l'environnement et du conduit auditif externe qui transmet ces ondes sonores au tympan. L'oreille externe a un rôle de protection du système auditif en l'isolant de l'extérieur, elle va également permettre une amplification de certaines fréquences acoustiques par résonance dans le pavillon et transmettre les informations sonores à l'oreille moyenne. La transmission du son se fait ici dans un milieu aérien.

L'oreille moyenne, deuxième partie du système auditif périphérique, regroupe le tympan, à l'intersection entre l'oreille externe et l'oreille moyenne, les osselets (marteau, enclume et étrier) ainsi que la fenêtre ovale, lien entre l'oreille moyenne et l'oreille interne, et la trompe d'Eustache. Le tympan entre en vibration au contact de l'onde sonore qui vient de traverser le conduit auditif ce qui met en mouvement des osselets, l'un à la suite de l'autre, avec pour conséquence d'amplifier les vibrations sonores (comme par un phénomène de levier). Le mouvement de l'étrier, dernier osselet de la chaîne, exerce une pression mécanique sur la fenêtre ovale et, ainsi, transmet l'onde sonore à l'oreille interne. La trompe d'Eustache établit une connexion entre l'oreille moyenne et le nasopharynx. Elle joue un rôle protecteur en égalisant la pression d'air des deux côtés du tympan pour éviter sa rupture.

L'oreille interne est composée de la cochlée, un triple tube enroulé en spirale, d'environ 35mm de long, divisé en deux passages, les rampes vestibulaire et tympanique, séparés par le canal cochléaire. Les rampes vestibulaire et tympanique sont remplies d'un fluide, la périlymphe, qui circule de la base (au niveau des fenêtres ovale et ronde respectivement) à l'apex, au niveau duquel elles communiquent. Le canal cochléaire est formé de deux membranes, la membrane de Reissner et la membrane basilaire et contient l'endolymphe. La membrane basilaire est le plancher de l'organe de Corti qui contient les cellules ciliées, reliées à des fibres nerveuses provenant du nerf auditif. Les cellules ciliées transforment les vibrations présentes dans le milieu liquide en impulsions électriques pour stimuler le nerf auditif. Les fréquences des ondes sonores sont transmises de façon tonotopique : chaque fréquence est codée à un endroit spécifique le long de la cochlée. La Figure 1.2, ci-dessous, présente la répartition des fréquences à l'intérieur de la cochlée : la membrane basilaire étant plus fine à sa base et plus large au niveau de l'apex, les fréquences les plus hautes sont traitées à sa base et les fréquences les plus basses sont traitées au niveau de l'apex. En résumé, les vibrations transmises suite à la pression exercée par l'étrier sur la fenêtre ovale modifient la pression du liquide présent dans la cochlée et entraînent l'ouverture de canaux ioniques et la libération de neurotransmetteurs au niveau des cellules ciliées : l'énergie mécanique présente dans le milieu aérien se transforme, ainsi, en impulsions électriques dans le milieu liquide. Ces impulsions électriques stimulent alors le nerf auditif et activent le système auditif central.

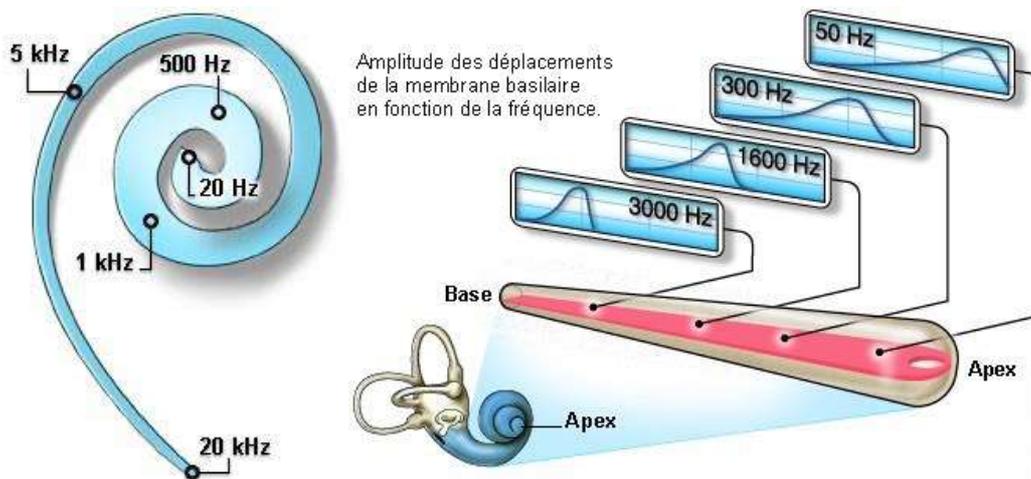


Figure 1.2 : Schéma représentant la cochlée (images cochlea.eu)

1.2. FONCTIONNEMENT ATYPIQUE DU SYSTEME AUDITIF : CAS DE LA SURDITE

La surdité constitue une privation totale ou partielle de l'audition ce qui va impacter considérablement la perception de la parole. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), considère l'enfant sourd comme un « *enfant dont l'acuité auditive est insuffisante pour lui permettre d'apprendre sa propre langue, de participer aux activités normales de son âge et de suivre avec profit l'enseignement scolaire général* ».

D'après Briec (2012), trois dimensions définissent la surdité : une dimension organique, une dimension fonctionnelle et une dimension sociale. La dimension organique concerne l'organe lui-même, l'oreille, qui présente un fonctionnement pathologique. La dimension fonctionnelle, quant à elle, représente toutes les conséquences liées au dysfonctionnement organique. La déficience auditive va entraîner des distorsions de la qualité du signal acoustique reçu, ce qui va impacter le développement langagier, entre autres. La dimension fonctionnelle de la surdité est mesurée à partir de tests audiométriques (tels que les Potentiels Évoqués Auditifs, les Oto-Émissions Acoustiques, ou encore les audiométries tonales et vocales, entre autres), réalisés soit par un médecin ORL soit par un audioprothésiste. Enfin, la dimension sociale implique toutes les conséquences induites par la déficience auditive en ce qui concerne l'interaction avec un tiers.

Plusieurs critères permettent de classer les surdités chez l'enfant. La suite de ce chapitre propose de décrire les différents types et les différents degrés de surdité ainsi que quelques dispositifs de remédiation auditive.

1.2.1. TYPES DE SURDITE

Plusieurs types de surdité ont été mis en évidence, selon le lieu anatomique où se situe le dysfonctionnement. La surdité de transmission est une atteinte de l'oreille externe ou de l'oreille moyenne qui va empêcher la stimulation mécanique d'arriver jusqu'à la cochlée, sans distorsion acoustique (Figure 2). L'oreille interne, quant à elle, reste intacte ce qui permet la transmission du signal acoustique par voie osseuse, et donc la perception de sa propre voix. La surdité de transmission peut être li e à des otites séromuqueuses (dans 95% des cas), il s'agit alors d'une d ficiance auditive transitoire, ou à une malformation de l'oreille externe (i.e. pavillon ou conduit auditif externe) ou de l'oreille moyenne (i.e. osselets ou tympan) pouvant être soign e par un traitement adapt e ou une opération chirurgicale. La surdité de transmission induit une perte auditive ne dépassant pas 60 dB (Mondain et al., 2005).

La surdité de perception, quant à elle, constitue une atteinte de l'oreille interne et/ou des voies auditives. En particulier, lorsqu'une partie des cellules ciliées de l'organe de Corti, qui se situent dans la cochlée, dysfonctionnent, la conversion du signal acoustique en signal électrique est impact e et, de ce fait, la transmission au cerveau via le nerf auditif est alt r e, d'où le terme de surdité de perception. Le nerf auditif peut lui-même être défectueux et ne pas transmettre correctement l'impulsion électrique au cerveau. On observe ainsi une distorsion fréquentielle ainsi qu'une éventuelle distorsion d'amplitude (Briec, 2012; Grandon, 2016; Lina-Granade & Truy, 2005; Virole, 2006). L'oreille externe et l'oreille moyenne ne sont pas touch es. La surdité de perception est irréversible et induit une perte pouvant aller jusqu'à 130dB. Elle est d'origine génétique chez 50 à 60% des enfants (Mondain et al., 2005).

Dans certains cas, la présence d'une surdité mixte est observ e. Ce type de surdité correspond à la combinaison d'une surdité de transmission et d'une surdité de perception. Il y a atteinte des oreilles externe et/ou moyenne ainsi que de l'oreille interne. Dans de plus rares cas, enfin, une surdité centrale peut être mise en évidence. Il s'agit d'une atteinte du système auditif central, soit au niveau du tronc cérébral, soit au niveau des aires auditives (surdité centrale corticale).

1.2.2. DEGRES DE SURDITE

Ces différentes surdités sont classées selon le degré de la perte auditive, mesuré en décibels (dB) de perte. Le BIAP (Bureau International d'AudioPhonologie) propose de classer les seuils d'audition de la manière suivante :

- L'audition normale ou subnormale
 - o Perte ne dépassant pas 20 dB
- La déficience auditive légère. La parole à voix normale (± 60 dB) est perçue mais la parole à voix basse l'est difficilement.
 - o Perte de 21 à 40 dB
- La déficience auditive moyenne. La parole est perçue lorsque le locuteur élève la voix. La compréhension est meilleure si l'on regarde son interlocuteur.
 - o De 1^{er} degré : perte de 41 à 55 dB
 - o De 2nd degré : perte de 56 à 70 dB
- La déficience auditive sévère. La parole est perçue à voix forte uniquement.
 - o De 1^{er} degré : perte de 71 à 80 dB
 - o De 2nd degré : perte de 81 à 90 dB
- La déficience auditive profonde. Aucune perception de la parole, seuls les bruits très puissants sont perçus.
 - o De 1^{er} degré : perte de 91 à 100 dB
 - o De 2nd degré : perte de 101 à 110 dB
 - o De 3^{ème} degré : perte de 111 à 119 dB
- La déficience auditive totale ou cophose : perte supérieure ou égale à 120 dB. Aucune perception auditive quelle qu'elle soit.

Ces seuils sont calculés à partir de différents tests de perception de certaines fréquences (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz), tels que les audiométries tonales et vocales, qui permettent de situer la perte auditive par rapport aux seuils d'audition.

1.2.3. DISPOSITIFS DE REMEDIATION AUDITIVE

Une fois le type et le degré de surdité diagnostiqués, plusieurs types de dispositifs visant à améliorer le niveau d'audition peuvent être proposés aux personnes sourdes ou à leurs

parents. Chaque type de dispositif est proposé par une équipe médicale, en fonction du type de surdité.

Trois types de dispositifs sont disponibles actuellement (Borel & Leybaert, 2020; Mondain et al., 2005) :

- Les dispositifs à conduction aérienne, qui sont soit des prothèses auditives, soit des implants de l'oreille moyenne, permettent de capter et d'amplifier les sons afin de les transmettre à l'oreille interne. Les prothèses auditives sont des dispositifs externes et amovibles, qui se fixent au niveau du pavillon tandis que les implants de l'oreille moyenne se composent d'une partie interne non amovible (nécessitant une chirurgie) et d'une partie externe amovible, placée sur le pavillon, comme une prothèse auditive classique.
- Les dispositifs à conduction osseuse sont également de deux types. Les prothèses *BAHA* captent le son et le transmettent directement à la cochlée, par vibrations au niveau des os du crâne. La conduction aérienne par l'oreille externe et la transmission mécanique par l'oreille moyenne sont ainsi court-circuitées. Les prothèses vibrotactiles, telles que les prothèses *Tactaid*, se placent au niveau du dos ou du torse et apportent des informations acoustiques sous la forme de stimulations vibratoires corporelles.
- Les dispositifs par stimulation électronique, enfin, stimulent les fibres du nerf auditif au niveau de la cochlée, comme l'implant cochléaire, ou sont placés directement au niveau du nerf auditif comme les implants du tronc cérébral.

Notre travail s'attachant à décrire le développement de la parole chez l'enfant porteur d'implants cochléaires, le chapitre qui suit propose une description détaillée du fonctionnement de ce dispositif. Les autres systèmes d'appareillages disponibles ne seront pas décrits davantage.

1.3. L'IMPLANT COCHLEAIRE

1.3.1. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT

D'après une enquête réalisée par le journal *Le Monde* en 2017, environ 45.000 implants cochléaires sont posés chaque année, dont plus de 1400 en France, la moitié étant destinée aux enfants. En 2020, plus de 220.000 personnes dans le monde bénéficient d'au moins un implant cochléaire, dont plus de 15.000 en France (CISIC, 2020). Proposé en cas de surdité sévère ou profonde, l'implant cochléaire crée artificiellement des impulsions électriques, à partir d'électrodes insérées dans la cochlée, qui vont venir stimuler directement le nerf auditif et ainsi permettre à la personne sourde d'entendre un signal acoustique. Cette partie propose une description de l'implant cochléaire ainsi que de son fonctionnement, en se basant, notamment, sur les publications de Borel (2015) et Grandon (2016) ainsi que Borel & Leybaert (2020).

Comme le montre la Figure 1.3, l'implant cochléaire se compose de deux parties. Une première partie externe et amovible, composée, d'une part, d'un appareil, placé autour du pavillon de l'oreille, contenant un microphone et un processeur de son, et, d'autre part, d'une antenne magnétique émettrice, connectée directement à la partie interne. Cette seconde partie, non amovible, est constituée d'un récepteur électronique placé sous la peau, derrière le pavillon de l'oreille, et auquel est aimantée l'antenne. Un faisceau d'électrodes introduit chirurgicalement dans la cochlée est relié à ce récepteur interne. Cette partie est ce qu'on appelle l'implant à proprement parler.

Afin de contourner la déficience du système auditif périphérique et dans le but de transmettre le maximum d'informations auditives au système central, le fonctionnement de l'implant cochléaire suit différentes étapes. Tout d'abord, les informations acoustiques (sons de parole et bruits de l'environnement sonore) sont captées par le microphone et transmises au processeur de son qui va les transformer en signal électronique. Pour ce faire, le processeur filtre les sons et les convertit dans un code de stimulations électriques. Ces informations codées sont ensuite envoyées vers l'antenne externe qui les transmet au récepteur électronique par radiofréquence. L'implant interne, ou récepteur, décode alors ces ondes radio puis les transforme en impulsions électriques au niveau des électrodes insérées dans la cochlée. Le nombre d'électrodes actives peut varier d'un implant à l'autre, allant de douze à 22 selon les fabricants et les modèles d'implant. La position des

électrodes dans la cochlée respecte toujours la tonotopie cochléaire, soit la représentation du spectre auditif le long du conduit cochléaire, sur une étendue fréquentielle de 100Hz à 8000Hz environ. Les impulsions électriques créées via les électrodes vont alors jouer le rôle des cellules ciliées défailiantes, voire absentes, en stimulant le nerf auditif. Ce dernier va, enfin, transmettre les informations nerveuses aux aires auditives du cerveau qui va les interpréter comme des sons.

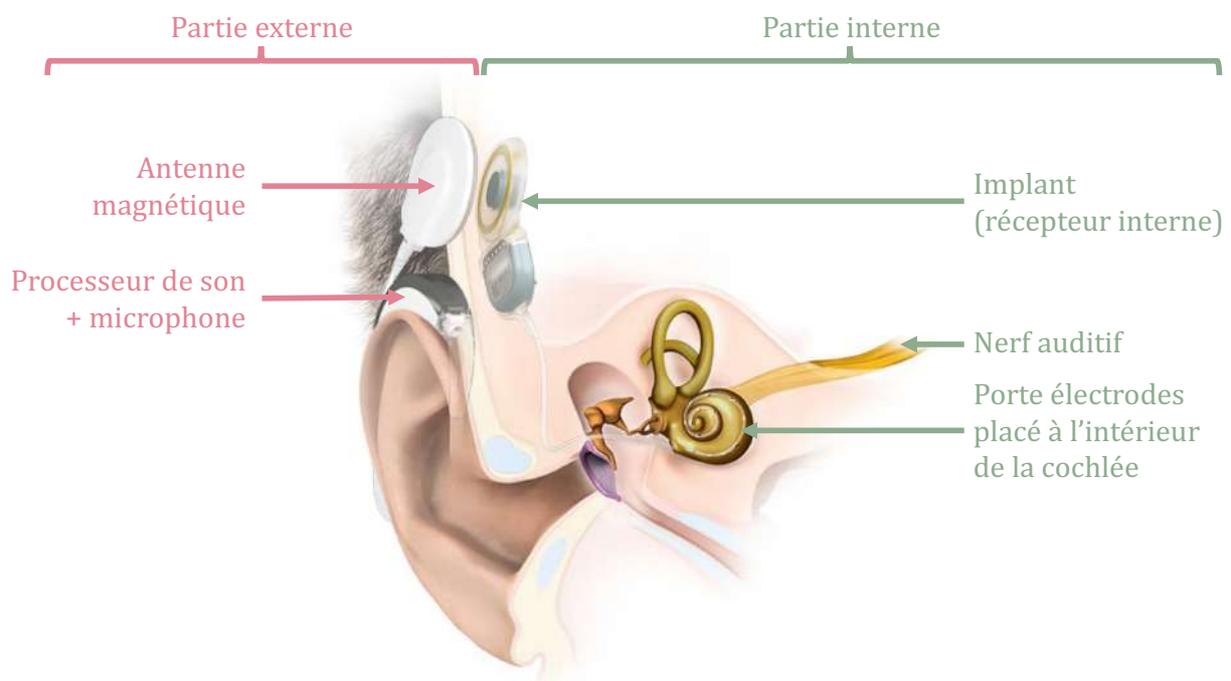


Figure 1.3 : Schématisation de l'implantation cochléaire (image Medel, notre propre légende)

En fonction du modèle de l'implant, du nombre d'électrodes actives ou encore de la programmation des processeurs, il existe différentes stratégies de codage des sons de parole par l'implant cochléaire. Nous ne rentrons pas ici dans le détail de ces différentes stratégies, pour plus d'informations se référer aux travaux de Borel (2015) ou Grandon (2016). Toutefois, ces vingt dernières années, la technologie des implants cochléaires s'est considérablement améliorée, notamment avec l'augmentation du nombre d'électrodes actives et de meilleures techniques de codage du signal.

L'implant cochléaire permet donc de stimuler directement le nerf auditif et ainsi de donner accès aux sons de parole et aux bruits ambiants à la personne sourde. Toutefois, malgré les évolutions récentes, le traitement des sons par l'implant ne permet pas

d'atteindre une audition similaire à celle d'une personne normo-entendante, certaines fréquences n'étant pas codées par les électrodes présentes dans la cochlée. Les enfants présentant une surdité prélinguale et bénéficiant d'implants cochléaires ont ainsi accès à un signal auditif réduit, ce qui peut les conduire à développer des capacités de traitement de la langue vocale différentes de celles de leurs pairs normo-entendants.

Il est également important de rappeler que l'implantation cochléaire peut s'avérer être un choix difficile pour les familles, comme en témoigne Heather Artinian dans son témoignage TedX (2013) ou comme le souligne le film documentaire *Sound and Fury* (Aronson, 2000) qui retrace le cheminement de deux familles américaines autour de l'implantation cochléaire ou non de leurs enfants sourds. Il s'agit, en effet, d'une opération chirurgicale invasive avec possibilité d'échec. Le rapport du CISIC (2021) mentionne, en effet, que 9% des enfants ayant reçu un implant ont dû subir une réimplantation en raison, par exemple, d'un implant défectueux ou d'une infection post-implantatoire. Ces résultats sont en accord avec ceux de Farinetti et al. (2014) qui observent 14,9% de complications lors de l'implantation cochléaire chez l'enfant, dont 4,7% de complications majeurs (i.e., implant défectueux, par exemple).

La suite de ce chapitre propose de faire le point sur les difficultés et les spécificités de la perception et de la production de parole chez l'enfant porteur d'implants cochléaires, à partir d'une sélection non exhaustive de travaux disponibles actuellement.

1.3.2. DIFFICULTES ET SPECIFICITES DE LA PERCEPTION ET DE LA PRODUCTION DE PAROLE CHEZ L'ENFANT PORTEUR D'IMPLANTS COCHLEAIRES

Chez l'enfant porteur d'implants cochléaires, un certain nombre de travaux ont mis en évidence des difficultés en perception et en production de la parole. Les principaux résultats observés dans le domaine du développement de la parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires sont présentés dans la suite de ce chapitre. Pour simplifier la présentation, nous aborderons dans un premier temps les travaux autour de la perception de parole puis nous traiterons de la question de la production de parole, ces deux processus étant cependant intrinsèquement liés. La sélection des travaux présentés dans cette partie n'est pas exhaustive.

1.3.2.1. Perception de parole

Les effets de l'implantation cochléaire sur l'amélioration de la perception de la parole ont aujourd'hui largement été mis en évidence, aussi bien chez les adultes que chez les enfants. Cependant, une grande variabilité des résultats post-implantation demeure (Colin et al., 2017; Dillon et al., 2004; Leybaert et al., 2011; Sundström et al., 2018). De nombreux facteurs explicatifs ont été mis en évidence.

Comme expliqué précédemment, l'implant cochléaire respecte la tonotopie cochléaire. Les signaux issus du processeur sont répartis par bande de fréquence sur les différentes électrodes en respectant la tonotopie cochléaire. La bande de fréquence la plus aigüe est ainsi codée par l'électrode la plus proche de la base, tandis que la bande la plus grave est codée par l'électrode la plus proche de l'apex. Toutefois, chaque électrode code un ensemble de fréquences et stimule ainsi un ensemble de cellules nerveuses, contrairement aux cellules ciliées qui codent chacune une fréquence qui leur est propre. Par conséquent, la récupération auditive ainsi que la qualité du message acoustique sont corrélées au nombre d'électrodes activées. Ce dernier peut considérablement varier d'un modèle d'implant à l'autre, mais également d'un patient à l'autre. Ainsi, l'efficacité de l'implant cochléaire et la récupération auditive montrent une variabilité inter-individuelle importante (Bayard, 2014; Borel, 2015; Grandon, 2016).

Par ailleurs, la stimulation du nerf auditif ne se fait pas de la même façon via un implant cochléaire que dans le cadre d'une audition normale. L'information auditive transmise par l'implant cochléaire est limitée, voire dégradée, ce qui a des conséquences sur certaines caractéristiques fines du signal acoustique de parole (Leybaert & LaSasso, 2010). Bouton et al. (2012) ont, en effet, mis en évidence que les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des difficultés d'identification de la nasalité et du lieu d'articulation pour les consonnes, alors que les caractéristiques acoustiques liées au mode d'articulation et au voisement semblent mieux transmises via l'implant cochléaire. En ce qui concerne la perception des traits acoustiques descriptifs des voyelles, Bouton et al. (2012) ainsi que Fagniard et al. (2020) ont observé que les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des difficultés avec la perception des traits de nasalité, tandis que les traits d'antériorité et d'aperture sont mieux perçus (i.e., traits acoustiques avec des corrélats visibles, ce qui peut compenser le manque acoustique). Ces résultats sont cohérents avec les observations de Borel (2015) qui a montré que les adultes porteurs

d'implants cochléaires avaient des difficultés de perception du trait de nasalité vocalique ainsi que du trait de lieu d'articulation pour les consonnes nasales. Toutefois, Watterman (2020) a observé que les difficultés de perception du trait de nasalité chez les enfants porteurs d'implants cochléaires étaient moins prononcées que celles des adultes. Pour Leybaert & LaSasso (2010), ces difficultés s'expliquent principalement par le codage de l'information auditive via l'implant cochléaire : la transmission des indices temporels se fait d'une manière similaire à l'audition typique alors que la transmission des indices spectraux est fortement limitée par le codage en bandes de fréquence limitées. Par conséquent, les traits de voisement et de mode d'articulation correspondant principalement à des indices temporels, ils sont mieux perçus que le trait de lieu d'articulation, dont la perception est basée sur des indices spectraux.

Ces difficultés de perception des détails acoustiques entraînent une dégradation des compétences phonologiques, malgré un accès à l'audition augmenté, avec des représentations phonologiques qui demeurent sous-spécifiées (Colin et al., 2017; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2018) ce qui peut provoquer des troubles du développement du langage. Il apparaît ainsi qu'un tiers des enfants porteurs d'implants cochléaires présente des troubles langagiers persistants à 10 ans (Bouton et al., 2015; Geers et al., 2016).

L'âge d'implantation constitue un prédicteur des performances post-implantation. L'implantation précoce, avant l'âge de 24 mois, permet d'atteindre un niveau de perception de parole similaire aux pairs normo-entendants. Toutefois, les études ne s'accordent pas toutes sur l'âge limite d'une implantation précoce. En effet, les travaux de Nittrouer et al. (2018) montrent des effets bénéfiques d'une implantation avant 36 mois, tandis que Geers et al. (2016) défendent une implantation avant 18 mois et Colletti et al. (2011) et Watterman (2020) semblent en faveur d'une implantation avant douze mois pour obtenir les meilleurs résultats. Certains enfants sourds parviennent à rattraper leur retard de langage par rapport aux enfants normo-entendants mais de manière générale, leurs performances demeurent plus faibles, avec des difficultés langagières persistantes (Geers et al., 2016; Grandon, 2016; Hansson et al., 2018; Nittrouer et al., 2018). Par ailleurs, la durée d'utilisation de l'implant cochléaire apparaît également comme un facteur prédictif des performances de l'enfant avec déficience auditive : plus la période

d'utilisation est importante, plus les bénéfices observés sur le plan langagier sont élevés (Bayard, 2014; Connor et al., 2006; Grandon, 2016; Havy et al., 2013).

Ces différents travaux pointent que l'audition restaurée par le biais de l'implant cochléaire est incomplète, avec une qualité acoustique dégradée en raison de diverses contraintes technologiques qui ne permettent pas, pour le moment, de reproduire une information auditive artificielle identique à l'information auditive naturelle. Cette qualité acoustique limitée induit donc des difficultés de perception de la parole. D'autres répercussions de la dégradation des informations auditives ont également été constatées dans la production vocale des enfants porteurs d'implants cochléaires. La suite de ce chapitre propose une vue d'ensemble des difficultés de production de parole de ces enfants.

1.3.2.2. Production de parole

La production de parole peut être évaluée à partir de plusieurs types d'études. Une partie des études est basée sur des jugements perceptifs de phonéticiens experts qui proposent des transcriptions et annotations phonétiques des productions vocales des enfants tandis que d'autres chercheurs proposent des analyses acoustiques ou encore articulatoires, à partir d'échographie linguale par ultrasons par exemple. Nous proposons ici de faire le point sur les principaux résultats des études s'intéressant à la production de parole chez l'enfant porteur d'implants cochléaires, sur les plans perceptif, acoustique et articulatoire.

Plusieurs études perceptives mettent en évidence les difficultés des enfants porteurs d'implants cochléaires pour atteindre des compétences de production de parole similaires à celles des enfants normo-entendants (Dillon et al., 2004; Hansson et al., 2018; Nittrouer et al., 2014; Sundström et al., 2018). Les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des difficultés pour la production du lieu d'articulation, aussi bien pour les voyelles (Tye-Murray & Kirk, 1993; Warner-Czyz et al., 2010; voir Grandon, 2016) que pour les consonnes, mais les auteurs ne s'accordent pas tous sur l'ordre d'acquisition des différents lieux (Baudonck et al., 2010; Dillon et al., 2004; Warner-Czyz et al., 2010). En ce qui concerne plus spécifiquement la production de consonnes, Kim & Chin (2008) observent des difficultés avec le trait de voisement ainsi que le mode d'articulation tandis que Sundarrajan et al. (2020) mettent en évidence des difficultés avec le trait de nasalité. Fagniard et al. (2020) observent également des difficultés de production du contraste de nasalité pour les voyelles. L'effet de l'âge d'implantation sur le développement des

capacités de production de parole ne fait pas consensus dans la littérature. Certains auteurs trouvent un effet significatif de l'âge d'implantation, c'est-à-dire que plus l'implantation est précoce plus la production de phonèmes et la réalisation des traits acoustiques est proche de celle des enfants normo-entendants (Sundarrajan et al., 2020; Sundström et al., 2018; Tye-Murray & Kirk, 1993), tandis que d'autres études ne révèlent aucun effet (Dillon et al., 2004; Hansson et al., 2018).

En ce qui concerne les corrélats acoustiques, les études ne s'accordent pas quant à l'évolution de la taille de l'espace vocalique suite à l'implantation cochléaire : certains résultats révèlent une expansion de l'espace vocalique (Hocevar-Boltezar et al., 2008; Kunisue et al., 2006) tandis que d'autres auteurs n'observent aucun changement bien que l'espace soit plus large que celui des enfants normo-entendants (Liker et al., 2007). Enfin, certains auteurs trouvent que l'espace vocalique des enfants porteurs d'implants cochléaires est plus réduit que celui de leurs pairs normo-entendants (Löfkvist et al., 2020; Ryalls et al., 2003; voir Grandon, 2016 pour une revue). Fagniard et al. (2020), quant à eux, observent que les enfants porteurs d'implants cochléaires ne produisent pas le contraste de nasalité de manière typique mais que leurs productions ne sont pas significativement différentes de celles d'enfants au développement typique. Turgeon et al. (2017), de leur côté, montrent que sur le plan spectral, les enfants porteurs d'implants cochléaires distinguent les lieux d'articulation des voyelles de la même manière que leurs pairs normo-entendants mais présentent des difficultés dans la réalisation du contraste d'aperture. Quelques auteurs se sont également interrogés sur les aspects acoustiques de la production de consonnes. Il ressort de ces travaux que les enfants porteurs d'implants cochléaires ont des difficultés pour produire le contraste de voisement sur les consonnes plosives (Horga & Liker, 2006) ainsi que les contrastes de mode d'articulation (Grandon & Vilain, 2020) et de lieu d'articulation pour les consonnes fricatives (Grandon, 2016; Grandon & Vilain, 2020; Mildner & Liker, 2008).

Sur le plan articulatoire, enfin, une étude de Turgeon et al. (2017) met en évidence que lors de la production de voyelles, les enfants porteurs d'implants cochléaires placent leur langue dans le conduit vocal de la même manière que les enfants normo-entendants, aucune différence significative n'étant observée entre les groupes. De plus, les valeurs de courbure de la langue semblent également similaires entre les enfants porteurs d'implants cochléaires et leurs pairs normo-entendants. A notre connaissance, aucune

étude ne s'est pour le moment intéressée aux caractéristiques articulatoires des consonnes produites par des enfants porteurs d'implants cochléaires.

Les difficultés de production mises en évidence dans cette partie sont fortement liées aux difficultés mises en évidence pour la perception de parole via l'implant cochléaire. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des difficultés de perception du trait de nasalité, du mode d'articulation ou encore du lieu d'articulation. Certains auteurs suggèrent que les indices visuels disponibles lors de la perception de parole vont moduler la production par l'enfant des traits acoustiques associés à ces indices (Grandon, 2016; Turgeon et al., 2017), ce qui expliquerait que certains lieux d'articulation, moins visibles, soient plus difficilement produits (Geffner, 1980), que certaines voyelles soient plus difficilement réalisées (Turgeon et al., 2017) ou encore que les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des difficultés avec la coarticulation dans les séquences consonne-voyelle (Grandon, 2016).

Résumé. La revue de la littérature présentée ci-dessus nous a permis de mettre en avant les bénéfices d'une implantation cochléaire précoce mais également les difficultés liées à cette implantation. En effet, malgré un accès de plus en plus précis aux sons de parole, grâce à l'augmentation du nombre d'électrodes actives et à l'amélioration des techniques de traitement du signal, l'information acoustique transmise par l'implant cochléaire demeure limitée, notamment en ce qui concerne certains traits phonétiques tels que le lieu d'articulation et la nasalité. Par ailleurs, les auteurs s'accordent sur l'existence d'une grande variabilité des résultats post-implantation avec de nombreux facteurs explicatifs (i.e., âge d'implantation, modes de communication, durée d'utilisation de l'implant cochléaire, âge de dépistage, etc.). Globalement, bien que les enfants porteurs d'implants cochléaires présentent des compétences linguistiques satisfaisantes, ils restent déficitaires par rapport à leurs pairs normo-entendants. Plus particulièrement, leurs représentations phonologiques semblent sous-spécifiées ce qui implique de nombreuses difficultés de perception de la parole et, par conséquent, de production de la parole.

Pour compenser la dégradation de l'information acoustique via l'implant cochléaire, certains parents font le choix d'utiliser le système manuel du *cued speech* pour compléter le message vocal et, ainsi, renforcer la perception de la parole. La suite de ce travail propose de décrire le système du *cued speech* ainsi que ses bénéfices éventuels sur la perception de la parole et le développement des compétences langagières de l'enfant sourd.

CH2. LA LANGUE FRANÇAISE PARLEE COMPLETEE (LFPC), OUTIL D'AIDE AU DEVELOPPEMENT DE LA COMMUNICATION EN LANGUE VOCALE

Dans les années 1960, constatant le faible niveau de lecture de ses étudiants sourds à l'université Gallaudet aux Etats-Unis, le Dr R. O. Cornett observe que ces difficultés sont principalement liées à la qualité de leurs représentations phonologiques, celles-ci étant construites à partir d'un niveau faible de lecture labiale et de l'absence *d'input* auditif. Cornett décide alors, en 1967, de créer le *cued speech*, un système permettant de fournir des informations phonologiques par le biais d'indices visuels (i.e., manuels et labiaux). Il s'agit d'un outil de réception du message vocal qui facilite la perception de la parole en palliant le manque d'informations lié au déficit auditif et en complétant les informations partielles fournies par la lecture labiale.

2.1. PRINCIPES ET FONDEMENT

Lors de l'élaboration du *cued speech*, Cornett (1967) s'est fixé trois critères principaux pour assurer l'efficacité de son système :

- 1. La langue utilisée doit être accessible et apprise comme une langue parlée.** Ainsi, chaque trait phonologique de la langue vocale doit être visible sans ambiguïté. Ce premier fondement permet de combler les limites de la lecture labiale en différenciant précisément tous les sosies labiaux, en rendant accessibles tous les phonèmes peu visibles ou encore en détaillant manuellement les phénomènes de coarticulation.
- 2. L'information manuelle est indissociable de l'information labiale.** Pour une même image labiale, différentes configurations et/ou positions de la main seront utilisées pour différencier deux phonèmes ou plus. Et à l'inverse, pour une même configuration et/ou position de la main, deux phonèmes ou plus seront distingués par des images labiales différentes. Les gestes du *Cued Speech* complètent mais ne remplacent pas l'image labiale.
- 3. Les gestes utilisés conjointement à la lecture labiale ne doivent pas interférer avec le rythme approprié de la parole.** Les gestes complémentaires ne transmettent que des informations directement liées aux phonèmes produits et n'interfèrent pas avec la structure syllabique de la langue parlée.

A ces trois principes, Cornett ajoute trois contraintes supplémentaires afin d'assurer une communication la plus claire et complète possible :

4. **Ce système doit être facile et rapide à apprendre afin d'assurer une communication efficace en classe.** Cette proposition supplémentaire peut également s'appliquer au cercle familial en permettant aux parents entendants d'acquérir le *cued speech* rapidement et sans difficultés.
5. **L'apprentissage du « décodage » des gestes doit pouvoir se faire naturellement, à travers le bain de langage dont l'enfant bénéficie à la maison** (exposition régulière et importante).
6. **Ce système doit être efficace, sans ambiguïté et utilisable aux distances rencontrées en classe,** jusqu'à six mètres environ.

Un septième critère a été envisagé dans la conception du *cued speech* puisque Cornett souhaitait, en effet, que ce système permette **d'accroître la capacité de la personne sourde à parler de manière intelligible et à percevoir la parole sans aide extérieure.** Toutefois, ce point n'a pas été intégré aux règles de base régissant le système parce que seules des expérimentations permettaient de confirmer ce bénéfice. Cette observation est également valable pour le point 5 (i.e., l'apprentissage naturel du « décodage »), cependant, ce critère permet d'intégrer au système la notion d'exposition précoce et intensive, ce qui justifierait qu'il ait été tout de même retenu.

Ainsi, le *cued speech*, dans sa version initiale, c'est-à-dire adaptée à l'anglais américain (i.e., *Cued American*), se compose de quatre positions de la main autour du visage, permettant de distinguer les sons vocaliques et de huit configurations de la main différenciant les sons consonantiques. Ces douze indices visuels vont se combiner entre eux pour créer ce qu'on appelle des « clés manuelles ». Plus concrètement, le code va permettre de transmettre la parole à l'aide de suites de syllabes de type CV (i.e., les « clés manuelles »). Ces syllabes sont construites à l'aide des positions et configurations de la main autour du visage : c'est l'association d'une position de la main autour du visage à une configuration de la main qui va permettre de créer une clé manuelle (i.e., une syllabe). Le *cued speech* permet de rendre compte d'indices phonologiques facilitant l'identification d'un phonème sans toutefois coder chaque phonème de la langue parlée : le locuteur code son message vocal de manière fluide et naturelle, sans générer de fatigue excessive, en respectant le découpage syllabique imposé par la langue parlée. Pour ce qui est des

structures syllabiques plus complexes, par exemple une syllabe CCV, un geste isolé sera réalisé afin de rendre visibles tous les éléments constituant la syllabe. Par exemple, pour une syllabe CCV, la première consonne sera réalisée avec la configuration de la main correspondante et placée en position dite neutre autour du visage⁵. L'ensemble CV qui suit sera quant à lui codé à l'aide d'une seule clé manuelle, correspondant à l'association de la position autour du visage pour la voyelle et de la configuration de la main pour la consonne. Ainsi, cette syllabe plus complexe, sera codée à l'aide de deux clés manuelles permettant de rendre saillants tous les éléments nécessaires à la perception du message vocal.

Bien qu'initialement développé pour l'anglais américain, le *cued speech* est aujourd'hui adapté à plus de 60 langues parlées (Shull & Crain, 2010), en fonction de leur propre système phonologique (i.e., les positions et configurations de la main peuvent donc varier d'un système à l'autre). En 1998, Fleetwood & Metzger ont soutenu que *cued language* et *cued speech* devraient être distingués, tout comme le sont la langue et la parole ou encore la langue parlée et la langue signée. Ils suggèrent alors que le nom *cued speech* se réfère à la modalité de communication tandis que le nom *Cued language* désigne un langage parlé spécifique (par exemple, le *Cued English*) transmis à l'aide d'indices manuels et labiaux. Notre travail portant sur la langue française, nous utilisons ici le terme *Langue française Parlée Complétée* (LfPC) (i.e., *Cued French*) pour désigner le code manuel utilisé avec nos participants. Le terme *cued speech* n'est utilisé que pour faire référence au mode de communication en général, sans cibler une langue donnée. La LfPC⁶ se compose de cinq positions de la main autour du visage pour les sons vocaliques et de huit configurations de la main pour les sons consonantiques (Figure 2.1). Chaque syllabe prononcée, peu importe sa structure phonémique, sera accompagnée d'un ou plusieurs gestes permettant de compléter les indices visuels fournis par la lecture labiale à l'aide d'indices visuels fournis par les gestes manuels (Figure 2.2).

⁵ La position dite neutre est située à côté du visage. Il existe également une configuration neutre pour les consonnes isolées ou les clusters consonantiques, il s'agit de la main « pleine », c'est-à-dire avec tous les doigts visibles.

⁶ Adaptation française du *cued speech*, elle a vu le jour en 1977. D'abord appelée « Langage Complété Cornett » puis « Langage Parlé Complété » ou « code LPC », l'appellation « Langue française Parlée Complétée » a été adoptée en 2005 (voir [Attina, 2005](#) ou [Bayard, 2014](#) pour plus de détails).

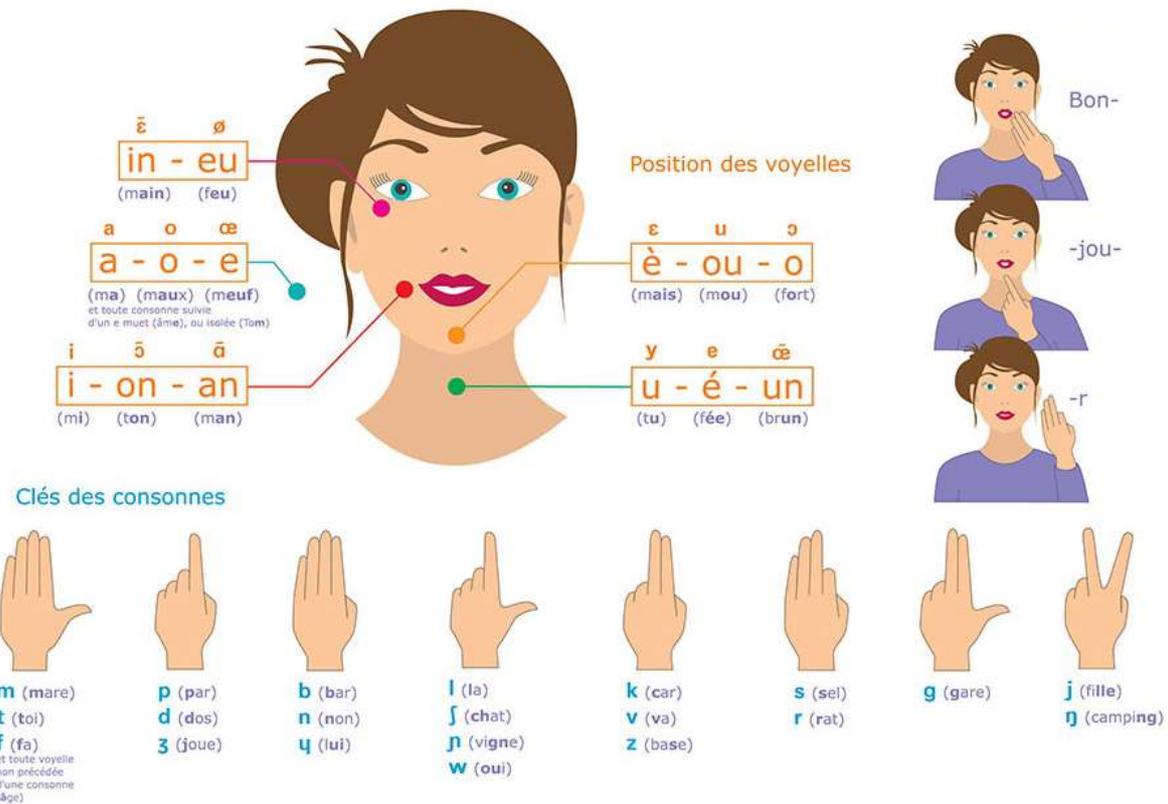


Figure 2.1 : Les cinq positions de la main autour du visage et les huit configurations de la main en Langue française Parlée Complétée

Source : Association pour la promotion de la LfPC <https://alpc.asso.fr/les-cles-du-code-lpc/>

Depuis sa création dans les années 1970, de nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation du *cued speech* et ce, dans différentes langues. Au début des années 2000, quelques équipes de recherche se sont interrogées sur les mécanismes de production et de réception du *cued speech*. Plus précisément, ces équipes se sont demandé si la production simultanée de gestes articulatoires et manuels peut poser problème au locuteur et dans quelles mesures elle présente un avantage pour le récepteur du message. Concernant le développement linguistique de l'enfant sourd, un grand pan de la littérature s'est intéressé aux bénéfices de l'exposition à la LfPC. La suite de ce chapitre propose donc de faire le point sur les mécanismes de production puis de perception du *cued speech* avant d'aborder la question centrale des apports au niveau linguistique pour l'enfant exposé au *cued speech*.

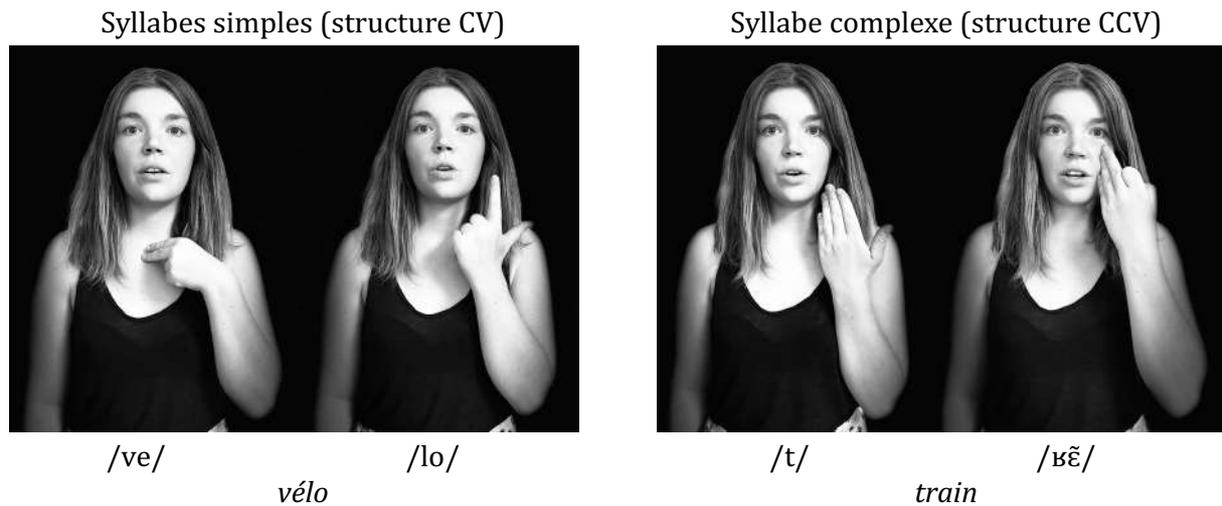


Figure 2.2 : Exemples de syllabes de complexité différente en LfPC

2.2. MECANISMES DE PRODUCTION ET DE PERCEPTION

2.2.1. PRODUCTION DE LA LFPC

À la base de son système, Cornett (1994) préconisait une synchronisation entre le geste manuel (i.e., la clé manuelle) et les sons de parole (i.e., image labiale associée à la production vocale). En effet, selon lui, le mouvement d'une position de la main à une autre, ainsi que le changement de configuration de la main, désignent le moment de la synchronisation parole-geste manuel. En d'autres termes, le moment où la main arrive à une position donnée, ou celui où elle change de configuration, indique précisément l'instant où le son associé commence.

Au début des années 2000, une équipe grenobloise a voulu mettre au point une « tête codeuse ». Pour ce faire, les chercheurs ont commencé par observer des codeuses professionnelles afin d'analyser précisément les différentes productions codées. Leur objectif principal était de vérifier s'il existait une réelle synchronisation entre les mouvements de la main et l'information labiale, telle que décrite par Cornett (1994). Ces travaux ont toutefois mis en évidence une légère avance de la main par rapport aux lèvres⁷ (cf. Attina et al. , 2002, 2004, 2005) : il s'agit en fait de l'information labiale qui vient compléter l'information visuelle donnée par la main (pour plus de détails, voir

⁷ La valeur moyenne d'anticipation de la main est de 160ms, elle ne dépasse jamais 200ms (Attina et al., 2004)

Bayard, 2014). À l'inverse de ce que pensait Cornett en créant le *cued speech*, ce n'est pas la main qui vient désambiguïser l'information labiale mais plutôt l'image labiale qui va désambiguïser l'information manuelle. Des résultats similaires ont été mis en évidence pour la production de syllabes (Sacher et al., 2008; Troille, 2009) mais également pour la production de phrases (Aboutabit, 2007; Gibert, 2006).

2.2.2. PERCEPTION DE LA LFPC

À la suite de ce constat, Attina (2005) s'est demandé si cette anticipation de la main était mise à profit pour la perception de la parole codée. Seize participants sourds, âgés de 11 à 35 ans et exposés à la LfPC depuis leur enfance, ont été soumis à une tâche de perception de syllabes de structure CV. Six séquences d'une même vidéo de production d'une syllabe CV leur ont été proposées. A la fin de chaque séquence, les participants devaient choisir la consonne et la voyelle produite à partir d'une liste de plusieurs propositions. Les séquences étaient découpées comme suit (Figure 2.3) : (1) le début du mouvement de la main, (2) le début de la configuration digitale, (3) le déplacement de la main vers l'emplacement de la voyelle au niveau du visage, (4) la configuration digitale et la position de la main visibles, accompagnées du début de l'image labiale, (5) la consonne visible aux lèvres et (6) la cible labiale de la voyelle atteinte.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence que l'avance de la main est investie par les personnes sourdes pour faciliter la perception de la parole : à l'issue de la quatrième séquence, Attina (2005) observe plus de 80% d'identifications correctes. Les personnes sourdes exposées à la LfPC semblent faire une première sélection de syllabes possibles à partir de la clé manuelle proposée par leur interlocuteur pour ensuite sélectionner la syllabe effectivement produite à partir de l'information labiale qui s'ajoute.



Figure 2.3 : Exemple de découpage en six séquences de la syllabe [pɛ] (de gauche à droite et de haut en bas)

La main débute en position « côté » (1) et se dirige vers la position « pommette » (2), tout en formant la clé manuelle du /p/ (3). On voit sur l'image (4) que la clé manuelle est formée et que la position vocalique est presque atteinte alors que la consonne n'est pas encore visible aux lèvres. La consonne devient visible sur l'image (5) et la voyelle est réalisée sur l'image (6). D'après Attina (2005)

En d'autres termes, la personne sourde va identifier des syllabes potentielles grâce à l'avance de la main puis l'information labiale va venir compléter la perception en permettant de sélectionner la syllabe effectivement prononcée (Figure 2.4). Ainsi, la main est complètement intégrée au système de perception de la parole et joue un rôle important dans la réception du message vocal.

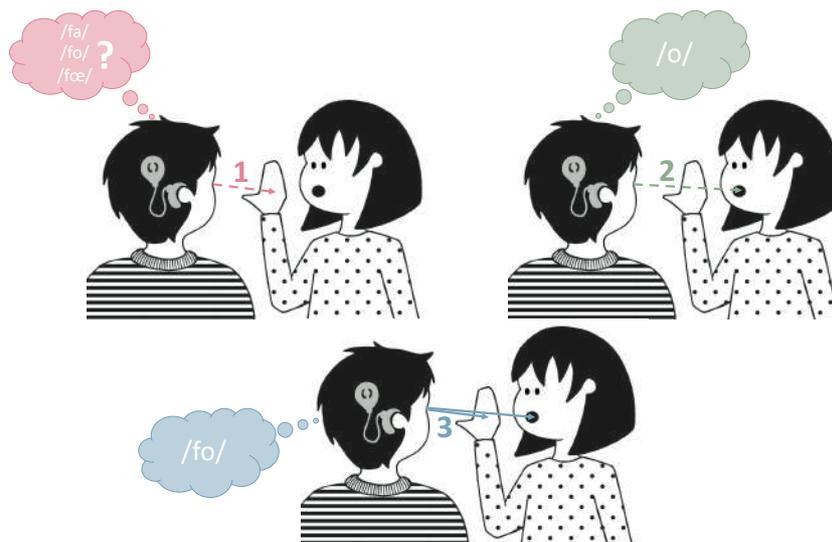


Figure 2.4 : Schématisation des étapes de perception d'une syllabe avec LfPC

Alegria & Lechat (2005) se sont, quant à eux, interrogés sur le poids de l'information manuelle en l'absence d'information auditive. Leur objectif était donc de déterminer si le geste manuel constituait une information visuelle supplémentaire ou incontournable. En se basant sur les travaux de McGurk & MacDonald (1976), ils ont créé des stimuli visuels dans lesquels l'information manuelle était soit congruente soit incongruente avec l'information labiale. Par exemple, lorsque la clé manuelle correspondant à la syllabe /pa/, /da/ ou /ʒa/ était présentée avec l'image labiale de la syllabe /da/ alors les informations étaient congruentes. À l'inverse, si cette même clé manuelle était présentée avec l'image de la syllabe /fa/ alors les informations étaient incongruentes (Figure 2.5).

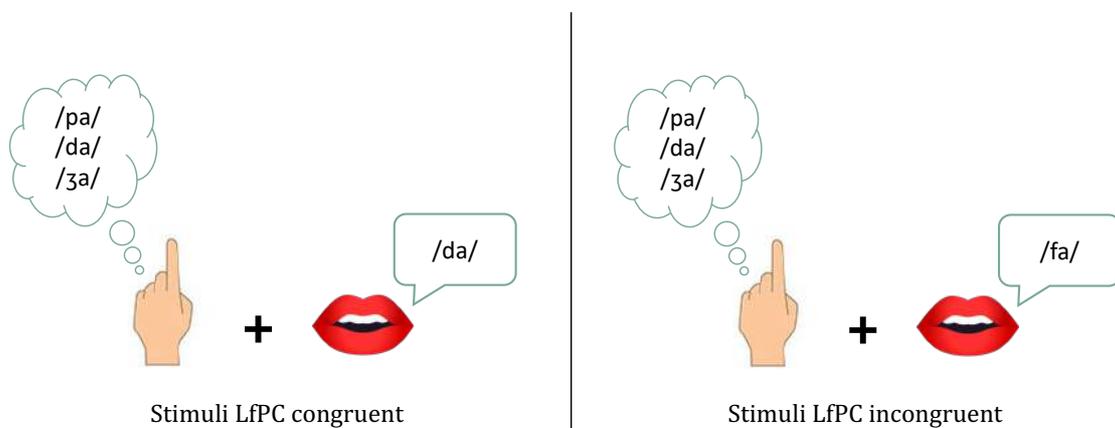


Figure 2.5 : Exemple de stimuli présentés dans l'étude de Alegria & Lechat (2005)

Adaptée de Bayard et al. (2015)

Deux groupes d'enfants sourds, âgés de 6 à 15 ans, ont été testés : un groupe de 10 enfants exposés précocement à la LfPC (avant l'âge de deux ans, à la maison) et un groupe de 10 enfants exposés tardivement à la LfPC (après l'âge de deux ans, à la fin de la garderie ou au début de l'école). Les participants devaient répéter une syllabe diffusée sous forme de vidéo, sans information auditive. Les résultats de cette étude ont montré que l'information manuelle est prise en compte même lorsqu'elle est incongruente avec l'information labiale : en effet, ils ont mis en évidence l'existence de réponses « compromises », évoquant un effet McGurk. Par exemple, lorsque l'image labiale de la syllabe /fa/ a été présentée avec la clé manuelle des syllabes /pa/, /da/ ou /ʒa/, les participants avaient tendance à percevoir la syllabe /da/. Ils créaient alors ce qu'on peut appeler un « percept illusoire » dans lequel l'information labiale et l'information manuelle étaient fusionnées. Ainsi, les syllabes /pa/ et /ʒa/ étant très visibles labialement, pour ne

pas ignorer l'information labiale, les participants choisissaient la réponse compromis /da/, qui semble la plus proche d'une production de la syllabe /fa/. Par ailleurs, cette étude de Alegria & Lechat (2005), a montré que le poids de l'information manuelle augmente avec l'expertise de la personne sourde : plus la personne a été exposée à la LfPC (i.e., exposition précoce) plus l'information manuelle sera prise en compte pour favoriser la perception de la parole.

Dans la continuité de ces travaux, Bayard et al. (2014) ont réalisé plusieurs études à partir du paradigme de l'étude de Alegria & Lechat (2005)⁸. Leur objectif était d'identifier l'importance de chaque information visuelle (i.e., manuelle et labiale) en fonction de différents facteurs. Pour ce faire, ils ont observé les effets du statut auditif en comparant des participants sourds à des participants entendants. Ils ont également étudié le degré de visibilité de l'information labiale en fonction du lieu d'articulation. Enfin, l'effet de la qualité de l'information manuelle a été évaluée en floutant ou non la clé manuelle. Trois groupes d'adultes sourds ont été testés : un groupe de huit personnes sourdes exposées à la LfPC, un groupe de 14 personnes normo-entendantes exposées à la LfPC et un groupe contrôle de 15 personnes normo-entendantes qui n'avaient jamais été en contact avec la LfPC. La tâche consistait à répéter une syllabe diffusée sous forme de vidéo, sans information auditive. Les résultats de cette première expérience mettent en évidence que :

(1) le statut auditif influence le poids de l'information manuelle : les personnes sourdes exposées à la LfPC de manière précoce tiennent davantage compte de l'information manuelle que les personnes sourdes exposées tardivement ou encore que les personnes entendants exposées à la LfPC.

(2) le degré de visibilité de l'image labiale détermine le poids de l'information manuelle : plus l'information labiale est ambiguë (notamment dans le cas des consonnes postérieures telles que /k/ ou /ʁ/), plus l'information manuelle est prise en compte. Par exemple, lorsque les mouvements labiaux correspondant à la syllabe /aka/ étaient associés à l'information manuelle correspondant aux syllabes /apa/, /ada/, ou /aza/, les participants avaient tendance à proposer la réponse « compromis » /ada/. L'image labiale

⁸ Les auteurs précisent ici que contrairement à l'étude de Alegria & Lechat (2005), leurs stimuli congruents et incongruents ont été construits de manière artificielle afin d'éviter tout biais lié à un éventuel décours temporel (voir Bayard, 2014 pour plus de détails)

de la syllabe /aka/ étant ambiguë, la production pouvait être confondue avec la syllabe /ada/, congruente avec la clé manuelle présentée. A l'inverse, lorsque l'information labiale ne présentait aucune ambiguïté, comme dans la syllabe /afa/, les participants combinaient les informations labiale et manuelle en proposant la syllabe /afda/ (voir Figure 2.6). Par conséquent, même lorsque les informations labiale et manuelle sont incongruentes, les participants sourds utilisent l'information manuelle pour percevoir un stimulus.

(3) la qualité de l'information manuelle conditionne le poids de l'information labiale : plus la clé manuelle est dégradée (i.e., floutée dans le cas de cette étude), plus l'information labiale sera prise en compte dans la réponse des participants.

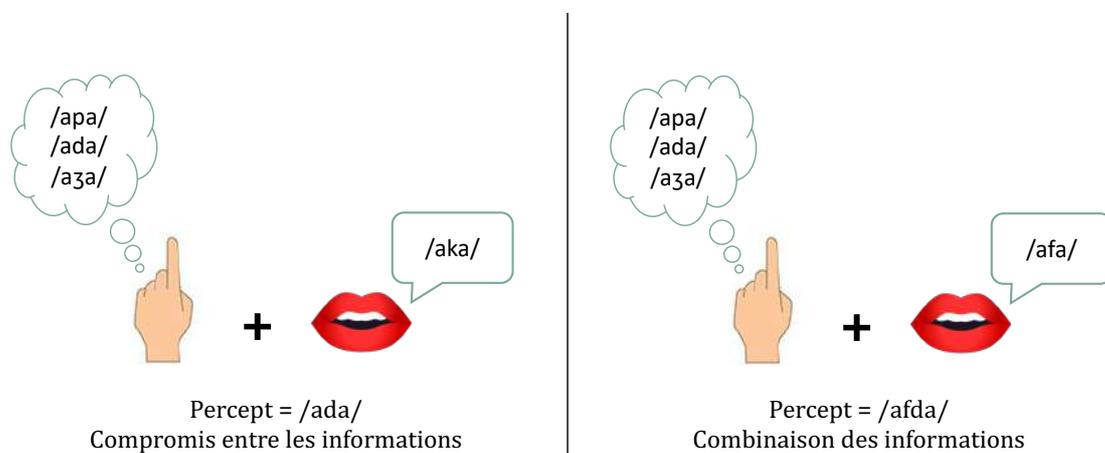


Figure 2.6 : Réponse « compromis » vs réponse « combinaison » dans l'étude de Bayard et al. (2014)

Adaptée de Bayard et al. (2015)

Bayard et al. (2014) ont ainsi mis en évidence l'intégration des informations labiale et manuelle dans le traitement de la parole lorsque celle-ci est transmise sans information auditive. En 2015, cette même équipe de chercheurs a voulu observer les mécanismes d'intégration des informations manuelle et labiale lorsque la parole était transmise avec des informations auditives (Bayard et al., 2015). Ils ont alors réalisé une étude similaire à celle de 2014 mais en ajoutant une information auditive afin d'observer comment la main s'intègre dans le traitement audio-visuel. Trois types de stimuli ont été proposés aux participants (Figure 2.7) : une série de stimuli où la clé manuelle était congruente avec l'information auditive mais pas avec l'information labiale, une autre série de stimuli dans lesquels la clé manuelle était congruente avec l'information labiale mais pas avec l'information auditive et une troisième série dans laquelle la clé manuelle correspondait

à la réponse compromis (i.e., la clé manuelle correspondait donc à la fusion attendue entre l'information auditive et l'information labiale). L'information auditive ne correspondait jamais à l'information labiale.

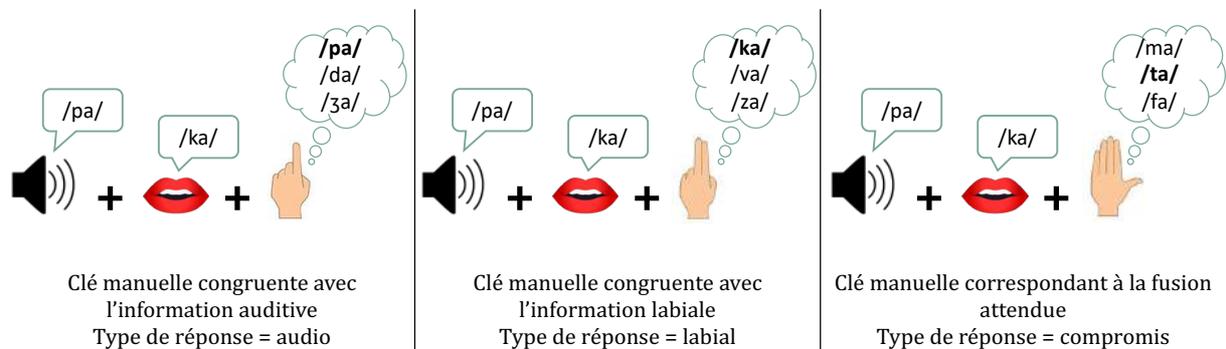
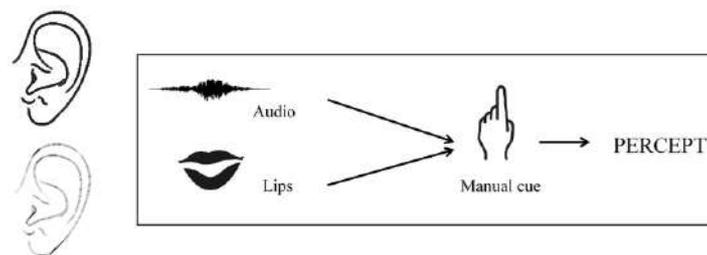


Figure 2.7 : Exemples de stimuli présentés dans l'étude de Bayard et al. (2015)

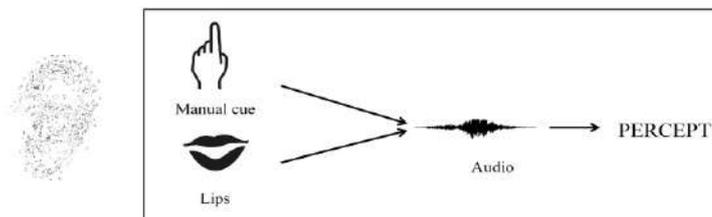
Adaptée de Bayard et al. (2015)

Les participants se divisaient en deux groupes d'adultes sourds : le premier groupe rassemblait 36 adultes exposés à la LfPC tandis que le second réunissait 35 adultes n'ayant jamais été exposés à la LfPC. La tâche consistait à répéter une syllabe diffusée sous forme de vidéo, avec ou sans information auditive. Les résultats de cette seconde étude montrent, dans un premier temps, que l'information manuelle joue un rôle important dans la perception des participants sourds. Lorsque la clé manuelle correspondait à l'information labiale, la majorité des réponses était de type labial et lorsque l'information manuelle correspondait à la fusion attendue, la majorité des réponses étaient de type compromis (Figure 2.7). Cependant, lorsque la clé manuelle était congruente avec l'information auditive, une réponse de type compromis était donnée afin de ne pas ignorer totalement ni l'information labiale (auquel cas, le type de réponse aurait été audio) ni l'information manuelle (auquel cas la réponse aurait été /ta/, comme dans l'effet McGurk classique, sans information manuelle). Dans un second temps, cette étude met également en évidence l'influence du statut auditif sur l'utilisation des informations auditive, labiale et manuelle. Les auteurs observent que chez les personnes sourdes, l'utilisation de l'information visuelle est modulée par le degré de perte auditive. En effet, l'ajout d'une clé manuelle congruente avec l'information auditive, mais pas avec l'information labiale, augmente le nombre de réponses de type audio uniquement chez les participants sourds avec une bonne récupération auditive. Toutefois, l'ajout d'une clé manuelle congruente avec l'image labiale, mais pas avec l'information auditive, favorise le nombre de réponses

du type labial pour tous les groupes de participants sourds (i.e., avec une bonne récupération auditive ou avec une faible récupération auditive). Notons également que chez les personnes normo-entendantes exposées à la LfPC, l'information auditive est prise en compte au même titre que l'information manuelle, à l'instar des personnes sourdes avec une bonne récupération auditive. Bayard et al. (2015) en déduisent que l'ajout d'indices manuels de la LfPC lors de la production de parole va modifier l'intégration audio-visuelle de base en fonction du statut auditif du récepteur ainsi que du degré de perte auditive chez les récepteurs sourds. Deux esquisses de modèles de perception de la parole ont alors été imaginées (Figure 2.8).



a. Modèle de perception chez les personnes normo-entendantes ou les personnes sourdes bénéficiant d'une bonne récupération auditive



b. Modèle de perception chez les personnes sourdes présentant une faible récupération auditive

Figure 2.8 : Modèles de perception proposés par Bayard et al. (2015)

Adaptés de Bayard et al. (2015)

(1) Le premier modèle proposé décrit la perception de parole chez les personnes normo-entendantes ou chez les personnes sourdes bénéficiant d'une très bonne récupération auditive. Dans ce cas, l'information manuelle viendrait modifier ou renforcer l'intégration audio-visuelle orofaciale (Modèle a., Figure 2.8).

(2) Le second modèle concerne davantage les personnes sourdes dont la récupération auditive demeure réduite. Ici, l'information auditive serait éventuellement prise en compte pour compléter les informations manuelle et labiale, prédominantes dans le traitement de la parole chez ces sujets (Modèle b., Figure 2.8).

Ces travaux mettent en lumière l'intégration de l'information manuelle au traitement de base de la parole (i.e., traitement audio-visuel orofacial) en pointant le rôle précis des clés manuelles dans la perception de parole chez la personne sourde exposée à la LfPC. Comme nous l'avons vu précédemment (Chapitre 1), les progrès technologiques liés à l'implantation cochléaire permettent un accès plus précis aux sons de parole et, ainsi, une récupération auditive plus qualitative. De ce fait, certaines personnes sourdes pourront avoir tendance à suivre le même modèle de perception que celui des personnes normo-entendantes. En effet, plus la récupération auditive sera exhaustive et fine, plus la personne sourde utilisera en premier lieu un traitement audio-visuel de base (informations auditive et labiale) auquel l'information manuelle viendra s'ajouter pour compléter la perception de parole.

Le développement de cette intégration demande une exposition conséquente au *cued speech* et donc une pratique à la fois par les équipes éducatives et rééducatives ainsi que par les parents. La mise en place du *cued speech* peut sembler contraignante pour les familles, notamment du fait du manque de naturel de l'ajout de ce type de gestes manuels à la production de parole. Par ailleurs, l'utilisation du *cued speech* demande de la rigueur et de la patience, surtout avec un enfant en plein développement langagier. Certains parents peuvent alors se sentir découragés face à ce nouvel apprentissage, voire démunis lorsque leur enfant prête peu d'attention aux clés manuelles. Toutefois, de nombreuses études ont mis en évidence les bénéfices de l'exposition à la LfPC sur le développement langagier de l'enfant sourd. Le chapitre suivant fait le point sur ces travaux.

2.3. BENEFICES DE L'EXPOSITION A LA LFPC

2.3.1. EFFICACITE SUR LA PERCEPTION DE PAROLE

Depuis la création du *cued speech* dans les années 1970, de nombreux chercheurs se sont questionnés sur l'efficacité de ce système. Initialement créé pour pallier les manques liés à la lecture labiale, le *cued speech* a été rapidement utilisé par de nombreux parents et professionnels de la surdité. Les chercheurs se sont alors demandé si l'exposition au *cued speech* permettait effectivement, comme le suggérait Cornett, d'améliorer sensiblement la perception de parole.

Ling & Clarke (1975) sont les premiers à avoir mis en évidence un léger effet du *cued speech* sur la perception de mots. Douze enfants âgés de sept à douze ans et exposés au *Canadian Cued English* devaient décoder des mots et des phrases simples présentés avec ou sans code. Un léger bénéfice du *cued speech* pour la perception de mots a été observé, avec un score de 52% de réponses correctes. En condition lecture labiale seule, cependant, les participants n'identifiaient en moyenne que 35% des mots. Du côté de la perception de phrases simples, aucun bénéfice n'a été mis en évidence : avec ou sans code, seulement 9% des phrases ont été correctement perçus par les participants. Ling & Clarke se sont alors dit que la faible exposition au *cued speech* (i.e., depuis un an seulement) ne permettait pas aux participants d'investir suffisamment le code pour percevoir plus précisément des phrases simples. A la suite de ce constat, ils ont alors reconduit cette expérience avec huit des participants de la précédente étude qui, cette fois-ci, étaient exposés au *Canadian Cued English* depuis deux ans (Clarke & Ling, 1976). L'identification de phrases simples en condition *cued speech* a atteint 62% contre 23% en condition lecture labiale seule. Ainsi, en plus de mettre en évidence l'efficacité du *cued speech* sur la perception de phrases simples, Clark & Ling pointent l'importance de la durée d'exposition pour favoriser l'efficacité du système.

Nicholls & Ling (1982), de leur côté, ont observé l'effet du *cued speech* sur la perception de syllabes et de mots clés. Les participants de leur étude, 18 enfants sourds âgés de neuf à 17 ans, avaient bénéficié d'une exposition au *cued speech* d'au moins quatre ans au moment de l'expérimentation. La tâche d'identification de syllabes se composait de 84 stimuli différents, sous la forme de syllabes de structure consonne-voyelle (CV) ou voyelle-consonne (VC), qui combinaient les 28 consonnes de l'anglais avec les voyelles

/i/, /u/ et /a/. Plusieurs conditions de réception ont été testées : audio seul (A), lecture labiale seule (L), audio + lecture labiale (AL), clés du *Australian Cued English* seules (C), audio + clés (AC), lecture labiale + clés (LC) et, enfin, audio + lecture labiale + clés (ALC). Les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sont indéniables, comme l'attestent les résultats : plus de 80% des syllabes sont identifiées correctement pour les conditions LC et ALC alors que les résultats des conditions L, AL, C et AC ne dépassent pas 30 à 40% d'identifications correctes. Au niveau des mots clés, ils ont proposé des phrases simples avec deux niveaux contextuels différents : le contexte sémantique était soit fortement prédictible, soit faiblement prédictible. Les mots clés étaient toujours insérés en fin de phrase. Par exemple, la phrase « *Go to sleep in your bed* » ciblait le mot « *bed* » avec un haut niveau de prédictibilité tandis que la phrase « *Where is my book ?* » ciblait le mot « *book* » avec un faible niveau de prédictibilité. Encore une fois, les résultats sont en faveur de l'exposition au *cued speech* avec pas moins de 95% d'identifications correctes en conditions LC et ALC, peu importe le niveau de prédictibilité sémantique. Ce résultat est d'autant plus intéressant qu'il met en évidence l'efficacité du *cued speech* sans information auditive. En effet, l'absence de son (modalité LC) ne diminue pas le pourcentage de réponses correctes ce qui appuie les bénéfices de l'exposition au *cued speech*, peu importe le degré de récupération auditive.

Gregory (1987) a proposé un test d'identification de mots isolés à onze personnes sourdes âgées de 11 à 68 ans et ayant été exposées au *Cued American* sur une période allant de deux à neuf ans. Les items à identifier étaient proposés avec ou sans clés manuelles. Une première session a mis en évidence un score moyen d'identification de 43% sans clés manuelles contre 76% avec clés manuelles. Ces résultats confirment une nouvelle fois l'efficacité du *cued speech* pour la perception de mots isolés. Pour aller plus loin, Gregory s'est interrogé sur les potentiels bénéfices d'un entraînement intensif au décodage du *cued speech* pour favoriser la perception de parole. A l'issue de la première session expérimentale, les participants ont donc bénéficié d'un entraînement intensif de 18h pour améliorer leur niveau de perception du *Cued American*. Une deuxième session de perception de mots a ensuite été conduite. Les résultats ont alors montré que l'entraînement intensif au décodage du *cued speech* n'augmente pas les scores d'identification de mots isolés (i.e. score moyen de 76% pour la perception de mots présentés avec les clés manuelles). Les bénéfices de l'exposition au *cued speech* ne semblent donc pas conditionnés par l'entraînement à court terme.

Périer et al. (1990) ont mis en évidence l'apport des clés manuelles sur la perception de phrases simples en français. Ils ont proposé une tâche de perception de phrases simples à deux groupes d'enfants sourds : le premier groupe comptait 24 enfants âgés de huit à 14 ans et exposés à la LfPC à l'école uniquement (groupe « école ») tandis que le second groupe rassemblait 11 enfants de cinq à 10 ans et exposés à la LfPC à l'école et à la maison (groupe « maison »). La tâche consistait à choisir parmi quatre images celle qui correspondait à la phrase prononcée. Le corpus se composait de 78 phrases présentées avec ou sans LfPC. Trois niveaux de complexité labiale étaient proposés. Dans le niveau facile, les quatre images présentées illustraient des phrases labialement différentes, ainsi l'identification d'un seul mot permettait de trouver l'image correspondant à la phrase produite (par exemple, « Il montre le gâteau », « Le sac est lourd », « Il prend une robe », « Les œufs sont noirs »). Les phrases du niveau moyen contenaient un mot visuellement similaire (par exemple, « La poule est chaude », « La frite est chaude », « La frite est jaune », « La moule est jaune »). Enfin, dans le niveau difficile, les quatre phrases illustrées étaient produites avec des images labiales identiques et aucun indice contextuel n'était proposé (par exemple, « La fermière porte la poire », « La fermière porte l'armoire », « L'infirmière porte la poire », « L'infirmière porte l'armoire »). Toutes phrases confondues, les résultats ont révélé que l'ajout des clés manuelles augmente significativement les performances des participants. Les sujets du groupe « école » reconnaissent 60% de phrases en lecture labiale seule contre 71% quand les clés manuelles sont ajoutées. Les sujets du groupe « maison », quant à eux, identifient 66% de phrases en lecture labiale seule contre 86% lorsque les clés manuelles sont proposées. Par ailleurs, les auteurs soulignent que les clés manuelles sont encore plus pertinentes dans le cadre des phrases de niveau difficile. En effet, les scores passent de 39% en lecture labiale seule à 72% avec les clés manuelles pour les enfants du groupe « maison ». Enfin, cette étude met en évidence que la perception de phrases des enfants exposés à la LfPC à l'école et à la maison est meilleure que celle des enfants exposés uniquement à l'école. Toutefois, l'augmentation de la perception avec l'ajout des clés manuelles pour le groupe « école » demeure non négligeable comparativement au score en lecture labiale seule.

Plusieurs études se sont également intéressées à l'efficacité du *cued speech* lorsque le message est plus complexe et/ou plus long (par exemple, suivre une conversation). En ce qui concerne les études francophones, Alegria et al., (1999) ont réalisé une tâche d'identification de mots et de pseudomots avec deux groupes d'enfants sourds. Le corpus

contenait des mots et des pseudomots bisyllabiques, contenant quatre phonèmes (les structures syllabiques proposées étaient de type CV-CV, VC-CV, V-CVC et V-CCV), présentés avec ou sans clés manuelles de la LfPC. Le premier groupe d'enfants (« LfPC précoce ») se composait de sept enfants âgés de huit à douze ans et exposés à la LfPC de manière précoce (soit à la maison, avant l'âge de deux ans) et ce pendant au moins six ans. Le second groupe (« LfPC tardive ») était constitué de 24 enfants âgés de 11 à 19 ans et exposés tardivement à la LfPC (soit entre cinq et neuf ans) et ce pendant au moins trois ans. Les résultats ont pointé une augmentation significative des compétences perceptives avec l'ajout de la LfPC : les scores moyens sont passés de 40% en lecture labiale seule à 70% d'identification avec les clés manuelles ajoutées. Par ailleurs, les auteurs ont mis en évidence que les scores d'identification du groupe « LfPC précoce », principalement pour les pseudomots, étaient supérieurs à ceux du groupe « LfPC tardive ». Comme démontré par les études de Gregory (1987) et Périer et al. (1990), il semblerait donc que l'âge de début d'exposition au *cued speech* joue un rôle déterminant sur les capacités perceptives des personnes sourdes.

Du côté des études anglophones, Uchanski et al. (1994) ont observé que l'ajout des clés manuelles du *cued speech* avait un impact positif sur la perception de parole conversationnelle et de phrases complexes. Les participants de cette étude étaient quatre adultes sourds âgés de 18 à 27 ans avec une expérience du *cued speech* variant de 8 à 25 ans. Pour tous les sujets, le *cued speech* a été utilisé de manière intensive pendant les années d'école primaire et secondaire ainsi qu'à la maison. Cependant, au moment de l'étude, leur utilisation du *cued speech* n'avoisinait que quelques heures par jour pour les plus exposés. Les résultats de cette expérimentation ont montré que les participants identifiaient, en moyenne, 62% de la parole conversationnelle et 25% de phrases complexes en modalité lecture labiale seule. Lorsque les clés du *Cued American* étaient ajoutées à la lecture labiale (toujours sans information auditive), les scores moyens atteignaient 97% pour la parole conversationnelle et 84% pour les phrases complexes. Il apparaît donc clairement que l'utilisation du *cued speech* permet aux personnes sourdes de percevoir la parole aussi efficacement que leurs pairs entendants. Les travaux de Bratakos et al. (1998) ont confirmé ces résultats : les scores moyens de perception de phrases complexes de six adultes sourds (de 19 à 27 ans), exposés au *cued speech* depuis minimum douze ans, n'atteignaient que 30% en lecture labiale seule contre 84% lorsque les clés manuelles étaient ajoutées. Duchnowski et al. (2000), quant à eux, obtiennent 35%

d'identification de mots clés en lecture labiale seule chez cinq adultes, âgés de 19 à 24 ans et exposés au code depuis au moins 14 ans, alors que les scores atteignent 91% d'identification lorsque les clés manuelles sont ajoutées.

En résumé, toutes ces études indiquent que l'exposition au *cued speech* est un moyen efficace de compléter les informations auditives et labiales afin de favoriser la perception de parole, aussi bien pour les syllabes, les mots que les phrases simples ou complexes ainsi que la parole conversationnelle. Ces bienfaits ont d'ailleurs été observés aussi bien pour les versions anglophone que francophone du *cued speech*. Par ailleurs, plusieurs études ont également mis en lumière l'importance de la durée d'exposition au *cued speech* qui semble constituer un facteur déterminant dans l'efficacité du système.

De manière plus remarquable encore, quelques études ont également révélé que l'exposition au *cued speech* présentait des effets à plus long terme en facilitant la perception de parole même lorsqu'elle est présentée sans indices manuels. Aparicio et al. (2012) ont exploré les avantages de l'exposition à la LfPC sur les compétences en lecture labiale. En réutilisant le matériel de l'étude de Périer et al. (1990), ils ont demandé à 30 adultes sourds congénitaux de pointer l'image correspondant à la phrase qui venait d'être diffusée sous la forme d'une vidéo, sans information auditive ni indice manuel. Parmi ces participants, 15 sujets avaient été exposés à la LfPC dès leur plus jeune âge, tandis que les 15 autres n'y avaient pas été exposés du tout. Les résultats ont montré qu'à expérience auditive similaire, les adultes exposés à la LfPC dans leur enfance avaient de meilleures performances en lecture labiale que les sujets qui n'avaient pas reçu de LfPC (80% de réponses correctes pour les utilisateurs précoces contre 65% de réponses correctes pour les non-utilisateurs). Il semble donc que l'exposition précoce à la LfPC, en plus d'aider la perception de la parole lorsque des indices manuels sont ajoutés, améliore également les capacités de lecture labiale lorsqu'aucun indice manuel n'est présenté.

Enfin, l'étude de Kos et al. (2009) a mis en évidence un effet de l'exposition au *cued speech* sur la perception de la parole lorsque seules les informations auditives sont disponibles. Les auteurs ont demandé à treize personnes sourdes porteuses d'implants cochléaires d'identifier des voyelles et des consonnes sans aucun indice visuel ou contextuel. Ils ont alors constaté que l'exposition à la LfPC avant l'implantation cochléaire améliore l'identification de phonèmes après l'implantation et lorsque les stimuli sont présentés en modalité audio uniquement. Kos et al. ont donc supposé que l'utilisation de la LfPC avant

l'implantation cochléaire favoriserait la connaissance de la structure temporelle de la langue vocale, dans laquelle les sons sont organisés de manière séquentielle pour former des mots et des phrases. Cela soutiendrait le développement de compétences phonologiques plus précises, ce qui améliorerait la perception de la parole audio après l'implantation cochléaire.

Les études sur la perception de la parole présentées ici révèlent l'impact bénéfique de l'exposition au *cued speech* sur le développement des connaissances phonologiques chez les personnes sourdes. Cette amélioration des compétences phonologiques peut avoir des répercussions sur le développement des représentations phonologiques ainsi que sur le développement linguistique.

2.3.2. DEVELOPPEMENT DES REPRESENTATIONS PHONOLOGIQUES ET DEVELOPPEMENT LINGUISTIQUE

Les représentations phonologiques constituent toutes les informations concernant la structure sonore d'une langue donnée qui sont stockées en mémoire à long terme (Munson et al., 2012). La qualité de ces représentations joue un rôle clé dans la perception et la production de la parole, ainsi que dans la mémoire verbale à court terme et dans le développement des compétences en lecture et en écriture (Campbell, 1992; Elbro, 1996; Fowler, 1991; Leybaert & Charlier, 1996; Rvachew et al., 2003; Stackhouse et al., 1997). Chez les enfants ayant une audition normale, les représentations phonologiques émergent de l'entrée multisensorielle fournie par l'environnement linguistique (Beckman & Edwards, 2000) alors que chez les enfants porteurs d'une déficience auditive profonde, elles se construisent principalement à partir de la lecture labiale, en raison du manque d'informations auditives (Burden & Campbell, 1994; Dodd, 1979; Leybaert & LaSasso, 2010). Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, hors contexte, la lecture labiale ne donne accès qu'à dix à 30% d'un mot ou d'une phrase (Bernstein et al., 2000). Par conséquent, en se basant uniquement sur la lecture labiale, les enfants sourds n'ont accès qu'à des informations incomplètes d'où un développement de connaissances phonologiques sous-spécifiées (Charlier & Leybaert, 2000; Leybaert et al., 2011), pouvant impacter ultérieurement le développement du langage oral et entraîner des troubles persistants.

Comme nous venons de le voir, le système du *cued speech* va venir compenser la dégradation de l'information auditive en fournissant des informations phonologiques à l'aide d'indices manuels. En plus de faciliter la perception de parole, il a été démontré que l'exposition au *cued speech* a un impact positif sur la conscience phonologique et les compétences linguistiques. Pour examiner les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur le développement de la conscience phonologique, plusieurs études ont porté sur les compétences en matière de rimes chez les enfants sourds. Chez les enfants entendants, la capacité à produire et à juger des rimes émerge, généralement, de manière spontanée, avant tout contact avec l'alphabétisation (Read, 1978).

Charlier & Leybaert (2000) ont proposé une tâche de jugement de rimes à plusieurs groupes d'enfants sourds et qui bénéficiaient de différents modes de communication. Le premier groupe (LfPC+) était composé de 16 enfants sourds, âgés de six à 15 ans, exposés à la LfPC à la maison et ce de manière précoce (avant l'âge de trois ans). Le second groupe (LfPC-) réunissait 18 enfants sourds, âgés de sept à 16 ans, exposés à la LfPC à l'école uniquement, c'est-à-dire que l'exposition a débuté tardivement. Un troisième groupe (O) de 29 enfants sourds, âgés de neuf à 17 ans, bénéficiant d'une éducation oraliste stricte (i.e., sans aucun ajout de gestes ou de signes), a également été étudié. Les quatrième et cinquième groupes (LSF+ et LSF-), étaient constitués respectivement de douze enfants sourds exposés à la LSF depuis leur naissance et de 20 enfants sourds exposés à la LSF dès leur entrée à l'école. Les enfants LSF+ étaient âgés de six à treize ans et les enfants LSF- de six à douze ans. Enfin, ces cinq groupes d'enfants sourds ont été mis en regard d'un groupe contrôle composé de douze enfants normo-entendants âgés de sept à douze ans (l'appariement a été fait en fonction du niveau scolaire des participants). Deux images étaient montrées à l'enfant qui devait juger si les mots illustrés rimaient ou non. Au total, 35 paires d'images ont été présentées, réparties en quatre groupes de difficulté : sept paires dont les rimes présentaient une similitude orthographique (« cœur » / « fleur »), onze paires de rimes où l'orthographe différait (« soleil » / « oreille »), sept paires où les mots ne rimaient pas mais dont l'image labiale était identique (« lit » / « nez ») et dix paires d'items qui ne rimaient pas et dont l'image labiale était différente (« loup » / « train »). Le jugement de rime étant basé uniquement sur les images, les enfants devaient s'appuyer sur leurs connaissances phonologiques perceptives pour évaluer la similarité des unités sublexicales. Les résultats montrent que les enfants ayant bénéficié d'une exposition précoce et intensive à la LfPC (groupe LfPC+) ont donné significativement plus

de réponses correctes que les quatre autres groupes d'enfants sourds (c'est-à-dire ceux qui ont bénéficié d'une exposition à la LfPC à l'école uniquement, ceux qui ont été éduqués exclusivement par la méthode oraliste stricte ou ceux qui ont été éduqués en LSF). Aucune différence significative dans les jugements de rimes n'a été observée entre les groupes LfPC+ et le groupe contrôle d'enfants normo-entendants. Ces résultats suggèrent donc que l'exposition précoce à la LfPC, en fournissant une information phonologique parfaitement spécifiée, soutient les capacités de jugement des rimes. Paire-Ficout et al. (2003) obtiennent des résultats similaires pour les enfants sourds prélecteurs.

Une autre façon d'évaluer les compétences en matière de rimes consiste à demander aux enfants de générer des mots qui riment avec un mot cible, illustré par une image. Paire-Ficout et al. (2003) ont comparé la génération de rimes chez des enfants sourds prélecteurs avec ou sans exposition à la LfPC. Un groupe de huit enfants sourds exposés à la LfPC à l'école et un groupe de huit enfants sourds qui n'ont jamais été exposés à la LfPC ont été comparés à un groupe de 34 enfants normo-entendants. Les auteurs ont observé que l'exposition à la LfPC améliore la production de rimes, les performances des enfants sourds exposés à la LfPC atteignant celles de leurs pairs normo-entendants. Les auteurs ont conclu que l'exposition à la LfPC semble renforcer l'entrée phonologique, mieux spécifier les contrastes phonologiques et faciliter l'accès au lexique mental, ce qui encourage la production de rimes. Cependant, la capacité à générer des rimes pourrait également provenir de l'expérience de l'orthographe alphabétique plutôt que des connaissances phonologiques en soi.

Charlier & Leybaert (2000) ont examiné la capacité à générer des rimes avec des mots orthographiquement différents de l'item cible. Elles ont montré que les enfants exposés précocement et intensivement à la LfPC étaient meilleurs dans cette tâche que les enfants exposés tardivement, à l'école uniquement. LaSasso & Leybaert, (2003) obtiennent des résultats similaires pour la génération de rimes chez des adultes sourds exposés au *Cued American*.

Ces résultats suggèrent que les personnes sourdes, lorsqu'elles sont exposées au *cued speech* de manière précoce et adaptée, peuvent s'appuyer sur une stratégie phonologique plutôt que sur une stratégie orthographique pour générer des rimes (voir aussi Leybaert et al., 2011 pour une revue des études sur les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur le jugement et la génération de rimes). En résumé, l'exposition précoce au *cued speech*

améliore les compétences en matière de rimes, même sans aide orthographique. Cela met en évidence que l'exposition au *cued speech* contribue au développement de la conscience phonologique, et ce en français comme en anglais.

La conscience phonologique est l'une des habiletés fondamentales sur lesquelles se développent les compétences en lecture. À la suite des travaux de Charlier & Leybaert (2000), Colin (2004) et Colin et al. (2007) ont constaté que l'exposition à la LfPC avant l'apprentissage de la lecture favorise la reconnaissance des mots écrits parce que l'utilisation du code clarifie l'entrée phonologique et rend tous les contrastes phonologiques saillants. Une exposition intensive semble d'ailleurs améliorer davantage les compétences phonologiques, puisque Leybaert & Charlier (1996) montrent que les enfants exposés à la LfPC à la maison et à l'école développent des compétences similaires à celles de leurs pairs normo-entendants pour le jugement des rimes avant l'apprentissage de la lecture. La correspondance graphème-phonème développée grâce à l'utilisation du *cued speech* permet aux enfants sourds d'atteindre un niveau de lecture équivalent à celui de leurs pairs entendants (Bouton et al., 2011; Leybaert et al., 2011; Leybaert & Charlier, 1996). Cependant, il semblerait que la langue d'enseignement influence les performances en lecture chez les enfants sourds, l'impact du *cued speech* peut donc varier en fonction du degré de transparence orthographique de chaque langue. Trezek (2017) rappelle que la correspondance phonème-graphème diffère entre les langues. Elle suggère que, bien que le *cued speech* permette le développement des représentations phonologiques, l'amélioration de la lecture pourrait varier entre les enfants en raison de la transparence orthographique dans leur langue maternelle (i.e., l'anglais étant une langue particulièrement opaque, les études sont mitigées sur les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur le développement de la lecture, voir Trezek, 2017 pour une revue sur l'anglais).

Il a également été suggéré que l'exposition à la LfPC favorise le développement lexical (Hage, 1994) et améliore le niveau orthographique des enfants sourds, qui atteignent un niveau orthographique similaire à celui de leurs pairs normo-entendants avec des erreurs phonologiquement correctes (Leybaert, 2000). Par ailleurs, l'exposition à la LfPC permet un meilleur développement de la morphosyntaxe. Les caractéristiques morphologiquement significatives, qui sont difficiles à percevoir lorsque l'information acoustique est dégradée parce qu'elles sont produites rapidement, deviennent

perceptiblement plus saillantes grâce à l'ajout de l'information manuelle (Hage et al., 1991; Hage & Leybaert, 2005).

Enfin, Charlier (1994, citée dans Leybaert & Charlier, 1996) a montré que l'exposition à la LfPC favorise le développement de la boucle articulatoire. De la même manière que leurs pairs normo-entendants, les enfants sourds exposés précocement à la LfPC (c'est-à-dire avant 3 ans et de manière intensive à la maison) s'appuient davantage sur des stratégies phonologiques pour se souvenir d'une liste de mots que les enfants sourds qui n'ont aucune expérience de la LfPC, comme en témoigne leur sensibilité à l'effet de similarité phonologique et à l'effet de longueur des mots. De plus, Leybaert & Charlier (1996) ont montré que l'empan mnésique des enfants exposés de manière précoce à la LfPC est plus important que celui des enfants exposés tardivement (à partir de six ans, c'est-à-dire à l'école uniquement).

Dans l'ensemble, ces études indiquent que l'exposition au *cued speech* favorise le développement de représentations phonologiques précises, ce qui conduit à une meilleure perception de la parole ainsi qu'à une meilleure conscience phonologique. L'exposition au *cued speech* favorise également le développement de la lecture, de l'orthographe et des capacités de mémorisation.

Résumé. De nombreuses études ont montré les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur la perception de parole et le développement phonologique en langue vocale chez l'enfant sourd. Un consensus a émergé de ces nombreux travaux quant à l'amélioration de la perception de parole mais également concernant le développement de représentations phonologiques précises. L'exposition au *cued speech* renforce ainsi le développement de la conscience phonologique, ce qui a un impact important sur le développement langagier de l'enfant sourd, notamment en ce qui concerne l'acquisition de la lecture et le développement lexical et orthographique. A ce jour, aucune étude n'a toutefois encore été publiée concernant les potentiels bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur la production de parole.

2.4. LA COMBINAISON DE L'IMPLANTATION COCHLEAIRE A L'EXPOSITION A LA LFPC

Les différents travaux autour des difficultés liées à l'implantation cochléaire et des bénéfices de l'exposition au *cued speech* nous amènent à penser que la combinaison de l'implantation cochléaire à une exposition au *cued speech* favoriserait grandement la perception de la parole et, donc, le développement langagier de manière générale. Toutefois, peu d'études se sont intéressées à l'association de ces deux systèmes, respectivement auditif et manuel, ainsi qu'aux bénéfices potentiels de cette combinaison.

Descourtieux et al. (1999) ont proposé une tâche de perception de mots à 42 enfants porteurs d'implants cochléaires, âgés de trois à 16 ans. Les mots étaient présentés selon trois modalités différentes : audio seul, audiovisuel (i.e., audio + lecture labiale) et lecture labiale + LfPC (version francophone du *cued speech*, cf. Paragraphe 2.1, ci-dessus) sans son. Les résultats de cette étude mettent en évidence que l'ajout de l'information labiale augmente considérablement la perception de parole avec plus de 80% de réponses correctes. Par ailleurs, Descourtieux et al. (1999) mettent en avant que les performances sont légèrement supérieures pour la modalité lecture labiale et LfPC sans son. Davantage d'informations phonologiques sont transmises par le biais du *cued speech*, comparativement à la lecture labiale. Bien que l'audition avec implant cochléaire permette un accès facilité à la parole avec un développement de la communication proche de celui des enfants normo-entendants, les résultats de cette étude montrent que l'exposition au *cued speech* des enfants porteurs d'implants cochléaires améliore considérablement leur perception de la totalité du message vocal et ce, dès trois ans. Ces résultats, observés pour la langue française, ont également été mis en évidence chez des enfants anglophones (Leybaert et al., 2016). Par ailleurs, la perception de parole dans le bruit reste altérée malgré l'implant cochléaire (Bayard, 2014; Hage & Leybaert, 2005) mais l'exposition au *cued speech* améliore significativement l'accès à la parole bruitée (Bayard et al., 2019). Finalement, l'association du *cued speech* à l'implantation cochléaire permet d'approcher une qualité d'intégration multisensorielle de la parole proche de celle des normo-entendants (Bayard, 2014; Leybaert et al., 2016).

Quelques auteurs ont également mis en évidence que l'exposition au *cued speech* avant l'implantation cochléaire augmente les résultats post-implantation. Cochard (2003), à partir de tâches de perception de parole et de reconnaissance de mots dans des phrases, a montré que lorsque les enfants sont exposés à la LfPC avant l'implantation cochléaire,

leur perception est significativement améliorée. Toutefois, à partir de cinq ans post-implantation, les enfants n'ayant bénéficié d'aucune aide avant implantation, ou n'ayant été exposé qu'au français signé, atteignent des compétences perceptives similaires à celles des enfants exposés au *cued speech* avant l'implantation cochléaire. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Kos et al. (2009) qui a mis en évidence que l'implant cochléaire améliore la perception de parole, peu importe le mode de communication utilisé (i.e., *cued speech* vs langue des signes dans cette étude). Cependant, les auteurs observent que les performances auditives globales post-implantation sont significativement meilleures pour les participants ayant bénéficié d'une exposition au *cued speech* avant leur implantation cochléaire. Par ailleurs, la perception auditive est améliorée malgré une implantation tardive. Notons tout de même que, comme le souligne Hage & Leybaert (2005), l'implantation cochléaire est aujourd'hui très précoce (i.e., parfois avant douze mois) ce qui rend difficile la mise en place du *cued speech* avant l'implantation. Toutefois, les premiers mois post-implantation, de nombreux réglages doivent être réalisés et le signal acoustique transmis par l'implant cochléaire est imparfait. Par ailleurs, le traitement cognitif du signal acoustique perçu via l'implant cochléaire n'est pas encore efficient, c'est pourquoi il semble pertinent de commencer à mettre en place le *cued speech* durant cette période précoce, afin d'assurer l'accès aux informations auditives dans leur entièreté.

Les études autour de l'implantation cochléaire ont montré que certains enfants n'atteignent pas des compétences langagières similaires à celles des enfants normo-entendants trois ans post-implantation, malgré une implantation avant quatre ans (Hage & Leybaert, 2005). L'exposition au *cued speech*, grâce à la désambiguïsation de l'information auditive reçue par l'implant cochléaire, permet le développement de compétences langagières plus précises (Cochard, 2003) avec une augmentation du stock lexical, une amélioration de la syntaxe mais également de meilleures compétences morphosyntaxiques grâce à la perception totale de la chaîne parlée (Hage & Leybaert, 2005). Bouton et al. (2011) ont étudié le jugement phonémique et la mémoire phonologique à court terme chez 18 enfants porteurs d'implants cochléaires, âgés de huit à onze ans et implantés avant trois ans et demi. Neuf d'entre eux étaient exposés au *cued speech* dans sa version francophone. Les résultats de cette étude montrent que l'exposition au *cued speech* améliore significativement la conscience phonologique, mais, toutefois, il semblerait que la mémoire phonologique à court terme ne soit pas influencée

par l'exposition au *cued speech*. Par ailleurs, Bouton et al. (2011) observent que l'exposition au *cued speech* facilite l'acquisition de la correspondance graphème-phonème avec une amélioration de l'identification et de la manipulation des unités phonémiques, ce qui favorise le développement des compétences en lecture. Colin et al. (2017), quant à eux, ont comparé 90 enfants porteurs d'implants cochléaires en fonction de leur âge d'implantation et de leur âge d'exposition au *cued speech*. A partir de tâches de suppression phonémique, de lecture, de vocabulaire et d'orthographe, ils ont mis en évidence un effet de l'âge d'exposition au *cued speech* sur le développement de différentes compétences linguistiques. Les auteurs observent un effet précoce du *cued speech* sur le développement de l'orthographe tandis qu'un effet plus tardif est observé sur le niveau de compréhension en lecture. Par ailleurs, leurs résultats mettent en évidence un effet de la précocité de l'implantation sur le développement de toutes les compétences langagières étudiées (i.e., conscience phonologique, vocabulaire, lecture et orthographe). Toutefois, Leybaert et al. (2016) soulignent que la conscience phonologique des enfants implantés tardivement est moins développée que celle des enfants implantés précocement qui, malgré tout, ont une conscience phonologique plus faible que celle des enfants normo-entendants. Ces observations sont en faveur de l'association de l'implantation cochléaire à l'exposition au *cued speech*.

Une étude s'est également intéressée aux bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur l'intelligibilité de la parole d'enfants porteurs d'implants cochléaires. Vieu et al. (1998) ont soumis douze enfants porteurs d'implants cochléaires à une tâche de dénomination d'images avant l'implantation cochléaire puis à un an, deux ans et trois ans post-implantation. Avant l'implantation, quatre enfants bénéficiaient d'une exposition au *cued speech*, quatre autres utilisaient la langue des signes et les quatre derniers étaient éduqués via une communication orale sans aide gestuelle. Afin d'évaluer l'intelligibilité de la parole de chaque participant, leurs productions ont été jugées perceptivement par des adultes non spécialistes de la parole. Cette étude longitudinale a montré une augmentation des scores d'intelligibilité de la parole pour tous les groupes suite à l'implantation cochléaire avec une progression encore plus importante pour les enfants exposés au *cued speech* (+ 44,3% trois ans post-implantation pour les enfants exposés au *cued speech* contre + 36,6% pour les enfants sans aide gestuelle et + 28,7% pour les enfants avec langue des signes). Les scores d'intelligibilité des enfants exposés au *cued speech* sont plus élevés que ceux des deux autres groupes, avant et après implantation.

Une tâche de production de parole spontanée met également en évidence que les enfants exposés au *cued speech* présentent des compétences syntaxiques plus avancées que les enfants sans aide gestuelle ou avec langue des signes, toutefois, cette différence n'est pas significative (Vieu et al., 1998). Ces résultats sont en accord avec les observations de Kos et al. (2009) qui constatent que l'exposition au *cued speech* améliore l'intelligibilité de la parole spontanée, bien que cette dernière soit déjà améliorée par l'implantation cochléaire.

Résumé. La combinaison de l'implantation cochléaire à l'exposition au *cued speech* améliore la perception de parole et ce même dans le bruit. Quelques études mettent également en avant l'amélioration du gain post-implantation lorsque l'enfant est exposé au *cued speech* avant l'implantation cochléaire. Enfin, de nombreux bénéfices ont été mis en évidence en ce qui concerne le développement des compétences langagières, en particulier de la conscience phonologique, mais également de l'intelligibilité de la parole.

2.5. QUESTION DE RECHERCHE

Ainsi, à notre connaissance, seules deux études sont actuellement disponibles dans la littérature sur l'apport de l'exposition au *cued speech* sur le développement des compétences de production de la parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. De plus, si ces études mettent en évidence les effets de l'exposition au *cued speech* combiné à l'implantation cochléaire sur l'intelligibilité de la parole, elles n'examinent pas de façon détaillée la qualité et la précision des productions. Notre projet est donc d'étudier les bénéfices à long terme de l'exposition au *cued speech*, dans sa version francophone (LfPC), sur le développement de la production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires.

L'objectif de ce travail de thèse est, plus précisément, d'examiner dans quelles mesures l'exposition à la LfPC peut améliorer la qualité et la précision de la production de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires.

Notre hypothèse générale est que l'exposition à la LfPC améliore la perception de parole, ce qui favorise le développement des représentations phonologiques chez l'enfant porteur d'implants cochléaires. Nous supposons que ces compétences phonologiques développées en perception sont transférées à la production de parole, ce qui conduirait à une amélioration de la production des phonèmes chez les enfants ayant été exposés à la LfPC. Les représentations phonologiques enrichies sur le plan perceptif, grâce au *cued speech*, constituent ainsi des informations plus complètes, utilisables par le système de production de la parole pour conduire à une réalisation plus précise des unités sonores de la langue, comme cela a déjà été démontré pour les enfants au développement typique (Munson et al., 2012; Schwartz, Basirat, et al., 2012). En outre, il a également été montré que l'entraînement perceptif améliore la production de la parole chez les enfants présentant des troubles des sons de parole (Rvachew et al., 2004). Par conséquent, nous nous attendons à ce que l'exposition au *cued speech*, par son effet sur la perception de la parole et sur les représentations phonologiques, impacte positivement les capacités de production de la parole des enfants porteurs d'implants cochléaires. Cette hypothèse a déjà été envisagée par Leybaert & Van Reybroeck (2004) mais aucune étude à ce sujet n'a jamais été publiée. Toutefois, rappelons que lors de l'élaboration du système du *cued speech*, Cornett (1967) s'était interrogé sur la possibilité de créer un outil favorisant la perception de parole mais également l'accroissement de l'intelligibilité de la parole. Malheureusement, la nécessité d'expérimentations scientifiques pour mesurer ce bénéfice ne lui a pas permis de prendre ce critère en compte dans la conception de ce système manuel.

Dans le but d'analyser l'effet de l'exposition au *cued speech* sur la production de parole d'enfants francophones, ce travail s'articule autour de trois études expérimentales.

(1) Une première étude propose d'analyser les **caractéristiques phonétiques** de la production de parole d'enfants porteurs d'implants cochléaires en comparant la production de phonèmes français chez des enfants présentant différents niveaux de décodage de la LfPC. En effet, comme le suggèrent Colin et al. (2015; 2017), nous considérons que la capacité de l'enfant à déchiffrer les clés manuelles (i.e., la compétence de décodage) est primordiale pour étudier les effets de l'exposition au *cued speech*. Les productions de deux groupes d'enfants porteurs d'implants

cochléaires de niveaux de décodage différents sont comparées à celles d'un groupe d'enfants normo-entendants.

A partir d'une tâche de dénomination d'images issue de la batterie EULALIES (Meloni, 2022; Meloni et al., 2018), nous étudions la production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles. Une analyse approfondie des traits acoustiques de voisement, de nasalité, de mode d'articulation et de lieu d'articulation des consonnes est également fournie.

En se basant sur le fait que l'exposition au *cued speech* favorise le développement de représentations phonologiques précises, plusieurs hypothèses sont formulées.

(H1.1) Nous nous attendons à ce que les enfants porteurs d'implants cochléaires ayant un niveau élevé de décodage de la LfPC (i.e., capacité à décoder des mots et des phrases simples à la vitesse de la parole, sans voix) présentent des scores de production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles similaires à ceux de leurs pairs normo-entendants.

(H1.2) Nous supposons également qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC permet la réalisation plus précise des traits acoustiques de voisement, de nasalité, de mode et de lieu d'articulation pour les consonnes.

(H1.3) Nous présumons, enfin, que l'âge d'implantation impacte également la production de parole mais que le niveau de décodage de la LfPC permet de compenser les manques acoustiques liés à l'implantation cochléaire.

(2) Une seconde étude s'intéresse aux **caractéristiques acoustiques** de la production de consonnes plosives et de consonnes fricatives chez les enfants porteurs d'implants cochléaires lorsqu'ils sont exposés au *cued speech*. Afin de mieux quantifier l'influence de l'exposition au *cued speech* sur la précision articulatoire, nous examinons les propriétés acoustiques de la production des quatre consonnes /t/, /k/, /s/ et /ʃ/ par des enfants canadiens francophones porteurs d'implants cochléaires ayant bénéficié d'une exposition à la LfPC (dans sa version québécoise), en les comparant aux productions de pairs ayant une audition typique.

D'après les travaux de Sundarajan et al. (2020), l'acquisition des consonnes se fait dans le même ordre chez les enfants porteurs d'implants cochléaires que chez les

enfants normo-entendants mais plus tardivement. Ainsi, les consonnes plosives sont acquises plus précocement que les consonnes fricatives chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. Par ailleurs, les analyses acoustiques de Grandon (2016) ont mis en évidence les difficultés de production des consonnes fricatives chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. Ces observations nous conduisent à formuler les hypothèses suivantes.

(H2.1) Les enfants porteurs d'implants cochléaires, lorsqu'ils sont exposés à la LfPC, distinguent significativement les consonnes plosives ainsi que les consonnes fricatives.

(H2.2) Par ailleurs, nous nous attendons à ce que les productions des enfants porteurs d'implants cochléaires et exposés à la LfPC ne diffèrent pas significativement des productions des enfants normo-entendants en ce qui concerne les valeurs des formants F1, F2 et F3 pour les plosives et les fricatives ainsi que les valeurs de centre de gravité pour les fricatives.

(3) Une troisième et dernière étude s'attache à décrire les **caractéristiques articulatoires** des productions de consonnes plosives et de consonnes fricatives chez les enfants porteurs d'implants cochléaires et exposés au *cued speech*. Dans la continuité des études 1 et 2, nous nous interrogeons sur l'effet du niveau de décodage de la LfPC sur les mouvements articulatoires de la langue. Nous comparons ici les productions d'enfants porteurs d'implants cochléaires présentant différents niveaux de décodage de la LfPC québécoise (cf. étude 1). Très peu de travaux en phonétique articulatoire se sont intéressés à la production de parole chez l'enfant porteur d'implants cochléaires. A notre connaissance, seule l'étude de Turgeon et al. (2017) décrit la production vocalique d'enfants porteurs d'implants cochléaires. Par ailleurs, un manque de données articulatoires de production de consonnes chez l'enfant demeure dans la littérature. Cette troisième étude propose de tester, chez les enfants porteurs d'implants cochléaires et chez les enfants normo-entendants, la mesure de courbure MCI (*Mean Curvature Index*) plébiscitée par Dawson et al. (2016) chez les adultes, la mesure du point le plus haut de la langue utilisée pour caractériser la production vocalique par Ménard et al. (2013) ainsi que la mesure du lieu de la plus faible distance entre le contour de langue et le palais, permettant de caractériser le

point d'occlusion ou de constriction utilisée par Ohkubo & Scobbie (2019). Nous formulons ici l'hypothèse suivante.

(H3.1) Un niveau élevé de décodage de la LfPC permet aux enfants porteurs d'implants cochléaires d'avoir une meilleure représentation des sons de la parole, ce qui se traduirait par une articulation plus précise et des configurations linguales comparables à celles des enfants au développement typique. Plus précisément, nous nous attendons à ce que la courbure de la langue ainsi que le lieu d'articulation et le degré de constriction soient plus proches du groupe d'enfants normo-entendants pour les enfants avec un niveau élevé de décodage de la LfPC que pour les enfants avec de faibles compétences de décodage de la LfPC.

Notre travail de thèse se développe ainsi à travers deux corpus distincts. Un corpus de données acoustiques et perceptives recueillies à l'aide de la méthodologie EULALIES (corpus EULALIES-Surdité) et analysées dans le cadre de l'étude 1. Un corpus de données acoustiques et articulatoires recueillies par échographie par ultrasons (corpus ArtiMontréal) et analysées dans le cadre des études 2 et 3.

Chaque étude sera présentée sous la forme d'un article scientifique soumis dans une revue à comité de lecture⁹. Chaque chapitre débute par une présentation des objectifs spécifiques de chaque étude ainsi que des hypothèses expérimentales. Une synthèse des principaux résultats et de leurs interprétations est fournie à la fin de chaque article. Afin de garantir la fluidité de lecture, nous avons fait le choix de présenter chaque article en respectant la même mise en page que le reste du manuscrit. Par ailleurs, les références bibliographiques de chaque article sont intégrées à la bibliographie générale du manuscrit.

Avant d'entrer en détail dans la partie expérimentale de nos travaux, nous proposons de faire le point sur la méthodologie générale que nous avons adoptée pour la création et l'analyse de chacun de nos deux corpus de parole.

⁹ Les articles des études 1 et 2 ont été soumis. L'article de l'étude 3 est en préparation et sera soumis sous peu. Par ailleurs, les résultats de l'étude 1 ont été publiés dans une version francophone raccourcie dans les actes des 33^{ème} Journées d'Études sur la Parole (JEP 2020) (Machart, Vilain, Løevenbruck, et al., 2020)

**SECTION 2 : CREATION DE DEUX CORPUS DE PAROLE D'ENFANTS
PORTEURS D'IMPLANTS COCHLEAIRES ET D'ENFANTS TYPIQUES**

Afin d'observer l'effet de l'exposition au *cued speech* sur le développement de la parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires, nous avons constitué deux corpus de données de parole.

Le premier corpus, nommé ci-après corpus EULALIES-Surdité, est composé de données acoustiques et perceptives enregistrées chez quatorze enfants porteurs d'implants cochléaires exposés à la LfPC et 71 enfants normo-entendants, âgés de 60 à 137 mois. Ces données de parole ont été recueillies en France, dans la région grenobloise, à partir de la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES (Meloni et al., 2018) et sont analysées dans l'étude expérimentale 1.

Le second corpus, nommé ci-après corpus ArtiMontréal, englobe un ensemble de données acoustiques et articulatoires recueillies par échographie par ultrasons chez neuf enfants porteurs d'implants cochléaires et dix enfants normo-entendants, âgés de 52 à 133 mois. Ces données de parole ont été enregistrées au Québec, à Montréal, et sont analysées dans le cadre des études expérimentales 2 et 3.

CH3. CORPUS EULALIES-SURDITE : DONNEES PHONETIQUES

Ce premier corpus de données de parole a été constitué dans le but d'analyser les **caractéristiques phonétiques** de la production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires en fonction de leur niveau de décodage de la LfPC.

L'objectif est d'étudier la production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles ainsi que d'analyser plus spécifiquement la production des traits acoustiques de voisement, de nasalité, de mode d'articulation et de lieu d'articulation des consonnes.

Ces données de parole ont été recueillies à Grenoble, auprès de quatorze enfants porteurs d'implants cochléaires et présentant différents niveaux de décodage de la LfPC ainsi que 71 enfants normo-entendants faisant partie de la large cohorte d'enfants typiques du projet EULALIES (Meloni, 2022; Meloni et al., 2015, 2018).

Le chapitre suivant propose de décrire le protocole expérimental adopté pour la constitution de ce corpus de données de parole.

3.1. CRITERES D'INCLUSION

3.1.1. TEST TERMO

Dans le cadre de ces travaux, nous considérons que la compétence de décodage du *cued speech* de l'enfant sourd (i.e., capacité à déchiffrer les clés manuelles) est **primordiale** pour étudier les effets de l'exposition au *cued speech*. Cette distinction a peu été étudiée jusqu'à aujourd'hui, toutefois les travaux de Colin et al. (2015, 2017) mentionnent l'importance de comparer les performances des enfants déficients auditifs en fonction de leur compétence de décodage du *cued speech* plutôt que de la simple exposition au *cued speech*.

Pour ce faire, le niveau de décodage de la LfPC est mesuré à partir du test TERMO (Busquet & Descourtieux, 2000). Il s'agit d'un test qui permet d'évaluer la réception du message vocal, indépendamment de sa compréhension (Descourtieux, 2006). Plusieurs modalités peuvent être utilisées, nous ne proposons que les modalités *Audition + lecture labiale + LfPC* et *Lecture labiale + LfPC*. Notre objectif étant de définir le niveau de décodage de l'enfant, la modalité *Audition + lecture labiale + LfPC* sert de phase d'entraînement et seuls les résultats de la modalité *Lecture labiale + LfPC* sont utilisés pour définir le niveau de décodage du participant. Dans un premier temps, l'expérimentatrice demande à l'enfant de répéter à haute voix les mots qu'elle produit. Elle commence par une phase d'entraînement, avec une première liste de dix mots présentée dans la modalité *Audition + lecture labiale + LfPC*. Puis elle poursuit par la phase de test avec une seconde liste de dix mots présentée dans la modalité *Lecture labiale + LfPC*. Si l'enfant est capable de répéter plus de cinq mots en modalité *Lecture labiale + LfPC*, alors l'expérimentatrice propose de répéter des phrases. La phase d'entraînement comporte une série de cinq phrases en modalité *Audition + lecture labiale + LfPC* puis a lieu la phase de test, avec une série de cinq phrases en modalité *Lecture labiale + LfPC*. Différentes listes de mots et de phrases sont proposées selon l'âge de l'enfant, une première liste est utilisée pour les enfants de moins de huit ans (Annexe 3.1) et une seconde est proposés à partir de huit ans (Annexe 3.2).

A partir des scores obtenus par l'enfant dans les phases de test, quatre niveaux de décodage de la LfPC sont établis, de faible (niveau 4) à excellent (niveau 1) (Figure 3.1). En raison du faible nombre de participants à cette étude, deux sous-groupes ont été créés

en fonction du niveau de décodage de la LfPC. Les participants du groupe CF- ont un faible niveau de décodage de la LfPC : ils peuvent tout au plus décoder quelques mots familiers à vitesse lente (niveaux 3 et 4 sur l'échelle de niveau de décodage de la LfPC). Les sujets du groupe CF+, quant à eux, ont un bon niveau de décodage de la LfPC : ils sont capables de décoder des mots et des phrases à la vitesse de la parole (niveaux 1 et 2 sur l'échelle de décodage de la LfPC).

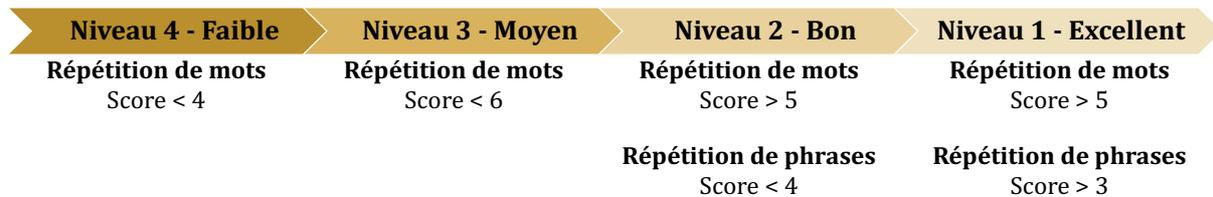


Figure 3.1 : Échelle de niveau de décodage de la LfPC

3.1.2. TEST D'EMPAN VISUEL : PATHSPAN¹⁰

Les capacités de mémoire à court terme peuvent influencer les compétences de répétition de mots. Certains enfants présentant des difficultés langagières, la répétition de chiffres peut être une difficulté supplémentaire. De ce fait, la mesure de leur mémoire à court terme peut ne pas être représentative de la réalité. Pour éviter ce biais, nous réalisons un test d'empan visuel administré à partir de l'outil ludique *PathSpan* (LeFevre et al., 2010). Une tablette est placée devant l'enfant. Sur l'écran, une grenouille saute sur des nénuphars (Figure 3.2). L'enfant doit alors retenir le trajet emprunté par la grenouille (i.e., la suite des emplacements) et le reproduire ensuite, en appuyant sur les points verts, dans le même ordre. Lorsque l'enfant a un échec dans deux suites comportant le même nombre de sauts, la tâche s'arrête. L'empan visuel correspond au plus grand nombre d'emplacements rapportés correctement et dans l'ordre (par exemple, si l'enfant échoue pour les deux suites de six sauts proposées, la suite la plus longue répétée sans erreur contient cinq sauts, l'empan visuel est donc de cinq).

¹⁰ Ce test d'inclusion a été ajouté après le début du recueil de données parce que nous nous sommes aperçues que certains enfants présentaient des difficultés avec la répétition de chiffres, notamment lorsqu'ils étaient multilingues. De ce fait, plusieurs participants n'ont pas effectué cette tâche (cf. Annexe 3.7)

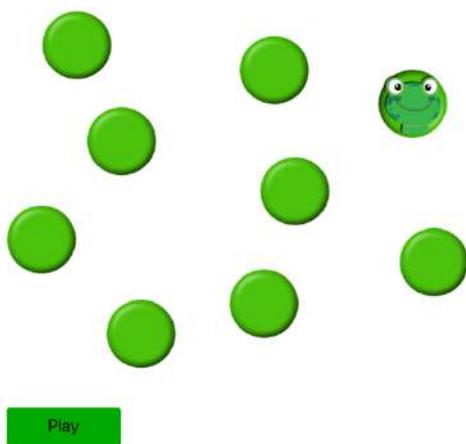


Figure 3.2 : Tâche d'empan visuel PathSpan

3.1.3. TEST DE MEMOIRE AUDITIVO-VERBALE : EMPAN ENDROIT¹¹

Les capacités de mémoire auditivo-verbale peuvent toutefois influencer la performance en répétition de mots, c'est pourquoi nous réalisons également le test d'empan de chiffres endroit de la batterie de test ODEDYS (Jacquier-Roux et al., 2005) (Annexe 3.3). L'expérimentatrice énonce oralement une suite de chiffres, en veillant à respecter un temps de pause d'une seconde entre chaque chiffre, et demande à l'enfant de les répéter dans le même ordre. Cette tâche consiste à déterminer le nombre maximal de chiffres que l'enfant est capable de retenir et de répéter, dans l'ordre dans lequel ils ont été présentés. Lorsque l'enfant fait une erreur dans deux suites du même nombre de chiffres, la tâche s'arrête. L'empan endroit correspond alors au nombre de chiffres de la plus longue suite donnée juste, par exemple, si l'enfant ne parvient pas à donner tous les chiffres des deux suites de cinq chiffres, la suite la plus longue répétée sans erreur contient quatre chiffres, l'empan endroit est donc de quatre.

3.1.4. TEST DE PRODUCTION DE LANGAGE ORAL : ELO

Pour mesurer les habiletés de production de langage oral de l'enfant, et plus particulièrement ses compétences morphosyntaxiques, nous utilisons la tâche de production d'énoncés de la batterie de test ELO (Evaluation du Langage Oral, Khomsi, 2001). Cette tâche est étalonnée de la petite section de maternelle au CM2. Deux images

¹¹ Certains participants n'ont pas effectué cette tâche parce qu'elle ne faisait pas encore partie du protocole de passation au moment de leur enregistrement (cf. Annexe 3.7)

sont présentées à l'enfant, l'expérimentatrice pointe la première image et la décrit par une phrase. L'expérimentatrice pointe ensuite la seconde image, commence la phrase et laisse l'enfant la compléter.

Par exemple, l'expérimentatrice pointe la première image (Figure 3.3) en disant « *ici, il y a un seul avion* » puis elle désigne la seconde image en introduisant l'énoncé que l'enfant doit compléter : « *là, il y a... ? [deux avions]* ». La tâche se compose de 25 phrases. Seules les 15 premières sont proposées aux enfants jusqu'en grande section de maternelle. Chaque phrase correcte rapporte un point.

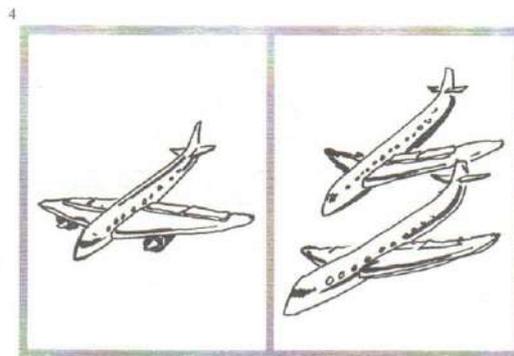


Figure 3.3 : Exemple d'item pour la tâche de production d'énoncés du test ELO

3.1.5. TEST AUDIOMETRIQUE

Afin d'éliminer un éventuel trouble de l'audition, un test audiométrique est réalisé pour les enfants normo-entendants. L'audition normale se situant entre 0 et 35 dB de perte (Figure 3.4), la perception de tonalités sur les fréquences 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000HZ, 4000Hz et 8000Hz a été testée à partir d'un audiomètre Electronica 9910, à une intensité de 20dB. Si l'enfant ne semble pas percevoir de son à 20dB dans le casque audio, l'expérimentatrice peut augmenter l'intensité de 5dB. L'environnement de passation pouvant être un peu bruyant (classe, temps de récréation, ventilation, etc.), l'intensité pouvait aller jusqu'à 35dB sans considérer un quelconque déficit auditif. Les participants pour lesquels l'intensité est parfois comprise entre 20 et 35dB ont donc été inclus dans le groupe normo-entendant.

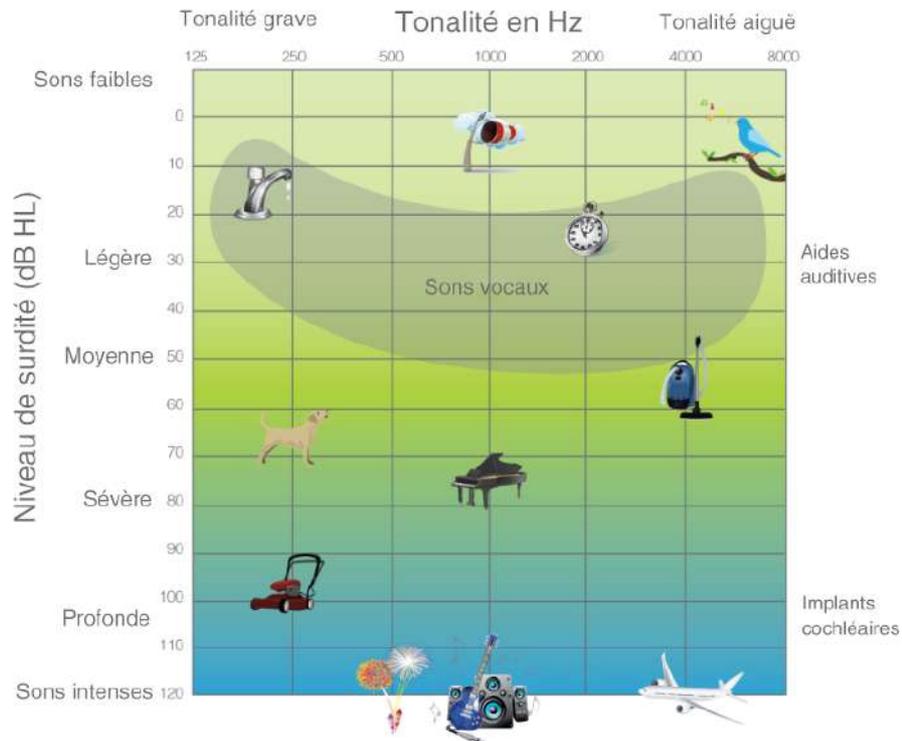


Figure 3.4 : Niveaux de surdité (source Advanced Bionics)

3.1.6. QUESTIONNAIRE DE LANGAGE

Un questionnaire de langage est remis en amont aux parents afin de récolter des informations sur le développement langagier de chaque enfant. La confidentialité de ces informations est garantie par le fait que seul un identifiant anonyme (i.e., numéro de participant) figure dans les tableaux de traitement des données ainsi que dans les analyses. Aucune donn e   caractère personnel n'apparaît dans les publications. Dans les fichiers de données, en plus des données expérimentales, nous conservons simplement le sexe, l'âge en mois au jour de la passation (la date de naissance de l'enfant ne figure dans aucun document), ainsi que plusieurs variables telles que le lieu de passation, les langues parl es ou encore les troubles langagiers éventuels ou autres déficits. Pour les participants porteurs d'implants cochléaires, les informations concernant le diagnostic de surdité ainsi que le type d'appareillage et les modes de communication et/ou prises en charge spécifiques sont conserv es. Ces informations ont toutes été recod es à l'aide de codes stockés dans un fichier de codage à part. Toutefois, une table de correspondance entre les numéros d'anonymat et les noms et prénoms des participants est conserv e, afin de pouvoir les contacter dans le futur pour des études complémentaires. Cette table de correspondance nous a également permis de mettre en lien les questionnaires de langage

remplis en amont par les parents et les données expérimentales de chaque participant. Cette table est protégée par un mot de passe et conservée au sein des laboratoires GIPSA-lab et LPNC, à Grenoble, de façon confidentielle.

Les informations ainsi recueillies font partie intégrante des critères d'inclusion de notre étude et nous permettent donc de sélectionner les participants répondant à nos besoins.

Ces questionnaires étant utilisés au sein du projet EULALIES¹² et afin de favoriser leur accessibilité et leur compréhension par le plus grand nombre (population allophone, par exemple), une adaptation sous forme de bande-dessinée a été créée par nos soins avec l'aide d'une graphiste. Cette adaptation permet également d'expliquer simplement aux enfants le déroulement de la passation et, pour certains, de les rassurer. Les documents de consentement et questionnaires de langage sont disponibles en Annexes 3.4 (pour les enfants au développement typique) et 3.5 (pour les enfants porteurs d'implants cochléaires).

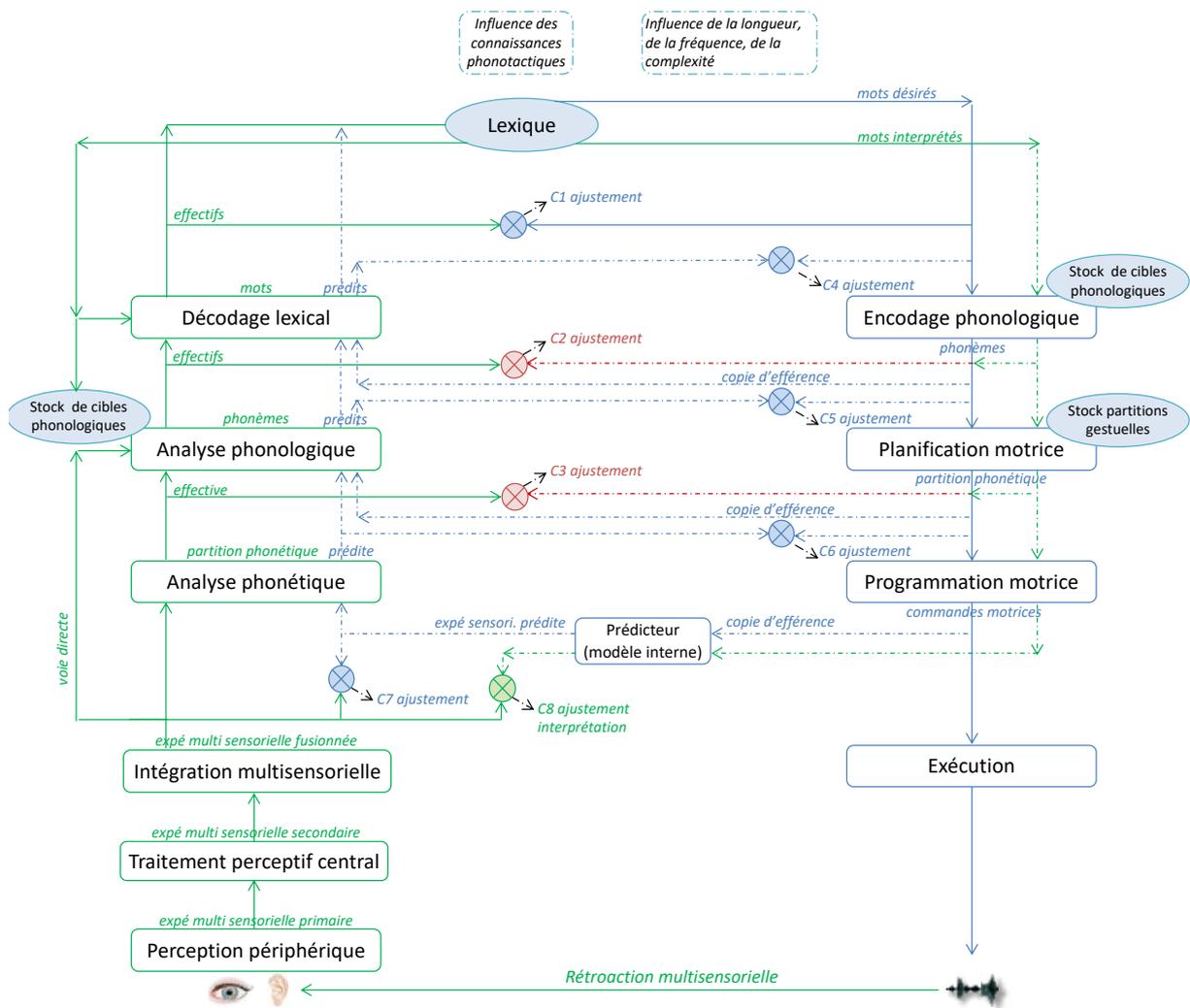
3.2. LA BATTERIE EULALIES

3.2.1. PRINCIPES ET FONDEMENTS

La batterie de test EULALIES (Meloni, 2022) a été mise au point pour l'évaluation et le dépistage des troubles du développement des sons de parole (TDSP) en français. Un des premiers objectifs de cet outil est de récolter des données de référence sur le développement phonologique chez les enfants francophones. Par ailleurs, la batterie EULALIES propose d'établir des marqueurs cliniques spécifiques aux TDSP en français.

Cinq tâches permettent d'évaluer la production et la perception de parole chez l'enfant francophone. Ces tâches ont été élaborées à partir du modèle psycholinguistique de traitement de la parole proposé par Meloni (2022) et adapté du modèle de Stackhouse et al. (1997), entre autres. Chaque tâche permet d'analyser un niveau différent du modèle de traitement de la parole (Figure 3.5).

¹² Le projet EULALIES est un projet de grande envergure qui implique des participants avec différents profils pathologiques ainsi que des familles d'origines diverses, avec une connaissance de la langue française variable.



Note : cette figure décrit les différents processus impliqués dans le monitoring de la production de parole. Les boîtes bleues et vertes constituent les processus. Les ovales en bleu sont les éléments stockés en mémoire à long terme. Les étiquettes bleues en italique correspondent au signal obtenu en sortie de chaque étape. Les croisillons bleus renvoient aux comparaisons entre l'unité désirée et la copie d'efférence. Les croisillons verts constituent, quant à eux, les comparaisons entre l'expérience sensorielle prédite et le stimulus sensoriel. Les croisillons rouges, enfin, correspondent aux systèmes de comparaison partagés par les voies de la perception et de la production.

Figure 3.5 : Modèle de traitement de la parole proposé par Meloni (2022) et sur lequel est basée la batterie EULALIES (voir aussi Meloni et al., (2015, 2018)). Adapté de Stackhouse et Wells (1997), Terband et al. (2019), Grandchamp et al. (2019), Van der Merwe (2021).

Dans le cadre de ce travail de thèse, seule la tâche de dénomination d'image (1) a été analysée. Nous ne détaillerons donc pas ici les tâches de répétition de syllabes (2), de diadococinésies (3), de répétition de pseudomots (4) et de jugement de lexicalité (5). Pour plus d'informations, voir Meloni (2022), Meloni et al. (2015, 2018) ou encore Schott-Brua (2018). Toutefois, des données ont été recueillies sur ces quatre tâches également et feront l'objet d'analyses ultérieures.

3.2.2. DENOMINATION D'IMAGES

La tâche de dénomination consiste à présenter des images à l'enfant qui doit spontanément produire oralement le nom de l'item représenté (Annexe 3.6). Ce test permet d'évaluer les représentations phonologiques en production et met en jeu la planification et l'exécution motrices du participant (Figure 3.5). Afin de juger précisément le degré de spécification de ces représentations phonologiques, les items présentés à la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES contiennent l'ensemble des phonèmes de la langue française, présentés dans différentes positions et dans des contextes segmentaux et syllabiques différents.

La tâche se compose ainsi de 68 items¹³ d'une à cinq syllabes de complexité différente (syllabes ouvertes simples de type Consonne-Voyelle (CV), groupes consonantiques ou encore consonnes en frontière de syllabe) (Tableau 3.1). De plus, chaque phonème est présent dans différentes positions dans le mot (initiale, médiane, finale).

L'objectif n'étant pas d'évaluer le niveau lexical du participant, la fréquence d'occurrence est élevée pour tous les items choisis (Tableau 3.1). Cela permet également l'accessibilité de la tâche aux plus jeunes. Les fréquences lexicales ont été calculées à partir de la base de données MANULEX (Lété et al., 2004) selon la variable « fréquence de films » (cf. Tableau 3.1).

Enfin, lorsque l'enfant ne connaît pas l'item présenté et ne parvient pas à le dénommer spontanément, trois niveaux d'aide lui sont proposés : premièrement une amorce sémantique, ensuite une amorce phonologique si le mot n'est toujours pas dénommé et enfin une répétition immédiate lorsqu'aucune des amorces n'a été suffisante. Les amorces proposées pour chaque item sont disponibles en Annexe 3.7.

¹³ Une première version de 66 items a été utilisée avec quelques participants

Monosyllabiques	Bisyllabiques	Trisyllabiques	Quadrisyllabiques et plus
Griffe (36.25)	Indien (56.33)	Oreiller (57.88)	Locomotive (56.85)
Jambe (59.13)	Docteur (55.98)	Pyjama (58.64)	Hippopotame (55.97)
Huile (57.25)	Farine (63.61)	Escargot (56.74)	Hélicoptère (57.34)
Peigne (58.88)	Poisson (68.65)	Uniforme (50.77)	Machine à laver (60.72)
Œuf (65.07)	Fourchette (55.13)	Parapluie (60.36)	Supermarché (53.48)
Tigre (59.27)	Biberon (55.87)	Déguisement (42.59)	Médicament (51.29)
Neige (67.41)	Hibou (59.30)	Eléphant (64.20)	Aspirateur (53.26)
Main (66.05)	Citron (61.01)	Aquarium (53.47)	Ventilateur (-)
Langue (60.56)	Capuche (35.74)	Couverture (53.85)	Extraterrestre (-)
Zèbre (60.80)	Chaussette (45.86)	Téléphone (63.31)	Rhinocéros (51.04)
Pieuvre (31.86)	Avion (63.71)	Toboggan (52.65)	Ordinateur (51.35)
Ours (68.08)	Grenouille (61.11)	Cinéma (62.01)	Bibliothèque (56.04)
Gare (61.70)	Camion (62.07)	Chocolat (66.50)	Vétérinaire (45.98)
Livre (67.85)	Bonhomme (61.04)		
Robe (64.10)	Yaourt (57.36)		
Stade (46.06)	Menton (57.19)		
Ongle (54.56)	Tomate (56.75)		
Fraise (60.54)	Euro (-)		
Loup (67.13)	Dentiste (55.35)		
	Ciseaux (58.79)		
	Enveloppe (60.70)		
	Voiture (68.79)		

Tableau 3.1 : liste des items pour la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES. La fréquence d'occurrence est indiquée entre parenthèses (un - indique l'inexistence de fréquence d'occurrence dans la base MANULEX pour les items sélectionnés).

3.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

3.3.1. DEROULEMENT DE LA PASSATION

L'enfant est assis devant une table sur laquelle se trouvent un ordinateur et un enregistreur numérique. Un micro-tête est également placé sur la tête de l'enfant, et relié à l'enregistreur numérique, afin d'enregistrer plus spécifiquement sa voix. Cette installation nous permet de capter à la fois la voix de l'enfant (via le micro-tête) et la voix de l'expérimentatrice (via les microphones de l'enregistreur numérique). L'expérimentatrice est installée à la droite de l'enfant, face à l'écran d'ordinateur (Figure 3.6). Elle porte un casque audio relié à l'enregistreur numérique afin de vérifier que la voix de l'enfant est bien enregistrée.

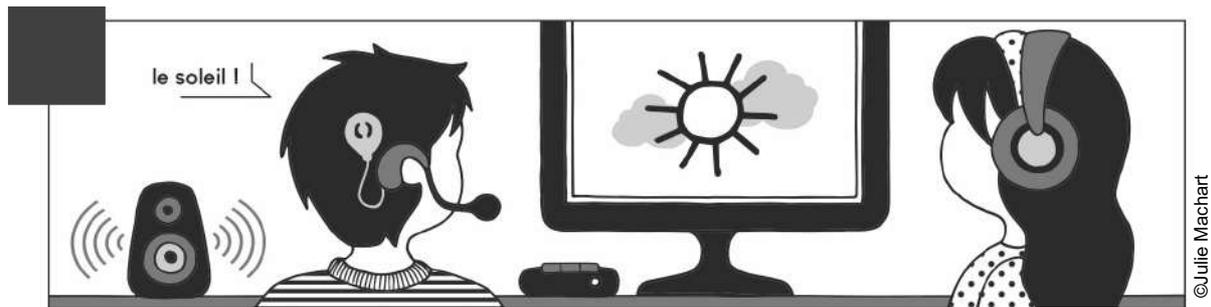


Figure 3.6 : Schéma de la passation de l'étude EULALIES-Surdité

Avant de commencer la passation à proprement parler, le questionnaire de langage, rempli en amont par les parents, est récupéré et les formulaires de consentement sont signés. Le consentement oral de l'enfant est recueilli et enregistré, sans son nom. La passation peut alors débuter. L'expérimentation comporte deux types de tâches : quatre tests d'inclusion, décrits ci-dessus, qui varient en fonction du statut auditif du participant, ainsi que les cinq tâches de la batterie EULALIES. Pour les enfants sourds, la passation débute par l'évaluation du niveau de décodage de la LfPC à partir du test TERMO (Busquet & Descourtieux, 2000). Ensuite, les deux tests d'empan mnésique sont proposés à l'enfant : la tâche d'empan visuel (PathSpan, LeFevre et al., 2010) et la tâche d'empan de chiffres endroit (ODEDYS, Jacquier-Roux et al., 2005). Les tâches de la batterie EULALIES sont ensuite administrées, en débutant par la tâche de dénomination d'images. Le troisième test d'inclusion, moins ludique, est réalisé à l'issue des épreuves EULALIES afin d'éviter un éventuel biais de fatigabilité pendant les épreuves d'évaluation du développement des sons de parole. Ce dernier test d'inclusion nous permet d'évaluer le niveau morphosyntaxique en production de chaque sujet (module morphosyntaxe du test ELO (Khomsy, 2001)). Pour les enfants normo-entendants, une audiométrie est réalisée à la fin de la passation.

3.3.2. MATERIEL

L'enregistrement des données audio se fait à l'aide d'un enregistreur numérique de marque Zoom (H4n Pro). Les enfants portent un micro-tête SHURE (Beta 54R). L'audiométrie est réalisée à partir d'un audiomètre Electronica 9910. Les stimuli visuels sont présentés sur un ordinateur portable Macbook Pro posé devant l'enfant. Les stimuli audio sont diffusés à travers un casque audio pour les enfants normo-entendants et à

l'aide d'une enceinte Bose pour les enfants porteurs d'implants cochléaires. Le volume de diffusion est confortable et se situe autour de 70dB.

3.4. PARTICIPANTS

Le groupe d'enfants porteurs d'implants cochléaires constitue notre population expérimentale (Tableau 3.2). Ce groupe d'enfants est comparé à un groupe de participants normo-entendants représentant notre population contrôle (Tableau 3.3). Cette partie propose de faire le point sur les caractéristiques démographiques de chaque participant.

3.4.1. GROUPE CONTROLE : PARTICIPANTS NORMO-ENTENDANTS

Participant	Groupe	Sexe	Age (mois)	Classe ¹⁴	Exposition à une autre langue parlée
CP_001	TH	F	97	CE1	monolingue
CP_005	TH	M	105	CE2	monolingue
CP_011	TH	F	118	CM1	monolingue
CP_014	TH	M	117	CM1	monolingue
CP_017	TH	F	129	CM2	monolingue
CP_019	TH	F	131	CM2	monolingue
CP_023	TH	F	119	CM1	monolingue
CP_034	TH	M	92	CE1	monolingue
CP_036	TH	F	92	CE1	monolingue
CP_042	TH	M	95	CE1	monolingue
CP_044	TH	M	108	CE2	monolingue
CP_046	TH	F	104	CE2	monolingue
CP_051	TH	M	81	CP	monolingue
CP_053	TH	M	79	CP	monolingue
CP_055	TH	F	84	CP	monolingue
CP_056	TH	F	89	CP	monolingue
CP_057	TH	F	87	CP	monolingue
CP_058	TH	F	79	CP	monolingue
CP_061	TH	M	80	CP	monolingue
CP_063	TH	F	89	CP	monolingue
CP_066	TH	M	69	GSM	monolingue
CP_068	TH	M	67	GSM	monolingue
CP_070	TH	F	68	GSM	monolingue
CP_071	TH	F	71	GSM	monolingue
CP_076	TH	F	61	GSM	monolingue
JS_005	TH	M	81	CP	monolingue
JS_008	TH	F	78	CP	monolingue
JS_015	TH	M	83	CP	monolingue
LM_026	TH	F	108	CM1	monolingue
LM_029	TH	M	119	CM1	monolingue
LM_030	TH	M	127	CM2	monolingue
LM_031	TH	F	118	CM1	monolingue
LM_032	TH	F	76	CP	monolingue
LM_033	TH	F	101	CE2	monolingue
LM_034	TH	F	69	GSM	monolingue
LM_035	TH	M	68	GSM	monolingue
LM_037	TH	M	75	GSM	monolingue
LM_041	TH	F	71	GSM	monolingue
LM_043	TH	M	69	GSM	monolingue
LM_044	TH	F	66	GSM	monolingue
LM_046	TH	F	71	GSM	monolingue
LM_048	TH	F	67	GSM	monolingue

¹⁴ GSM : Grande Section de Maternelle ; CP : Cours Préparatoire ; CE1 : Cours Élémentaire 1 ; CE2 : Cours Élémentaire 2 ; CM1 : Cours Moyen 1 ; CM2 : Cours Moyen 2

Participant	Groupe	Sexe	Age (mois)	Classe	Exposition à une autre langue parlée
LM_049	TH	F	69	GSM	monolingue
LM_054	TH	F	119	CE2	monolingue
LM_059	TH	M	133	CM2	monolingue
LZ_003	TH	F	63	GSM	monolingue
LZ_004	TH	F	62	GSM	monolingue
LZ_005	TH	F	61	GSM	monolingue
LZ_010	TH	F	66	GSM	monolingue
OC_001	TH	F	77	CP	monolingue
SH_008	TH	M	82	CP	monolingue
SH_009	TH	F	88	CP	monolingue
VB_001	TH	F	88	CE1	monolingue
VB_003	TH	M	101	CE2	monolingue
VB_005	TH	M	87	CE1	monolingue
VB_006	TH	F	84	CE1	monolingue
VB_007	TH	F	102	CE2	monolingue
VB_008	TH	F	72	CP	monolingue
VB_009	TH	M	74	CP	monolingue
VB_010	TH	M	70	CP	monolingue
VB_011	TH	M	73	CP	monolingue
VB_012	TH	F	80	CP	monolingue
VB_013	TH	M	100	CE2	monolingue
VB_014	TH	M	97	CE2	monolingue
VB_015	TH	M	105	CE2	monolingue
VB_016	TH	F	90	CE1	monolingue
VB_017	TH	M	97	CE2	monolingue
VB_018	TH	F	75	CP	monolingue
VB_019	TH	F	81	CP	monolingue
VB_020	TH	M	80	CP	monolingue
VB_021	TH	M	74	CP	monolingue
VB_022	TH	M	78	CP	monolingue
VB_023	TH	M	94	CE2	monolingue
VB_024	TH	F	90	CE1	monolingue

Tableau 3.2 : données démographiques des participants normo-entendants pour la tâche de dénomination d'images

3.4.2. PARTICIPANTS PORTEURS D'IMPLANTS COCHLEAIRES

Participant	Groupe	Sexe	Age (mois)	Classe	Type de scolarisation ¹⁵	Diagnostic	Age auditif (dépistage)	Age d'implantation	Période d'implantation ¹⁶	Durée d'utilisation de l'implant cochléaire	Type d'implantation ¹⁷	Degré de surdité ¹⁸ après implantation ¹⁹	Niveau de décodage de la LfPC ²⁰	Exposition à la LSF ²¹	Exposition à une autre langue parlée
LM_005	CF+_early	M	128	CM2	Inclusion totale	DA	125	11	précoce	117	bilatérale	moyenne	CF+	Aucune	monolingue
LM_009	CF+_late	F	125	CM1	Inclusion totale	DA	89	58	tardive	67	bimodale	légère	CF+	Aucune	monolingue
LM_010	CF+_late	M	107	CE1	Inclusion totale	DA	104	44	tardive	63	bimodale	moyenne	CF+	Aucune	monolingue
LM_012	CF+_early	M	139	6 ^{ème}	Inclusion totale	DA	129	22	précoce	117	bilatérale	légère	CF+	Aucune	monolingue
LM_018	CF+_early	F	118	CM1	Inclusion totale	DA	118	10	précoce	108	bilatérale	légère	CF+	Aucune	monolingue
LM_019	CF+_late	M	60	GSM	Inclusion totale	DA	38	33	tardive	27	bimodale	légère	CF+	Faible	monolingue
LM_056	CF-_early	M	135	CM2	ULIS	DA	127	18	précoce	117	bilatérale	<i>non transmis</i>	CF-	Faible	monolingue
LM_061	CF-_late	M	100	CE1	Inclusion totale	DA	70	36	tardive	64	bilatérale	<i>non transmis</i>	CF-	Faible	monolingue
LM_064	CF+_early	M	110	CE2	Inclusion totale	DA	109	15	précoce	95	bilatérale	normale	CF+	Aucune	monolingue
LM_065	CF-_early	F	114	CM1	Inclusion totale	DA	114	1	précoce	113	bilatérale	légère	CF-	Faible	monolingue
LM_066	CF-_early	F	139	6 ^{ème}	Inclusion totale	DA	139	19	précoce	120	bilatérale	légère	CF-	Faible	monolingue
LM_067	CF-_late	M	74	CP	Inclusion totale	DA	52	28	tardive	46	bilatérale	légère	CF-	Faible	monolingue
LM_068	CF-_late	F	79	GSM	Inclusion totale	DA	75	24	tardive	55	bilatérale	moyenne	CF-	Faible	monolingue
LM_069	CF+_early	F	77	GSM	Inclusion totale	DA	77	12	précoce	65	bilatérale	légère	CF+	Importante	monolingue

Tableau 3.3 : données démographiques des participants porteurs d'implants cochléaires pour la tâche de dénomination d'images

¹⁵ Nous distinguons ici deux types de scolarisation : inclusion totale pour les enfants scolarisés en milieu ordinaire (école de quartier) et ULIS pour les enfants scolarisés en milieu spécialisé avec temps d'inclusion en milieu ordinaire

¹⁶ Nous distinguons ici les implantations réalisées avant l'âge de 24 mois (implantation précoce) de celles réalisées après l'âge de 24 mois (implantation tardive)

¹⁷ Dans le cadre d'une implantation bilatérale, le participant porte un implant cochléaire à chaque oreille. Pour les implantations bimodales, le participant porte un implant cochléaire et une prothèse controlatérale.

¹⁸ Six degrés de surdité sont distingués : audition normale (perte tonale < 20dB), surdité légère (perte tonale comprise entre 21dB et 40dB), surdité moyenne (perte tonale comprise entre 41dB et 70dB), surdité sévère (perte tonale comprise entre 71dB et 90dB), surdité profonde (perte tonale comprise entre 91dB et 120dB), surdité totale ou cophose (perte tonale supérieure à 120dB)

¹⁹ Avant implantation, tous nos participants présentaient une surdité profonde

²⁰ Cf. partie descriptive du test TERMO, paragraphe 3.1.1, ci-dessus

²¹ Le niveau d'exposition à la LSF est estimé par les parents, aucun test n'est proposé pour quantifier le niveau de connaissance de la LSF de chaque participant. Il s'agit donc d'une information déclarative. Trois niveaux d'exposition à la Langue des Signes Française (LSF) sont distingués : aucune exposition, faible exposition (exposition occasionnelle à quelques signes de la LSF à l'école ou à la maison), exposition importante (exposition à la LSF à la maison)

3.5. TRAITEMENT DES DONNEES

3.5.1. TESTS D'INCLUSION

Les résultats aux tests d'empan visuel (PathSpan, LeFevre et al., 2010), d'empan de chiffres endroit (ODEDYS, Jacquier-Roux et al., 2005) et de production morphosyntaxique (ELO, Khomsi, 2001) ont été traités selon les consignes données dans chaque outil. Les scores à chaque tâche ont été renseignés dans un tableur Excel (Annexe 3.8).

Les réponses au questionnaire de langage ont été renseignées sous forme codée dans un tableur Excel contenant les informations démographiques de chaque participant identifié par un numéro anonyme. Les informations utilisées dans le cadre de ce travail sont détaillées dans les tableaux 3.2 et 3.3, ci-dessus.

3.5.2. TRAITEMENT DES DONNEES DE PAROLE

Cette partie propose de faire le point sur le processus de traitement des données de parole enregistrées dans le cadre de la tâche de dénomination d'images. Ces données ont été traitées à partir du logiciel PHON (Hedlund & Rose, 2016), permettant de construire des corpus de données textuelles et phonologiques. Ce logiciel offre un support spécialisé pour la recherche sur les unités phonologiques (par exemple, les phonèmes, les traits phonologiques, etc.) ce qui en fait un outil de choix pour le traitement de nos données.

La passation complète est enregistrée sur un seul fichier audio au format .wav. Pour faciliter le traitement des données recueillies, il est nécessaire de découper ce fichier audio pour obtenir un fichier audio par tâche. Chaque tâche constitue ainsi un corpus donné, lequel contient un fichier par participant (Figure 3.7). Chaque fichier son (.wav), issu de l'enregistreur numérique, et chaque fichier PHON (.xml), issu du logiciel de traitement, sont renommés de la même façon. Pour les fichiers .wav, le codage permet d'identifier le participant par son numéro d'anonymat et la tâche effectuée (initiales de l'expérimentatrice_numéro de sujet_nom de la tâche ; exemple : LM_018_Deno, l'expérimentatrice est Laura Machart, le participant est le 18^{ème}, il s'agit de la tâche de dénomination d'images). Pour les fichiers .xml, l'état d'avancement de l'annotation est ajouté afin de coder l'étape de traitement de chaque fichier de données (exemple de nom de fichiers : LM_018_Deno_tdav.xml ; *t* signifie que le fichier a été transcrit une première

fois, **d** indique qu'une seconde transcription en double aveugle a été réalisée, **a** indique que l'alignement a été fait et **v** spécifie que tout le processus de traitement a été validé). Les détails de la procédure d'annotation sont décrits dans le paragraphe 3.5.2.2, ci-dessous.

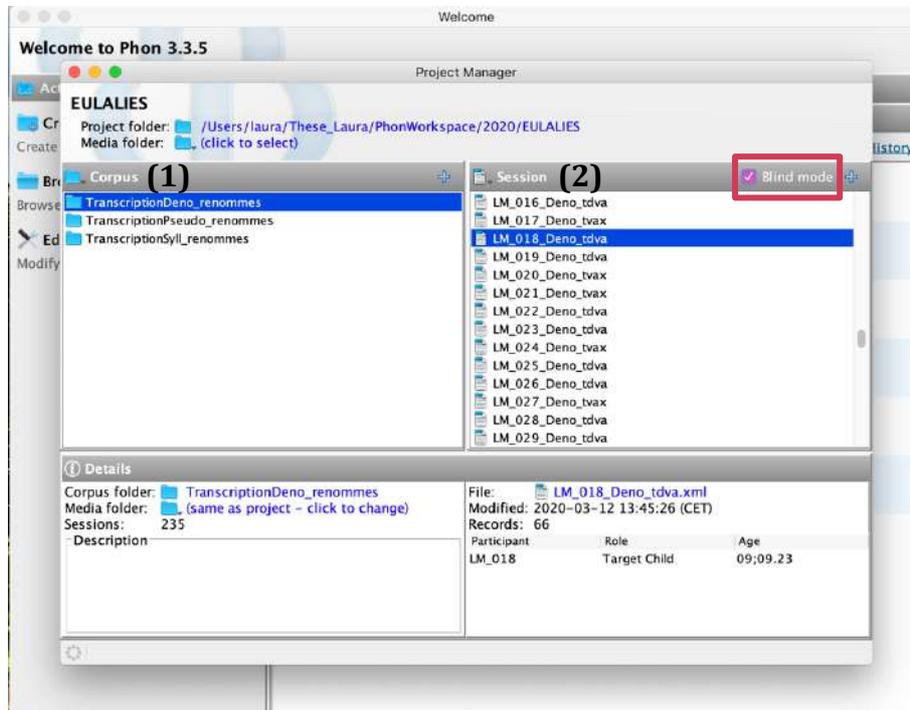


Figure 3.7 : Sélection du fichier à annoter en blind mode ((1) Corpus = tâche en cours de traitement ; (2) Session = liste des fichiers participants pour la tâche sélectionnée)

Chaque tâche est annotée séparément, au minimum par deux personnes, selon la procédure d'annotation décrite au paragraphe 3.5.2.2. Le processus d'annotation est réalisé par des personnes formées à la transcription phonétique et ayant suivi une formation pour la prise en main du logiciel PHON. De plus, des guides d'utilisation du logiciel ont été rédigés afin de faciliter son utilisation et harmoniser les critères entre les transcriptrices (voir Annexe 3.9).

3.5.2.1. Organisation d'un corpus

Dans un premier temps, le fichier audio correspondant à la tâche annotée pour un participant défini est redécoupé de façon à isoler chaque mot prononcé correctement. Le menu *Timeline* de PHON permet de faire ce découpage facilement et crée

automatiquement une « fiche » par item (Figure 3.8) (i.e., 68²² fiches pour la dénomination d'images). Cette étape de découpage est réalisée par la première personne en charge de l'annotation.

3.5.2.2. Annotation

3.5.2.2.1. Première transcription

Lorsque le processus d'annotation débute, la première personne en charge de la transcription crée le fichier PHON (i.e., .xml) correspondant au participant étudié, pour une tâche donnée. A ce stade, il est nécessaire de cocher la case *blind mode* (Figure 3.7) afin que cette première annotation puisse être cachée à la seconde transcriptrice et ainsi éviter tout biais de jugement perceptif.

L'annotation se fait sur cinq niveaux différents : 1) l'orthographe de l'item cible (ligne *Orthography*), 2) la transcription phonétique de l'item cible (ligne *IPA Target*), 3) la transcription phonétique de la production effective du participant (ligne *IPA Actual*), 4) les notes de la transcriptrice (ligne *Notes + initiales de la transcriptrice*) et 5) les temps de début et fin du segment de parole découpé (ligne *Segment*). Il peut arriver qu'un mot ne soit pas du tout prononcé ou alors qu'il soit substitué par un autre (par exemple, si la cible attendue est *locomotive* et que le participant produit *train*). Dans ce cas, le mot n'est pas retenu et n'est donc pas annoté. La fiche est conservée mais la ligne *IPA Actual* n'est pas renseignée. L'item ne sera ainsi pas pris en compte dans les analyses. Dans le cas des productions multiples pour un même item, la première production est la seule transcrite même si la ou les suivantes sont mieux réalisées. Toutefois, un commentaire du transcripneur est laissé dans la ligne *Notes* afin de préciser que le mot a été produit plusieurs fois.

Les annotations sont réalisées manuellement, à partir d'un modèle .xml qui permet de créer un fichier contenant toutes les fiches correspondant aux items de la tâche traitée ainsi que le découpage du fichier audio correspondant aux productions d'un participant donné. La Figure 3.8, ci-dessous, présente un exemple d'annotation d'un item de la tâche de dénomination d'images.

²² Un tiers des participants a passé une première version de la tâche de dénomination d'images qui comportait 66 items

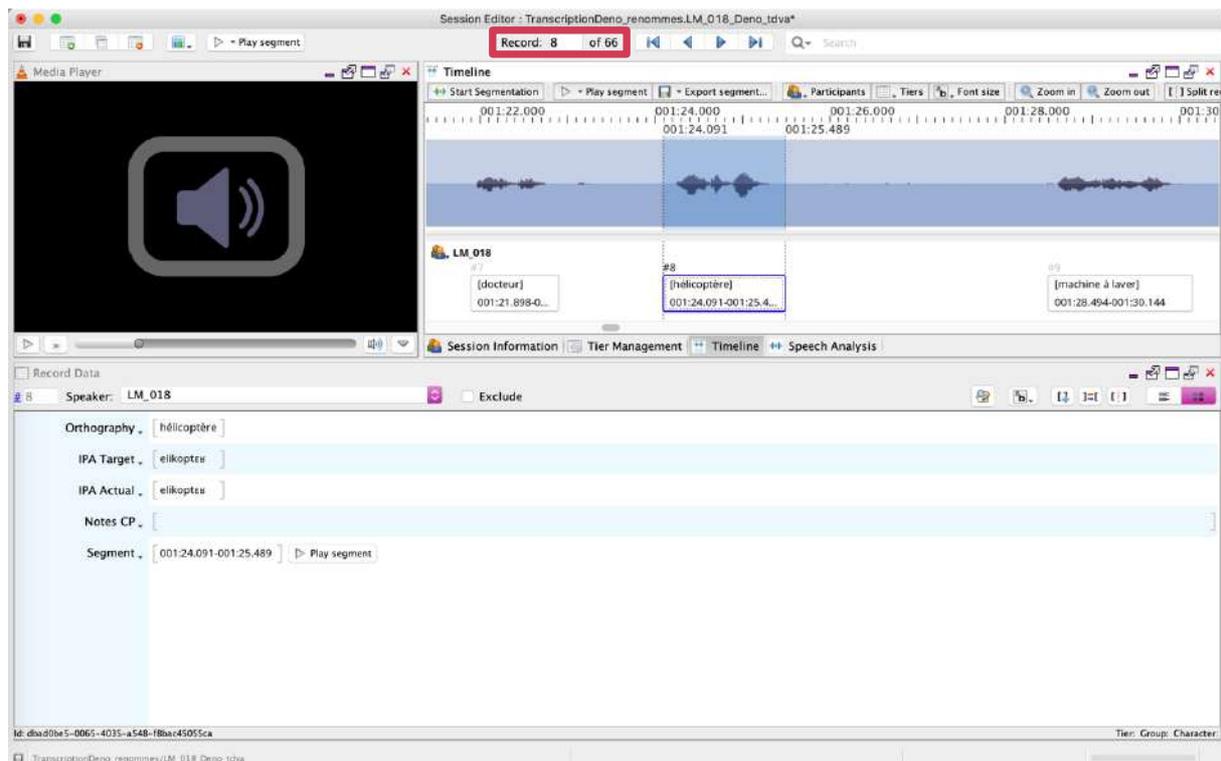


Figure 3.8 : annotation du fichier LM_018_Deno par la transcriptrice CP pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON

A l'issue de cette première étape, le nom du fichier .xml aura la forme LM_018_Deno_txxx.xml : la tâche de dénomination du participant LM_018 a été transcrite une première fois (t : *transcription*).

3.5.2.2.2. Double annotation

Une fois la première transcription réalisée, le fichier est transmis à une seconde transcriptrice pour procéder à la double annotation. La transcription est réalisée en double aveugle pour éviter toute influence de la première annotation. A l'issue de cette étape de double annotation, le nom du fichier .xml aura la forme LM_018_Deno_tdxx.xml : la tâche de dénomination du participant LM_018 a été transcrite en double aveugle (td : *transcription double*).

Ce processus étant long, toutes les données n'ont pas été transcrites en double aveugle. Toutefois, cette démarche a été appliquée à plus de 40% des données recueillies pour la tâche de dénomination d'images. Lorsqu'un fichier n'a pas été transcrit en double aveugle, l'information (d) n'apparaîtra simplement pas dans son nom.

3.5.2.2.3. Consignes de transcription

Les données annotées en double aveugle ont permis de réaliser une transcription multi-juges (cinq transcriptrices) afin de définir des consensus sur la transcription et, ainsi, d'établir des critères et consignes de transcription permettant d'harmoniser les annotations de toutes les transcriptrices impliquées dans le traitement des données recueillies. Ce consensus a mis en évidence un accord inter-juge de plus de 80% pour la tâche de dénomination d'images. Aucune donnée n'a été éliminée.

Toutes les transcriptions des lignes *IPA Target* et *IPA Actual* sont réalisées à l'aide de l'Alphabet Phonétique International (API).

Le tableau 3.4 présente les règles générales de transcription qui ont été établies à partir du consensus multi-juges (pour plus de détails, voir Annexe 3.10).

1. Lorsque le phonème produit ne correspond à aucun phonème présent en français, on utilise le phonème correspondant dans l'API pour le transcrire Liste des phonèmes que l'on peut rencontrer : occlusive glottale non voisée [ʔ], vibrante uvulaire voisée [ʀ], fricatives interdentes non voisée [θ] et voisée [ð], fricatives latérales non voisée [ɬ] et voisée [ɮ], fricatives palatales non voisée [ç] et voisée [j], fricatives vélares non voisée [x] et voisée [χ], fricative uvulaire non voisée [χ], fricative glottale non voisée [h] et fricative alvéo-palatale non voisée [ç]
2. Lorsque le phonème produit peut être considéré comme admis en français mais que la production diffère un peu d'une production classique, on utilise le diacritique correspondant pour le transcrire Liste des diacritiques utilisés : dévoisement, voisement, phonème non relâché (en fin de mot), relâchement nasal, relâchement glottal, aspiration, labialisation, nasalisation, réalisation apicale, réalisation dentale, plus arrondi, moins arrondi, <i>sliding</i> , diphtongue
3. Transcription de l'allongement vocalique avec le diacritique :
4. Transcription des pauses avec le diacritique .
5. Utilisation des affriquées pour n'avoir qu'un seul phonème de comptabilisé dans la production de l'enfant, par rapport à la cible
6. Utilisation du diacritique de dévoisement, pour les [ɸ] dévoisé mais utilisation de la fricative uvulaire sourde [χ] lorsque la cible n'est pas un [ɸ]
7. Transcription du dévoisement des voyelles
8. Pour les productions inaudibles ou chevauchements de voix, transcription des phonèmes produits à l'aide d'astérisques (un astérisque par phonème produit) Ex. : <i>IPA Target</i> [jauɾt] = ***** (production inaudible)
9. a) Si transcription du /ə/ final dans <i>IPA Actual</i> , alors ajout également à <i>IPA Target</i> pour conserver le même nombre de phonèmes b) Si transcription d'un /ə/ à l'intérieur d'une syllabe dans <i>IPA Actual</i> et qu'on considère que cette production est admise en français, alors transcription également dans <i>IPA Target</i> pour conserver le même nombre de phonèmes
10. Si absence de production ou substitution par un autre mot, aucune transcription dans <i>IPA Actual</i>
11. Règle du « bénéfice du doute » S'il y a hésitation entre deux phonèmes dont l'un correspondant à la cible, alors utilisation de ce dernier Ex. : Item « indien », hésitation entre [ɛ̃dja] et [ɛ̃djɛ̃] ; on conservera [ɛ̃djɛ̃]
Aide : En cas d'hésitation, utilisation du site https://www.seeingspeech.ac.uk/ipa-charts/?chart=1 pour s'aider à identifier le phonème produit

Tableau 3.4 : règles générales pour la transcription sous PHON

Pour la tâche de dénomination d'images, il existe une variation dans la langue cible pour certains items. Le tableau 3.5 présente la liste des items pour lesquels on peut s'attendre à différentes variations. Lorsqu'une de ces possibilités est identifiée, la ligne *IPA Target* est modifiée de façon à ce qu'elle corresponde à la production de l'enfant. Ces productions sont en effet considérées comme « admises », c'est pourquoi elles sont comptabilisées comme des productions correctes.

оѵеје	ɔѵеје	оѵеје	ɔѵеје
lokomotiv	lɔkomotiv		
ipopotam	ipɔpɔtam		
doktæѵ	dɔktæѵ		
elikopteѵ	elikopteѵ	elikopteѵ	elikopteѵ
degizəmə	degizmə		
eskaɤgo	eskaɤgo		
ʃɔset	ʃɔset		
bibəѵɔ	bibəѵɔ		
bɔnɔm	bɔnɔm		
jauѵt	jauѵt		
elektɤisjĕ	elektɤisjĕ	elektɤisjĕ	elektɤisjĕ
ekstɤateѵestɤ	ekstɤateѵestɤ	ekstɤateѵestɤ	ekstɤateѵestɤ
tomat	tɔmat		
kɤokodil	kɤɔkodil		
biblijotek	bibliotek	biblijotek	bibliotek
ãvəɔp	ãvlɔp		
tobogã	tɔbogã		

Tableau 3.5 : liste des variations admises pour la tâche de dénomination d'images

3.5.2.3. Validation de l'annotation

Une fois la première, et la deuxième s'il y a lieu, transcription faite, une troisième transcriptrice s'occupe de valider l'annotation. Ce processus de validation nous permet, lorsque la transcription en double aveugle n'a pas pu être réalisée, d'obtenir tout de même au minimum deux transcriptions différentes pour chaque item. Par ailleurs, lors des doubles transcriptions, cette validation permet de trancher un éventuel désaccord. La Figure 3.9, ci-dessous, présente un exemple de validation pour l'item *hélicoptère* produit par le participant LM_018. On observe ici que les deux transcriptrices ne sont pas en accord sur la production de la troisième voyelle, avec une différence sur l'aperture de celle-ci (i.e., [o] ou [ɔ]). La personne en charge de la validation semble ici être davantage en accord avec la transcriptrice LM et valide donc la première transcription (i.e., voyelle mi-fermée [o]). Notons ici que la transcriptrice CP, percevant la voyelle mi-ouverte [ɔ], a

bien modifié la transcription de la ligne *IPA Target*, cette production étant considérée comme admise en langue française (Tableau 3.5). A l'issue de cette étape de validation, le nom du fichier .xml aura la forme LM_018_Deno_tdvx.xml : la transcription de la tâche de dénomination du participant LM_018 a été validée (v).

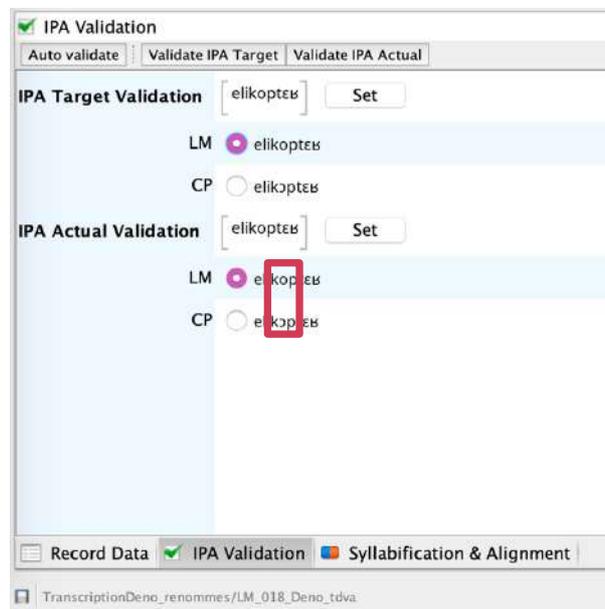


Figure 3.9 : exemple de validation pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON

3.5.2.4. Syllabation et alignement

La dernière étape du processus d'annotation concerne la syllabation et l'alignement des phonèmes produits avec les phonèmes cibles. Cette phase très importante permet (par comparaison) de déterminer précisément quel phonème cible est remplacé par quel autre phonème, pour pouvoir ensuite étudier les différents types d'erreurs, les substitutions, les délétions (suppressions), etc. Cette étape constitue un des nombreux avantages du logiciel PHON (Hedlund & Rose, 2016) puisqu'elle permet une analyse en traits phonologiques, sur la base d'un modèle de la phonologie du français.

Dans un premier temps, un statut est attribué à chaque phonème. Trois statuts sont utilisés dans notre corpus (Figure 3.10) : **Onset** pour les consonnes d'attaque de syllabe, **Nucleus** pour le noyau vocalique et **Coda** pour les consonnes en fin de syllabe. Dans le cas de groupes consonantiques, toutes les consonnes portent le même statut. Par exemple, pour l'item *citron*, les phonèmes du groupe [tr] sont tous considérés comme **Onset** parce

qu'ils se situent en début de syllabe. A l'inverse, pour l'item *uniforme*, les deux phonèmes du groupe [ɥm] sont étiquetés comme *Coda* parce qu'ils sont en fin de syllabe. En ce qui concerne le statut des semi-consonnes (*glides*), un enchaînement consonne+*glide* est traité comme un groupe consonne+consonne. En effet, les données de la littérature (MacLeod, communication personnelle) suggèrent que, lors d'une production erronée, les enfants ont tendance soit à supprimer complètement le *glide*, soit à le substituer par une autre consonne (par exemple, pour le mot *poisson* [pwasɔ̃], on pourra trouver [pasɔ̃] mais jamais [pusɔ̃] ; *oiseau* donne [azo] ou [vazo] mais pas [uzo]). Ainsi, les *glides* sont étiquetés comme des consonnes, soit *Onset* en début de syllabe et *Coda* en fin de syllabe.

Dans un second temps, une fois la syllabation réalisée, les phonèmes produits sont alignés avec les phonèmes cibles. Pour ce faire, il suffit de faire glisser les phonèmes produits sous les phonèmes cibles correspondants (Figure 3.10). A l'issue de cette étape d'alignement, le nom du fichier .xml aura la forme LM_018_Deno_tdva.xml : l'alignement de la tâche de dénomination du participant LM_018 a été réalisé (a : *alignement*).

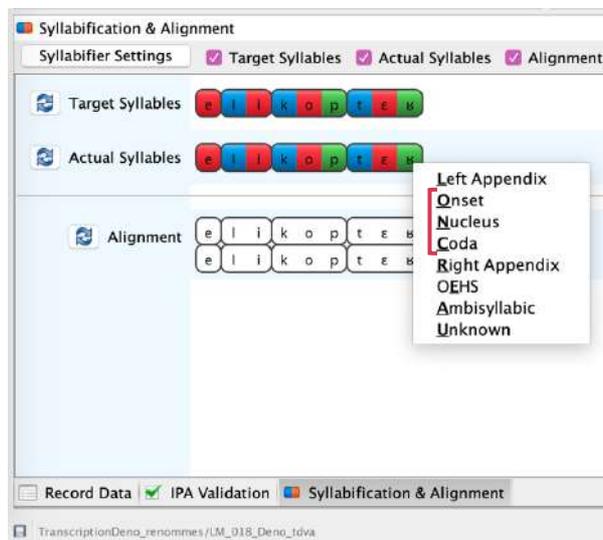


Figure 3.10 : exemple de syllabation et d'alignement pour l'item hélicoptère avec le logiciel PHON

3.5.2.5. Extraction des données

Le logiciel PHON offre de nombreuses possibilités pour l'analyse des données de parole (Figure 3.11, menu *Analyses*). Une fois le processus d'annotation terminé, il est donc possible d'extraire un certain nombre d'informations directement à partir du logiciel.

Il est possible, par exemple, d'extraire les délétions (suppressions de phonème), les épenthèses, le pourcentage de phonèmes corrects, le pourcentage de consonnes ou de voyelles correctes, etc. (Figure 3.11, menu *Analysis*), et cela pour un corpus donné, pour un nombre de participants donné ou alors dans le corpus complet. Le logiciel PHON offre également la possibilité de décrire complètement le type de processus phonologique examiné (Figure 3.11, menu *Custom Settings*, exemple de recherche de toutes les consonnes alvéolaires réalisées comme des consonnes postalvéolaires).

Dans le cadre de ce travail, les principales analyses utilisées sont le pourcentage de consonnes correctes (PCC), le pourcentage de clusters (groupes consonantiques) corrects (PCIC), le pourcentage de voyelles correctes (PVC), le type de substitutions, le nombre d'épenthèses, le nombre de délétions ainsi que les processus phonologiques de voisement, dévoisement, nasalisation et dénasalisation.

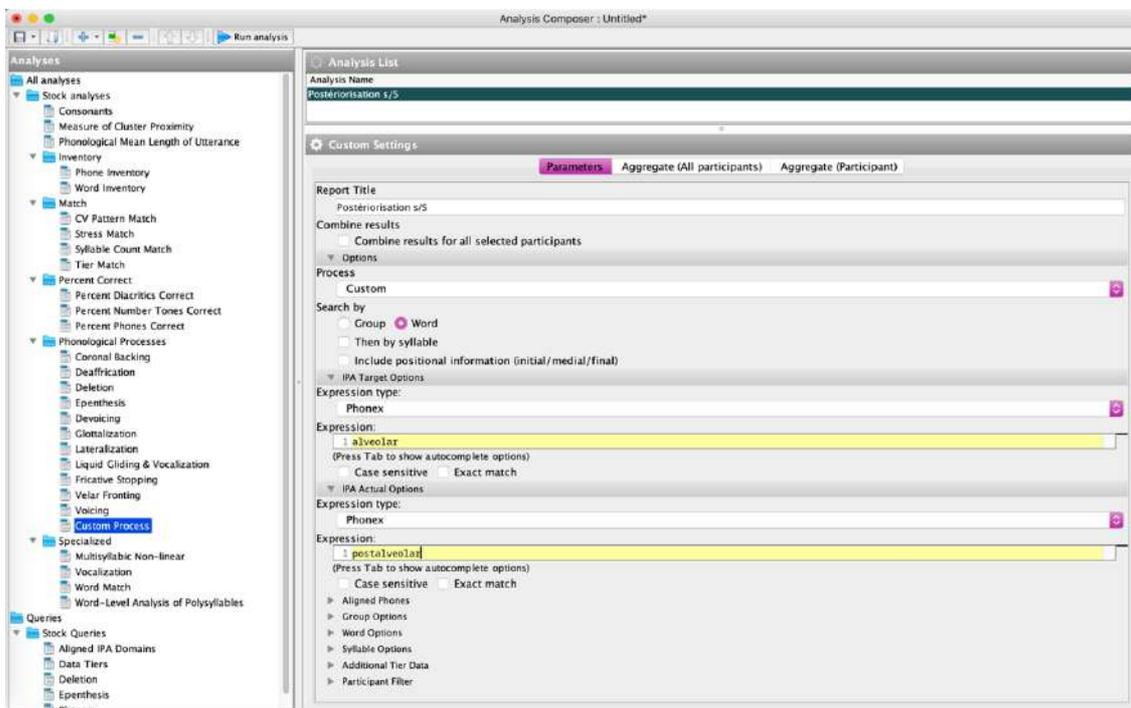


Figure 3.11 : liste des analyses proposées par le logiciel PHON (*Analyses* à gauche) et exemple d'analyse créée manuellement (*Custom Settings* à droite)

3.6. ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses statistiques et les graphiques présentés dans ce travail ont été élaborés à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2012). Les analyses statistiques ont été réalisées à partir de modèles linéaires mixtes (fonction *glmer* et *glm* dans le package *lme4* de R). Pour chaque analyse, une sélection de variables avec comparaisons de modèles un à un a été appliquée afin de déterminer le modèle le mieux ajusté. Tout d'abord, tous les facteurs à effet aléatoire et les facteurs à effet fixe ont été inclus dans le modèle, ainsi que les interactions. Finalement, toutes les variables qui n'amélioreraient pas l'ajustement d'un modèle ont été exclues (fonction *anova* dans R avec un seuil de $p < .05$).

Les analyses statistiques sont décrites plus en détail dans l'article correspondant aux données recueillies avec cette méthodologie (Chapitre 5, ci-dessous).

CH4. CORPUS ARTIMONTREAL : DONNEES ARTICULATOIRES ET ACOUSTIQUES

Ce second corpus de données de parole a été constitué dans le but d'analyser les **caractéristiques acoustiques et articulatoires** de la production de consonnes plosives et fricatives par des enfants porteurs d'implants cochléaires exposés à la LfPC. Le premier objectif est d'étudier les caractéristiques acoustiques des productions de consonnes plosives et fricatives des enfants porteurs d'implants cochléaires lorsqu'ils sont exposés à la LfPC et de leurs pairs normo-entendants.

Le second objectif est d'étudier les caractéristiques articulatoires de ces mêmes productions et d'observer l'effet du niveau de décodage de la LfPC sur la réalisation des gestes articulatoires lors de la production de consonnes plosives et fricatives.

Ces données de parole ont été recueillies à Montréal, auprès de neuf enfants porteurs d'implants cochléaires et présentant différents niveaux de décodage de la LfPC ainsi que dix enfants normo-entendants.

Cette étude a été pré-enregistrée sur le site *Open Science Framework* ([10.17605/OSF.IO/V8JAO](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/V8JAO)). Toutefois, le protocole expérimental a évolué en raison de la situation sanitaire ainsi qu'en fonction du type de données récoltées. Le chapitre suivant décrit le protocole expérimental que nous avons finalement suivi pour cette étude. Les différences entre le protocole appliqué et le protocole pré-enregistré sont disponibles en Annexe 4.1.

4.1. CRITERES D'INCLUSION

4.1.1. TEST DE CONSCIENCE PHONOLOGIQUE

Un test de conscience phonologique est réalisé pour tous les participants, afin d'évaluer le développement de leurs représentations phonologiques. En effet, au cours de l'acquisition de la lecture, les enfants apprennent des correspondances entre graphèmes et phonèmes qui vont réorganiser leurs représentations phonologiques (Caudrelier et al., 2019). Les enfants qui apprennent à lire expérimentent donc des changements importants dans leur conscience phonologique.

Le test de conscience phonologique proposé consiste en une tâche de jugement de rimes issue d'un test étalonné chez des enfants francophones du Québec (Lefebvre et al., 2008),

une tâche de suppression de syllabes dans des pseudomots de structure CV-CV et une tâche de suppression de phonèmes dans des syllabes de structure CVC. Pour les enfants de plus de 6 ans, une tâche de suppression de phonèmes dans des syllabes de structure CCV est administrée en plus des trois précédentes (adaptée de Caudrelier et al., 2019). Ces trois tâches sont extraites de la batterie de tests BELEC²³ (Mousty et al., 1994) Le détail de chaque tâche est disponible en Annexe 4.2.

4.1.2. ÉVALUATION DU NIVEAU DE DECODAGE DE LA LFPC²⁴

Tous les enfants porteurs d'implants cochléaires de cette étude sont scolarisés à l'école St Jude à Montréal dont le projet d'établissement est la version québécoise du *cued speech*. Ainsi, ils sont tous exposés à la LfPC dans le milieu scolaire et ce peu importe l'interlocuteur (i.e., enseignante, orthophoniste, etc.). Tout comme pour l'étude EULALIES-surdité, les niveaux de décodage de la LfPC varient entre les participants. Sur la base d'une échelle à deux niveaux de décodage de la LfPC (Figure 4.1), chaque orthophoniste en charge d'un participant a sélectionné le niveau de décodage de la LfPC en fonction de sa propre évaluation de l'enfant. Nous distinguons ici les participants présentant un niveau faible de décodage de la LfPC (groupe CI-) de ceux avec des compétences élevées de décodage de la LfPC (groupe CI+).



Figure 4.1 : Échelle de niveau de décodage de la LfPC

4.1.3. ÉVALUATION DU NIVEAU DE CODAGE DE LA LFPC

Pour tester l'impact de la production de la LfPC simultanément à la production de parole sur la précision articulatoire, nous évaluons également l'aptitude au codage de la LfPC des enfants porteurs d'implants cochléaires qui sont capables de produire de la LfPC lorsqu'ils

²³ Batterie d'Évaluation du Langage Écrit et de ses troubles

²⁴ La Langue française Parlée Complétée (nommée LfPC jusqu'à maintenant dans le manuscrit) est appelée *Langage Parlé Complété* ou *Langue Parlée Complétée* dans sa version québécoise. Nous avons fait le choix de conserver l'appellation LfPC dans la suite du manuscrit pour plus de lisibilité. Ce choix est motivé par le fait que les deux populations étudiées sont francophones et les phonèmes analysés sont codés de la même manière dans les systèmes français et québécois.

parlent. De la même manière que pour l'évaluation du niveau de décodage de la LfPC, les orthophonistes en charge des participants ont évalué la capacité à coder la LfPC de chaque enfant en utilisant une échelle à deux niveaux (Figure 4.2) : niveau faible (quelques syllabes isolées peuvent être produites simultanément avec la parole) et niveau élevé (des mots et des phrases simples peuvent être produits simultanément avec la parole, avec un débit lent). Seuls les enfants ayant un niveau élevé ou très élevé de production de la LfPC sont invités à réaliser la tâche de dénomination dans les conditions « avec LfPC » (conditions noUS_CF et US_CF).

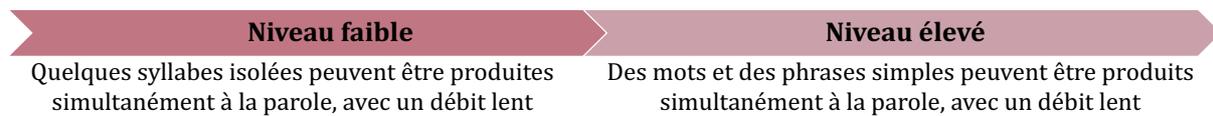


Figure 4.2 : Échelle de niveau de codage de la LfPC

4.1.4. TEST AUDIOMETRIQUE

De la même façon que pour le corpus EULALIES-surdité, un test audiométrique est réalisé pour les enfants normo-entendants sur les fréquences 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz et 8000Hz à une intensité de 20 dB (cf. paragraphe 3.1.5). Les données étant récoltées en chambre sourde, tous les participants perçoivent les fréquences testées à une intensité de 20 dB.

4.1.5. QUESTIONNAIRE DE LANGAGE

De la même manière que pour l'étude 1, un questionnaire de langage est remis aux parents en amont du recueil de données. La confidentialité concernant l'identité du participant ainsi que certaines informations médicales est garantie par le fait que seul un identifiant anonyme (i.e., numéro de participant) figure dans les tableaux de traitement des données ainsi que dans les analyses. Seuls le sexe, l'âge en mois au moment de l'enregistrement des données, ainsi que des variables telles que le lieu de passation, les langues parlées, les troubles langagiers éventuels, ainsi que les caractéristiques de la surdité et des appareillages auditifs sont conservées. Ces informations ont toutes été recodées et peuvent être mises en lien avec une table de correspondance entre les numéros d'anonymat et les noms et prénoms des participants, protégée par mot de passe. Cette

table est conservée de façon confidentielle au sein des laboratoires GIPSA-lab et LPNC, à Grenoble, ainsi qu'au sein du Laboratoire de Phonétique de l'UQAM, à Montréal.

Les informations ainsi recueillies font partie intégrante des critères d'inclusion de notre étude et nous permettent de sélectionner les participants répondant à nos besoins. Les documents de consentement et questionnaires de langage de cette seconde étude sont disponibles en Annexe 4.3.

4.2. TACHE DE DENOMINATION D'IMAGES

4.2.1. CREATION DU CORPUS

L'analyse des données récoltées dans le cadre de l'étude EULALIES-Surdité nous a permis d'examiner les substitutions consonantiques les plus souvent effectuées par les enfants porteurs d'implants cochléaires lorsqu'ils sont exposés ou non à la LfPC. Nous avons mis en évidence que le lieu d'articulation est difficile à produire pour ces enfants, et ce d'autant plus lorsqu'ils ne sont pas exposés à la LfPC (voir Chapitre 5). L'objectif de cette seconde étude est d'enregistrer les productions acoustiques et les mouvements linguaux d'enfants âgés de quatre à onze ans, lors de la production de mots simples comprenant chacun un phonème cible. Les deux critères principaux pour le choix de ces phonèmes cibles sont : la position horizontale de la langue (distinction du lieu d'articulation) et la position verticale de la langue (distinction du mode d'articulation). Par ailleurs, l'étude EULALIES-Surdité a permis de montrer que les consonnes postalvéolaires et vélaires sont les plus substituées par les enfants porteurs d'implants cochléaires, qui ont tendance à antérioriser ces phonèmes. Afin de prendre en compte tous ces critères, nous avons choisi d'étudier les consonnes plosives /t/ et /k/ et les consonnes fricatives /s/ et /ʃ/.

Les *stimuli* proposés sont des mots simples, bisyllabiques, choisis pour leur fréquence et leur caractère iconique. La consonne cible se trouve toujours en position initiale, car les consonnes initiales des mots sont généralement produites avec une plus grande précision articulatoire, et est suivie de la voyelle centrale /a/. Nous proposons donc les quatre mots français suivants : *tapis* /tapi/, *carotte* /kaxɔt/, *sapin* /sapɛ̃/ et *chapeau* /ʃapo/. Enfin, pour faciliter la détection d'événements acoustiques tels que l'apparition de l'explosion dans les consonnes plosives, tous les mots sont produits dans la phrase porteuse : *C'est les... /sele.../*.

4.2.2. CONDITIONS DE PASSATION

Chaque mot est produit six fois (comme dans Barbier et al. (2015) ou Noiray et al. (2018)), à partir de six images différentes pour rendre la tâche plus attrayante pour les enfants. Au total, 36 images sont dénommées dans chaque condition de passation. Ce nombre d'items permet de minimiser la fatigue tout en assurant un nombre suffisant de répétitions.

Notre étude comprend quatre conditions différentes, en fonction du profil langagier du participant :

- Tous les groupes réalisent les conditions dites « sans LfPC », c'est-à-dire pas d'ultrasons et pas de LfPC (noUS_noCF), ainsi que ultrasons sans LfPC (US_noCF)
- Les enfants porteurs d'implants cochléaires avec un niveau élevé ou très élevé de codage de la LfPC réalisent, en plus, les conditions dites « avec LfPC », c'est-à-dire pas d'ultrasons avec LfPC (noUS_CF) et ultrasons avec LfPC (US_CF)

L'ordre des conditions est le même pour tous les participants. Les conditions « sans ultrasons » (noUS) sont enregistrées en premier. Cela nous permet de familiariser les participants avec la tâche ainsi qu'avec les items à dénommer. Par ailleurs, les données enregistrées lors de la phase de familiarisation nous permettent de mesurer un éventuel effet de la sonde sur l'articulation des participants, ce qui n'a a priori jamais été mesuré auparavant dans les études articulatoires. Ensuite, la sonde d'échographie ultrasons est installée et les tâches « avec ultrasons » sont enregistrées. Ainsi, deux conditions sont enregistrées pour les participants normo-entendants et les participants qui ne sont pas en mesure de coder la LfPC (noUS_noCF et US_noCF) tandis que quatre conditions sont proposées aux participants qui savent coder la LfPC (noUS_noCF, noUS_CF, US_noCF et US_CF).

Nos *stimuli* sont, quant à eux, présentés dans quatre ordres différents afin d'éviter toute influence d'un *stimulus* sur un autre. Les ordres sont répartis aléatoirement entre les sujets et entre les conditions : les enfants normo-entendants et non codeurs de la LfPC ont deux ordres différents alors que les enfants codeurs de la LfPC ont quatre ordres différents (i.e., un ordre par condition).

4.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

4.3.1. MATERIEL

Les enregistrements acoustiques et articulatoires des productions de chaque enfant sont enregistrés simultanément à l'aide d'une interface de synchronisation *Blackmagic Intensity shuffle* à laquelle étaient connectés un microphone Audio-Technica de haute qualité (microphone serre-tête à condensateur omnidirectionnel, numéro de modèle BP892) et le système à ultrasons SonoSite 180 Plus. Une mini-caméra vidéo est positionnée devant l'enfant pour enregistrer le mouvement de ses lèvres et de sa tête.

4.3.2. DEROULEMENT DE LA PASSATION

Avant de débiter, le questionnaire de langage, rempli en amont par les parents, est récupéré ainsi que les consentements signés. La passation peut alors débiter. L'enfant est assis à côté d'une table sur laquelle est posé l'échographe ultrasons. Un ordinateur, sur lequel les images sont diffusées, se trouve sur une seconde table située face à lui. Les mouvements de la langue sont enregistrés à l'aide de la sonde à ultrasons placée et maintenue sous le menton de l'enfant à l'aide d'un casque et d'un élastique (Figure 4.3). Une expérimentatrice reste à côté et tient la sonde à ultrasons, afin d'assurer une pression suffisante pour la détection des mouvements de la langue mais, également, pour s'assurer que la sonde suit précisément les mouvements de la mâchoire tout au long de l'expérimentation. Ce protocole permet d'obtenir des images de la langue dans le même plan que la tête et ce de manière similaire dans toutes les conditions. Cette technique non invasive s'est avérée très adaptée aux études phonétiques car elle permet de visualiser le contour global de la langue dans le plan mid-sagittal ou coronal (Ménard et al., 2012, 2014; Ménard, Perrier, et al., 2013), en particulier chez les enfants. Les mouvements des lèvres sont filmés à l'aide d'une caméra placée face à l'enfant. Cinq pastilles bleues, de 5 mm de diamètre, sont placées sur le visage du participant et quatre autres pastilles se trouvent sur la sonde échographique. Ces pastilles bleues permettent d'appliquer une correction des mouvements de tête lors du traitement des données (Figure 4.3). Une seconde expérimentatrice s'occupe du retour caméra et de faire défiler les items pour la tâche de dénomination d'images sur l'écran d'ordinateur en face de l'enfant. La voix de l'enfant est enregistrée à l'aide du microphone et de l'enregistreur numérique.

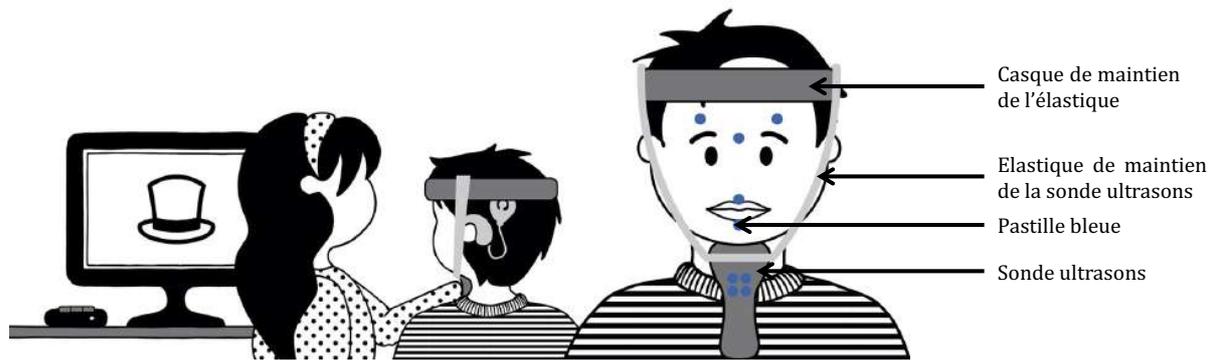


Figure 4.3 : Schéma de l'installation de la sonde à ultrasons

La passation comporte deux types de tâches : un ou deux tests d'inclusion, en fonction du statut auditif du participant, ainsi qu'une tâche de dénomination d'images. L'expérimentation commence par la tâche de dénomination d'images. Une fois toutes les conditions enregistrées, le test de conscience phonologique est réalisé. Pour les enfants normo-entendants, une audiométrie est réalisée à la fin de la passation.

4.4. PARTICIPANTS

4.4.1. GROUPE CONTROLE

Participant	Groupe	Sexe	Age (mois)	Langue maternelle	Conditions de passation
008	TH	F	52	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
013	TH	F	60	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
016	TH	F	84	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
017	TH	F	86	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
011	TH	M	99	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
018	TH	M	101	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
019	TH	F	103	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
015	TH	M	108	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
012	TH	F	130	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
014	TH	M	137	Français québécois	noUS_noCF US_noCF

Tableau 4.1 : données démographiques des participants normo-entendants pour l'étude ArtiMontréal

4.4.2. PARTICIPANTS PORTEURS D'IMPLANTS COCHLEAIRES

Participant	Groupe	Sexe	Age (mois)	Age auditif (dépistage)	Age d'implantation	Période d'implantation	Durée d'utilisation de l'implant cochléaire	Type d'implantation	Degré de surdité après implantation	Niveau de décodage de la LfPC	Niveau de codage de la LfPC	Langue maternelle	Conditions de passation
002	CI+	M	51	49	12	précoce	39	bilatérale	légère	4	4	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
005	CI+	F	65	49	18	précoce	47	bilatérale	<i>non transmis</i>	4	4	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
007	CI+	F	89	65	75	tardive	14	bimodale	<i>non transmis</i>	2	2	Français québécois	noUS_noCF noUS_CF US_noCF US_CF
004	CI+	M	102	90	54	tardive	48	bimodale	<i>non transmis</i>	4	4	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
009	CI+	F	102	85	24	tardive	78	bilatérale	légère	2	3	Français québécois	noUS_noCF US_noCF
010	CI+	F	102	90	27	tardive	75	bilatérale	normale	3	2	Français québécois	noUS_noCF noUS_CF US_noCF US_CF
001	CI+	F	103	91	49	tardive	54	bimodale	moyenne	2	2	Français québécois	noUS_noCF noUS_CF US_noCF US_CF
006	CI+	F	121	103	24	tardive	97	bilatérale	<i>non transmis</i>	3	2	Français québécois	noUS_noCF noUS_CF US_noCF US_CF
003	CI+	M	133	121	24	tardive	109	bilatérale	légère	4	4	Français québécois	noUS_noCF US_noCF

Tableau 4.2 : données démographiques des participants porteurs d'implants cochléaires pour l'étude ArtiMontréal

4.5. TRAITEMENT DES DONNEES

De la même manière que pour l'étude précédente, la passation complète est enregistrée d'un seul tenant. Après découpage de chaque modalité (i.e., noUS_noCF, noUS_CF, US_noCF et US_CF), nous obtenons donc un fichier audio .wav ainsi qu'un fichier vidéo .m4v par modalité. Le codage des fichiers .wav et .m4v permet d'identifier le participant par son numéro d'anonymat ainsi que la modalité étudiée (nom de l'étude_initiales de l'expérimentatrice_numéro de sujet_nom de la tâche ; exemple : Arti_LM_017_US_noCF, il s'agit de l'étude ArtiMontréal, l'expérimentatrice est Laura Machart, le participant est le 17^{ème}, il s'agit de la modalité US_noCF). Les numéros d'anonymat de chaque participant sont disponibles dans les tableaux 4.1 et 4.2 (colonne *Speaker*).

4.5.1. TRAITEMENT DES DONNEES ACOUSTIQUES

Pour chaque modalité, l'ensemble des productions a été découpé et annoté à l'aide du logiciel Praat (Boersma & Weenink, 2019), au format TextGrid. L'annotation a été réalisée sur 5 lignes différentes (Figure 4.4) :

- 1) Orthography: Word (items cibles avec numéro de la production),
- 2) IPA Actual: Phone,
- 3) Consonne (uniquement pour les phonèmes cibles),
- 4) ConsoVoy (fin des consonnes cibles et milieu des voyelles /i/, /o/ et /a/),
- 5) Burst (explosion consonantique, pour les consonnes plosives /t/ et /k/),
- 6) Commentaires.

Nous avons choisi de ne pas transcrire les phonèmes substitués ou non-produits puisque notre objectif ici est d'étudier la production acoustique et articulatoire des phonèmes /t/, /k/, /s/ et /ʃ/. Lorsqu'une production est jugée incorrecte ou absente, aucune annotation n'est donc donnée pour la ligne 3 (i.e., Consonne). Par ailleurs, les voyelles /i/, /o/ et /a/ ont été transcrites pour obtenir une représentation du triangle vocalique de chaque sujet mais ces données n'ont pas été exploitées dans les études présentées ici. Enfin, en amont de ces étapes, les fichiers audios ont été rééchantillonnés à 16kHz (fréquence d'échantillonnage divisée par trois), à l'aide d'un script MATLAB (Mathworks Inc., 2019). Cette fréquence d'échantillonnage est, en effet, plus pertinente pour l'analyse des

productions d'enfants puisqu'elle permet une meilleure détection des valeurs de formants sur l'intervalle [0;6000 Hz].

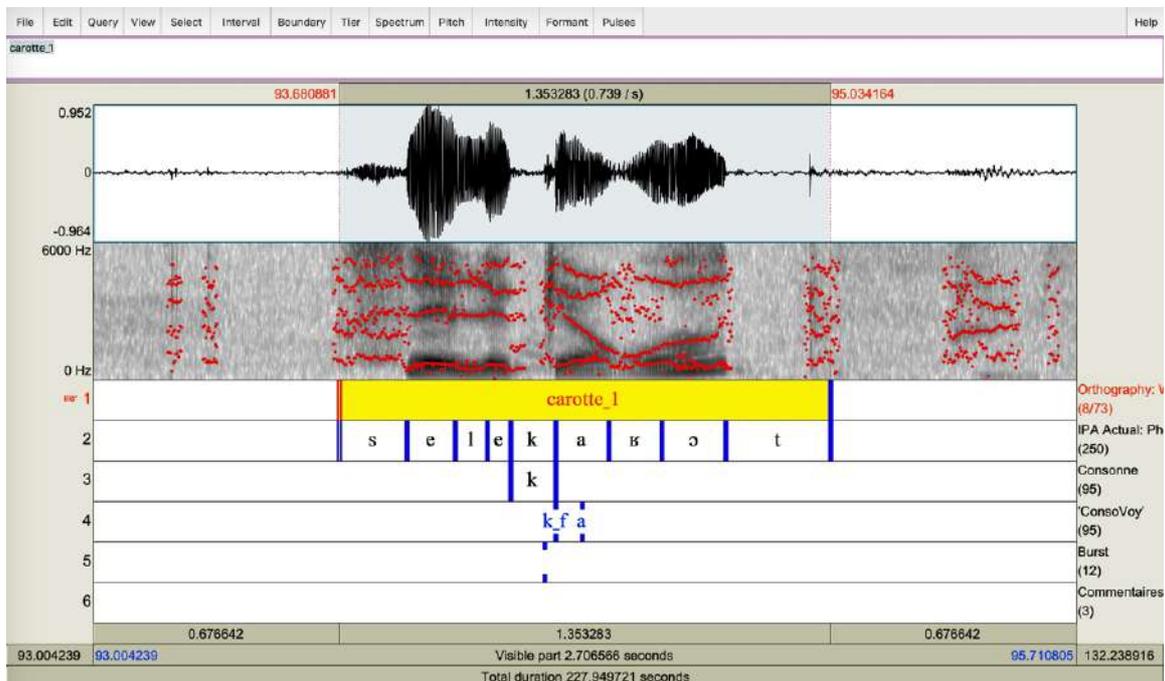


Figure 4.4 : Exemple d'annotation sous PRAAT pour l'item « carotte »

Dans un premier temps, pour chaque consonne occlusive (i.e., /t/ et /k/) et chaque consonne fricative (i.e., /s/ et /ʃ/), un script Praat nous a permis d'extraire automatiquement les valeurs des formants F1, F2 et F3 à la fin de chaque consonne produite. Toutes les valeurs aberrantes liées aux erreurs de mesure ont été corrigées manuellement. Dans un second temps, pour chaque consonne fricative, nous avons également extrait une fenêtre de 40 ms autour du point central, puis calculé automatiquement le centre de gravité (i.e., premier moment spectral) à l'aide d'un second script Praat. Enfin, afin d'aller plus loin dans l'analyse de la distinction entre les fricatives alvéolaires et postalvéolaires, nous avons également calculé la différence moyenne entre les centres de gravité de /s/ et /ʃ/ pour chaque groupe de participants.

4.5.2. TRAITEMENT DES DONNEES ARTICULATOIRES

Pour les modalités avec US (i.e., US_noCF et US_CF), les fichiers vidéo des images linguales, enregistrées à partir de l'interface *Blackmagic Intensity shuffle*, ont été traités à partir de l'algorithme en accès libre *SLURP* (Laporte, 2018; Laporte & Ménard, 2018), intégré dans le programme de suivi de contours de langue *GetContours* (Tiede, 2015) disponible sous MATLAB. L'algorithme *SLURP* affine l'algorithme implémenté dans *GetContours* en optimisant plusieurs ajustements à l'aide d'un algorithme de filtrage particulière (Laporte & Ménard, 2018). Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que l'algorithme *SLURP* permet une extraction complète des contours de langue à partir d'images échographiques et ce, de manière précise sur un nombre important d'images (peu de corrections sont nécessaires) (Kabakoff et al., 2022; Whalen et al., 2019). Par ailleurs, il s'agit d'un programme qui ne nécessite pas d'entraînement particulier et dont la prise en main est par conséquent rapide.

Plusieurs points d'ancrage rouges (Figure 4.5) ont été disposés manuellement à la surface de la langue, sur la première image de chaque vidéo, afin de définir la ligne jaune du contour de la langue dans *GetContours* (Figure 4.5). L'algorithme *SLURP* a ensuite permis de tracer automatiquement tous les contours de langue, image par image. Les données de contour de chaque image ont alors été extraites dans un fichier de contour (.con), nécessaire pour les analyses qui ont suivi. Ces mêmes étapes ont également été réalisées pour obtenir la trace du palais de chaque participant.



Figure 4.5 : Points d'ancrage à la surface de la langue pour le traçage automatique du contour de langue avec le programme *SLURP*

Pour chaque phonème produit, nous avons analysé différentes mesures à partir d'un script MATLAB et des fichiers de contours (.con) extraits à l'étape précédente. Nous avons calculé les valeurs de l'index de courbure moyen (MCI : *Mean Curvature Index*) (Dawson et al., 2016) ainsi que les coordonnées (x;y) du point le plus haut de la langue (que nous appelons *index d'antéro-posteriorité*), appelé Y max (Ménard et al., 2013). La position du point le plus haut de la langue ne nous permettant pas toujours d'obtenir une information claire sur le lieu d'articulation, nous avons également calculé la distance la plus petite entre le contour de langue et la trace du palais, c'est-à-dire le point d'occlusion ou de constriction (que nous avons choisi de nommer *lieu de constriction*). Pour les plosives, ces mesures ont été réalisées au début de l'explosion consonantique (*burst*) tandis que pour les fricatives, ces mesures ont été faites au milieu de la consonne. Toutes ces mesures sont représentées dans la Figure 4.6 ci-dessous. Nous distinguons le lieu de constriction de l'index d'antéro-posteriorité puisque, comme le montre la Figure 4.6, le point le plus proche du palais ne correspond pas au point le plus haut de langue. Ainsi, le lieu de constriction nous permet d'analyser le geste lingual relativement au palais alors que l'index d'antéro-posteriorité indique la position de la langue dans la bouche.

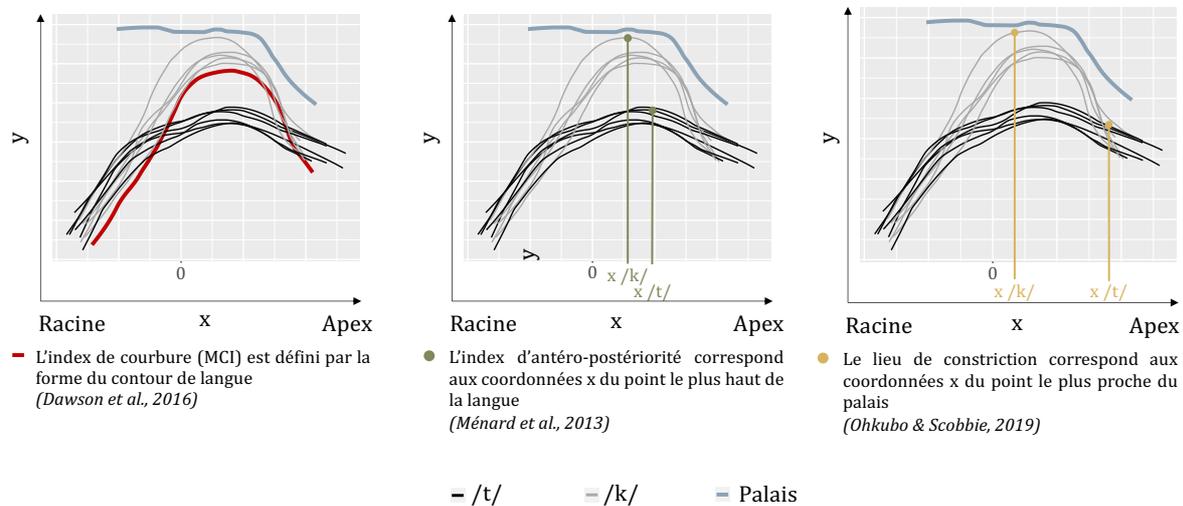


Figure 4.6 : Représentations schématiques des mesures articulatoires effectuées dans l'étude 3

Pour s'assurer que toutes les analyses ont été effectuées dans le même plan, et pour renforcer la fiabilité de nos résultats, une correction des mouvements de la tête a été réalisée avant l'extraction des valeurs de courbure (i.e., index de courbure), du point le plus haut de la langue (i.e., index d'antéro-posteriorité) et du point le plus proche du palais (i.e., lieu de constriction). Cette correction a été faite à partir d'un script MATLAB qui

analysait la position et les mouvements des neuf pastilles bleues placées sur le visage du participant et sur la sonde à ultrasons (Figure 4.3). Ces pastilles ont permis de mesurer le déplacement de la sonde à ultrasons le long des axes x et y afin d'obtenir un système de coordonnées de référence des mouvements de tête identique à celui des contours de la langue (voir Noiray et al. (2020) pour plus de détails).

4.5.3. TESTS D'INCLUSION

Les résultats au test de conscience phonologique ont été traités selon les consignes données pour chaque tâche (i.e., le total des productions correctes). Les scores à chaque tâche ont été renseignés dans un tableur Excel (Annexe 4.4).

Les réponses au questionnaire de langage ont été codées dans un tableur Excel contenant toutes les informations démographiques de chaque participant. Les informations utilisées dans le cadre de ce travail sont détaillées dans les tableaux 4.1 et 4.2, ci-dessus.

4.6. ANALYSES STATISTIQUES

De la même manière que pour le corpus EULALIES-Surdité, toutes les analyses statistiques et les graphiques présentés pour cette étude ont été élaborés à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2012). Les analyses statistiques ont été réalisées à partir de modèles linéaires mixtes (fonctions *lm* et *lme* dans le package *lme4* de R). Pour chaque analyse, une sélection de variables avec comparaisons de modèles a été appliquée afin de déterminer le modèle le mieux ajusté. Tout d'abord, tous les facteurs à effet aléatoire et les facteurs à effet fixe ont été inclus dans le modèle, ainsi que les interactions. Finalement, seules les variables qui permettent l'ajustement du modèle ont été retenues (fonction *anova* dans R avec un seuil de $p < .05$). Les analyses statistiques sont détaillées dans les articles correspondants à l'étude ArtiMontréal (Chapitre 6 et Chapitre 7, ci-dessous).

SECTION 3 : ANALYSE DES DONNEES ET RESULTATS

CH5. EVALUATION DE LA PRODUCTION DE MOTS CHEZ L'ENFANT PORTEUR D'IMPLANTS COCHLEAIRES EXPOSE A LA LFPC

5.1. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Comme nous l'avons vu précédemment, l'implant cochléaire est aujourd'hui un dispositif de remédiation largement utilisé pour les surdités congénitales. Cependant, bien que cette technologie de remédiation restaure efficacement les fonctions auditives et améliore la perception de la parole chez les enfants atteints de surdité profonde, la perception de certaines caractéristiques acoustiques fines peut être altérée (Bouton et al., 2012; Fagniard et al., 2020; Leybaert et al., 2016). Le développement de la langue vocale peut ainsi être impacté (Hansson et al., 2018) avec des compétences phonologiques qui restent limitées (Colin et al., 2017; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2018). D'autres répercussions liées à l'information phonologique dégradée sont également observées dans la production vocale des enfants porteurs d'implants cochléaires : difficultés à produire le contraste de voisement (Grandon et al., 2017), le contraste de nasalité (Fagniard et al., 2020), le mode d'articulation, en particulier pour les fricatives (Grandon & Vilain, 2020) et également le lieu d'articulation (Grandon, 2016; Grandon et al., 2017).

Les bénéfices de l'exposition au *cued speech* sur la perception de parole chez l'enfant sourd ont largement été démontrés (Alegria et al., 1999; Aparicio et al., 2012; Clarke & Ling, 1976; Gregory, 1987; Kos et al., 2009; Ling & Clarke, 1975; Nicholls & Ling, 1982; Périer et al., 1990; Uchanski et al., 1994) et quelques études ont prouvé que cette exposition permet également de compléter la perception de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires (Bouton et al., 2011; Cochard, 2003; Colin et al., 2017; Descourtieux et al., 1999; Hage & Leybaert, 2005). Cependant, à notre connaissance, seule une étude a aujourd'hui mis en avant l'impact de l'exposition à la LfPC sur l'intelligibilité de la parole d'enfants porteurs d'implants cochléaires (Vieu et al., 1998).

L'objectif de notre première étude expérimentale est donc d'examiner **dans quelles mesures l'exposition à la LfPC peut améliorer la production de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires.**

Cette étude s'articule autour de deux questions principales. Premièrement, nous évaluons la précision de la production de phonèmes en français chez des enfants porteurs d'implants cochléaires, en regard des productions d'enfants normo-entendants. La seconde question concerne l'impact de l'exposition à la LfPC sur les compétences de production de la parole des enfants porteurs d'implants cochléaires. **L'originalité de cette étude réside dans la comparaison d'enfants porteurs d'implants cochléaires en fonction de leur niveau de décodage de la LfPC.** En effet, comme démontré par Colin et al. (2015), l'exposition à la LfPC ne garantit pas une bonne performance de décodage des clés manuelles, c'est pourquoi nous avons choisi d'évaluer cette compétence à partir du test TERMO²⁵ (*Test d'évaluation de la réception du message oral par l'enfant sourd*). Les participants porteurs d'implants cochléaires ont ainsi été répartis en deux sous-groupes : le groupe CF- réunit les enfants sachant décoder tout au plus quelques syllabes et mots familiers à une vitesse lente tandis que le groupe CF+ rassemble les enfants capables de décoder des mots et/ou des phrases à la vitesse de la parole. En comparant la production de phonèmes du français chez des enfants porteurs d'implants cochléaires bénéficiant de différents niveaux de décodage de la LfPC (i.e., faible décodage vs bon décodage), nous testons l'hypothèse d'un transfert des connaissances phonologiques perceptives vers les compétences de production vocale.

Pour ce faire, la production vocale de 14 enfants porteurs d'implants cochléaires et de 71 enfants normo-entendants, âgés de 60 à 140 mois, est évaluée à l'aide de la tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES. La production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles est analysée à partir du nombre d'erreurs produites (somme des substitutions, épenthèses et délétions). Une analyse spécifique est ensuite menée pour observer la précision de production de caractéristiques acoustiques fines telles que le voisement, la nasalité, le mode d'articulation et le lieu d'articulation.

²⁵ Le test TERMO est utilisé par les professionnels de la surdité (en particulier les codeuses) pour déterminer, entre autres, le niveau de décodage de la LfPC ou encore la compétence en lecture labiale, avec ou sans information auditive

5.2. ARTICLE

Cette étude est présentée sous la forme d'un article de journal.

Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Gerber, S. & EULALIES Consortium* (submitted). Positive impact of French Cued Speech exposure on speech production in children fitted with Cochlear Implants.

*Members of the EULALIES consortium include, in alphabetical order, Estelle Gillet-Perret (CRTLA, Centre Hospitalier Universitaire Grenoble Alpes, France), Andrea A. N. MacLeod (University of Alberta, Edmonton, Canada), Geneviève Meloni (Université Grenoble Alpes, France and Université de Montréal, Montréal, Canada), Clarisse Puissant (Université Grenoble Alpes, France), and Yvan Rose (Memorial University, Newfoundland, Canada)

Une partie des résultats de cette étude expérimentale a également été présentée dans le cadre de conférences internationales (ICPLA, 2021 et ICPC, 2019), au sein d'un symposium international (AEAL Congress, 2022), lors d'un workshop international (Beyond Speech, 2020) et dans les actes d'une conférence internationale à comité de lecture (JEP, 2020) :

- **Machart, L.,** Van Bogaert, L., Vilain, A. & Løevenbruck, H. (2022, septembre). *Sustaining speech development in French-speaking children fitted with CI: a comparative study on different intervention strategies*. Part of the symposium "From early socio-communicative skills to word encoding and intervention procedures in children fitted with cochlear implants: different views on variability in language outcomes". X AEAL Congress of Language Acquisition, Girona, Spain. [Présentation orale en binôme]
- **Machart, L.,** Løevenbruck, H., Vilain, A., Meloni, G. & Puissant, C. (2021, juin). *Speech production in children with cochlear implants: contribution of French Cued Speech*. ICPLA, Glasgow, Ecosse. [Présentation orale en visioconférence]
- **Machart, L.,** Vilain, A., Løevenbruck, H., Ménard, L., Meloni, G. & Puissant, C. (2020, août). *Influence of French Cued Speech exposure on speech production in children with cochlear implants*. Beyond Speech: Perspective on language in children with hearing loss, Macquarie University Workshop, Sydney, Australia. [Présentation orale en visioconférence]

- **Machart, L.**, Vilain, A., Lœvenbruck, H., Meloni, G. & Puissant, C. (2020). *Production de parole chez l'enfant porteur d'implant cochléaire : apport de la Langue française Parlée Complétée*. 6e conférence conjointe Journées d'Études sur la Parole (JEP, 33e édition), Traitement Automatique des Langues Naturelles (TALN, 27e édition), Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement Automatique des Langues (RÉCITAL, 22e édition). Volume 1 : Journées d'Études sur la Parole, 2020, Nancy, France. pp.388-396. <hal-02798562v3>
- **Machart, L.**, Meloni, G., Vilain, A., Lœvenbruck, H. & Schott-Brua, V. (2019, juin). *Phonological skills in children with cochlear implants: Contribution of a Cued Speech education*. The International Child Phonology Conference (ICPC), Montréal. [Poster disponible en Annexe 5.1]

Positive impact of French Cued Speech exposure on speech production in children fitted with Cochlear Implants

Laura Machart^{1,2}, Anne Vilain², H el ene L oevenbruck¹, Silvain Gerber² & EULALIES
Consortium*

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LPNC, 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France

**Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

*Members of the EULALIES consortium include, in alphabetical order, Estelle Gillet-Perret (CRTLA, Centre Hospitalier Universitaire Grenoble Alpes, France), Andrea A. N. MacLeod (University of Alberta, Edmonton, Canada), Genevi eve Meloni (Université Grenoble Alpes, France and Université de Montréal, Montréal, Canada), Clarisse Puissant (Université Grenoble Alpes, France), and Yvan Rose (Memorial University, Newfoundland, Canada)

Short title: Cued French exposure improves speech production in children with Cochlear
Implants

Author Note: LM, AV, HL, EGP, AML and GM designed the experimental protocol. LM, AV, HL, GM and CP collected data. LM, AV, HL, GM, CP and YR devised transcription methods. LM, GM and CP transcribed data. LM, AV, HL and SG performed data analysis. LM, HL, AV wrote the first draft and revised version of the manuscript.

Correspondence concerning this article should be addressed to Laura Machart, Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, Univ. Grenoble Alpes, 1251 avenue centrale, 38058 Grenoble Cedex 9,

France. E-mail: laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr

Conflict of Interest: No competing interests existed at the time of publication.

ABSTRACT

Although cochlear implants improve speech perception in children with hearing loss, the auditory information remains degraded. To complement the missing phonological information, cued speech gestures can be used, with established benefits for children with hearing impairment. Cued speech might also have longer-term impacts on speech and language processing. This paper aims to investigate to what extent cued speech exposure may enhance speech production in French-speaking children with cochlear implants. Fourteen children with cochlear implants and 71 children with typical hearing aged from 60 to 140 months were assessed using a picture-naming task. Results reveal an improvement of speech production skills in children with cochlear implants adequately exposed to Cued French: an effect of Cued French exposure is observed on consonant, consonant cluster and vowel production. Additionally, an effect of cue reading skills is found on the production of voicing contrast, nasal contrast and manner and place of articulation.

Keywords: French Cued Speech, cochlear implants, speech production, phonological representations

INTRODUCTION

Phonological representations are information about the sound structure of a language stored in long-term memory (Munson et al., 2012). Quality of phonological representations plays a key role in accurate speech perception and speech production, as well as in verbal short-term memory and in the development of reading and writing skills (e.g., Fowler, 1991; Campbell, 1992; Elbro, 1996; Leybaert & Charlier, 1996; Stackhouse et al., 1997; Rvachew et al., 2003). In children with typical hearing (TH), perceptual phonological knowledge emerges from the multisensory input provided by the linguistic environment (Beckman & Edwards, 2000). In orally-educated children with profound hearing loss, it is mainly built from lipreading, due to the lack of auditory information (Dodd, 1987; Burden & Campbell, 1994; Leybaert & LaSasso, 2010). However, out of context, lipreading only gives access to 10 to 30% of a word or a sentence (Bernstein et al., 2000). Therefore, through lipreading, children with profound hearing loss only have access to incomplete information and develop underspecified perceptual phonological knowledge (Charlier & Leybaert, 2000; Leybaert et al., 2011), which may impact oral language development and lead to persistent oral language disorders (Turgeon et al., 2017; Grandon et al., 2019).

To compensate for the degraded acoustic information in hearing impairment, Cornett (1967) developed cued speech (CS), a system initially designed to provide phonological information via manual and lip gestures: manual gestures are used to disambiguate visually identical phonemes (e.g. /b/ and /m/). Providing cued speech gestures simultaneously with speech has been shown to improve sentence processing in children with hearing aids (Périer et al., 1990; Leybaert & LaSasso, 2010) and even in children with CIs (Hage & Leybaert, 2005). Some studies have also demonstrated beneficial effects of cued speech exposure on the development of phonological representations in children with hearing impairment (e.g. Charlier & Leybaert, 2000; LaSasso et al. 2003). But very few studies have tested the long-term impact of a cued speech education on audio-only speech processing, or on speech production skills. To our knowledge, the present study is the first one which examines the impact of cued speech exposure on speech production in children with cochlear implants.

Cued speech perception

In the cued speech manual system (Cornett, 1967), all the consonant phonemes are cued with a specific handshape and all the vowels are cued with a specific hand placement around the face (see Appendix 5.1 for Cued French). The manual cue helps disambiguating phonemes which have similar lip shapes. For example, consonants /b/ and /m/, which differ in manner of articulation, are visually identical, as they have similarly closed lips. Different cued speech handshapes are used to introduce a contrast between these two consonants: /m/ is produced with the addition of a handshape with all four fingers extended and the thumb raised whereas /b/ is accompanied with a handshape with all four fingers extended and the thumb hidden. The manual cue can also give information about invisible phonemes like /k/ or /ʁ/ and invisible features such as voicing or nasality²⁶. Cuers will provide a manual cue for each phoneme of each word to convey spoken language to people with hearing impairment (Shull & Crain, 2010). Cued speech can be used with or without phonation (LaSasso, 2010).

There are now well-established data that evidence the effectiveness of the cued speech system for speech perception. Speech comprehension has been shown to be improved in children with hearing impairment when audio-visual speech is presented together with manual cues (e.g. Ling & Clarke (1975) for Canadian Cued English; Uchanski et al. (1994) for Cued American English; Périer et al. (1990) for Cued French), with benefits increasing with duration of exposure to cued speech (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990). Perception is improved even without auditory information (Nicholls & Ling, 1982). Early exposure to cued speech (before the age of two years) has been shown to be a key factor, particularly for pseudo-word perception (Alegria et al., 1999). But, even more remarkably, a few studies have also revealed that a cued speech education has longer-

²⁶ Although initially developed in English-speaking countries, cued speech has now been adapted to more than 60 spoken languages (Shull & Crain, 2010). Each of these spoken languages has its own cued speech system, adapted to its own phonological system (i.e., placements and configurations of the hand may therefore vary from one system to another). In 1998, Fleetwood and Metzger have argued that cued language and cued speech should be distinguished, just like language and speaking or language and signing. They suggested that the name cued speech refers to the communication modality whereas the name Cued language denotes a specific spoken language conveyed with manual and facial cues. Since our study deals with the French language, we use the term Cued French when referring to the language manually cued for our participants. We restrict the use of the term cued speech to refer to the communication mode in general, without targeting a given language.

term effects, and that it helps children develop phonological skills that will help them better perceive lip gestures or audio-only speech information.

Impact of cued speech education on the development of phonological representations

A few studies suggest that a cued speech education not only helps speech perception when cues are added, but it also improves lipreading skills when cues are absent. As an example, Aparicio et al. (2012) revealed that adults who had received Cued French in childhood had significantly better lipreading skills than those who had not received Cued French. A few rare studies have even evidenced an effect of cued speech education on the perception of speech in audio conditions only. Kos et al. (2009) found that pre-implantation exposure to Cued French improves post-implantation phoneme identification based on audio only. The authors speculate that pre-implantation cued speech use promotes knowledge of the acoustic and temporal structure of the oral language, which would benefit the development of perceptual phonological knowledge, and in turn improve audio speech perception after implantation.

Additionally, cued speech exposure has also been shown to have positive impact on phonological awareness and on linguistic competencies. Children who have been exposed to cued speech have better rhyme judgment performance (Charlier & Leybaert, 2000 for Cued French) and rhyme generation skills (Paire-Ficout et al., 2003 and Leybaert et al., 2011 for Cued French; LaSasso et al., 2003 for Cued American English), with performance equivalent to their peers with typical hearing if cued speech exposure has been intensive. Paire-Ficout et al. (2003) argue that cued speech reinforces the phonological input and helps better specify phonological contrasts, which facilitates access to the mental lexicon, making it easier to generate rhymes.

Overall, these studies indicate that exposure to cued speech sustains the development of accurate phonological representations, which leads to better perception, better phonological awareness, and supports reading, spelling and remembering (Colin et al. 2007; Leybaert & Charlier, 1996; Bouton et al., 2011; Trezek, 2017). In addition, it can be expected that perceptually-enriched phonological representations will provide more specified information to the speech production system, which has been shown to lead to

more accurate realization of the sound units of the language for typically-developing children (Munson et al., 2012; Schwartz et al. 2012). Moreover, studies have also shown that perceptual training improves speech production in children with speech sound disorders (e.g. Rvachew et al., 2004). Therefore, it can be hypothesized that cued speech exposure, through its impact on speech perception and on phonological representations, might also affect the speech production skills of children with hearing impairment.

RESEARCH QUESTION

The present study aims to investigate whether and how Cued French exposure may improve speech production in children with cochlear implants.

Cochlear implant is now a widely used remedial device available for congenital deafness and which partially restores access to speech sounds. However, although cochlear implant (CI) improves speech perception in children with profound hearing loss, the perception of some acoustic features can be altered (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016) and oral language development may be impacted (Hansson et al., 2018), with phonological skills that remain limited (Leybaert & LaSasso, 2010; Colin et al., 2017; Nittrouer et al., 2018). Other repercussions of degraded phonological information have also been found in the speech production of children with cochlear implants. French-speaking children with cochlear implants have difficulties in producing some phonetic features like voicing (Grandon et al., 2017), nasality (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016; Fagniard et al., 2020), manner of articulation (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016; especially in fricatives Grandon & Vilain, 2020), and place of articulation (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016; Grandon et al., 2017).

A few studies have demonstrated the benefit of using cued speech as a way to supplement speech perception in children with cochlear implants (Hage & Leybaert, 2005; Colin et al., 2017). But, to our knowledge, no study has explored the impact of cued speech exposure on the development of speech production skills in children with cochlear implants. The aim of the present study is therefore to investigate to what extent Cued French exposure may enhance speech production in children with cochlear implants. By comparing French phoneme production in children with cochlear implants with different levels of exposure to Cued French, we test the hypothesis of a transfer of perceptual phonological knowledge to speech production skills.

This study is focused on two main questions. First, the accuracy of French phoneme production by children with cochlear implants is evaluated and compared with data from children with typical hearing. Among other demographic factors, the effect of age at implantation is particularly examined. Indeed, the positive impact of early implantation has long been documented: several studies show that, by providing access to speech sounds in a crucial period for language development, implantation before 24 months improves the performance of children with CIs (Boons et al., 2012; Colin et al., 2017; Berland et al., 2019; Sundarrajan et al., 2020, among others). Colin et al. (2017), among others, found that early implantation has a significant impact on the development of phonological skills and thus on reading and spelling.

The second question concerns the impact of Cued French exposure on the speech production skills of children with cochlear implants. The performance of children with high cue reading skills is contrasted with that of children with low cue reading skills. The final aim of the study is to test whether cued speech is a relevant tool to support oral communication development in children with cochlear implants.

METHODS

Phoneme production was assessed with a picture-naming task, which is an effective task to evaluate a child's ability to produce phonological contrasts (Edwards & Beckman, 2008; Mahshie et al., 2015). Accuracy of consonant production, consonant cluster production and vowel production was examined. Further, phonological features which have been shown to be especially challenging for children with cochlear implants were specifically examined. These include voicing, nasality, manner and place of articulation.

Picture-naming task

This study used the picture-naming task from the EULALIES battery (Meloni et al., 2018) for which a large number of reference data with typically-developing children have been collected. This battery consists of five tasks, each testing different levels of French speech processing, both in perception and production. The EULALIES picture-naming task tests the accuracy of spontaneous (non-imitative) phoneme production in isolated word context. It was designed to allow a comprehensive analysis of phonological skills, by including all French phonemes in different word positions, as well as a significant number

of clusters and words varying in syllable structure and length. It includes 68 familiar words²⁷ (Appendix 5.2). All French phonemes are targeted, with consonants elicited in word-initial, word-medial and word-final positions, as well as syllable-initially, syllable-finally, and in clusters. Word length varies from 1 to 4 syllables, presence of clusters is controlled, resulting in varying degrees of word complexity (simple words like “robe” /ʁɔb/ *dress* or complex ones like “hélicoptère” /elikoptɛʁ/ *helicopter*). Only familiar words are used, in order to lower the weight of lexical access, and to focus on the child’s phoneme production abilities. For that purpose, high frequency of occurrence in oral French as indicated by the Lexique.org database (New et al., 2004) and accessibility to the youngest were used as criteria to select the stimuli (designating clothing, everyday objects, food, transportation modes, etc.). Children saw pictures displayed on a computer screen and had to spontaneously produce the name of each item. The pictures were clear photographs of familiar items and every attempt was made to elicit words without a model. In rare cases in which a child had difficulty identifying a picture, semantic or phonological cues were provided. When the child was unable to name the item despite the cues, the experimenter simply asked the child to repeat the word after her.

Procedure

The child sat in front of a computer screen on which the pictures to be named were displayed. He or she wore a SHURE headset microphone (Beta 54R) to record his or her productions and a backup microphone was also placed on the table in front of him or her. The experimenter was seated next to the child, also facing the computer screen. The audio data were recorded using a Zoom recorder (H4n Pro). Preliminary tests were administered: a digit span task (ODEDYS (Jacquier-Roux et al., 2002), and the morphosyntax production subtask of the ELO oral language test (Khomsî, 2001). Children with typical hearing were excluded from the study if their scores were below the norm (see Appendix 5.5 for a table of scores on digit span and ELO in all the participants included in this study). The five tasks of the EULALIES battery were performed starting with the picture naming task. An auditory screening test was completed with children with typical hearing to eliminate a possible hearing disorder (perception at 20 dB on the frequencies 250, 500, 1000, 2000, 4000 and 8000 Hz, using an Electronica 9910

²⁷ One third of the subjects performed a later version of the task with only 66 items

audiometer). For children with cochlear implants, Cued French reading level was evaluated using the “*Test d’évaluation de la réception du message oral par l’enfant sourd*” (TERMO, Evaluation test for the reception of the oral message by the deaf child; Busquet & Descourtieux, 2000). TERMO is designed to assess lip-reading and cue reading skills in children with hearing impairment. A list of words and sentences (Appendix 5.3) was presented by the experimenter using Cued French gestures without phonation, in order to measure the children’s cue reading skills without the auditory modality. The children were asked to repeat the items vocally. Phonological accuracy of the children’s production was not evaluated, only lexical accuracy. Children were split into two subgroups according to their TERMO scores. Children in the CF- group had low cue reading skills: they could at most decode a few familiar words at slow speed (levels 3 and 4 of the TERMO scale, Appendix 5.4). Children in the CF+ group had high cue reading skills: they could decode words and/or sentences at normal speed (levels 1 and 2 of the TERMO scale, Appendix 5.4).

Parents completed a survey on their child’s language development and background (multilingualism, age of first fitting, parental socioeconomic status, etc.). This provided further individual and environmental information and allowed us to eliminate any possible associated disorder. Data were collected anonymously, according to GDPR regulations.

Participants

Children with cochlear implants (CI groups)

Fourteen children with profound hearing loss wearing cochlear implants and aged 60 to 140 months took part in this study (CI group) (age = 107.43 months, SD = 25.08) (Table 5.1). This group consisted of six girls and eight boys. All but one child with cochlear implants were recruited during summer cue camps organized by the ALPC²⁸ in 2018 and 2019 for families from all over France.

All the children in the CI group had been exposed to Cued French. One child in the CI group was also exposed to French Sign Language (FSL) at home (7.1%), seven children were

²⁸ Association pour de la Langue française Parlée Complétée (Association for French Cued Speech)

occasionally exposed to FSL at school or at home (50%) and six children had never been exposed to FSL (42.9%). The CI group was divided into two subgroups: six children including three girls with a low cue reading level (the “CF-” group, age = 106.83 months, SD = 25.13) and eight children including three girls with a high cue reading level (the “CF+” group, age = 107.89 months, SD = 25.05). All children in the CF- group were fitted with two cochlear implants whereas, in the CF+ group, five children were fitted with two cochlear implants and three children were fitted with one cochlear implant and a hearing aid on the other ear.

Hearing age was defined as chronological age for the TH group and as duration of implant use (defined as the time elapsed since the first fitting with a cochlear implant) for the CI group. The mean duration of implant use was 85.83 months (SD = 31.37) for the CF- group and 82.36 months (SD = 29.93) for the CF+ group. Strictly speaking, the children with CI had been first fitted with hearing aids before implantation, so their hearing age was in fact higher. The mean strict hearing age was 96.17 months (SD = 32.15) for the CF- group and 98.58 months (SD = 28.17) for the CF+ group. In our analyses, hearing age was taken as the duration of implant use, which appeared as a more informative and more comparable variable.

The mean age at implantation was 21.00 months (SD = 10.78) for the CF- group and 25.53 months (SD = 16.61) for the CF+ group. Following the general consensus about age at implantation (cf. supra), children were characterized as early-implanted and late-implanted. Early implantation refers to a first fitting with cochlear implant before 24 months whereas late implantation corresponds to a first implantation after 24 months.

Finally, speech production in children with cochlear implants may also be influenced by socioeconomic status (SES). However, due to incomplete information on SES, a thorough examination of the influence of this factor is beyond the scope of this study. To reduce the potential influence of SES, children with cochlear implants were recruited during summer cue camps that usually involve families with homogeneous SES. Demographics of children with cochlear implants are available in Table 5.1.

Sex	Chronological age (months)	Age at cochlear implantation (months)	Implantation period	Implantation type ²⁹	Cued French reading level	Exposure to French Sign Language at home or at school (FSL) ³⁰	Group
F	77	12	early	bilateral	High	Important	CF+ early
M	110	18	early	bilateral	High	None	CF+ early
F	118	10	early	bilateral	High	None	CF+ early
M	128	11	early	bilateral	High	None	CF+ early
M	139	22	early	bilateral	High	None	CF+ early
M	60	33	late	bimodal	High	Occasional	CF+ late
M	107	44	late	bimodal	High	None	CF+ late
F	125	37	late	bimodal	High	None	CF+ late
F	114	12	early	bilateral	Low	Occasional	CF- early
M	135	18	early	bilateral	Low	Occasional	CF- early
F	139	19	early	bilateral	Low	Occasional	CF- early
M	74	28	late	bilateral	Low	Occasional	CF- late
F	79	24	late	bilateral	Low	Occasional	CF- late
M	100	36	late	bilateral	Low	Occasional	CF- late

Table 5.1: Demographics of children with cochlear implants

Children with typical hearing (TH group)

The CI group was compared with a group of 71 children with typical hearing (TH group) aged between 60 and 140 months and belonging to the large cohort of typical children in the EULALIES project (Meloni, 2022) (age = 86.12 months, SD = 17.84). This group consisted of 39 girls and 32 boys. None of the children were daily exposed to another language than French. TH children had never been exposed to Cued French nor FSL. All the hearing participants were recruited in schools in Grenoble and Strasbourg (France).

This study was approved by the Grenoble Alpes Research Ethics Committee (CER Grenoble Alpes-Avis-2018-04-03-2-Amendment).

²⁹ Bilateral refers to children wearing two cochlear implants whereas bimodal refers to children wearing one cochlear implant with a contralateral prosthesis

³⁰ Important: exposition to FSL at home and at school; Occasional: some signs from FSL are used occasionally at home or at school; None: no exposition at all

Data processing

The items produced by the children during the picture naming task were first transcribed and processed with the PHON software (Hedlund & Rose, 2016). Ten percent of the data were double-blindly transcribed, with an inter-judge agreement of 82.4%. All items which had transcription differences between judges were reviewed by five transcribers and consensus was obtained. No data were eliminated. Transcription methods and criteria were subsequently adapted for further annotation, with a list of diacritics facilitating narrow transcription. After alignment with the target, the number of errors per word was extracted with PHON (adding numbers of substitutions, elisions and epenthesis).

Statistical analyses

Different types of statistical analysis methods were used for the study of (1) consonant, consonant cluster, and vowel production; (2) voicing and nasality; (3) manner and place of articulation.

Analyses on number of errors on consonant production, consonant cluster production, and vowel production

Generalized Linear Mixed-Effect Models with Poisson regressions were used (glmer function in package lme4 in R, R Development Core Team, 2012) to examine predictors of three error scores: consonant errors, consonant cluster errors and vowel errors. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model for each of the three scores. First, all random-effect factors and fixed-effect factors of interest were included, with interactions. Participant and Word were introduced as random-effect factors. Factors which did not improve model fit were then excluded (anova function in R with a threshold of $p < .05$). When an interaction was proven to be significant, multiple comparison tests were run, using the glht function in package multcomp in R. Given the limited number of participants with representative variation on sex and exposure to French Sign Language, adding these two demographic factors did not improve model fit. These factors were therefore not further considered.

Three different statistical models were run for each error type.

- Model 1: effect of hearing status, Cued French exposure and chronological age: includes hearing status and Cued French exposure (i.e., Group: CF+, CF- and TH children) and participant age in months (*Chronological_age*) as fixed-effect factors.
- Model 2: effect of age at implantation, Cued French exposure, and chronological age: an additional variable named *Age_at_implantation* (i.e., early vs late) was introduced in this second model. Since hearing children are obviously not affected by age at implantation, we did not include them in this analysis. Model 2 includes *Age_at_implantation*, Cued French exposure (i.e., Group: CF+ and CF-) and *Chronological_age* as fixed-effect factors.
- Models with effect of hearing age: since children with hearing impairment were not all diagnosed at the same age and so, not all fitted with cochlear implants at the same age, duration of implant use can vary independently from chronological age. In order to take into account the auditory deprivation period, all of our models were also tested with duration of implant use (*Hearing_age*) as a fixed-effect factor instead of *Chronological_age* (Appendix 5.6).

In order to assess the statistical power of our results, we followed the method described in Johnson & al. (2014), using a simulation-based approach, which is more flexible than an analytical power analysis. We simulated 1000 data sets using the *simulate.merMod* function of the *lme4* package. Each of the 1000 simulated data sets were then analyzed: for each contrast of interest, we calculated the proportion of simulated data sets in which the results were similar to those of our current data. This proportion is the power estimate of the statistical analysis.

Analyses on voicing contrast and nasal contrast

Generalized linear models with Poisson regressions (*glm* function in package *stats* in R) were used to examine voicing and nasal contrasts. The dependent variable was the total number of such errors in the whole task. To examine voicing control in our participants, voicing errors were split into over-prevoicing (replacing a voiceless consonant with a voiced phoneme, i.e., anticipating voice onset, e.g. [p] is produced as [b]) and over-devoicing errors (replacing a voiced consonant with a voiceless phoneme, i.e., suppressing prevoicing, e.g. [b] is produced as [p]). To assess nasalization control, we

examined nasalization errors for both consonants and vowels. Nasalization errors were split into over-nasalization (replacing an oral phoneme with a nasal phoneme, i.e., adding nasalization, e.g. [d] is produced as [n]) and denasalization (replacing a nasal phoneme with an oral phoneme, i.e., suppressing nasalization, e.g. [m] is produced as [b]) errors. A backward stepwise variable selection with model comparisons was applied to each type of error to find the best-fitting model. The following fixed-effect factors were examined: Age_at_implantation (i.e., early vs late), Group (i.e., CF+ and CF-) and Chronological_age. Variables which did not improve model fit were then excluded (*anova* function in R). When the best-fitting model was found, multiple comparison tests were run, using the *glht* function in package *multcomp* in R. Similarly to our analyses on consonant and vowel production, all of our models were also tested with duration of implant use (Hearing_age) as a fixed-effect factor instead of Chronological_age and the statistical power was estimated.

Analyses on manner of articulation and place of articulation

Finally, Generalized Linear Mixed-Effects Models with binomial regressions were used (*glmer* function in package *lme4* in R) to examine accuracy on manner and place of articulation. To examine the production of manner and place of articulation in our participants, confusion matrices were derived describing substitutions in each group (fig. 5 and 6): e.g. for each targeted manner or place of articulation, they provide the percentage of consonants actually produced in each manner or place of articulation category. As an example, the first line in the upper graph of Figure 5.5 indicates that of all the lateral approximants attempted by the children in the CF+ group, 93% were actually produced as lateral approximants, 1% were actually produced as nasals, and 6% were deleted. A backward stepwise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. The dependent variable was an accuracy score, calculated as a binary value, by phoneme, for each child and each occurrence of the target phoneme. The following fixed-effect factors were examined: Age_at_implantation (i.e., early vs late), Group (i.e., CF+ and CF-) and Manner_of_articulation or Place_of_articulation. Variables which did not improve model fit were then excluded (*anova* function in R). When the best-fitting model was found, multiple comparison tests were run, using the *glht* function in package *multcomp* in R. The power estimate of the statistical analysis is given in Appendix 5.7.

RESULTS

Number of consonant errors

Figure 5.1 displays the mean number of consonant errors for each child by chronological age and age at implantation (i.e., early or late) in each group (i.e., CF+, CF- and TH).

- Model 1: effect of hearing status, Cued French exposure and chronological age

The best-fitted Model 1 for the number of errors in consonant production includes Group (i.e., CF+, CF- and TH children) and Chronological_age as fixed-effect factors and Participant and Word as random-effect factors. An interaction is observed between Group and Chronological_age: consonant error rates decrease only slightly with age for TH children ($Estimate = -.21, z = -3.04, p = .012$) whereas they are strongly reduced with age in CF- children ($Estimate = -.68, z = -4.24, p < .001$). There is no significant effect of chronological age for the CF+ group.

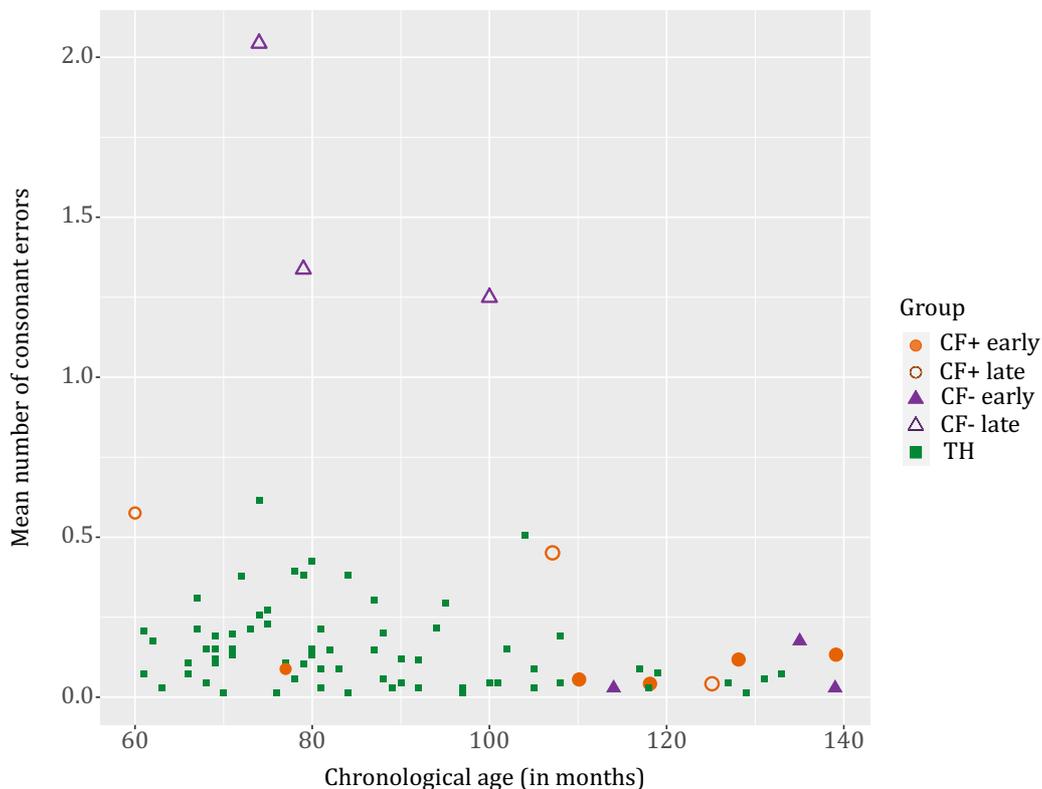


Figure 5.1: Mean number of errors by chronological age for consonant production in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation)

Multiple comparison tests reveal a significant between-group effect: the number of consonant errors in the CF- group is significantly higher than the one in the TH group ($p = .001$), and in the CF+ group ($p = .041$). That is, children with a low cue reading level make significantly more consonant errors than children with typical hearing, and than children with a high cue reading level. No significant difference is found between the CF+ group and the TH group.

- Model 2: effect of age at implantation, Cued French exposure, and chronological age

The best-fitted Model 2 includes Group (i.e., CF+ and CF-), Age_at_implantation and Chronological_age as fixed-effect factors. Participant and Word are included as random-effect factors. An interaction is observed between Age_at_implantation and Chronological_age: the number of consonant errors decreases with chronological age in children with late implantation (*Estimate* = $-.28$, $z = -2.65$, $p = .038$). Multiple comparison tests reveal a significant between-group effect for the age at implantation (see Figure 5.2a): CF- children with late implantation display significantly higher consonant error rates than CF- children with early implantation ($p < .001$). That is, later implanted children with a low cue reading level make significantly more consonant errors than children with a low cue reading level and an early implantation. A similar effect is found for children with high decoding skills: CF+ children with late implantation make more consonant errors than CF+ children with early implantation ($p = .015$).

A significant between-group effect is also observed for cue reading skills: the CF- group with late implantation displays significantly higher consonant error rates than the CF+ group with late implantation ($p < .001$). That is, with a similarly late implantation, children with high cue reading skills show less inaccuracy in consonant production than children with a low cue reading level. No significant difference was found between the CF- and the CF+ groups when children benefit from an early implantation.

Estimates of the statistical power for the consonant production error analysis are given in Table 5.2. The significant effect of age at implantation was observed in more than 80% of simulated data sets (96,7% for CF- children with late implantation vs CF- children with early implantation and 83,2% for CF+ children with late implantation vs CF+ children with early implantation). This is also the case for the significant effect of Cued French exposure:

results are similar in 98,4% of cases for CF- children with late implantation vs CF+ children with late implantation and in 88,3% of cases for CF- children with early implantation vs CF+ children with early implantation. These results are in favor of a possible effect of age at implantation and Cued French exposure on consonant production.

- Models with effect of hearing age

All statistical analyses were also run using `Hearing_age` instead of `Chronological_age`. Results are quite similar for the consonant production: we found a between-group effect for the age at implantation and for cue reading skills (see Appendix 5.6 for more details). However, estimates of the statistical power do not allow us to conclude strongly on the effect of early implantation in children with high Cued French reading skills (only 68,9% of cases in which results are similar in the simulated data sets and our data set when using `Hearing_age` instead of `Chronological_age`). No effect of duration of implant use (i.e., `Hearing_Age`) is observed.

Consonant production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
96,7%	83,2%	98,4%	88,3%
Consonant cluster production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
91,5%	58,3%	100%	95,2%
Vowel production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
68,1%	57,7%	100%	99,6%

Table 5.2: Estimates of the statistical power for the production errors analysis (percentage of cases in which results are similar in the simulated data sets and our data set)

Number of consonant cluster errors

- Model 1: effect of hearing status, Cued French exposure and chronological age

As observed for consonant errors, the best-fitted Model 1 for the number of errors in consonant cluster production includes `Group` and `Chronological_age` as fixed-effect factors and `Participant` and `Word` as random-effect factors. An interaction is observed

between Group and Chronological_age: cluster consonant error rates decrease with age for TH children (*Estimate* = -.20, *z* = -3.25, *p* = .006), and the decrease is stronger for CF- children (*Estimate* = -.57, *z* = -4.28, *p* < .001). Multiple comparison tests reveal a significant between-group effect: the number of cluster errors in the CF- group is significantly higher than the one in the TH group (*p* < .001), and in the CF+ group (*p* = .029). No significant difference is found between the CF+ group and the TH group.

- Model 2: effect of age at implantation, Cued French exposure, and chronological age

The best-fitted Model 2 includes Group (i.e., CF+ and CF-), Age_at_implantation and Chronological_age as fixed-effect factors. Only Word is included as random-effect factor. An interaction is observed between Age_at_implantation and Chronological_age: the number of consonant cluster errors decreases significantly with chronological age only in children with late implantation (*Estimate* = -.17, *z* = -3.06, *p* = .010). Multiple comparison tests reveal a significant between-group effect for the age at implantation (Figure 5.2b): children in the CF- group with late implantation make more cluster errors than those in the CF- group with early implantation (*p* = .002). A similar effect is found for children with high decoding levels: CF+ children with late implantation make more cluster errors than CF+ children with early implantation (*p* = .042). A significant between-group effect is also observed for cue reading skills: the CF- group with late implantation exhibits significantly higher cluster error rates than the CF+ group with late implantation (*p* < .001). With a similarly late implantation, children with high cue reading skills show less inaccuracy in consonant cluster production than children with a low cue reading level. No significant difference was found between the CF- group with early implantation and the CF+ group with early implantation.

Estimates of the statistical power for the consonant cluster production error analysis confirm the significant effect of age at implantation when comparing CF- children with late implantation and CF+ children with late implantation (91,5% of similar results). However, results for the effect of age at implantation in CF+ children with late implantation vs CF+ children with early implantation are only similar in 58,3% of simulated data sets. These results do not allow us to conclude strongly about the effect of age at implantation on consonant cluster production: it seems that the effect of age at implantation is not robust enough in children with high CF reading skills. The significant

effect of Cued French exposure is found in 100% of simulated data sets for CF- children with late implantation vs CF+ children with late implantation and in 95,2% of cases for CF- children with early implantation vs CF+ children with early implantation. The effect of Cued French exposure seems to be robust.

- Models with effect of hearing age

Statistical results with Hearing_age instead of Chronological_age are slightly different for the consonant cluster production. We observe an interaction between Age_at_implantation and Hearing_age. On the one hand, the effect of Age_at_implantation is not significant for children with high Cued French decoding skills whereas it remains significant for children with low Cued French reading skills. When considering duration of implant use, i.e. Hearing_Age, Cued French exposure seems to allow children with CIs to compensate for the degraded auditory information even in case of a late implantation. However, only 66,5% of simulated data sets show similar results which do not allow us to conclude about any effect of the age at implantation in children with high Cued French reading skills. On the other hand, the between-group effect for cue reading skills is still observed in children with late implantation and confirmed by the estimate of the statistical power.

Number of vowel errors

- Model 1: effect of hearing status, Cued French exposure and chronological age

The best-fitted Model 1 for the number of errors in vowel production includes Group and Chronological_age as fixed-effect factors and Participant and Word as random-effect factors. The number of vowel errors tends to decrease with age (*Estimate* = -.20, *z* = -2.86, *p* = .016). No interaction is observed. Multiple comparison tests reveal a significant between-group effect: the number of vowel errors in the CF- group is significantly higher than the one in the TH group (*p* < .001), and in the CF+ group (*p* = .016). No significant difference is found between the CF+ group and the TH group.

- Model 2: effect of age at implantation, Cued French exposure, and chronological age

The best-fitted Model 2 includes Group (i.e., CF+ and CF-), Age_at_implantation and Chronological_age as fixed-effect factors. Only Word is included as random-effect factor. Multiple comparison tests reveal a between-group effect for the age at implantation (Figure 5.2c): the CF- group with late implantation makes more vowel errors than the CF- group with early implantation ($p = .027$). This effect is not found in children with high cue reading skills: Cued French exposure seems to allow children with CIs to compensate for a late implantation regarding vowel production. A significant between-group effect is observed for cue reading skills: the CF- group with late implantation displays significantly higher vowel error rates than the CF+ group with late implantation ($p < .001$): with a similarly late implantation, children with high cue reading skills show less inaccuracy in vowel production than children with a low cue reading level. No significant difference is observed between CF- children and CF+ children with a similarly early implantation.

Figure 5.2 shows the mean and standard deviation of the three error scores (consonant, clusters and vowels) in each of the three groups of children.

The power estimate of the statistical analysis for the vowel production (Table 4) shows only 68,1% of similar results between simulated data sets when comparing CF- children with late implantation and CF+ children with late implantation and 57,7% for CF+ children with late implantation vs CF+ children with early implantation. These results do not allow us to conclude on any effect of age at implantation on vowel production. However, the significant effect of Cued French exposure is found in 99,6% of simulated data sets for CF- children with early implantation vs CF+ children with early implantation and in 100% for CF- children with late implantation vs CF+ children with late implantation. It seems that the effect of Cued French exposure on vowel production is robust.

- Models with effect of hearing age

Results of statistical analyses run with Hearing_age differ from those obtained with Chronological_age. It appears that the significant effect observed for the age at implantation is more related to an effect of duration of implant use (i.e., Hearing_age). This result is consistent with the simulated data sets: we found 85,3% of similar results

for CF- children with late implantation vs CF- children with early implantation and 94,9% for CF+ children with late implantation vs CF+ children with early implantation. The significant effect for cue reading skills is still observed in children with late implantation ($p < .010$) and confirmed by the power estimate.

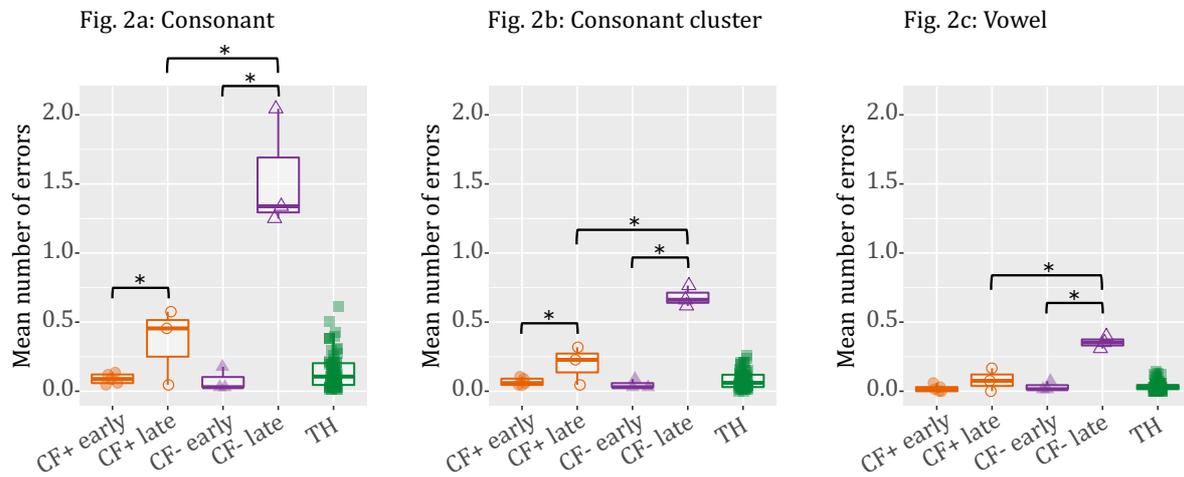


Figure 5.2: Mean number of errors for consonants (left panel), consonant clusters (middle panel) and vowels (right panel) in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation). Stars display significant differences in the multiple comparison tests (see section about Statistical analyses).

Types of errors

To further assess speech production in children with cochlear implants, we also examined specific types of errors, considering the Age_at_implantation variable. As mentioned earlier, TH children were not included in the statistical models that focus on the effect of age at implantation, but their results are displayed on the graph for the sake of information.

Number of errors for the voicing contrast

Figure 5.3 displays the total number of over-prevoicing (panel 5.3a) and over-devoicing (panel 5.3b) errors in the picture-naming task for each child by chronological age, for each group (i.e., CF+, CF- and TH). As shown on these graphs, overall, the number of over-devoicing errors (replacing a target voiced consonant with a voiceless phoneme, i.e. suppressing prevoicing), is larger than that of over-prevoicing errors (replacing voiceless

targets with voiced phonemes, i.e., anticipating voicing onset). Moreover, many children do not make any voicing errors (i.e., over-prevoicing or over-devoicing), which leads to a large number of 0 scores. To consider the lack of variability in some groups, and thus the level of performance of all the participants, the following voicing contrast analysis shows in which context the results are significantly different from 0 rather than comparing between groups.

- Over-prevoicing errors

The best-fitted model for the number of over-prevoicing errors includes Group (i.e., CF+ and CF-) and Age_at_implantation as fixed-effects. No over-prevoicing errors are observed for the CF+ group nor for CF- children with early implantation (Figure 5.3a). This low occurrence of over-prevoicing errors is comparable to what is found for TH children (*Mean = .13 errors, SD = .38*). Multiple comparison tests reveal that only later implanted children with a low cue reading level exhibit over-prevoicing error rates significantly different from 0 ($p < .001$). This finding suggests that Cued French exposure compensates for the impact of a late implantation on voiceless consonant production: with a similarly late implantation, children with high cue reading skills show more typical over-prevoicing control than children with a low cue reading level. The power estimate of the statistical analysis found the same results in 100% of simulated data sets.

- Over-devoicing errors

The best-fitted model for the number of over-devoicing errors includes Group (i.e., CF+ and CF-) and Age_at_implantation as fixed effects. Multiple comparison tests reveal that only later implanted children with a low cue reading level exhibit over-devoicing error rates significantly different from 0 ($p < .001$). The low occurrence of over-devoicing errors in all other CI groups than CF- children with late implantation is comparable to that of TH children (*Mean = 1.5, SD = 3.25*). As observed for over-prevoicing errors, it seems that Cued French exposure compensates for the impact of a late implantation on voiced consonant production, with a reduction of over-devoicing errors. The power estimate of the statistical analysis found the same results in 100% of simulated data sets.

- Effect of hearing age

Similar results were found for the effect of age at implantation and the effect of cue reading skills on over-prevoicing and over-devoicing errors, when running analyses with Hearing_age instead of Chronological_age. All of these results are confirmed by the power estimate of the statistical analysis.

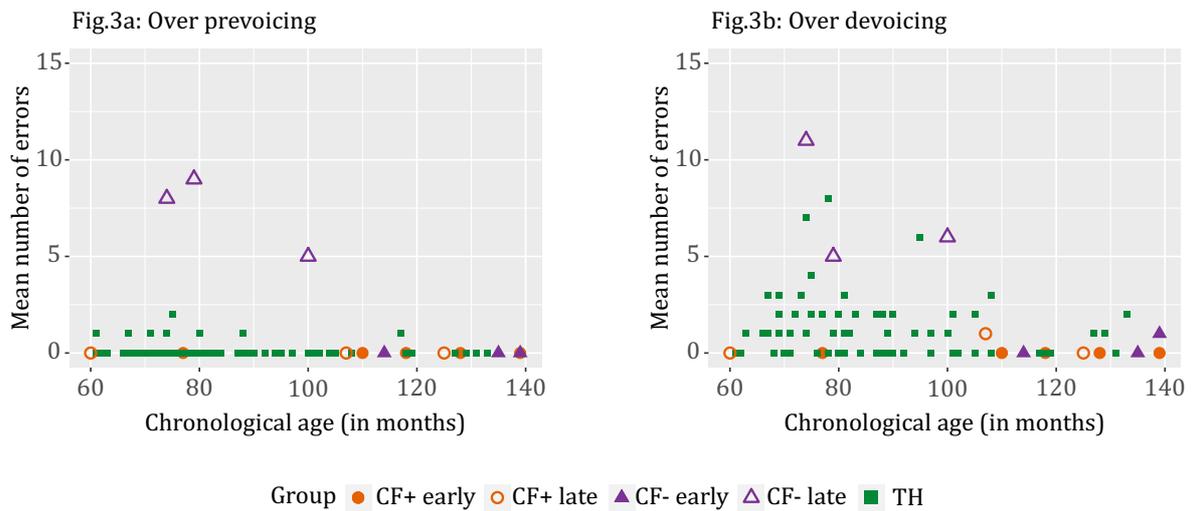


Figure 5.3: Total number of over-prevoicing errors (left) and over-devoicing errors (right) by chronological age for consonant production in the three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation).

Number of errors for the nasal contrast

Figure 5.4 shows error rates of over-nasalization (replacing an oral phoneme with a nasal phoneme, panel 5.4a) and denasalization (replacing a nasal phoneme with an oral phoneme, panel 5.4b) for each child by chronological age for each group (i.e., CF+ and CF-). As shown on these graphs, the overall number of over-nasalization errors is similar to that of denasalization errors. As observed for voicing contrast, a lack of variability appears in some groups, therefore, the following nasal contrast analysis shows in which context the results are significantly different from 0 rather than comparing groups between them.

- Over-nasalization errors

The best-fitted model for the number of over-nasalization errors includes Group (i.e., CF+ and CF-) and Age_at_implantation as fixed effects. Multiple comparison tests reveal that

only later implanted children with a low cue reading level exhibit over-nasalization error rates significantly different from 0 ($p < .001$). Later implanted children with high cue reading skills seem to compensate for the degraded auditory information and reach scores akin to CF+ children with early implantation. The low occurrence of over-nasalization errors in all other CI groups than CF- children with late implantation is comparable to that of TH children ($Mean = .14, SD = .42$). The power estimate of the statistical analysis found the same results in 100% of simulated data sets.

- Denasalization errors

The best-fitted model for the number of denasalization errors only includes Group (i.e., CF+ and CF-) and Age_at_implantation as fixed effects. Multiple comparison tests reveal that only later implanted children with a low cue reading level exhibit over-devoicing error rates significantly different from 0 ($p < .001$). The low occurrence of denasalization errors in all other CI groups than CF- children with late implantation is comparable to that of TH children ($Mean = .15, SD = .36$). As observed for over-nasalization errors, it seems that Cued French exposure compensates for the impact of a late implantation on nasal contrast production, with a reduction of denasalization errors. The power estimate of the statistical analysis found the same results in 100% of simulated data sets.

- Effect of hearing age

Similar results were found when running analysis with Hearing_age instead of Chronological_age for over-nasalization errors. Only CF- children with late implantation exhibit over-nasalization error rates which are significantly different from 0. However, an effect of Hearing_age is also observed: the longer the duration of implant use, the lower the number of over-nasalization errors. Regarding denasalization errors, results were slightly different when considering Hearing_age instead of Chronological_age. The effect of age at implantation is observed in CF- children and in CF+ children: CF- children and CF+ children with late implantation exhibit denasalization error rates significantly different from 0. As observed for over-nasalization errors an effect of duration of implant use (i.e., Hearing_age) is found. Cued French exposure seems to allow CI children to compensate for the degraded auditory information in case of a late implantation, only for over-nasalization errors. All of these results are confirmed by the power estimate of the statistical analysis.

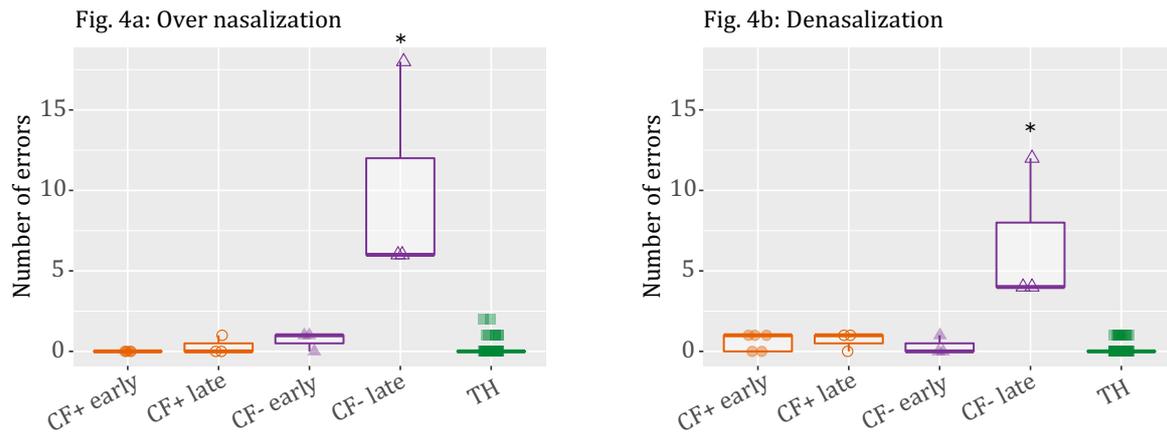


Figure 5.4: Total number of over-nasalization (left) and denasalization errors (right) three groups of children (CF+ in orange dots, CF- in dark purple triangles and TH in green squares), according to age at implantation (full shape for early implantation). Stars display error rates significantly different from 0 in the multiple comparison tests (see section about Statistical analyses).

Accuracy of manner of articulation

Confusion matrices (Figure 5.5) show that manner of articulation is better mastered by CF+ children than CF- children who make more manner substitutions. The best-fitted model for errors on manner of articulation includes Group (i.e., CF+ and CF-), Age_at_implantation (i.e., early and late) and Manner_of_articulation. There appears to be a significant between-group effect for the age at implantation: the children in the CF- group and with late implantation make significantly more substitutions of manner of articulation than CF- children with early implantation ($p < .001$ for all manners of articulation). No effect of age at implantation is observed in CF+ children for all manners of articulation (moderate effect size, see Appendix 5.7). In other words, Cued French exposure allows CF+ children with later implantation to reach similar manner of articulation accuracy to CF+ children with earlier implantation.

A significant between-group effect for cue reading skills is also observed: the CF- late group have higher substitution rates than the CF+ late group for all manners of articulation ($p < .001$ for all manners of articulation). There are no significant differences between CF- early children and CF+ early children for any manner of articulation.

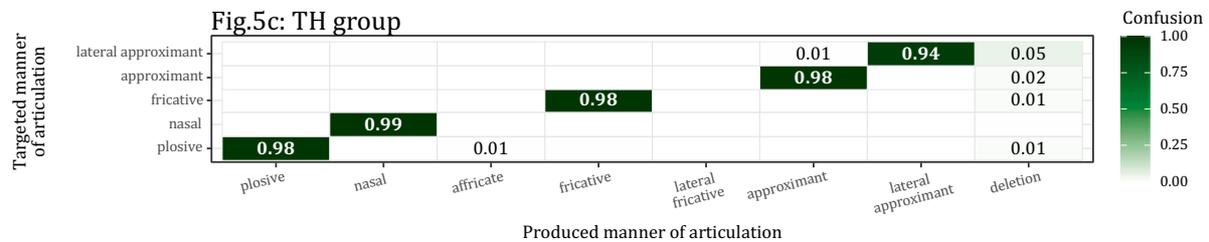
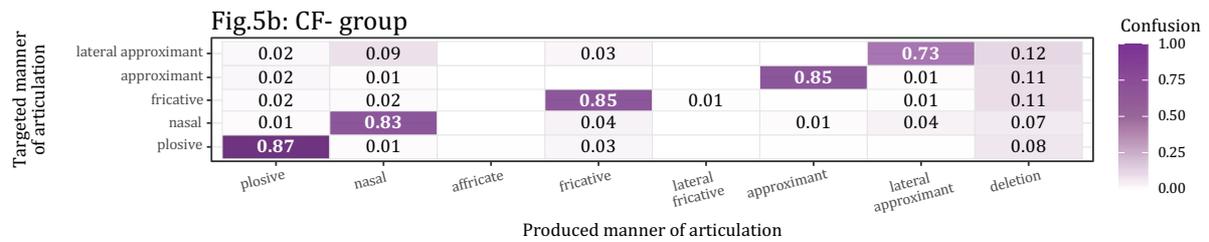
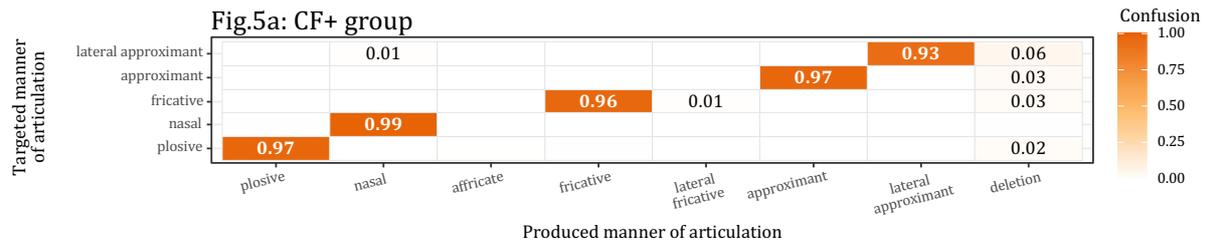


Figure 5.5: Mean accuracy and percentage of substitutions for manner of articulation in the three groups of children (CF+ in orange dots (upper panel), CF- in dark purple triangles (middle panel) and TH in green squares (bottom panel)).

Figure 5.5 reveals that when manner of articulation is not accurate, this is almost exclusively related to phoneme deletion for CF+ and TH groups. Lateral approximants, which are the least accurate manner of articulation in CF- children, are replaced with nasals (9%), fricatives (3%), or plosives (2%), when they are not deleted (12%). Nasals also seem difficult to produce for CF- children: 7% are deleted, 4% are realized as lateral approximants, 4% as fricatives, 1% as plosives, and 1% as approximants.

Accuracy of place of articulation

Figure 5.6 shows confusion matrices for substitutions of place of articulation for each group of participants (i.e., CF+, CF- and TH children). Place of articulation seems to be less accurate in children with lower Cued French reading skills. The best-fitted model for errors on place of articulation includes Group (i.e., CF+ and CF-), Age_at_implantation (i.e., early and late) and Place_of_articulation. Interactions between Group and Age_at_implantation, Group and Place_of_articulation and Age_at_implantation and Place_of_articulation are found. A between-group effect is observed for the age at implantation: children with low cue reading skills and a late implantation make much more substitutions of place of articulation than CF- children with early implantation for labials ($p < .001$), alveolars ($p < .001$), postalveolars ($p < .001$, moderate effect size, see Appendix 5.7), velars ($p < .001$) and uvulars ($p < .001$). Later implanted CF+ children display similar substitution rates to CF+ children with early implantation for all places of articulation. Cued French exposure therefore appears to compensate for late implantation in improving place of articulation accuracy.

A significant between-group effect for cue reading skills is also observed: in case of a late implantation, the CF- group display higher substitution rates than the CF+ group for all places of articulation (labials ($p = .001$), alveolars ($p = .015$, moderate effect size, see Appendix 5.7), postalveolars ($p < .001$) and velars ($p = .022$, moderate effect size, see Appendix 5.7)). In other words, higher cue reading skills significantly reduce substitutions of place of articulation in children with later implantation. When the implantation is early, there is no significant difference between CF- children and CF+ children for place of articulation.

Figure 5.6 shows that when place of articulation is inaccurate, it is mostly related to phoneme deletion for CF+ and TH children. In CF+ children, non-anterior places of articulation are often replaced with a more anterior phoneme or are deleted (except for alveolars and labials which are both posteriorized in 1% of cases). The same is observed in TH children except for postalveolars which are realized as palatals in 1% of cases. CF- children have a high substitution rate for place of articulation: although a large number of deletions are observed, most places of articulation are inaccurate. Postalveolars are often replaced with alveolars (15%) or palatals (4%). Velars, which are the most substituted phonemes for place of articulation in CF- group, are realized as alveolars

(6%), uvulars (3%), labials (1%), or palatals (1%). When they are not deleted (15%), uvulars are replaced with alveolars (2%), labials (1%) or palatals (1%). Even though substituted phonemes tend to be anteriorized, CF- children also make many substitutions of labials, which are posteriorized into alveolars (6%), uvulars (2%), palatals (1%) and velars (1%). Finally, CF+ children also appear to have some difficulties with place of articulation: postalveolars are anteriorized to interdental (6%) or alveolars (3%) and velars are replaced with alveolars (7%) and interdental (1%).

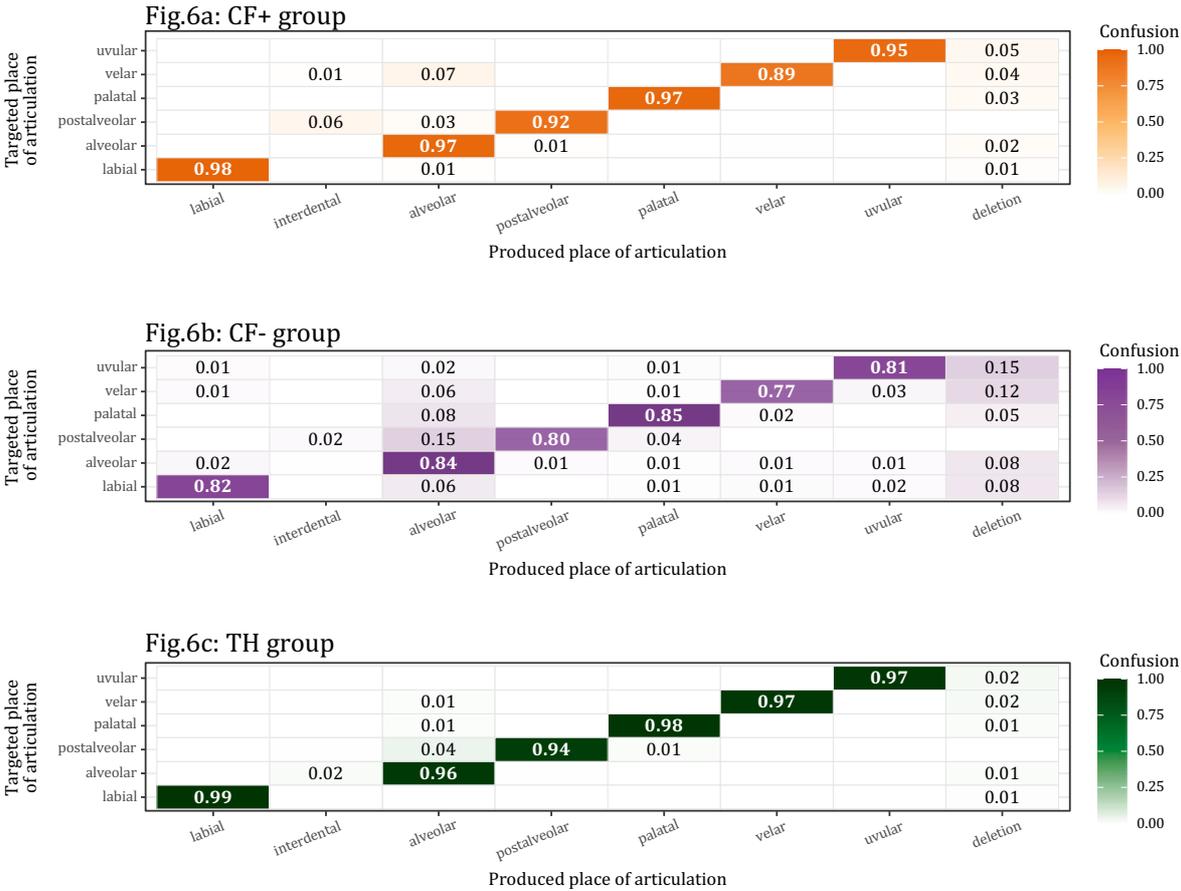


Figure 5.6: Mean accuracy and percentage of substitutions for place of articulation in the three groups of children (CF+ in orange dots (upper panel), CF- in dark purple triangles (middle panel) and TH in green squares (bottom panel)).

DISCUSSION

The present study aimed to investigate the combined effects of cochlear implantation and of cued speech exposure on speech production in children. To that aim, phoneme production was assessed in a group of children with cochlear implants with different degrees of cued speech exposure, and compared with data from children with typical hearing. Overall, our data suggest that the picture-naming task from the EULALIES battery can be used for the assessment of speech production in children with cochlear implants. Two main questions were explored. First, what are the specificities of speech production in children with cochlear implants as compared to children with typical hearing. Second, what is the impact of Cued French exposure on the speech production skills of children with cochlear implants.

French phoneme production in children with cochlear implants

In order to determine the impact of hearing impairment remedied with cochlear implantation on speech production skills, we first compared the results of children with cochlear implants who had little to no cued speech exposure (our CF- group), with the ones of children with typical hearing (TH group). A clear result of our study is that the children in our CF- group have significantly higher error rates than children with typical hearing for consonant production, consonant cluster production, and vowel production. This observation suggests that cochlear implant alone does not allow children with hearing impairment to develop speech production skills akin to those of their peers with typical hearing. It pleads for the view that children with CI need specific additional support to develop successful oral communication.

However, age at implantation was also found to have an effect on our results. Early age at implantation significantly decreases error rates for consonant, consonant cluster and vowel production, since children with low Cued French abilities who have been implanted before 24 months of age consistently show lower error rates than our children with low Cued French abilities who have been implanted after 24 months of age. Early implantation allows CF- children to reach accuracy scores that are higher than the ones of their later-implanted peers, and that are close to those of children with typical hearing (Figure 5.1 and Figure 5.2). This finding is consistent with those of Sundarrajan et al. (2020), who

demonstrated that early implantation improves consonant production accuracy in children with hearing impairment. In their study, early implantation reduced acquisition delay and led to acquisition stages patterning with those of children with typical hearing. Nonetheless, it should be noted that, in our study, all the participants with early implantation in the CF- group were older than nine years of age whereas all the participants with late implantation in the CF- group were younger than nine years of age. So the higher scores of our early-implanted children might also be somehow explained by their older age and longer duration of implant use. Still, a clear finding from our study is that CF- children with late implantation exhibit persistent speech production deficits that need to be explored.

To get a better understanding of the types of errors produced by CF- children with late implantation, four specifically-targeted phonological features were assessed: voicing contrast, nasal contrast, manner of articulation and place of articulation. These phonological features had been identified in the literature as especially challenging for children with cochlear implants.

First of all, our results suggest that voicing contrast is not fully acquired yet in CF- children with a late implantation, who display significantly higher error rates than CF- children with an early implantation, and who exhibit atypical patterns of voicing initiation (Figure 5.3). These children tend to replace voiceless phonemes by voiced phonemes (i.e., over-prevoicing) as well as to suppress prevoicing by replacing a voiced segment by a voiceless phoneme (i.e., over-devoicing). Voiced stops in standard French are produced with a long prevoicing. It has been argued that insufficient prevoicing, rather than replacing voiceless with voiced consonants (over-prevoicing), is a common error in French-speaking children with typical hearing (see Brosseau-Lapré et al., 2018; Meloni et al., 2020). These distortions can be attributed to a difficulty in articulatory synchronization of glottal and supra-glottal gestures: the long-lag French prevoicing implies complex aerodynamic and articulatory control. Over-prevoicing is almost never found in French children with typical hearing, and its presence in children with hearing impairment is attributable to perceptual difficulties and inadequate encoding of the voicing features.

Similar observations were made for the nasal contrast. CF- children with late implantation tend to replace oral phonemes with nasal phonemes (i.e., over-nasalization) or to replace

nasal phonemes with oral phonemes (i.e., denasalization). This pattern of errors is not typically present in children with typical hearing.

Manner of articulation also tends to be inaccurate in CF- children. Many substitutions were found, especially for lateral approximants, which were either deleted or replaced with nasals. Early implantation seems to improve performance in children with CIs: all substitution rates for manner of articulation in CF- children with late implantation were significantly higher than those of CF- children with early implantation. According to our data, late implantation does not appear to be sufficient for children with hearing impairment to develop fine skills for the production of manner of articulation, in comparison with children who benefit from an early implantation.

Finally, place of articulation appears to be a difficulty for CF- children, who make many substitutions for that feature, typically for postalveolar, velar and uvular consonants. This observation is consistent with those of Mahshie et al. (2015) who have found that children with cochlear implants have more difficulties producing posterior consonants. Palatals and alveolars were the least substituted places of articulation. CF- children tend to anteriorize phonemes: postalveolars were frequently replaced with alveolars, velars and uvulars were often replaced with labials, alveolars and palatals, when they were not deleted. These findings may reflect reliance upon visible cues (Dodd, 1987), as also found in Gaul Bouchard et al. (2007). Early implantation seems to allow children with CIs to better produce place of articulation: as observed for manner of articulation, almost all place substitution rates in CF- children with late implantation were significantly higher than those of children with early implantation. Our results show that production of place of articulation is more inaccurate in children with CIs when they do not benefit from additional cue nor from early implantation. These results are consistent with those of Medina & Serniclaes (2006), who have found that children with CIs have difficulties in categorizing places of articulation. These perceptual deficits may be causal in the production patterns observed in the present study.

In sum, our study shows that children with cochlear implants and low cue reading skills exhibit many speech production flaws. Perceptual difficulties related to deafness and not compensated by cochlear implants impair the development of fine speech production skills, especially for children with late implantation.

Positive impact of Cued French exposure on speech production in children with CIs

The second purpose of this study was to examine the specific impact of Cued French exposure on speech production abilities in children with cochlear implants. To that end, we compared two groups of children with CI with high vs. low cue reading skills.

Our study shows that children with cochlear implants and high cue reading skills (our CF+ group) have less speech production deficits than their peers with low cue reading skills (our CF- group). Our results reveal that children with CIs and a high cue reading level (our CF+ group) reach speech production scores akin to those of children with typical hearing for consonants, consonant clusters and vowels. Cued French exposure does seem to allow children with CIs to compensate for the degraded auditory information and to enhance speech production abilities.

As shown before, age at implantation plays an important role in the development of speech production skills: children with high Cued French exposure and with early implantation have higher scores than children with high Cued French exposure and with late implantation (Figure 5.2) for consonant production and consonant cluster production. However, this effect is not observed for vowel production, for which the disadvantage of late implantation appears to be cancelled: CF+ children with late implantation have similarly low error rates to their CF+ peers with early implantation. In that case, Cued French exposure seems to fully compensate for late implantation.

The data on voicing and nasal contrasts support the claim that Cued French exposure significantly improves accuracy in children with CIs. These two contrasts are acquired with increased accuracy when children with CIs are exposed to Cued French, with less over-prevoicing, over-devoicing, and over-nasalization errors (Figures 5.3 and 5.4). As concerns voicing control, interestingly, CI children with high decoding skills, with late or early implantation, exhibit more typical productions than CF- children with late implantation. They make little to no over-prevoicing errors, only over-devoicing errors, just like typical-hearing French-speaking children do. As argued in the previous section, whereas over-devoicing errors in French can be related to articulatory complexity, over-prevoicing errors are probably more due to perceptual difficulties: this subtle acoustic feature could be frequently ill-categorized by children with hearing impairment. Since cued speech provides enhanced information about the voicing feature (voiced consonants

are cued with different handshapes than voiceless consonants), this feature is better perceived and better encoded in phonological representations in children with high cued speech exposure, and therefore better produced.

As concerns nasality, as discussed above, over-nasalization and denasalization are not typically present in children with typical hearing, but they are present in CF- children with late implantation. Once again, such pattern of errors in children with impairment is probably due to ill-perception of the nasality feature. The fact that CF+ children with late implantation produce much less over-nasalization errors can be attributed to the fact that cued speech makes nasality visible in a non-ambiguous way, which makes it more easily encoded in the phonological representation. This finding suggests that Cued French exposure brings voicing and nasality production benefits that can compensate for a late implantation, and level down the differences between early and later implanted children.

The number of manner substitutions also significantly decreases with high Cued French exposure, for all manners of articulation (Figure 5.5). Moreover, no significant difference is observed between CF+ children with late implantation and CF+ children with early implantation for any manner of articulation (moderate effect size, see Appendix 5.7). As previously found for voicing and nasal contrasts, the detrimental effect of late implantation on the production of manner of articulation is no longer observed when children are exposed to Cued French. Moreover, CF+ children seem to make only few substitutions: when manner of articulation is not correctly produced, it is because phonemes are omitted, rather than distorted or substituted.

Finally, the number of place substitutions is significantly reduced with high exposure to Cued French (Figure 5.6). Post-alveolars and velars remain difficult places of articulation for CF+ children: they tend to anteriorize phonemes by producing alveolars or interdental. In sum, place of articulation appears to be produced more accurately by children with CIs when they benefit from additional cues given by Cued French exposure.

These observations highlight the benefits of Cued French exposure to speech production in French-speaking children with CIs. A high cue reading level is associated with a lower number of speech production errors. As shown on the graphs, children with high cue reading skills produce voicing, nasality and manner of articulation in the same way as children with typical hearing, independently of their age at implantation. Place of

articulation seems to be produced less accurately in children with high cue reading skills and a late implantation but their scores are well above those of children with low cue reading skills and a late implantation. Therefore, adequate Cued French exposure was beneficial even in children with a late implantation.

Limitations

Although this study supports the claim that Cued French exposure improves speech production in children with CIs and that this might stem from a transfer from perceptually-enhanced phonological representations to speech production, some limitations should be noted. The sample size is small, which reduces the number of subjects in each subgroup. This could explain the somewhat low error rates found in the CF- group with early implantation. All the participants in that group were older than nine years of age. It is likely that the chronological age effect overrides the effect of limited Cued French exposure: since subjects are older and have been implanted early, it is quite possible that the duration of implant use has helped in overcoming difficulties in speech production. This is what is observed for vowel production error rates: there seems to be no effect of the age at implantation but rather an effect of the duration of implant use (i.e., `Hearing_age`). However, our current data do not allow us to determine whether the effect of Cued French exposure is more important than the effect of implant use in early implantation. It will therefore be important to supplement these data by recording younger children with low CF exposure and early implantation in order to further assess the effect of Cued French exposure with early implantation.

Other factors may influence speech production skills in children with cochlear implants. The type of implantation (i.e., bilateral vs bimodal, that is, whether the children are wearing two cochlear implants, or one cochlear implant with a contralateral prosthesis) has been shown to have an effect on speech perception (Sturm et al., 2020) and might, therefore, shape speech production as well. In this study, the low number of participants does not allow us to compare between types of implantation. However, all of the CF- children benefit from a bilateral implantation, which is not the case for the CF+ group, among which three children benefit from a bimodal fitting (i.e., children with late implantation in the CF+ group). Error rates of CF- children with late implantation are always significantly higher than those of CF+ children with late implantation, although

children with late implantation in the CF- group wear two cochlear implants and children with late implantation in the CF+ group wear one cochlear implant with a contralateral prosthesis. Boons et al. (2012) found no difference between bilateral and bimodal fittings when early implantation is considered. Our present observations therefore seem to warrant the claim that Cued French exposure can compensate for the difference in equipment in late implantation. Another potentially influential factor that should be examined is duration of Cued French exposure. It has been shown that the longer the exposure, the higher the decoding skills are (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990; Leybaert & Charlier, 1996). Moreover, exposure to sign language has been shown to positively impact reading abilities in hearing-impaired children (Niederberger, 2004; Niederberger & Prinz, 2005; Padden & Ramsey, 2000). It may also impact phonological skills and, therefore, have an effect on segmental accuracy. Finally, socioeconomic status may impact the development of speech production in children with cochlear implants. Even though the potential influence of SES on our data was reduced by recruiting children during summer cue camps that involve families with homogeneous SES, it would be relevant to further examine the influence of this factor on speech production.

Not all of these factors were considered in our analyses because of the small sample size. Since our groups were too heterogeneous with regard to these variables, it was not relevant to integrate them into our models. Further exhaustive studies, with more data, should take these factors into account in order to more precisely describe the impact of Cued French exposure on speech production in children with CIs.

CONCLUSION

To our knowledge, this study is the first attempt to evaluate the contribution of Cued French exposure to speech production in children with cochlear implants. Our results revealed a significant improvement in the speech production abilities of eight children with CIs who had been adequately exposed to Cued French, relative to six children with lower cue reading skills. As found in many studies, our results indicate that early implantation facilitates the development of phonological skills (Colin et al., 2017; Berland et al., 2019; Sundarrajan et al., 2020). However, we show that the production of some acoustic features (i.e., voicing and nasal contrasts, manner and place of articulation) remains degraded even in children with early implantation, and that Cued French exposure considerably reduces the number of errors on these features. Crucially, our data

on eight children reveal that adequate Cued French exposure appears to improve the production of voicing contrast and manner of articulation, regardless of age at implantation.

As argued by several research teams (e.g., Leybaert et al., 2011), Cued French is functionally beneficial during communication, by providing visual access to all the French phonemes. But our results highlight its longer-term effects on speech production as well, probably explained by the fact that better perceptual access provides better phonological representations. We suggest that our data can inform clinical practice as well as daily home interaction by confirming the crucial role of visual cues for optimal learning of speech production and for speech processing. This preliminary evidence should be extended on larger samples and replicated across ages of participants, controlling for SES and language abilities in addition to cue reading skills.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the ANR project HEARCOG [grant number ANR-17-CE28-0006-05], and by the ANR project EULALIES [grant number ANR-19-CE28-0016-01]. We thank all the children who participated in this study and their parents, as well as the schools for their help with recruitment and for finding a space to conduct the experiment. We also want to thank the ALPC (Association pour la Langue française Parlée Complétée) for their partnership in this project, research assistants for their help in collecting and transcribing speech data and Julie Machart for the picture-based adaptation of consent forms and language questionnaires.

5.3. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

Cette étude exploratoire met en évidence une amélioration significative des capacités de production de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires lorsqu'ils sont exposés à la LfPC, en particulier lorsqu'ils ont développé un niveau élevé de décodage. Comme observé dans de nombreuses études, nos résultats indiquent que l'implantation précoce (i.e., avant 24 mois) facilite le développement des compétences phonologiques (Berland et al., 2019; Colin et al., 2017; Sundarrajan et al., 2020). Cependant, à l'instar de Fagniard et al. (2020), Grandon et al., (2017) ou encore Grandon & Vilain (2020), nos résultats montrent que la production de certaines caractéristiques acoustiques (i.e., les contrastes de voisement et de nasalité, le mode et le lieu d'articulation) reste dégradée, même chez les enfants bénéficiant d'une implantation précoce. Il semble toutefois que le niveau de décodage de la LfPC réduit considérablement le nombre d'erreurs sur ces caractéristiques acoustiques : nos données mettent en évidence qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC contribue à la production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles en français. Ces compétences de décodage améliorent également la production des contrastes de voisement et de nasalité ainsi que la production du mode et du lieu d'articulation, indépendamment de l'âge de l'implantation. Le tableau 5.3 récapitule les principaux résultats de cette étude.

Comme l'ont soutenu plusieurs équipes de recherche (par exemple, Leybaert et al., 2011), l'utilisation de la LfPC favorise la communication en fournissant un accès visuel à tous les phonèmes du français. Nos résultats mettent en évidence des effets à plus long terme sur la production de parole, probablement expliqués par le fait qu'un meilleur accès perceptif fournit de meilleures représentations phonologiques. En confirmant le rôle crucial des indices visuels pour le traitement de la parole et pour le développement optimal de la production de parole, nos données peuvent soutenir les cliniciens dans leurs pratiques (i.e., orthophonistes, codeuses en LfPC, enseignants, etc.) et favoriser l'accompagnement quotidien au sein du milieu familial.

La suite de nos travaux de thèse propose d'étudier plus en profondeur la production de parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires lorsqu'il est exposé à la LfPC à partir de deux études en phonétique acoustique et articulatoire.

	Effet du statut auditif (i.e., CF-, CF+ et TH)	Effet de l'âge d'implantation (i.e., précoce vs tardif)
Consonnes	CF- < CF+ et TH CF+ = TH	CF- tardif < CF- précoce CF+ tardif < CF+ précoce CF- tardif < CF+ tardif CF- précoce = CF+ précoce
Groupes consonantiques	CF- < CF+ et TH CF+ = TH	CF- tardif < CF- précoce CF+ tardif < CF+ précoce CF- tardif < CF+ tardif CF- précoce = CF+ précoce
Voyelles	CF- < CF+ et TH CF+ = TH	CF- tardif < CF- précoce CF+ tardif = CF+ précoce CF- tardif < CF+ tardif CF- précoce = CF+ précoce
Pré-voisement		CF- tardif ≠ 0 CF- précoce = CF+ tardif = CF+ précoce = 0
Dévoisement		CF- tardif ≠ 0 CF- précoce = CF+ tardif = CF+ précoce = 0
Pré-nasalisation		CF- tardif ≠ 0 CF- précoce = CF+ tardif = CF+ précoce = 0
Dénasalisation		CF- tardif ≠ 0 CF- précoce = CF+ tardif = CF+ précoce = 0
Mode d'articulation		CF- tardif < CF- précoce CF+ tardif = CF+ précoce CF- tardif < CF+ tardif CF- précoce = CF+ précoce
Lieu d'articulation		CF- tardif < CF- précoce CF+ tardif = CF+ précoce CF- tardif < CF+ tardif CF- précoce = CF+ précoce

Tableau 5.3 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 1

CH6. ÉTUDE DES CORRÉLATS ACOUSTIQUES DES CONSONNES PLOSIVES ET FRICATIVES EN FRANÇAIS

6.1. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Avant les travaux de (Machart et al., submitted, cf. Chapitre 5), aucune donnée sur la production de parole chez l'enfant exposé à la LfPC n'a été publiée (Gardiner-Walsh et al., 2021). D'autre part, nous faisons face actuellement à un manque important de données acoustiques pour caractériser les gestes articulatoires des enfants, notamment ceux porteurs d'implants cochléaires. Quelques études ont montré que les enfants ayant bénéficié d'un implant cochléaire avant l'âge de quatre ans ont un meilleur contrôle acoustique et articulatoire de leurs productions vocales comparativement à leurs pairs implantés plus tardivement (Seifert et al., 2002). Plus récemment, Reidy et al. (2017) ont toutefois mis en évidence que la production des consonnes fricatives sibilantes est moins précise chez les enfants porteurs d'implants cochléaires que chez les enfants au développement typique. Cependant, une étude de Turgeon et al. (2017) a montré que la production de voyelles chez des enfants francophones canadiens bénéficiant d'une implantation précoce est comparable à celle de leurs pairs normo-entendants. Enfin, Grandon & Vilain (2020) ont constaté que la production de consonnes fricatives peut être altérée chez certains enfants francophones implantés cochléaires alors que d'autres présentent des productions acoustiques proches de celles de leurs pairs normo-entendants.

Après avoir mis en évidence un effet des compétences de décodage des clés manuelles de la LfPC sur la production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles ainsi qu'une amélioration de la production des traits acoustiques caractéristiques des consonnes du français (cf. Chapitre 5), nous nous sommes interrogées sur les bénéfices de l'exposition à la LfPC sur les productions acoustiques d'enfants porteurs d'implants cochléaires.

L'objectif de ce second chapitre expérimental est d'**étudier l'influence de l'exposition à la LfPC sur les caractéristiques acoustiques des consonnes du français chez les enfants porteurs d'implants cochléaires**, et ce même pour les consonnes acquises tardivement par les enfants normo-entendants, comme les fricatives sibilantes.

Afin de mieux quantifier l'influence de la LfPC sur la précision articulatoire, cette étude s'intéresse plus précisément aux plosives /t/ et /k/ et aux fricatives /s/ et /ʃ/. Ces quatre consonnes ont été choisies car elles se distinguent par la position horizontale de la langue dans le conduit vocal (alvéolaire pour /t/ et /s/, post-alvéolaire pour /ʃ/, dorsale pour /k/) et la position verticale de la langue par rapport au palais (contact occlusif avec le palais dans /t/ et /k/ vs constriction dans /s/ et /ʃ/). De plus, d'après une étude préliminaire (Machart et al., 2019), ces quatre consonnes font partie des phonèmes les plus fréquemment substitués par les enfants porteurs d'implants cochléaires.

Ce chapitre expérimental analyse les productions vocales de neuf enfants porteurs d'implants cochléaires exposés quotidiennement à la LfPC québécoise et de dix enfants normo-entendants, âgés de 51 à 133 mois. Tous les participants ont pour langue maternelle le français québécois. Pour observer la capacité de chaque groupe de participants à distinguer les lieux d'articulation des consonnes plosives et des consonnes fricatives, nous analysons les valeurs des formants F1, F2 et F3 à la fin de chaque consonne. Nous étudions également le premier moment spectral (i.e., le centre de gravité) au milieu de chaque fricative, ainsi que la différence entre les centres des deux fricatives étudiées.

6.2. ARTICLE

Cette étude est présentée sous la forme d'un article de journal.

Machart, L., Løevenbruck, H., Vilain, A. & Ménard, L. (submitted), Consonant acoustics in children fitted with Cochlear Implants and exposed to Canadian French Cued Speech compared to children with typical hearing.

Une partie des résultats de cette étude expérimentale a également été présentée dans le cadre d'une conférence internationale (SMC, 2022) :

- **Machart, L.,** Vilain, A., Løevenbruck, H. & Ménard, L. (2022, août). *Consonant production in children with cochlear implants and exposed to Canadian French Cued Speech: an acoustic and articulatory study*. 8th International Conference on Speech Motor Control (SMC), Gröningen, Netherlands. [Poster en Annexe 7.2]

Consonant acoustics in children fitted with Cochlear Implants and exposed to Canadian French Cued Speech compared to children with typical hearing

Laura Machart^{1,2}, H el ene L oevenbruck¹, Anne Vilain² & Lucie M enard³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LPNC, 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France

**Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

³Department of Linguistics, Université du Québec  a Montréal, Montréal, Québec, Canada

Author Note: LM, AV, HL, and LM designed the experimental protocol. LM collected and annotated data. LM, AV, HL and LM performed data analysis. LM, HL, AV wrote the first draft and revised version of the manuscript.

Correspondence concerning this article should be addressed to Laura Machart, Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, Univ. Grenoble Alpes, 1251 avenue centrale, 38058 Grenoble Cedex 9, France. E-mail: laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr

Conflict of Interest: No competing interests existed at the time of publication.

ABSTRACT

The situation of children with hearing loss has seen dramatic changes in the last decades, with the widespread use of cochlear implants. However, the perception of some acoustic features can be altered and phonological skills can remain limited. By visually conveying full phonological information, the cued speech manual system can be used to compensate for the degraded acoustic and visual information. The effectiveness of this system has been widely evidenced by the improvement of speech perception skills and the enhancement of phonological skills. The present study aims to assess whether and how exposure to cued speech may improve consonant articulation in French-speaking children with cochlear implants. Production of alveolar /t/ and velar /k/ stops and alveolar /s/ and postalveolar /ʃ/ fricatives is assessed with acoustic measurements in nine children with cochlear implants and exposed to Canadian French Cued Speech (from 51 to 133 months), compared with a group of ten peers with typical hearing. The acoustic analysis reveals that formant patterns and spectral moments were similar for the two groups of children. This suggests that exposure to cued speech may contribute to phonological development as it provides children with cochlear implants with clear phonological contrasts, and enables them to produce a better distinction between places of articulation in stop and fricative consonants.

Keywords: cochlear implants, cued speech, speech production in children, phonological development, consonant, acoustic study, formants, spectral moments

INTRODUCTION

It is now well established that in children with typical hearing, phonological knowledge emerges from the multisensory input provided by the linguistic environment (Beckman & Edwards, 2000) and that the quality of phonological representations plays a key role in accurate speech perception and speech production (Leybaert & Charlier, 1996; Stackhouse et al., 1997; Rvachew et al., 2003). In orally-educated children with profound hearing loss, phonological knowledge is mainly built from lipreading, due to the lack of auditory information (Dodd, 1987; Burden & Campbell, 1994; Leybaert & LaSasso, 2010), and thus remains underspecified (Charlier & Leybaert, 2000; Leybaert et al., 2011), which may impact oral language development and lead to persistent oral language disorders (Turgeon et al., 2017; Grandon et al., 2019).

The situation of children with hearing loss has seen dramatic changes in the last decades, with the now widespread use of cochlear implants. The cochlear implant is a widely recommended remedial device available for congenital deafness, which compensates for the degraded acoustic information in hearing impairment by partially restoring access to speech sounds. However, although cochlear implants improve speech reception, the perception of some acoustic features can be altered and oral language development may be impacted by phonological skills that remain limited (Bouton et al., 2012; Colin et al., 2017; Hansson et al., 2018; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2018). Repercussions of degraded phonological information have also been found in the speech production of children with cochlear implants: French-speaking children with cochlear implants have difficulties in producing voicing contrast (Grandon et al., 2017), nasal contrast (Bouton et al., 2012; Fagniard et al., 2020; Leybaert et al., 2016), manner of articulation (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016), and place of articulation (Bouton et al., 2012; Grandon et al., 2017; Leybaert et al., 2016).

Cued speech has been developed in the 1960s by Cornett (1967) to visually convey full phonological information. In the cued speech system, the speaker produces speech together with manual gestures designed to disambiguate lipreading (e.g., visually identical phonemes). This manual system is used by parents and professionals to compensate for the degraded acoustic and visual information in hearing impairment. Each consonant is cued with a specific handshape and each vowel is cued with a specific hand placement around the face (see Machart et al. (submitted) for more details).

The effectiveness of cued speech has been widely evidenced: speech perception has been shown to be improved in children with hearing impairment when audio-visual speech is presented together with manual cues (e.g. Ling & Clarke (1975) for Cued Canadian English; Périer et al. (1990) for Cued French; Uchanski et al. (1994) for Cued American English) and even without auditory information (Nicholls & Ling, 1982). Early exposure to cued speech (before the age of two years) has been shown to be critical in the enhancement of speech perception skills, particularly for pseudo-word perception (Alegria et al., 1999) and the benefits increase even more with duration of exposure to cued speech (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990). More remarkably, a few studies have revealed that a cued speech education promotes the development of children's phonological skills: children who have had consequent exposure to cued speech will eventually develop better abilities to process lip gestures (Aparicio et al., 2012) or audio-only speech information, that is, in the absence of cued speech gestures (Kos et al., 2009). Moreover, a positive impact of cued speech exposure on phonological awareness and on linguistic competencies has long been documented. Children who have been exposed to cued speech have better rhyme judgment performance (Charlier & Leybaert, 2000 for Cued French) and rhyme generation skills (Paire-Ficout et al., 2003 and Leybaert et al., 2011 for Cued French; LaSasso et al. (2003) for Cued American English), with performance equivalent to their peers with typical hearing when cued speech exposure has been intensive.

The potential benefits of using cued speech with children who wear cochlear implants needs to be supported by research evidence. In particular, the long-term consequences of cued speech exposure on speech perception and production abilities need to be examined, as they are of crucial importance for the social and academic development of a child with hearing impairment raised in a mainly oral environment. Only a few studies have demonstrated the success of using cued speech as a means to supplement speech perception in children with cochlear implants (Colin et al., 2017; Hage & Leybaert, 2005). And, to our knowledge, the potential benefits of cued speech on speech production in these children has rarely been investigated. In a recent study, Machart et al. (submitted) suggested that the impact of cued speech exposure on speech perception and on phonological representations, may extend to the speech production skills of children with cochlear implants. In particular, Cued French exposure appears to improve the

production of voicing and nasal contrast and of manner and place of articulation in children with high Cued French reading skills.

Prior to the study by Machart et al. (submitted), no data on speech production in children exposed to Cued French, or to another language, had been published (Gardiner-Walsh et al., 2021). Moreover, there is currently a lack of data to characterize the articulatory gestures of children, especially those wearing cochlear implants. A few studies have shown that children who received a cochlear implant before the age of 4 have better acoustic and articulatory control of their speech production than peers who had been implanted later (Seifert et al., 2002). The production of sibilant fricatives, which have been shown to be the latest acquired consonants (MacLeod et al. (2011), among others), remains less accurate than that of their peers with typical hearing, however (Reidy et al., 2017). More recently, Turgeon et al. (2017) showed that the vowel production of Canadian French-speaking children who benefit from an early implantation is comparable to that of peers with typical-hearing whereas Grandon & Vilain (2020) found that the development of fricative production can be altered in some French-speaking children with cochlear implants while others reach accuracy scores close to those of children with typical hearing.

RESEARCH QUESTION

The present study aims to investigate whether and how Cued French exposure may improve speech articulation in French-speaking children with cochlear implants, even for consonants that are acquired late by children with typical hearing, such as sibilant fricatives. In order to better quantify the influence of Cued French exposure on articulatory precision, we focused on the stop consonants /t/ and /k/ and the typically late-acquired sibilant fricatives /s/ and /ʃ/. These consonants were chosen because they can be distinguished by the horizontal position of the tongue (alveolar for /t/ and /s/, post-alveolar for /ʃ/, velar for /k/) and the vertical position of the tongue relative to the palate (occlusive contact with the palatal vault in /t/ and /k/ vs constriction in /s/ and /ʃ/). Moreover, these four consonants are among the most frequent sounds substituted by children with cochlear implants (Machart et al., 2019). The present paper examined the acoustic properties of the production of these four consonants /t/, /k/, /s/ and /ʃ/ by Canadian French-speaking children with cochlear implants and exposed to cued speech, and compared them with the productions of peers with typical hearing. Phonological

awareness skills of the two groups of children were also tested. Our hypothesis was that a cued speech education should help children with hearing loss to develop phonological representations comparable to their peers with typical hearing, which should also sustain their speech production abilities.

METHODS

Participants

Children with cochlear implants and exposed to cued speech (CS group)

Nine children with profound hearing loss fitted with cochlear implants and aged 51 to 133 months took part in this study (CS group) (age = 96.80 months, SD = 23.59). All the children in the CS group were recruited at Saint Jude School in Longueuil, Montreal, Quebec. In this school, all the children received speech and language services from a specialized teacher of the deaf and hard of hearing. Moreover, teachers and Speech and Language Therapists (SLTs) used cued speech in its Canadian French version (Canadian French Cued Speech) to convey their speech. At the time of the study, all participants used oral language as a primary mode of communication and none of them had been exposed to Quebec Sign Language (LSQ). All participants in the CS group had Canadian French as their first language. Six children were fitted with two cochlear implants, whereas the other three were fitted with one cochlear implant and a hearing aid on the other ear. Demographics of the children fitted with cochlear implants are presented in Table 6.1.

Speaker	Gender	Chronological age (in months)	Implantation age	Hearing age (in months)
002	M	51	12	39
005	F	65	18	47
007	F	89	75	14
004	M	102	54	48
009	F	102	24	78
010	F	102	27	75
001	F	103	49	54
006	F	121	24	97
003	M	133	24	109

Table 6.1: Demographics of children in the CS group

In our analyses, hearing age was taken as the duration of implant use (defined as the time elapsed since the first fitting with a cochlear implant), which appeared as a more informative and more comparable variable than other measures of hearing age. The mean

duration of implant use was 61.28 months (SD = 28.90). The mean age at implantation was 35.52 months (SD = 20.16). All but one child had been implanted after 18 months (from 12 to 75 months).

Children with typical hearing (TH group)

The CS group was compared with a control group of 10 children with typical hearing (TH group) aged between 52 and 137 months (age = 96.05 months, SD = 25.52). This group consisted of six girls and four boys. All participants in the TH group had Canadian French as their first language. None of the children with typical hearing had ever been exposed to Canadian Cued French or LSQ. In this group, hearing age was defined as chronological age.

All participants with typical hearing had detection thresholds better than 25 dB HL (decibel Hearing Level) at every frequency, which corresponds to typical hearing. None of them reported any speech disorder or had a learning disability or other known medical condition.

Every child's parents gave written, informed consent in accordance with the Board of Ethics of Université du Québec à Montréal. Parents also completed a survey on their child's language development and background. This provided further individual and environmental information and allowed us to eliminate any possible associated disorder. Data were collected anonymously, according to GDPR regulations.

Materials and procedure

Speech production task: picture naming

This work was part of an articulatory study which aimed to evaluate the benefits of cued speech on the articulatory gestures of children with cochlear implants, with the use of ultrasound measurements. This study was pre-registered on Open Science Framework ([10.17605/OSF.IO/V8JAQ](https://osf.io/V8JAQ)). A first control condition without the ultrasound probe was recorded (noUS condition), to check that the ultrasound probe did not interfere with the child's speech production. At the end of this first session, the ultrasound system was installed and a second condition with the ultrasound probe was recorded (US condition).

Based on preliminary data analysis from an ongoing project on speech development in French-speaking children with cochlear implants (Machart et al., 2019), this study was focused on the two stops /t/ and /k/ and the two fricatives /s/ and /ʃ/, which are frequently substituted by children with cochlear implants. The corpus consisted of four words including one of the four targeted consonants (i.e., /t/, /k/, /s/ and /ʃ/) followed by vowel /a/. The stimuli were simple words that had been chosen for their frequency and imageability. All words were disyllabic and included the target consonant in initial position, since word-initial consonants are usually produced with higher articulatory precision. This resulted in the following four French words: “tapis” /tapi/ *carpet*, “carotte” /kaʁɔt/ *carrot*, “sapin” /sapɛ̃/ *fir tree* and “chapeau” /ʃapo/ *hat*. To facilitate the detection of acoustic events such as burst onset in occlusive stops, all words were produced in a carrier sentence: “C’est les...” /sele/ “*These are...*”. Each word was produced 6 times (as in Barbier et al. (2015) and Noiray et al. (2018)), and prompted with 6 different pictures to make the task more pleasant to the children. The pictures were presented to the children before the test, in order to suppress lexical access difficulties. Picture naming was preferred to word repetition in order to avoid imitation of an audio target, and to elicit the children’s spontaneous production of the words. A total of 36 tokens per condition (i.e., noUS vs US) allowed us to minimize fatigue while ensuring a sufficient number of repetitions. The order of the stimuli was randomized between subjects and across conditions to avoid any influence from a stimulus on another one.

This work offers to analyze the acoustic data from the control condition without ultrasound recording (i.e., the noUS condition). These analyses were not anticipated at the time of the pre-registration, but they appeared as a crucial basis for a subsequent articulatory study. They will provide unprecedented results on the speech production of children with cochlear implants who have received a cued speech education.

Phonological awareness test

In order to assess the development of phonological representations in our participants, a phonological awareness test was administered to all the children after the picture-naming task. This test consisted of a rhyme judgment task, a syllable deletion task in CVCV pseudo-words, and a phoneme deletion task in CVC. Children over 6 years also performed phoneme deletion in CCV (adapted from Caudrelier et al., 2019). The rhyme judgment task was taken from a French Canadian test for preschoolers (Lefebvre et al., 2008), while the

other tasks were taken from BELEC (Mousty et al., 1994). Results of the phonological awareness test are available in Table 6.2. When instructions were not understood by the participant, the task was not taken into account in the phonological awareness score. Thus, one subject with typical hearing and aged 52 months had no score in the phonological awareness test.

Speaker	Group	Task			
		Rhyme judgment	Syllable deletion	Phoneme deletion (CVC)	Phoneme deletion (CCV)
002	CS	80	87.5		
005	CS	60			
007	CS	100	100	75	90
004	CS	100	93.75	62.5	70
009	CS	90	62.5	56.25	90
010	CS	100	100	100	90
001	CS	100	93.75	87.5	
006	CS	90	100	68.75	70
003	CS	70	93.75	75	100
013	TH				
008	TH		68,75		
016	TH	100	100	100	100
017	TH	100	87,5	87,5	30
011	TH	100	75	100	100
018	TH	100	100	100	90
019	TH	100	100	93,75	100
015	TH	100	100	93,75	90
012	TH	100	100	100	100
014	TH	90	100	93,75	100

Table 6.2: Results of the phonological awareness test for each participant (children are ordered by chronological age). Grey boxes indicate tasks whose instructions were not understood by the participant.

Procedure

The child sat in front of a computer screen on which the pictures to be named were displayed. Acoustic recordings of his or her productions were recorded using a high-quality Audio-Technica microphone (Omnidirectional condenser headworn microphone, model number BP892). As these acoustic recordings are made as part of an articulatory study, a mini video camera was positioned in front of the mouth to record simultaneously the movement of the lips and of the head.

An auditory screening test was completed with children with typical hearing to eliminate a possible hearing disorder (perception at 20 dB on the frequencies 250, 500, 1000, 2000, 4000 and 8000 Hz, using an Electronica 9910 audiometer).

Data processing

All the items produced by the children were perceptually assessed by an experienced phonetician and manually segmented and annotated on Praat (Boersma & Weenink, 2019). Phoneme accuracy was judged by the same French listener and only accurate productions (i.e., identical to the target) were annotated. All the data were digitized at a rate of 44,000Hz but the acoustic signal was downsampled to 16,000 Hz to achieve more accurate formant detection in the [0, 6000 Hz] range. The beginning and the end of each target consonant were marked on an interval tier. To observe the ability of each group of participants to distinguish between places of articulation in stop consonants (i.e., /t/ and /k/) and in fricative consonants (i.e., /s/ and /ʃ/), we first extracted the first formant (F1), the second formant (F2) and the third formant (F3) values at the end of the consonant. Formants were extracted based on the Burg algorithm implemented in Praat. The window length varied from 0.015 to 0.020, with a pre-emphasis of 80. Likewise, formant values for plosives (burst) and fricatives were measured using the Burg algorithm. Outlier values related to measurement errors were all corrected manually. Second, to better characterize the place of articulation in each fricative, the four spectral moments (mean, variance, skewness and kurtosis) were measured based on a spectral analysis performed on a 40-ms window located at consonant mid-point. The mean difference between centers of gravity was also calculated for each group.

Statistical analyses

All graphs and statistical analyses were done with the R software (R Development Core Team, 2012). Several statistical analysis methods were used as described below.

Linear models (*lm* function in package *stats* in R) were fitted to examine phonological awareness as a function of several between-subject factors. The dependent variable was the average score in the full phonological awareness test. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. Factors and interactions which did not improve model fit were excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Chronological_age or Hearing_age.

To assess speech production in the picture naming task, an analysis of phoneme accuracy was run in each group, using a backward step-wise variable selection with model

comparisons to find the best-fitting linear model (*lm* function in R). Some participants did not produce the expected number of items. The dependent variable was therefore the average score in the picture-naming task. Factors and interactions which did not improve model fit were excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Chronological age or Hearing age.

Linear mixed-effects models (*lme* function in R) were used to analyze formant values and centers of gravity in stop and fricative production. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. First, all random-effect factors and fixed-effect factors of interest were included, alone and in interaction. Factors which did not improve model fit were then excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Consonant (i.e., /t/ or /k/ for the stops and /s/ or /ʃ/ for the fricatives). Only Participant was introduced as a random-effect factor. When an interaction of factors was proven to be significant, multiple comparison tests were run, using the *glht* function in package *multcomp* in R.

A linear model (*lm* function in package *stats* in R) was used to examine the contrast between centers of gravity. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. Factors and interactions which did not improve model fit were excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Chronological_age or Hearing_age.

Only productions deemed perceptually acceptable by an experienced phonetician were included in the statistical analyses of stop and fricative production (Table 6.3). Due to significant fatigability, the task had to be stopped after the production of four occurrences of each item for one participant (Arti_LM_005). Thus, the production score was calculated on four repetitions and not six, as in other participants. One participant of the CS group was not part of the statistical analysis for the stops and two participants of the CS group were not part of the statistical analyses for the fricatives because they produced less than 50% accurate phoneme. One participant in the TH group was excluded from the statistical analyses of center of gravity in fricatives because interfering microphone noise prevented measurement in the high frequencies.

Speaker	Group	Production score (%)			
		/t/	/k/	/s/	/ʃ/
002	CS	83	100	100	17
005	CS	83	100	100	83
007	CS	100	100	100	100
004	CS	100	100	100	100
009	CS	17	100	100	100
010	CS	100	100	100	83
001	CS	100	83	100	100
006	CS	100	100	83	100
003	CS	100	100	100	0
008	TH	100	100	100	100
013	TH	100	83	100	100
016	TH	100	100	100	100
017	TH	100	100	100	100
011	TH	100	83	100	100
018	TH	100	100	100	100
019	TH	83	100	100	100
015	TH	100	100	100	100
012	TH	100	100	100	100
014	TH	83	100	100	100

Table 6.3: Productions deemed perceptually acceptable for each consonant, by participants (classified by chronological age). Grey boxes indicate productions which are not part of the statistical analyses.

RESULTS

Phonological awareness test

The best-fitted linear model for the analyses of phonological awareness only includes Chronological_age ($p = .033$). Children with cochlear implants and exposed to cued speech show similar phonological awareness to children with typical hearing (Figure 6.1). No effect of Hearing_age (i.e., duration of implant use) was observed.

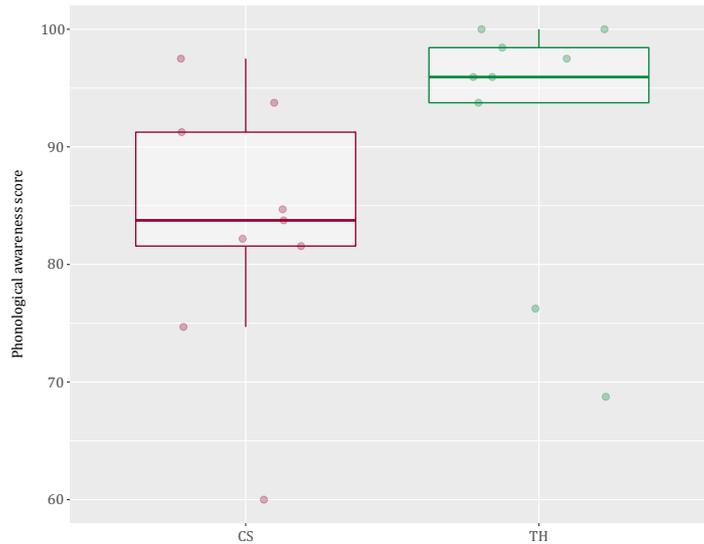


Figure 6.1: Distribution³¹ of the phonological awareness mean score by group (CS in red, TH in green). Each dot corresponds to the mean score of one given participant.

Phoneme accuracy

The best-fitted linear mixed effects model for the analysis of phoneme accuracy only includes Group (i.e., CS and TH). Phoneme accuracy of children in the CS group is significantly lower than that of their hearing peers ($p = .011$). Two participants (52 months and 133 months) anteriorized the production of /ʃ/ and one participant (102 months) anteriorized the production of /t/. That is, children with cochlear implants produced less accurate phonemes than children with typical hearing. No effect of chronological age nor duration of implant use was observed.

Production of stops

- F1

The best-fitted model for the analysis of F1 in stop production includes Group (i.e., CS and TH) and Consonant (i.e., /t/ and /k/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. No interaction is observed between Group and Consonant.

³¹ In the box plots, the boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentile, a line within the box marks the median, the mean is not represented but lies at the center of the box, and the boundary of the box farthest from zero indicates the 75th percentile. Lines above and below the box indicate the 10th and 90th percentiles.

Multiple comparison tests revealed a significant effect for the consonant (Figure 6.2, upper panel): CS and TH distinguish both a significantly higher F1 in /t/ than in /k/ ($p < .001$). There also appears to be a slight effect of group ($p = .093$). Regarding F1 values, children with cochlear implants and exposed to cued speech tend to produce higher F1 values than children with typical hearing.

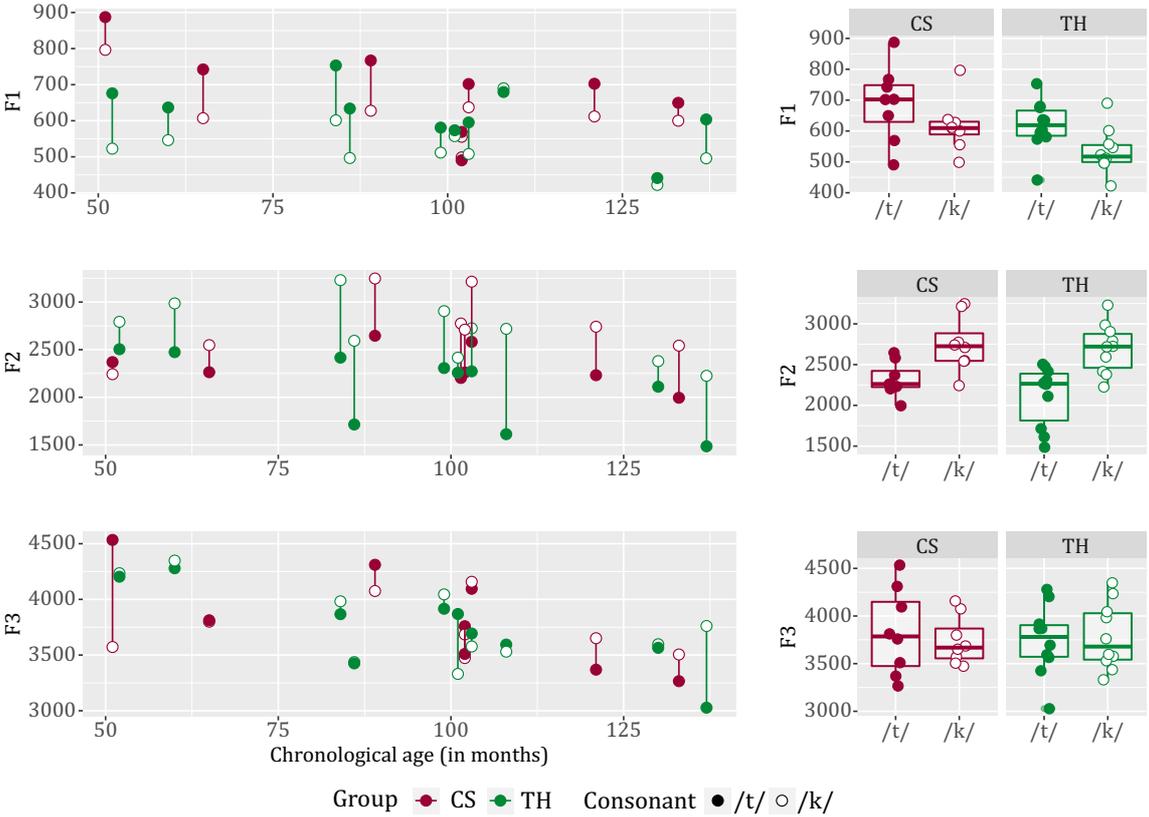


Figure 6.2: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.

- F2

The best-fitted model for the analysis of F2 in stop production includes Group (i.e., CS and TH) and Consonant (i.e., /t/ and /k/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests revealed a significant effect for the consonant (Figure 6.2, middle panel): CS and TH produce both a significantly lower F2 in /t/ than in /k/ ($p < .001$).

No significant difference was observed between groups for any of the two stops. That is, regarding F2 values, children with cochlear implants and exposed to cued speech seem to produce stops in the same way as children with typical hearing.

- F3

The best-fitted model for the analysis of F3 in stop production does not include any fixed-effect factor (Figure 6.2, bottom panel). Neither effect of Group or Consonant are observed. CS and TH do not distinguish between stop according to F3.

Production of fricatives

- F1

The best-fitted model for the analysis of F1 in fricative production includes Group (i.e., CS and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests revealed a significant effect for the consonant in the CS group (Figure 6.3, upper panel): CS produce a significantly higher F1 in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) whereas TH do not seem to distinguish between both fricatives. No significant difference was observed between groups for any of the two stops. Regarding F1 values, children with cochlear implants and exposed to cued speech distinguish significantly between the two fricatives, whereas children with typical hearing do not.

- F2

The best-fitted model for the analysis of F2 in fricative production only includes Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CS and TH produce both a significantly lower F2 in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) (Figure 6.3, middle panel).

- F3

The best-fitted model for the analysis of F3 in fricative production includes Group (i.e., CS and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests revealed a significant effect for the consonant in the CS group (Figure 6.3, bottom panel): CS produce a significantly higher F3 in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) whereas TH do not seem to distinguish between both fricatives. No significant difference was observed between groups for any of the two fricatives. Regarding F3 values, children with cochlear implants and exposed to cued speech distinguish significantly between the two fricatives whereas children with typical hearing do not.

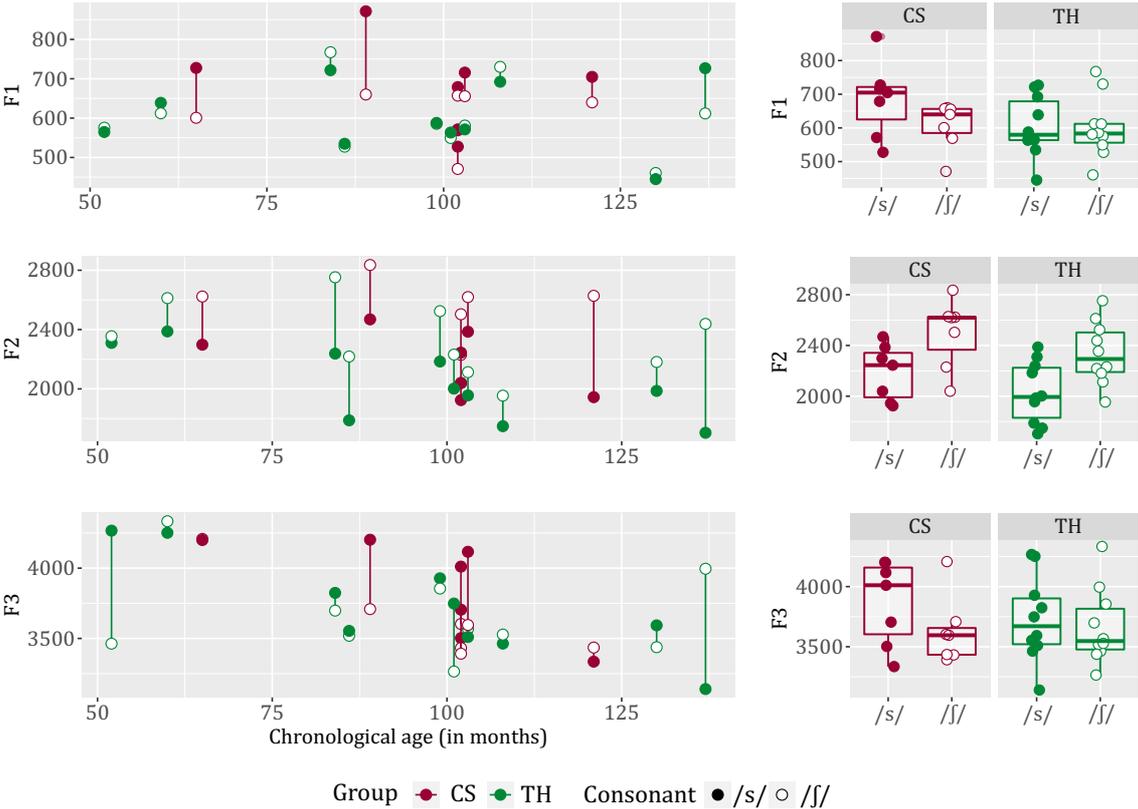


Figure 6.3: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.

- Center of gravity

The best-fitted model for the analysis of center of gravity in fricatives includes Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) and Group (i.e., CS and TH) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Consonant and Group.

Multiple comparison tests revealed a significant effect for the consonant (Figure 6.4): CS and TH both produce a significantly higher center of gravity in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$). No significant difference was observed between groups for any of the two fricatives. That is, regarding center of gravity, children with cochlear implants and high cue reading skills tend to differentiate between fricatives in the same way as children with typical hearing.

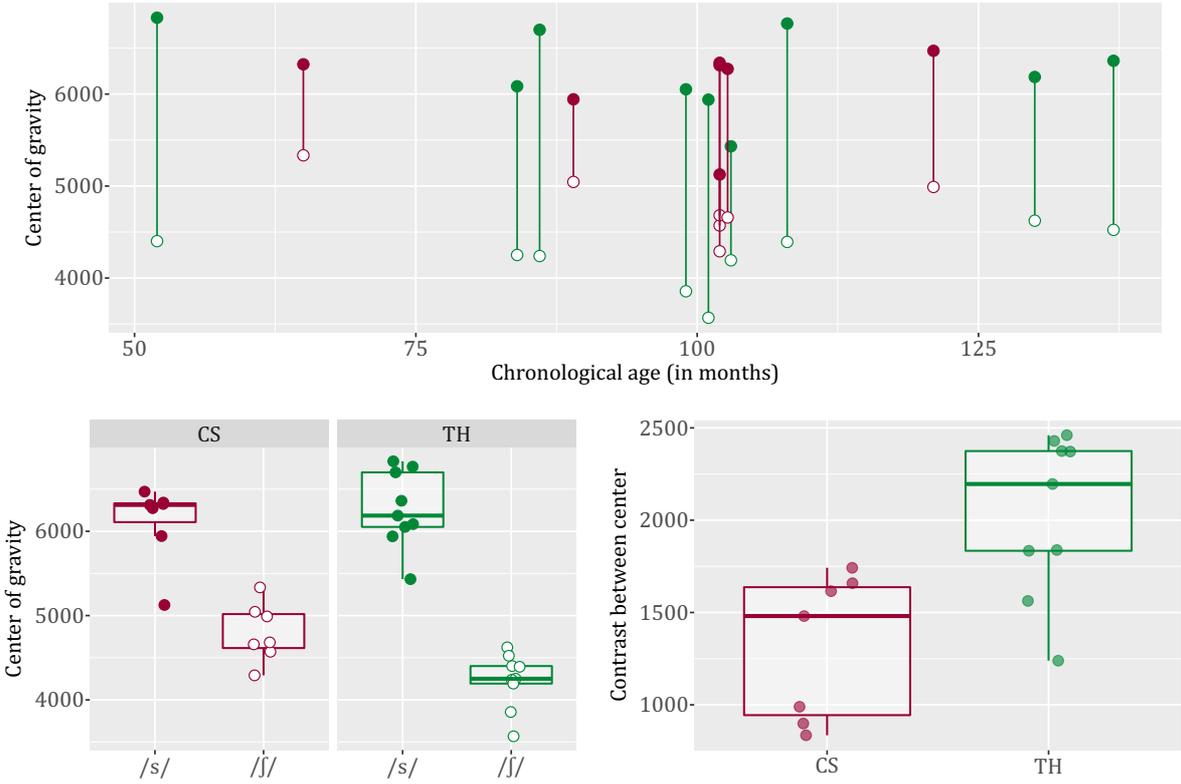


Figure 6.4: Mean center of gravity for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CS in red, TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between centers of gravity are illustrated in the bottom right panel.

- Contrast between center of gravity

The best-fitted model for the analyses of the contrast between centers of gravity of the fricative consonants /s/ and /ʃ/ only includes Group ($p = .004$) (Figure 6.4, bottom right panel). That is, children with cochlear implants and high cue reading skills do not produce fricatives in the same way as their peers with typical hearing: it seems that CS tend to differentiate less between the two fricatives than TH, although both groups do distinguish them significantly.

Regarding Hearing_age instead of Chronological_age, there is an effect of Group ($p = 002$), in interaction with duration of implant use ($p = 0.27$).

DISCUSSION

The aim of the present study was to characterize the articulatory gestures of children with cochlear implants and exposed to cued speech, using acoustic data. To that aim, the production of the two stop consonants /t/ and /k/ and of the two fricative consonants /s/ and /ʃ/ was assessed in a group of children with cochlear implants exposed to Canadian Cued French (i.e., the CS group). These data were compared with consonant production of peers with typical hearing (i.e., the TH group). The main question explored was the acoustic specificities of speech production in children with cochlear implants when they are exposed to cued speech as compared to children with typical hearing.

Phonological awareness and phoneme accuracy

The results of the phonological awareness test showed that children in the CS group had a similar level of phonological awareness as children with typical hearing (Figure 6.1). However, the phoneme accuracy of children with cochlear implants was found to be significantly lower than that of children with typical hearing, as judged by a French listener. Some repetitions of the four target phonemes are not produced accurately, even at 133 months whereas this type of error is not observed in the TH group. Indeed, in the CS group, two participants (52 months and 133 months) had difficulties with the production of /ʃ/ and one participant (102 months) with the production of /t/. The phoneme realizations which were not judged accurate by the transcribers were removed from the corpus, and acoustic analysis of the remaining data provided information on intra-categorical variation between the two groups. All of the productions judged to be inaccurate were produced with an anteriorization of the place of articulation. This observation is consistent with the findings of Machart et al. (submitted) who show that children with cochlear implants tend to anteriorize postalveolar and velar phonemes, independently of their cued speech proficiency.

To that aim, acoustic measurements were made, on the formant values at consonant offset in stops and fricatives in onset position before the vowel /a/, and on the center of gravity of the same fricatives. The data from children with cochlear implants and exposed to cued speech were compared to those of children with typical hearing.

Consonant production

The results of our study reveal a significant distinction between the acoustic correlates of places of articulation for the alveolar /t/ and the velar /k/ stops in all of our participants. F1 values at consonant offset are higher for /t/ than for /k/, F2 values are lower for /t/ than for /k/, and F3 values are equal for both places of articulation. These data differ from typical adult formant patterns for these places of articulation. Indeed, adults' alveolars typically have higher F3 values than velars, whereas F2 values tend to be similar for both places of articulation (Schwartz, Boë, et al., 2012). F1 values tend to be slightly higher for velars than alveolars.

As concerns F1 values, they are not typically directly related to the place of articulation, but to the "Helmholtz" resonance of the back cavity (Schwartz, Boë, et al., 2012), which does not vary much with place of articulation, but is more influenced by aperture. In this case, higher F1 values in velars could be related with later voicing onset, due to higher intra-oral pressure in the back cavity (Ohala, 1983). Another source of increase in F1 could be the effect of a higher F0 in children (Traunmüller, 1981).

As concerns F2 and F3 patterns, the differences between children and adults could be attributable to the fact that the back cavity (behind the constriction) is smaller in children, especially relatively to the front cavity, which could produce different relations between resonance frequencies of these cavities (Ménard et al., 2004). This hypothesis should be tested with articulatory simulations.

Importantly, the mean value of F2 for the stop consonants /t/ and /k/ indicates that both groups of participants distinguish significantly and in a similar way between the two places of articulation (i.e., alveolar vs velar). This result is consistent with the study of Machart et al. (submitted) which shows that place of articulation is perceived as accurate in children with cochlear implants when they have developed a high cued speech proficiency.

Regarding the fricative consonants /s/ and /ʃ/, the formant pattern slightly differs from that of stops. Both groups have lower F2 values for /s/ than for /ʃ/, which is consistent with the results obtained for stops: the more anterior constriction, i.e. the alveolar /s/, has a lower F2 value than the more posterior constriction /ʃ/. Those patterns for fricatives show the same difference from typical adult formant patterns as the ones for plosives.

However, the results also reveal differences between the two groups of children. In the CS group, F1 and F3 values at consonant offset are higher for /s/ than for /ʃ/, whereas they are similar in the TH group. Given the lack of data in the literature on formant values at consonant offsets in children, these differences are difficult to interpret and call for articulatory data.

In any case, the comparable F2 distinction between /s/ and /ʃ/ in the two groups suggests that children with cochlear implants and with high cued speech proficiency distinguish significantly between places of articulation, as well as children with typical hearing.

Concerning the center of gravity, in French-speaking adults, the center of gravity of the consonant /s/ is higher than that of the consonant /ʃ/. In our data set, children with typical hearing and children with cochlear implants exposed to Canadian Cued French follow the same acoustic pattern as observed in adults, with a higher center of gravity for /s/ than for /ʃ/ (Figure 4). Moreover, both groups distinguish significantly between the two places of articulation (i.e., alveolar vs postalveolar). However, children in the CS group tend to distinguish less precisely between fricatives than hearing children: when considering the contrast between centers of gravity, we observed a significant difference between the CS and TH groups. Children with cochlear implants and exposed to cued speech produce less distinction between the two fricative categories than their peers with typical hearing. This is consistent with the observation of Machart et al. (submitted) who showed that children with cochlear implants and high cued speech proficiency tend to anteriorize postalveolar consonants, which acoustically results in higher center of gravity for these fricatives. These results highlight that exposure to Canadian Cued French allows children with cochlear implants to produce fricatives in a distinctive way but not yet as precisely as children with typical hearing.

Previous research has shown that children with cochlear implants have difficulties in producing manner of articulation (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016; Grandon & Vilain, 2020) and place of articulation (Bouton et al., 2012; Grandon et al., 2017; Leybaert et al., 2016) which pleads for the view that they need specific additional support to successfully produce phonemes. According to the results of the present acoustic study, children with high cued speech proficiency do not seem to suffer from the same difficulties. Cued speech exposure therefore seems to allow children with cochlear

implants to better produce acoustic features, which leads to a better differentiation of consonants according to their place of articulation.

The results of our study also plead for the use of acoustic measurements in the study of child speech production. Indeed, it should be reminded that the consonant realizations that were studied in this paper were only the ones which had been deemed accurate by an adult transcriber. Yet, our acoustic study reveals differences between the two groups of children as concerns the distance between the two fricative places of articulation: children in the CS group produce less distinction between these fricatives than their peers with typical hearing. Such intra-categorical variation, which would have remained unidentified with a perceptual evaluation, could be related to lesser perceptual distinction, and might cause less intelligibility in continuous speech. Acoustic studies therefore provide unique information on subtle phonetic contrasts.

Limitations

Although this study supports the claim that cued speech exposure allows children with cochlear implants to produce the acoustic specificities of stops and fricatives in the same way as their peers with typical hearing, some limitations should be noted. First, the sample size of our study is small. A replication of the study with more participants will be necessary. Moreover, our study includes only one group of children with hearing impairment, i.e., children who have a high level of cued speech proficiency. To better ensure the positive impact of cued speech exposure to the production of consonants by children with cochlear implants, it will be important to supplement these data by recording children with cochlear implants who have never been exposed to cued speech.

Second, Sturm et al. (2020) have shown that bilateral vs bimodal implantation (i.e., whether the children are wearing two cochlear implants, or one cochlear implant with a hearing aid on the other ear) have an effect on speech perception, which might therefore also have an effect on speech production. The low number of participants in our data set does not allow us to compare between types of implantations but six of the nine children in the CS group benefit from a bilateral implantation. The type of implantation could be correlated with the age at implantation. However, Boons et al. (2012) found no difference between bilateral and bimodal fittings when early implantation is considered. Our present data set does not allow us to analyze the effect of age at implantation because only

two children in the CS group benefited from an early implantation (i.e., before 24 months). Our observations therefore seem to confirm that cued speech exposure can compensate for a late implantation, and allow children with cochlear implants to reach similar production to peers with typical hearing.

Another potentially influential factor that should be addressed is duration of cued speech exposure. It has been shown that the longer the exposure, the higher the decoding skills are (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990; Leybaert & Charlier, 1996). Actually, only two participants in the CS group have been exposed for less than 24 months to Canadian Cued French. As shown by Machart et al. (submitted), exposure to cued speech does not seem to be sufficient to promote speech development in children with hearing impairment, cue reading level (i.e., cued speech perception proficiency) also had an important role in speech production. It would therefore be relevant to analyze the effect of cued speech reading skills in our participant. However, our sample size was too small to explore this question.

Finally, socioeconomic status may impact the development of speech production in children with cochlear implants, it would be relevant to further examine the influence of this factor on speech production. Further studies, with more participants, should take these factors into account to more precisely describe the impact of Canadian Cued French exposure on acoustic production in children with CIs.

CONCLUSION

The results of this study support the hypothesis that exposure to cued speech promotes the development of phonological awareness in children with cochlear implants, which improves their speech production, particularly for stop and fricative consonants. Several studies have shown that deaf people have difficulty producing posteriorly articulated phonemes, as these phonemes are not labially visible. Our data show that exposure to Canadian French Cued Speech compensates for the non-visibility of the posterior tongue gesture, which allows children with cochlear implants to better articulate these phonemes.

Finally, this work points out the importance of studying objective data since even when consonants for which accuracy has been judged similar between groups are considered,

differences in the acoustic measurements may exist. Further investigations on articulatory correlates are needed to confirm our observations and will follow.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the ANR project HEARCOG [grant number ANR-17-CE28-0006-05], and has received a grant from IDEX UGA to the first author. We thank all the children who participated in this study and their parents, as well as St-Jude's school for their help with recruitment and for finding a space to conduct the experiment. We also want to thank Kathleen Bull and all the Speech and Language Therapists of St-Jude's School for their partnership in this project and their availability.

6.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les résultats de cette seconde étude soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'exposition à la LfPC favorise le développement de la conscience phonologique chez les enfants porteurs d'implants cochléaires, ce qui améliore leur production vocale notamment pour les consonnes plosives et fricatives. Nos données montrent que l'exposition au *cued speech* dans sa version québécoise semble compenser la non-visibilité du geste postérieur de la langue, ce qui favoriserait l'articulation de ces phonèmes chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. Plus précisément, nos résultats indiquent que les enfants porteurs d'implants cochléaires distinguent significativement les lieux d'articulation des consonnes plosives (i.e., alvéolaire vs vélaire) et fricatives (i.e., alvéolaire vs postalvéolaire), bien que leurs valeurs formantiques diffèrent de celles observées chez les adultes. Nous faisons l'hypothèse ici que ces différences entre enfants et adultes seraient liées au fait que la cavité arrière (derrière la constriction) est plus petite chez les enfants que la cavité avant.

De précédentes études ont mis en évidence les difficultés des enfants porteurs d'implants cochléaires à produire le lieu d'articulation (Bouton et al., 2012 ; Grandon et al., 2017 ; Leybaert et al., 2016) des consonnes. Les différentes observations émergeant de ces études plaident en faveur de l'idée que les enfants porteurs d'implants cochléaires ont besoin d'aide supplémentaire pour favoriser la production de phonèmes. Les résultats de notre étude acoustique vont en ce sens en pointant que les enfants porteurs d'implants cochléaires bénéficiant d'une exposition quotidienne à la LfPC ne semblent pas souffrir des mêmes difficultés que celles mises en évidence précédemment chez les enfants porteurs d'implants cochléaires ne bénéficiant d'aucun accompagnement. L'exposition à la LfPC semble donc permettre aux enfants porteurs d'implants cochléaires de mieux produire les caractéristiques acoustiques des phonèmes du français, ce qui conduit à une meilleure différenciation des consonnes en fonction de leur lieu d'articulation. Le tableau 6.4 résume les principaux résultats de l'étude expérimentale 2.

Enfin, ce travail souligne l'importance d'étudier des données objectives puisque la simple analyse de la précision phonémique n'a pas mis en évidence de différence entre nos groupes de participants. La suite de nos travaux propose d'autres investigations sur les corrélats articulatoires afin de confirmer nos observations.

	Plosives	Fricatives
F1	/t/ > /k/	CS : /s/ > /ʃ/ TH : /s/ = /ʃ/
F2	/t/ < /k/	/s/ < /ʃ/
F3	/t/ = /k/	CS : /s/ > /ʃ/ TH : /s/ = /ʃ/
Centre		/s/ > /ʃ/
Contraste centre		CS < TH

Tableau 6.4 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 2

CH7. ÉTUDE DES CORRÉLATS ARTICULATOIRES DES CONSONNES PLOSIVES ET FRICATIVES EN FRANÇAIS

7.1. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Notre seconde étude expérimentale (Chapitre 6) a mis en évidence que l'exposition à la LfPC améliore les productions vocales des enfants porteurs d'implants cochléaires, en particulier pour les consonnes plosives et fricatives. Cette étude souligne également l'importance d'étudier des données objectives puisque la simple analyse de la précision phonémique ne nous a pas permis de mettre en évidence de différence entre nos groupes de participants. La suite de ce travail propose d'aller encore plus loin dans l'analyse de l'effet de la LfPC sur les productions vocales d'enfants porteurs d'implants cochléaires. Nous présentons ici d'autres investigations sur les corrélats articulatoires qui viennent compléter nos observations sur les corrélats acoustiques.

L'objectif de ce troisième et dernier chapitre expérimental est d'**observer l'effet du niveau de décodage de la LfPC sur les mouvements articulatoires de la langue lors de la production de consonnes plosives et fricatives en français chez les enfants porteurs d'implants cochléaires.**

Dans la continuité de l'étude expérimentale 2 (Chapitre 6), nous étudions ici les caractéristiques articulatoires des productions vocales de huit enfants porteurs d'implants cochléaires exposés quotidiennement à la LfPC québécoise et de dix enfants normo-entendants, âgés de 51 à 133 mois. Tous les participants ont pour langue maternelle le français québécois et ne sont exposés à aucune autre langue quotidiennement. Pour observer la capacité de chaque groupe de participants à distinguer les lieux d'articulation des consonnes /t/ et /k/ et des consonnes /s/ et /ʃ/, nous analysons l'antéro-postériorité du point le plus haut de la langue, le lieu de constriction ainsi que la courbure de la langue pour chaque consonne. Ces mesures sont prises au moment de l'explosion pour les consonnes plosives et au milieu de la consonne pour les fricatives.

7.2. ARTICLE

Cette étude a été pré-enregistrée sur la plateforme *Open Science Framework* ([10.17605/OSF.IO/V8JAQ](https://osf.io/V8JAQ)) et est présentée sous la forme d'un article de journal.

Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Tiede, M. & Ménard, L. (in prep), Exposure to Canadian French Cued Speech improves consonant articulation in children with cochlear implants: acoustic and articulatory data.

Une partie des résultats de cette étude expérimentale a également été présentée dans le cadre de conférences internationales (SMC, 2022 et ISSP, 2020) :

- **Machart, L.**, Vilain, A., Løevenbruck, H. & Ménard, L. (2022, août). *Consonant production in children with cochlear implants and exposed to Canadian French Cued Speech: an acoustic and articulatory study*. 8th International Conference on Speech Motor Control (SMC), Gröningen, Netherlands. [Poster, disponible en Annexe 7.2]
- **Machart, L.**, Vilain, A., Løevenbruck, H. & Ménard, L. (2020, décembre). *Influence of French Cued Speech exposure on consonant production in children with cochlear implants: an ultrasound study*. 12th International Seminar on Speech Production (ISSP), Providence, USA. [Poster en visioconférence, disponible en Annexe 7.1]

Exposure to Canadian French Cued Speech improves consonant articulation in children with cochlear implants: acoustic and articulatory data

Laura Machart^{1,2}, Anne Vilain², H el ene L oevenbruck¹, Mark Tiede³ & Lucie M enard⁴

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LPNC, 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France

**Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

³Haskins Laboratories, New Haven, Connecticut, USA

⁴Department of Linguistics, Université du Québec  a Montréal, Montréal, Québec, Canada

Author Note: LM, AV, HL, and LM designed the experimental protocol. LM collected and annotated data. LM, AV, HL, LM and MT performed data analysis. LM, HL, AV and LM wrote the first draft and revised version of the manuscript.

Correspondence concerning this article should be addressed to Laura Machart, Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, Univ. Grenoble Alpes, 1251 avenue centrale, 38058 Grenoble Cedex 9, France. E-mail: laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr

Conflict of Interest: No competing interests existed at the time of publication.

ABSTRACT

One of the strategies that can be used to support speech communication in deaf children is cued speech, a visual code in which manual gestures are used as additional phonological information to supplement the acoustic and labial speech information. Cued speech has been shown to improve speech perception and phonological skills. This paper aims to assess whether and how cued speech reading proficiency may also have an impact on the acoustic and articulatory correlates of consonant production in children. Eight children with cochlear implants and with different receptive proficiency in Canadian French Cued Speech are compared to ten children with typical hearing (from 52 to 133 months) on their production of stop and fricative consonants. Articulation was assessed with ultrasound measurements. The results reveal that cued speech proficiency sustains the development of speech production in children with cochlear implants, and improves their articulatory gestures, particularly for the place contrast in plosives as well as fricatives. Moreover, this work highlights the importance of studying objective data and comparing acoustic and articulatory measurements to better characterize speech production in children.

Key words: cochlear implants, cued speech, speech production in children, phonological development, consonant, acoustics, articulation, ultrasound

INTRODUCTION

With 34 million children worldwide suffering from a hearing loss of more than 35 decibels (dB)³², the management of hearing impairment is a major public health issue. The impact of hearing loss affects all areas of social relationships and cognitive skills, such as communication, language development, schooling and employment. These repercussions are also likely to have a metacognitive impact on psycho-affective development, self-construction, self-esteem and self-confidence (Hintermair, 2014).

As concerns auditory restoration, cochlear implants are now largely recommended for children with prelingual deafness. This remedial device is a surgically-implanted neuroprosthesis which provides sound perception by direct electrical stimulation of the auditory nerve. Although speech reception is then partially restored, the perception of some acoustic features can be altered and oral language development may be impacted by limited phonological skills (Bouton et al., 2012; Colin et al., 2017; Hansson et al., 2018; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2018). These degraded phonological informations may also have repercussions on the speech production of children with cochlear implants. Indeed, it has been shown, for example, that French-speaking children with cochlear implants have difficulties in producing voicing contrast (Grandon et al., 2017) and nasal contrast (Bouton et al., 2012; Fagniard et al., 2020; Leybaert et al., 2016) but also manner of articulation (Bouton et al., 2012; Leybaert et al., 2016), especially in fricatives (Grandon & Vilain, 2020), and place of articulation (Bouton et al., 2012; Grandon et al., 2017; Leybaert et al., 2016). The results of these studies prove that additional support is needed to improve the perception and production of speech in children with cochlear implants.

One of the strategies that can be used to support speech communication in deaf children is cued speech (Cornett, 1967). Cued speech is "a visual mode of communication that uses hand shapes and placements in combination with the mouth movements and speech to make the phonemes of spoken language look different from each other" (The National Cued Speech Association). In other words, manual gestures are used as additional visual information to complement the degraded acoustic information as well as the labial

³² According to the World Health Organisation (WHO) report, published in March 2021: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

information, which is necessarily limited. In this system, each consonant is cued with a specific handshape and each vowel is cued with a specific hand placement around the face (see Appendix 5.1 for Cued French³³). The manual cue helps disambiguating phonemes which have similar lip shapes and can also indicate the presence of invisible phonemes like /k/ or /ʁ/, or invisible features such as voicing or nasality. For example, consonants /d/ and /n/, which differ in manner of articulation, are visually identical, as they have similarly slightly parted lips with the tip of the tongue slightly visible behind the teeth. Different cued speech handshapes are used to introduce a contrast between these two consonants. In Cued French and Cued English, /n/ is produced with the addition of a handshape with all four fingers extended and the thumb hidden whereas the production of /d/ is accompanied with a handshape with only the index finger raised. A manual cue is therefore provided for each phoneme in each word to convey spoken language (Shull & Crain, 2010), which can be done with or without phonation (LaSasso, 2010).

Communicating with a deaf child with added cued speech gestures is beneficial for the child's speech perception, as has been widely evidenced in a number of studies (e.g. for Cued Canadian English; Périer et al. (1990) for Cued French; Uchanski et al. (1994) for Cued American English), even without auditory information (Nicholls & Ling, 1982), with more benefits for earlier (Alegria et al., 1999) and longer duration of exposure to cued speech (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990). But a more remarkable consequence of receptive cued speech proficiency has also been demonstrated: children who have had intensive exposure to cued speech will eventually develop better abilities to process speech than their peers, even when cued speech gestures are absent. They become better at perceiving lip gestures only (Aparicio et al., 2012) or audio-only speech information (i.e., in the absence of cued speech gestures) (Kos et al., 2009). Moreover, children who have been exposed to cued speech have better phonological awareness, as revealed by rhyme judgment performance (Charlier & Leybaert, 2000 for Cued French) and rhyme generation skills (Paire-Ficout et al., 2003 and Leybaert et al., 2011 for Cued French; LaSasso et al. (2003) for Cued American English), with performance equivalent to their

³³ Although initially developed in English-speaking countries, cued speech has now been adapted to more than 60 spoken languages (Shull & Crain, 2010). Each of these spoken languages has its own cued speech system, adapted to its own phonological system (i.e., placements and configurations of the hand may therefore vary from one system to another). Since our study deals with the French language, we use the term Cued French when referring to the language manually cued for our participants. We restrict the use of the term cued speech to refer to the communication mode in general, without targeting a given language (see Fleetwood & Metzger (1998) for more information)

peers with typical hearing when cued speech exposure has been intensive. Such benefits have also been demonstrated for the specific population of children with cochlear implants perception (Cochard, 2003; Descourtieux et al., 1999; Hage & Leybaert, 2005; Bouton et al., 2011; Colin et al., 2017).

Based on these studies, the following resulting hypothesis can be formulated: better speech perception skills and better phonological awareness due to cued speech proficiency are likely to result in improvement of speech production. To our knowledge, the potential benefits of cued speech on speech production in children with cochlear implants have rarely been investigated. The studies of Vieu et al. (1998) and Kos et al. (2009) have shown that cochlear implantation increases significantly speech intelligibility scores, in particular when children were exposed to cued speech before implantation. In a more recent study, Machart et al. (submitted) studied accuracy of phoneme production in children with cochlear implants with high vs. low receptive cued speech proficiency. They showed that cued speech proficiency was related to improved production of voicing and nasal contrast and of manner and place of articulation.

The long-term consequences of cued speech exposure on speech production abilities need to be farther explored, as they are of crucial importance for the social and academic development of children with hearing impairment raised in a mainly oral environment. The present study proposes an acoustic and articulatory analysis of the impact of cued speech proficiency on the speech production of children with cochlear implants.

Although several studies have used acoustic measures to describe vowel and consonant development in children with cochlear implant, very few have characterized the underlying articulatory gestures used by those children in order to achieve a given acoustic-perceptual target. Concerning vowel production, Seifert et al. (2002) have used acoustic measurements to show that children who received a cochlear implant before the age of four have better acoustic and articulatory control of their production than peers who had been implanted later. Conflicting opinions emerged from acoustic studies regarding the evolution of the size of the vowel space after a cochlear implantation (Hocevar-Boltezar et al., 2008; Kunisue et al., 2006; Liker et al., 2007; Löfkvist et al., 2020; Ryalls et al., 2003), which particularly echoes the various, sometimes contradictory, acoustic and articulatory works concerning speech motor development in children with typical hearing (Barbier et al., 2020; Ménard et al., 2020; Noiray et al., 2019; Zharkova,

2019). Fagniard et al. (2020) identified atypical production of nasal vowel contrasts. One of the rare articulatory studies on speech production by children with cochlear implants, Turgeon et al (2017), showed that these children distinguish between places of articulation in vowels in the same way as their peers with normal hearing, although they show articulatory difficulties in producing the height contrast. As concerns consonant production, acoustics studies have shown that sibilant fricatives, which are among the latest acquired consonants in typical development (MacLeod et al., 2011, among others), remain less accurate than for peers with typical hearing (Reidy et al., 2017), and that children with cochlear implants have difficulty in producing manner of articulation (Grandon & Vilain, 2020) and place of articulation in fricative consonants (Grandon, 2016; Grandon & Vilain, 2020; Mildner & Liker, 2008) as well as voicing contrast in plosive consonants (Grandon et al., 2017; Horga & Liker, 2006). To our knowledge, no articulatory study has addressed the question of consonant production in children with cochlear implants.

RESEARCH QUESTION

The present study aims to investigate whether and how cued speech proficiency may improve speech articulation in French-speaking children with cochlear implants, even for consonants that are acquired late by children with typical hearing, such as sibilant fricatives. Speech production will be assessed with acoustic and echographic articulatory measurements in two groups of children with cochlear implants, with high vs. low receptive cued speech proficiency, compared with a group of children with typical hearing.

To better quantify the influence of cued speech reading skills on articulatory precision, we choose to focus on the stop consonants /t/ and /k/ and the sibilant fricatives /s/ and /ʃ/. These consonants, which can be distinguished by the horizontal position of the tongue (alveolar for /t/ and /s/, post-alveolar for /ʃ/, velar for /k/) and the vertical position of the tongue relative to the palate (occlusive contact with the palatal vault in /t/ and /k/ vs constriction in /s/ and /ʃ/), are among the most frequent phonemes substituted by children with cochlear implants (Machart et al., 2019). Furthermore, they involve phonological contrasts that are invisible, thus highly relevant in children who use cued speech. It is predicted that the contrasts along the place of articulation feature in plosives

(represented by /t/ vs. /k/) and in sibilants fricative (represented by /s/ vs /ʃ/) will be greater in children with higher cued speech reading skills.

METHODS

Participants

Following the same methodology as in Machart et al. (submitted), eight children with profound hearing loss fitted with cochlear implants and aged 65 to 133 months took part in this study (CI group) (age = 102.55 months, SD = 19.35). All the children in this group were recruited at Saint Jude School in Longueuil, Montreal, Quebec, where specialized teachers and Speech and Language Therapists (SLTs) used cued speech in its Canadian French version (Canadian French Cued Speech) to convey their speech. All participants were monolingual and used oral language as a primary mode of communication and none of them had been exposed to Quebec Sign Language (LSQ). However, exposure to cued speech does not guarantee a high proficiency of decoding performance of manual keys (Colin et al., 2015). Moreover, cue reading level³⁴ has been shown to have an important role in speech production (Machart et al., 2019, submitted), a cued speech reading level scale (Appendix 7.1) was thus given to SLTs who classified children according to their cue reading skills. Children were therefore split into two subgroups according to their cued speech proficiency. Participants in the CI- group had low cue reading skills, that is, they could at most decode a few familiar words at slow speed (level 4 of the scale, Appendix 7.1). This group consisted of three children including one girl from 65 to 133 months (age = 101 months, SD = 27.95). Participants in the CI+ group had high cue reading skills, that is, they could decode words and/or sentences at normal speed or a slightly reduced speed of speech (levels 1, 2 and 3 of the scale, Appendix 7.1). This group was composed of five children including five girls from 89 to 121 months (age = 103.55 months, SD = 10.85).

Three children in the CI- group and in the CI+ group were fitted with two cochlear implants. The other three children (i.e., one in the CI- group and two in the CI+ group) were fitted with one cochlear implant and a hearing aid on the other ear. Demographics of the children with hearing impairment are presented in Table 7.1. Hearing age was taken as the duration of implant use (i.e., the time elapsed since the first fitting with a cochlear implant), which appeared as a more informative and more comparable variable than the

³⁴ Cue reading level refers to the ability of “decoding” manual keys

duration of hearing aid use. The mean duration of implant use was 64.60 months (SD = 29.66). The mean age at implantation was 37.96 months (SD = 19.27). All but one child had been implanted after 24 months (from 18 to 75 months).

The CI group was compared with a group of 10 children with typical hearing (TH group) aged between 52 and 137 months (age = 96.25 months, SD = 25.68), including six girls. None of the typical-hearing peers had ever been exposed to Canadian Cued French or LSQ. In this group, hearing age was defined as chronological age. All typical-hearing children had detection thresholds better than 25 dB HL (decibel Hearing Level) at every frequency, which corresponds to typical hearing. None of them reported any speech problems or had a learning disability or other known medical condition.

All participants (i.e., CI-, CI+ and TH) had Canadian French as their first language. Each child's parents, in each group of participants, gave written, informed consent in accordance with the Board of Ethics of Université du Québec à Montréal. Parents also completed a survey on their child's language development and background. This provided further individual and environmental information and allowed us to eliminate any possible associated disorder. Data were collected anonymously, according to GDPR regulations.

Speaker	Gender	Chronological age (in months)	Implantation age	Hearing age (in months)	Cued speech reading level
005	F	65	18	47	CI-
004	M	102	54	48	CI-
003	M	133	24	109	CI-
007	F	89	75	14	CI+
009	F	102	24	78	CI+
010	F	102	27	75	CI+
001	F	103	49	54	CI+
006	F	121	24	97	CI+

Table 7.1: Demographics of children in the CI group

Materials and procedure

Speech production task: picture naming

This articulatory study offers to observe the benefits of cued speech on the articulatory gestures of children with cochlear implants. A first condition without the ultrasound probe was recorded (noUS condition), to observe the influence of the ultrasound probe on the production. A preliminary analysis of these acoustic data is available in Machart et al. (submitted). A second condition, presented here, consisted in recording the lingual movements using an ultrasound system (US condition). This study was pre-registered on Open Science Framework ([10.17605/OSF.IO/V8JAQ](https://osf.io/V8JAQ)).

The corpus consisted of four simple words including one of the four targeted consonants /t/, /k/, /s/ or /ʃ/, which are frequently substituted by children with cochlear implants, according to place of articulation. The stimuli were simple words chosen for their frequency and imageability. All the words were disyllabic and included the target consonant in initial position and followed by vowel /a/, since word-initial consonants are usually produced with higher articulatory precision. This resulted in the following four French words: “tapis” /tapi/ *carpet*, “carotte” /kaʁɔt/ *carrot*, “sapin” /sapɛ̃/ *fir tree* and “chapeau” /ʃapo/ *hat*. To facilitate the detection of acoustic events such as burst onset in occlusive stops, all words were produced in a carrier sentence: “C’est les...” /sele.../ “*It is...*”. Each word was produced 6 times and prompted with 6 different pictures to make the task more pleasant to the children. A total of 36 tokens per condition (i.e., noUS vs US) allowed us to minimize fatigue while ensuring a sufficient number of repetitions. The order of the stimuli was randomized between subjects and across conditions. To obtain reference data for the palate trace, children were asked to swallow a mouthful of water twice, after the picture-naming task.

Phonological awareness test

To situate our participants in their development of phonological representations, a phonological awareness test was administered after the picture-naming task. This phonological awareness test consisted of a rhyme judgment task, a syllable deletion task in CVCV pseudo-words, and a phoneme deletion task in CVC. Children over 6 years also performed phoneme deletions in CCV (adapted from Caudrelie et al., 2019). The rhyme judgment task was taken from a French Canadian test for preschoolers (Lefebvre et al.,

2008), while the other tasks were taken from BELEC (Mousty et al., 1994). When instructions were not understood by the participant, the task was not taken into account in the phonological awareness score. One subject with typical hearing and aged 52 months had no score in the phonological awareness test. CI and TH participants had similar phonological awareness at the time of the study.

Procedure

The child sat in front of a computer screen on which the pictures to be named were displayed. Simultaneous acoustic and ultrasound recordings of the target sentences were made. The acoustic signal was recorded using a high-quality Audio-Technica microphone (Omnidirectional condenser Headworn microphone, model number BP892). The SonoSite 180 Plus ultrasound system was used to synchronously record tongue displacement. This non-invasive technique has been shown to be very suitable for phonetic studies, since it provides a view of the global tongue contour in the mid-sagittal or coronal plane (Ménard et al., 2012, 2014; Ménard, Perrier, et al., 2013). A 15-mm broadband (4–2 MHz) curved array transducer (with a field of view of 101 degrees) was used. The internal frame rate was 100 frames per second. The visual signal provided by the ultrasound and the audio signal were synchronized through a Panasonic AGDVX100 digital camera. As a result, the output frame rate of the ultrasound signal was 29.97 frames per second (standard NTSC frame rate). Acoustic and articulatory recordings of the child's productions were synchronously recorded using a Blackmagic Intensity shuffle. The ultrasound system was placed on a table next to him or her. The child wore a helmet with an elastic band attached to hold the probe in place under his or her chin while allowing free movements of the jaw (Figure 7.1). One of the experimenters held the ultrasound probe, to ensure sufficient pressure for the detection of tongue movements and also to make sure that the probe made contact with the chin (Figure 7.1). This protocol allowed that the resulting tongue images are in similar head-based coordination systems across all conditions. For all participants, the probe was positioned so that in the rest position, the largest tongue contour (from the root to the tip) could be seen on the image from the leftmost point to the rightmost point, despite the presence of the shadows of the jaw and the hyoid bone usually associated with ultrasound imaging. Visual inspection by the experimenter ensured that the occlusal planes were comparable across participants.

Images were digitized using a digital camera at a rate of 29.97 images per second (standard NTSC rate).

In addition, a mini video camera was positioned in front of the mouth to record simultaneously the movement of the lips, of the head and of the ultrasound probe (see blue dots on Figure 7.1). To that end, 9 adhesive blue markers (about 5 mm-diameter) were positioned on the participant's head and on the probe: three on the forehead, two on the upper and lower lips and four on the ultrasound probe.

An auditory screening test was completed with children with typical hearing to eliminate a possible hearing disorder (perception at 20 dB on the frequencies 250, 500, 1000, 2000, 4000 and 8000 Hz, using an Electronica 9910 audiometer).

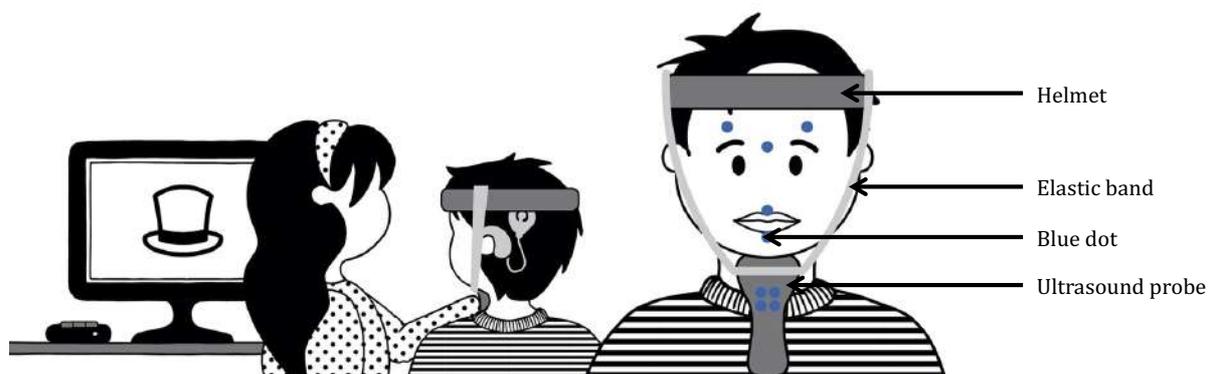


Figure 7.1: Set up of the experiment

Data processing

Acoustic data

All the items produced by the children were perceptually assessed by an experienced phonetician and manually segmented and annotated on Praat (Boersma & Weenink, 2019). All the data were digitized at a rate of 44,000Hz but the acoustic signal was downsampled to 16,000 Hz to achieve more accurate formant detection in the [0, 6000 Hz] range. The beginning and the end of each target consonant were marked on an interval tier. To observe the ability of each group of participants to distinguish between places of articulation in stop consonants (i.e., /t/ and /k/) and in fricative consonants (i.e., /s/ and /ʃ/), we first extracted the formant values of F1, F2 and F3 at the end of the

consonant (i.e., vowel onset). Formants were extracted based on the Burg algorithm implemented in Praat. The window length varied from 0.015 to 0.020, with a pre-emphasis of 80. Likewise, formant values for plosives (burst) and fricatives were measured using the Burg algorithm. Outlier values related to measurement errors were all corrected manually. Second, to better characterize the place of articulation in each fricative, the four spectral moments (mean, variance, skewness and kurtosis) were measured based on a spectral analysis performed on a 40-ms window located at consonant mid-point. The mean difference between centers of gravity is also calculated for each group.

Articulatory data

Tongue contours were automatically extracted using the publicly available SLURP algorithm (Laporte, 2018; Laporte & Ménard, 2018), which is integrated into the tongue contour tracking program GetContours (Tiede, 2015) available under MATLAB. Several authors agreed that the SLURP algorithm allows an accurate and complete extraction of tongue contours from ultrasound images, over a large number of frames (Kabakoff et al., 2022; Whalen et al., 2019).

For each tongue contour, the Mean Curvature Index (MCI) values (Dawson et al., 2016), the (x;y) coordinates of the highest point of the tongue (Ménard, Toupin, et al., 2013) and the closest point of the tongue to the palate (Ohkubo & Scobbie, 2019) were extracted. The difference between MCI values, between places of articulation of the highest point of the tongue and between places of articulation of the closest point to the palate are also calculated for each group.

To ensure that all of our analyses were performed in the same plane, and to strengthen the reliability of our results, head movement correction was performed prior to extraction of curvature values, highest point of the tongue and closest point to the palate. The nine blue dots placed on the participant's face and on the ultrasound probe (Figure 7.1) allow measurement of ultrasound probe displacement along the x- and y- axes. Millimetre based coordinates were then calculated with respect to the probe pixel-to-mm-ratio information which resulted in the same coordinate system reference as for tongue contours (see Noiray et al., 2020 for more details).

Statistical analyses

All graphs and statistical analyses were done with the R software (R Development Core Team, 2012). Different types of statistical analysis methods were used in this study.

Phoneme accuracy

Some participants did not produce the expected number of items. Therefore, an analysis of phoneme accuracy in each group was realized using a backward step-wise variable selection with model comparisons to find the best-fitting linear model (*lm* function in R). The dependent variable was the average score in the whole task. Factors and interactions which did not improve model fit were excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Chronological age or Hearing age.

Only productions deemed perceptually acceptable by an experienced phonetician were included in the acoustic and articulatory statistical analyses of stop and fricative production (Table 7.2). One participant of the CI+ group was not part of the statistical analysis for the stops and two participants of the CI- group were not part of the statistical analyses for the fricatives because they produced less than 50% accuracy by phoneme. One participant in the TH group was excluded from the statistical analyses for center of gravity in fricatives because interfering microphone noise prevented measurement in the high frequencies.

Acoustic and articulatory data

Linear mixed-effect models (*lme* function in R) were used to analyze F1, F2 and F3 values, centers of gravity, MCI, x coordinates of the highest point of the tongue and x coordinates of the closest point of the tongue to the palate in stop and fricative production. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. First, all random-effect factors and fixed-effect factors of interest were included, alone and in interaction. Factors which did not improve model fit were then excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Consonant (i.e., /t/ or /k/ for the stops and /s/ or /ʃ/ for the fricatives). Only Participant was introduced as a random-effect factor. When an interaction of factors was proven to be significant, multiple comparison tests were run, using the *glht* function in package *multcomp* in R.

Linear models (*lm* function in package *stats* in R) were used to examine the difference between centers of gravity, the difference between MCI measures, the difference between place of articulation of the highest point of the tongue and the difference between places of articulation of the closest point of the tongue to the palate. A backward step-wise variable selection with model comparisons was applied to find the best-fitting model. Factors and interactions which did not improve model fit were excluded (*anova* function in R with a threshold of $p < .05$). Possible fixed-effect factors were Group and Chronological_age or Hearing_age.

Speaker	Group	Production score (%)			
		/t/	/k/	/s/	/ʃ/
005	CI-	83	100	100	83
004	CI-	100	100	100	100
003	CI-	100	100	100	0
007	CI+	100	100	100	100
009	CI+	0	100	100	100
010	CI+	100	100	100	100
001	CI+	100	100	100	100
006	CI+	100	100	100	100
008	TH	100	100	100	100
013	TH	100	83	100	100
016	TH	100	100	100	100
017	TH	100	100	100	100
011	TH	100	100	100	100
018	TH	100	100	100	100
019	TH	83	100	100	100
015	TH	100	100	100	100
012	TH	100	100	100	100
014	TH	100	100	100	100

Table 7.2: Productions deemed perceptually acceptable for each consonant, by participants (classified by group and by chronological age). Grey boxes indicate productions which are not part of the statistical analyses.

RESULTS

Analysis of stop production according to cued speech reading level (i.e., CI-, CI+ and TH)

Acoustic data

- Effect of ultrasound probe on production

The best-fitted model for the analysis of the influence of the ultrasound probe on the production of stop consonant includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH), Modality (i.e., noUS and US) and Consonant (i.e., /t/ and /k/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. A triple interaction is observed between Group, Modality and Consonant.

Figure 7.2 shows that there is no effect of Modality on F1 values, in any group. However, an effect of Modality is observed in CI+ with lower F2 and F3 values in /k/ with the ultrasound probe than without (respectively $p < .001$ and $p = .007$). No effect of Modality is observed in CI- and TH for F2 and F3 values.

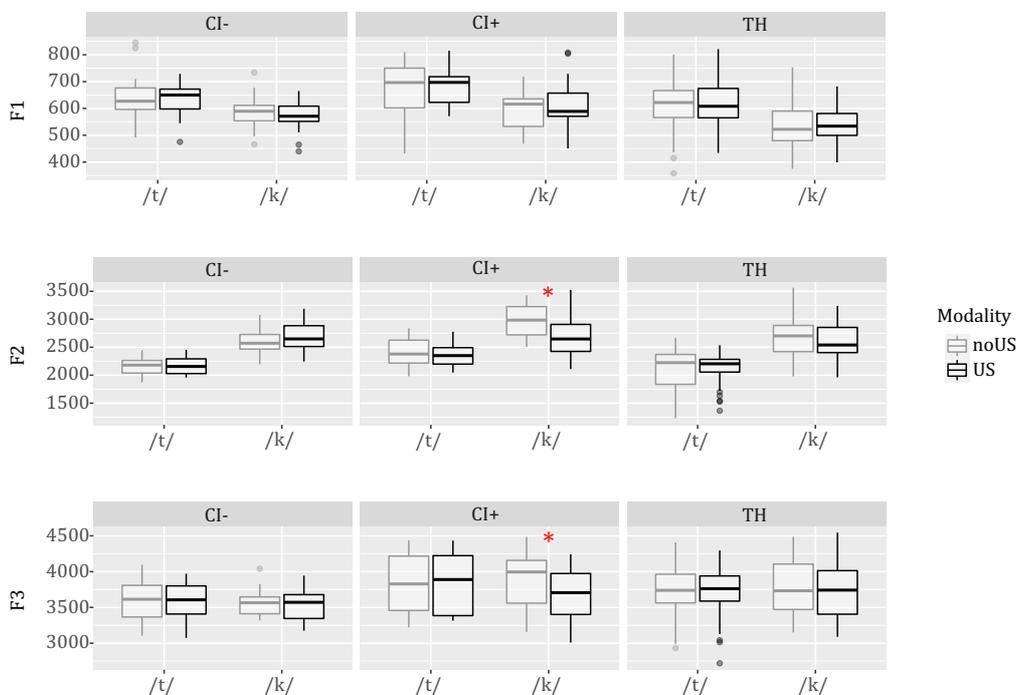


Figure 7.2: Difference between the two conditions (without the ultrasound probe in grey, and with the ultrasound probe in black). Mean of F1 is given in the upper panel, mean of F2 is given in the middle panel and mean of F3 is given in the bottom panel. Red stars indicate a significant difference.

- F1

The best-fitted model for the analysis of F1 in stop production only includes Consonant (i.e., /t/ and /k/) as a fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH produce a significantly higher F1 in /t/ than in /k/ ($p < .001$) (Figure 7.3, upper panel).

- F2

The best-fitted model for the analysis of F2 in stop production only includes Consonant (i.e., /t/ and /k/) as a fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH produce a significantly lower F2 in /t/ than in /k/ ($p < .001$) (Figure 7.3, middle panel).

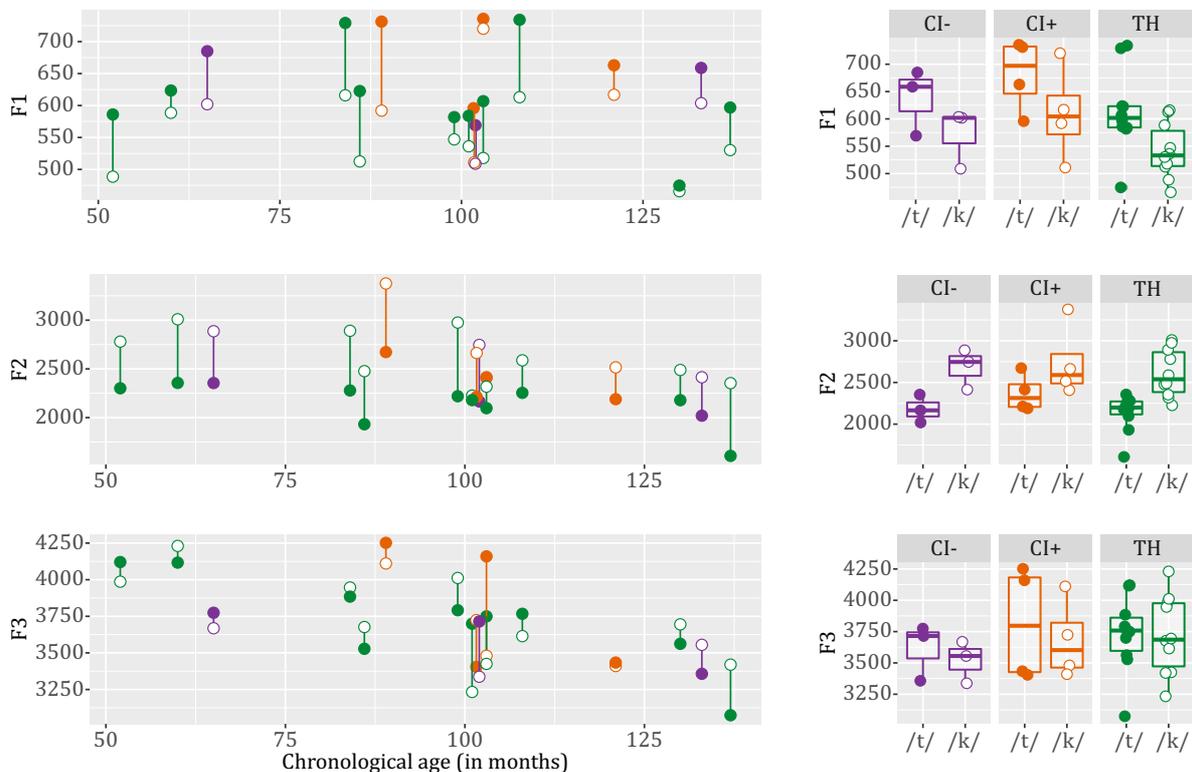


Figure 7.3: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.

- F3

The best-fitted model for the analysis of F3 in stop production does not include any fixed-effect factor (Figure 7.3, bottom panel). Neither effect of Group or Consonant are observed. CI-, CI+ and TH do not distinguish between stop according to F3.

Articulatory data

- MCI

The best-fitted model for the analysis of MCI in stop production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /t/ and /k/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect of Consonant (Figure 7.4): CI-, CI+ and TH show a significantly lower MCI in /t/ than in /k/ (respectively $p = .010$, $p < .001$ and $p < .001$). No significant difference is observed between groups for any of the two stops.

- Contrast between MCI values

The best-fitted model for the analyses of the difference between MCI values of the stop consonants /t/ and /k/ only includes Group (Figure 7.4, bottom right panel). CI- show a slightly lower difference than that of TH ($p = .081$). The difference between MCI values in CI+ is not significantly different than that of TH. No difference is observed between CI- and CI+.

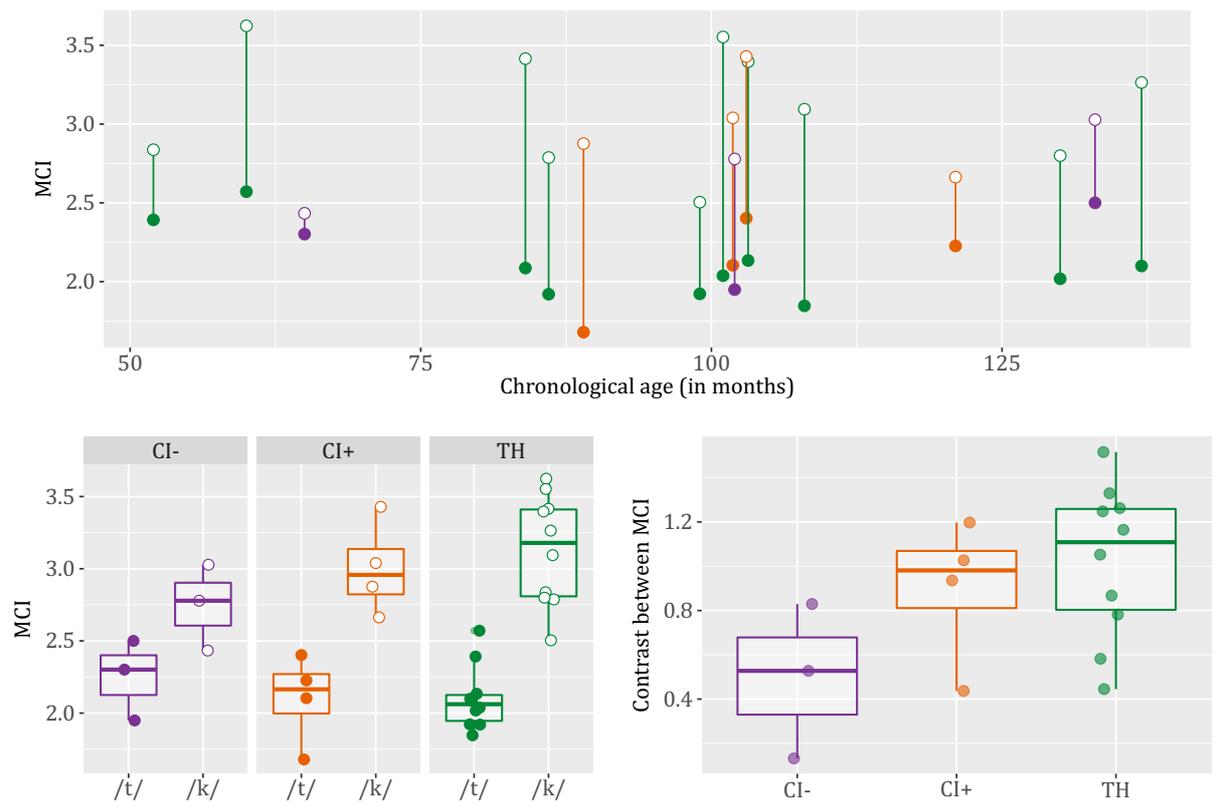


Figure 7.4: Mean MCI values for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean MCI values are illustrated in the bottom right panel.

- Front-back index

The best-fitted model for the analysis of the front-back index of the highest point of the tongue in stop production only includes Consonant (i.e., /t/ and /k/) as a fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH distinguish significantly between places of articulation in /t/ and /k/ ($p = .002$), with a more anterior articulation in /t/ (Figure 7.5).

- Contrast between front-back index

The best-fitted model for the analysis of the contrast between front-back index of the highest point of the tongue in stop production does not include any fixed-effect factor (Figure 7.5, bottom right panel). Neither effect of Group or Consonant are observed.

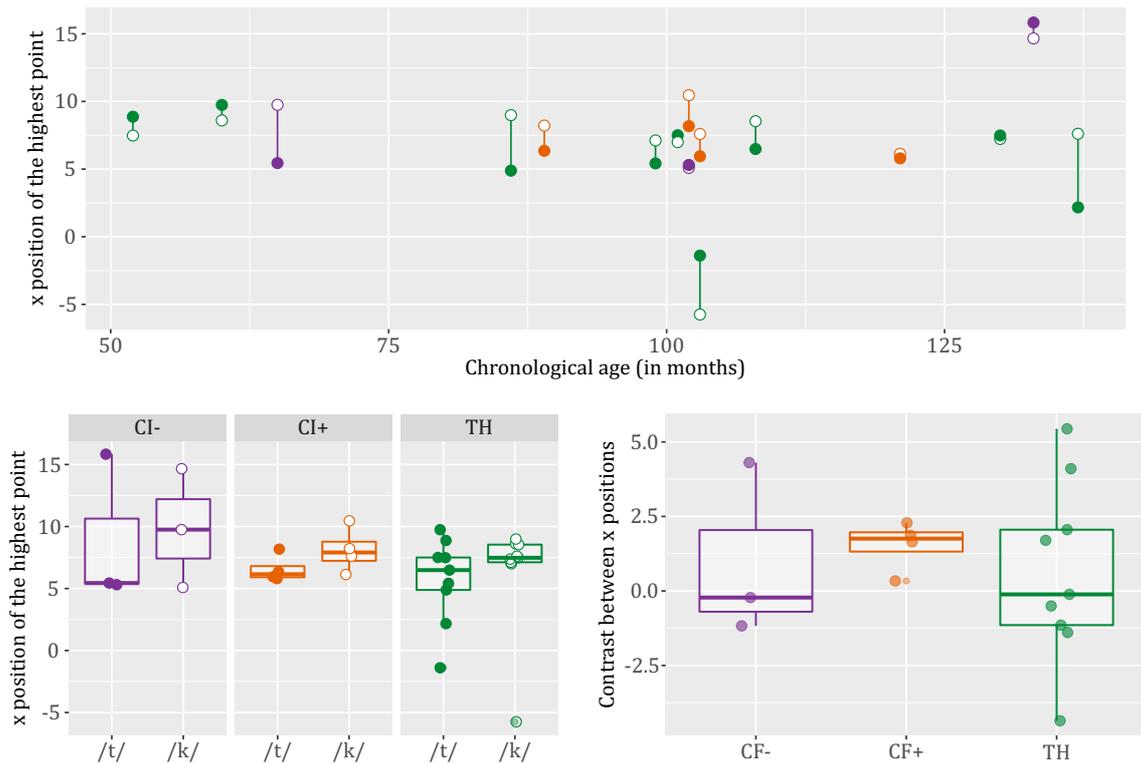


Figure 7.5: Mean x position of the highest point of the tongue for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.

- Constriction place

The best-fitted model for the analysis of the place of the constriction in stop production only includes Consonant (i.e., /t/ and /k/) as a fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH distinguish significantly between places of articulation in /t/ and /k/ ($p < .001$), with a more anterior articulation in /t/ (Figure 7.6).

- Contrast between constriction places

The best-fitted model for the analysis of the contrast between constriction places in stop production does not include any fixed-effect factor (Figure 7.6, bottom right panel). Neither effect of Group or Consonant are observed.

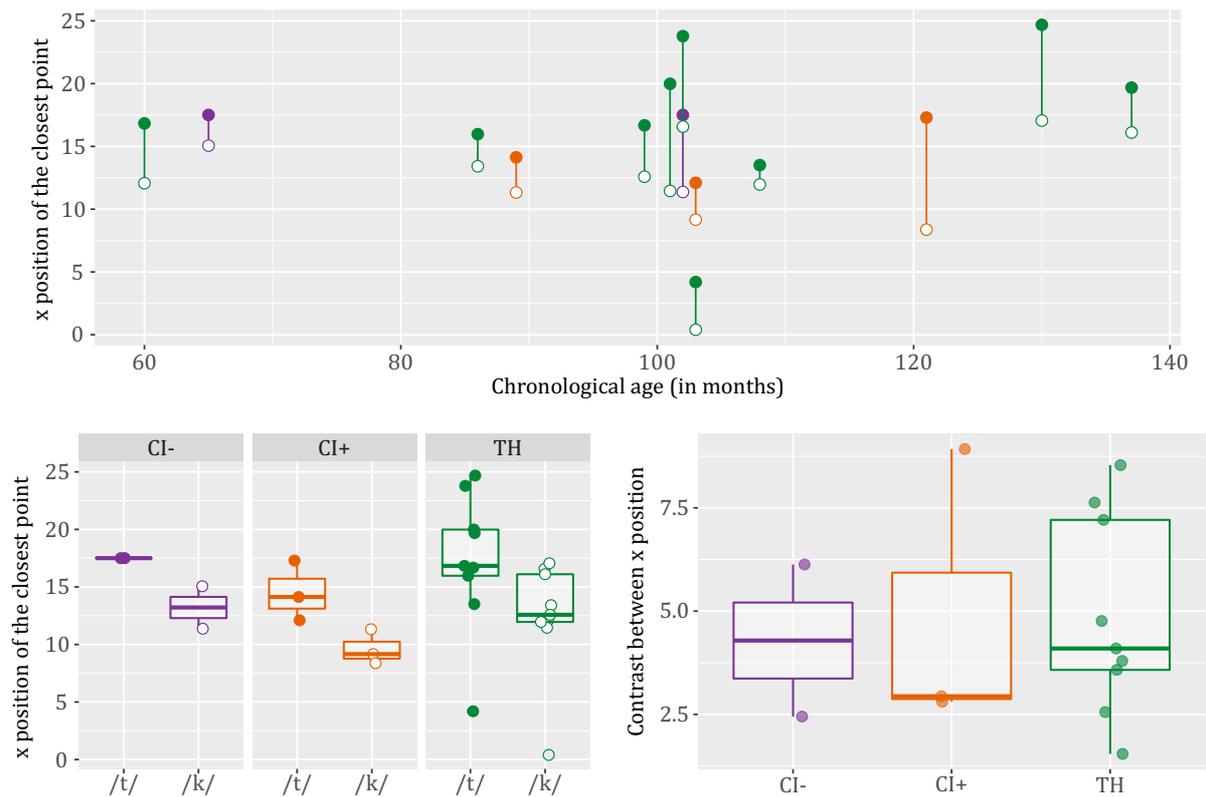


Figure 7.6: Mean x position of the constriction place for each stop consonant (/t/ solid circle, and /k/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.

Analysis of fricative production according to cued speech reading level (i.e., CI-, CI+ and TH)

Acoustic data

- Effect of ultrasound probe on production

The best-fitted model for the analysis of the influence of the ultrasound probe on the production of fricative consonant includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH), Modality (i.e., noUS and US) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. A triple interaction is observed between Group, Modality and Consonant.

Figure 7.7 shows that there is no effect of Modality on F1 values, in the CI+ and TH groups. A slight effect is observed in CI- with lower F1 values in /s/ with the ultrasound probe (p

= .058). An effect of Modality is observed in CI+ with slightly lower F2 values in /s/ ($p = .052$) and higher F3 values in /ʃ/ ($p = .032$) with the ultrasound probe than without. An effect of Modality is also observed in TH with lower F2 values with the ultrasound probe than without in both fricatives ($p < .001$). An effect of Modality is finally observed in CI- with lower F3 values in /ʃ/ ($p = .018$) and lower centers of gravity in /s/ ($p = .026$) with the ultrasound probe than without. No other effect of Modality is observed.

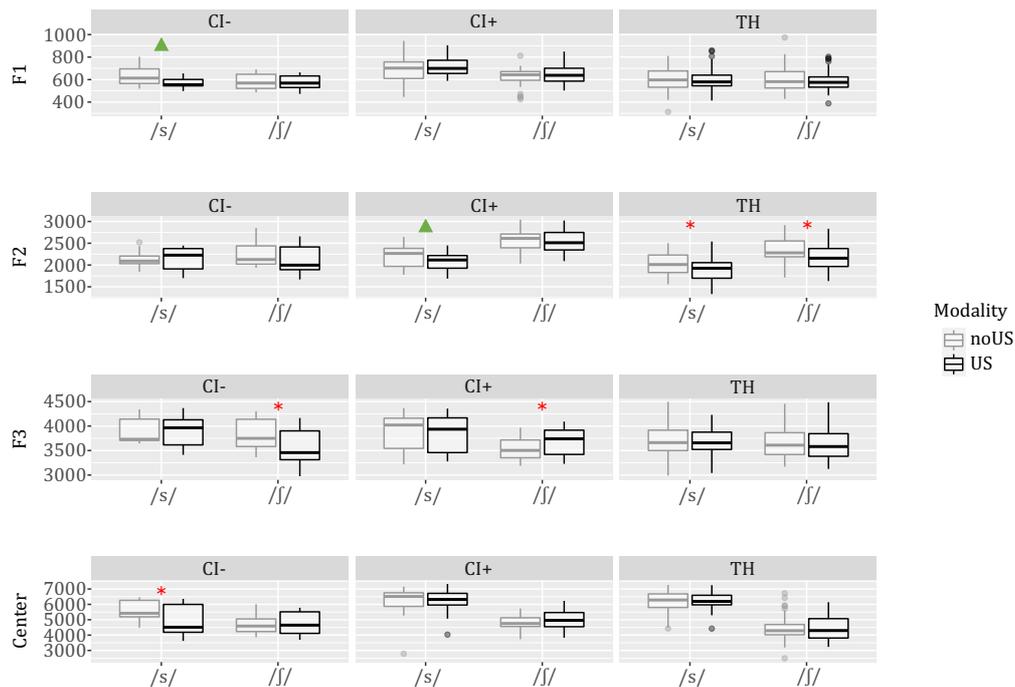


Figure 7.7: Difference between the two conditions (without the ultrasound probe in grey, and with the ultrasound probe in black). Mean of F1 is given in the upper panel, mean of F2 is given in the middle panel and mean of F3 is given in the bottom panel. Red stars indicate a significant difference whereas green triangles indicate a slight difference.

- F1

The best-fitted model for the analysis of F1 in fricative production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect for the consonant in the CI+ group (Figure 7.8, upper panel): CI+ produce a significantly higher F1 in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) whereas CI- and TH do not seem to distinguish between both fricatives. An effect of Group

is also observed for /s/ between CI+ and TH ($p = .029$), with a significantly higher F1 in CI+. There also appears to be a slight effect of Group for /s/ between CI+ and CI- ($p = .092$), with a slightly higher F1 in CI+.

- F2

The best-fitted model for the analysis of F2 in fricative production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect for the consonant in the CI+ group (Figure 7.8, middle panel): CI+ and TH produce a significantly lower F2 in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) whereas CI- do not seem to distinguish between both fricatives. An effect of Group is also observed for /ʃ/ between CI+ and TH ($p = .020$), with a significantly higher F2 in CI+.

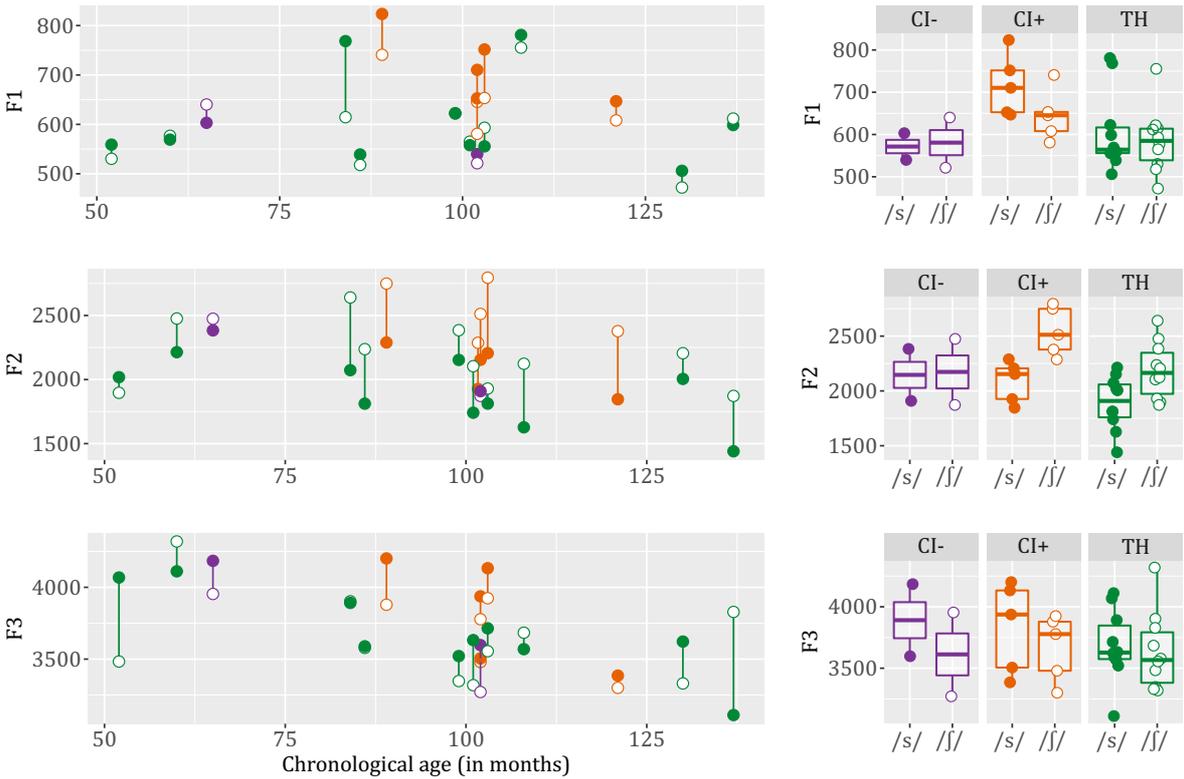


Figure 7.8: Mean of F1 (upper panel), F2 (middle panel) and F3 (bottom panel) for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Left panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the right panel. Each dot corresponds to the mean formant value for one given consonant for each participant.

- F3

The best-fitted model for the analysis of F3 in fricative production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect for the consonant (Figure 7.8, bottom panel): CI- and CI+ produce a significantly higher F3 in /s/ than in /ʃ/ (respectively $p = .004$, and $p = .011$) whereas TH do not seem to distinguish between both fricatives. No significant difference is observed between groups for any of the two fricatives.

- Center of gravity

The best-fitted model for the analysis of center of gravity in fricative production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect for the consonant in the CI+ and the TH groups (Figure 7.9): CI+ and TH produce a significantly higher center of gravity in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) whereas CI- do not seem to distinguish significantly between both fricatives. A significant effect of Group is also observed for /s/ between CI- and CI+ ($p = .005$) and between CI- and TH ($p = .003$), with a lower center of gravity in CI-. A slight effect of Group is also observed for /ʃ/ between CI+ and TH ($p = .099$), with a higher center of gravity in CI+.

- Contrast between centers of gravity

The best-fitted model for the analyses of the contrast between centers of gravity in the fricative consonants /s/ and /ʃ/ only includes Group. CI- show a significantly lower difference than that of TH ($p = .013$). No difference is observed between CI- and CI+ or CI+ and TH (Figure 7.9, bottom right panel).

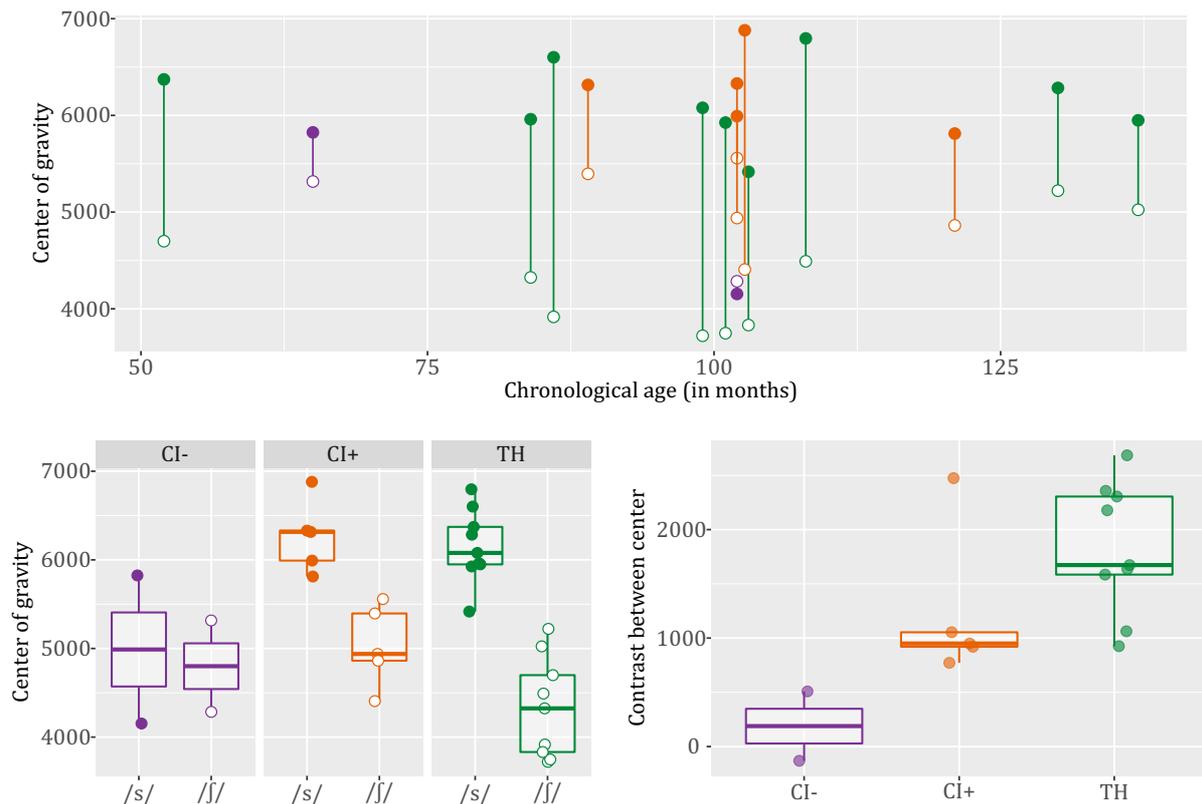


Figure 7.9: Mean center of gravity for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean centers are illustrated in the bottom right panel.

Articulatory data

- MCI

The best-fitted model for the analysis of MCI in fricative production only includes Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH show a significantly lower MCI in /s/ than in /ʃ/ ($p < .001$) (Figure 7.10).

- Contrast between MCI values

The best-fitted model for the analysis of the contrast between MCI values in fricative production does not include any fixed-effect factor (Figure 7.10, bottom right panel). Neither effect of Group or Consonant are observed.

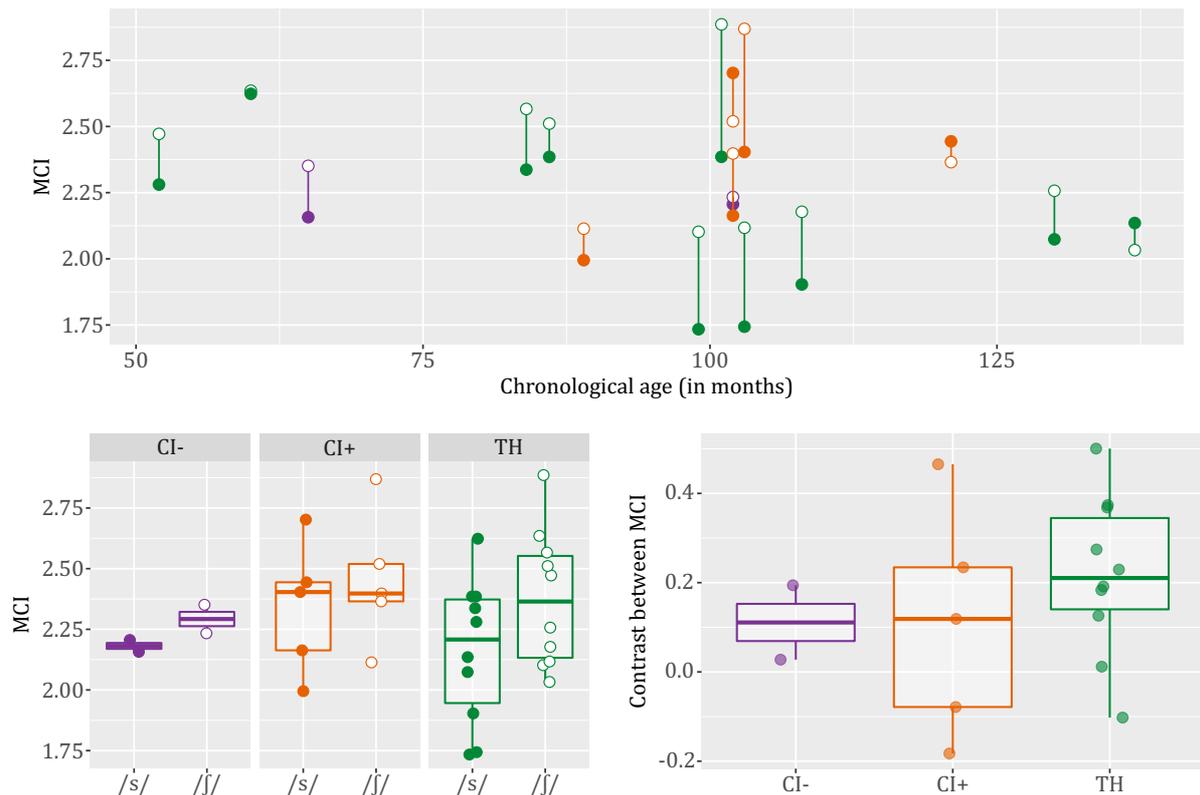


Figure 7.10: Mean MCI values for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean MCI values are illustrated in the bottom right panel.

- Front-back index

The best-fitted model for the analysis of the front-back index the highest point of the tongue in fricative production includes Group (i.e., CI-, CI+ and TH) and Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as fixed-effect factors. Participant is included as a random-effect factor. An interaction is observed between Group and Consonant.

Multiple comparison tests reveal a significant effect of Consonant in the CI+ group (Figure 7.11): CI+ distinguish significantly between places of articulation in /s/ and /ʃ/ ($p < .001$), with a more anterior articulation in /s/ than in /ʃ/, whereas CI- and TH do not seem to distinguish significantly between both fricatives. No significant difference is observed between groups for any of the two fricatives.

- Contrast between front-back index

The best-fitted model for the analyses of the contrast between front-back index of the highest point of the tongue in fricative consonants /s/ and /ʃ/ only includes Group (Figure 7.11, bottom right panel). CI+ show a slightly higher difference than that of TH ($p = .058$). No difference is observed between CI- and CI+ or CI+ and TH.

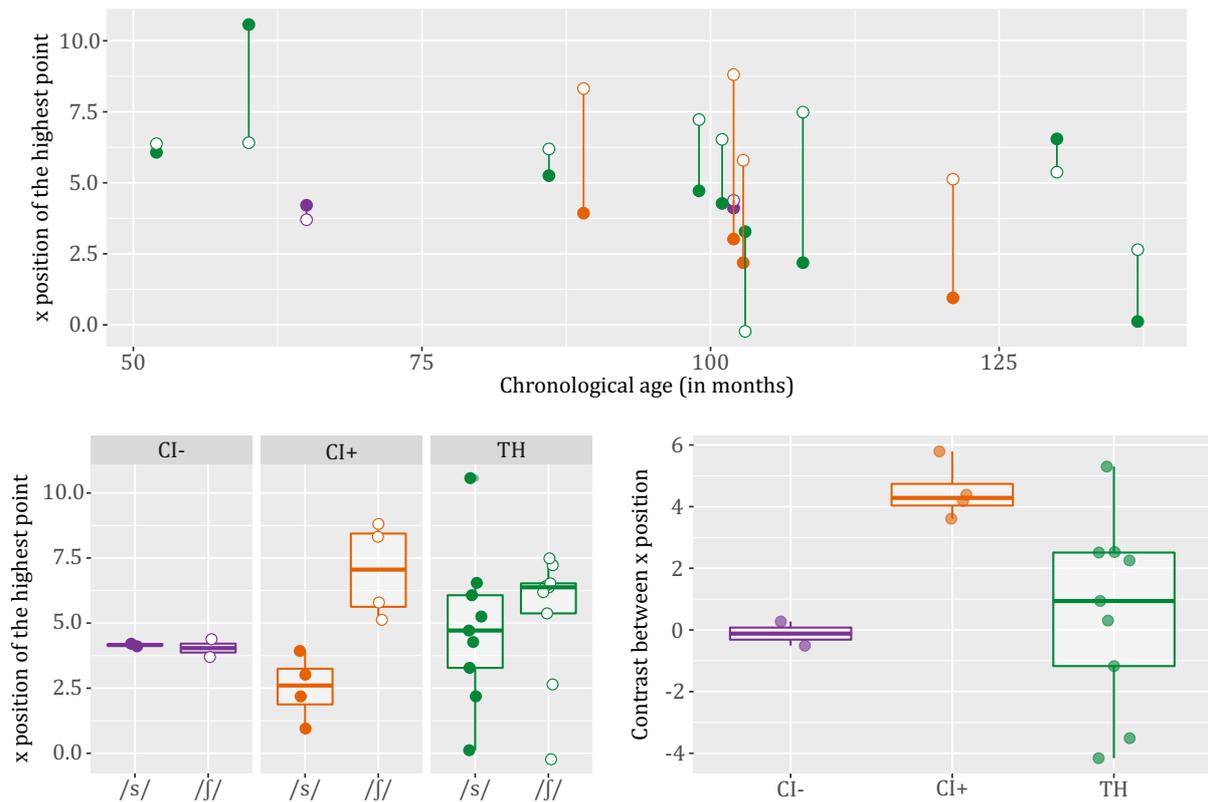


Figure 7.11: Mean x position of the highest point of the tongue for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.

- Constriction place

The best-fitted model for the analysis of the place of the constriction in fricative production only includes Consonant (i.e., /s/ and /ʃ/) as a fixed-effect factor. Participant is included as a random-effect factor. CI-, CI+ and TH distinguish significantly between places of articulation in /s/ and /ʃ/ ($p < .001$), with a more anterior articulation in /s/ than in /ʃ/ (Figure 7.12).

- Contrast between constriction places

The best-fitted model for the analysis of the contrast between constriction places in fricative production does not include any fixed-effect factor (Figure 7.12, bottom right panel). Neither effect of Group or Consonant are observed.

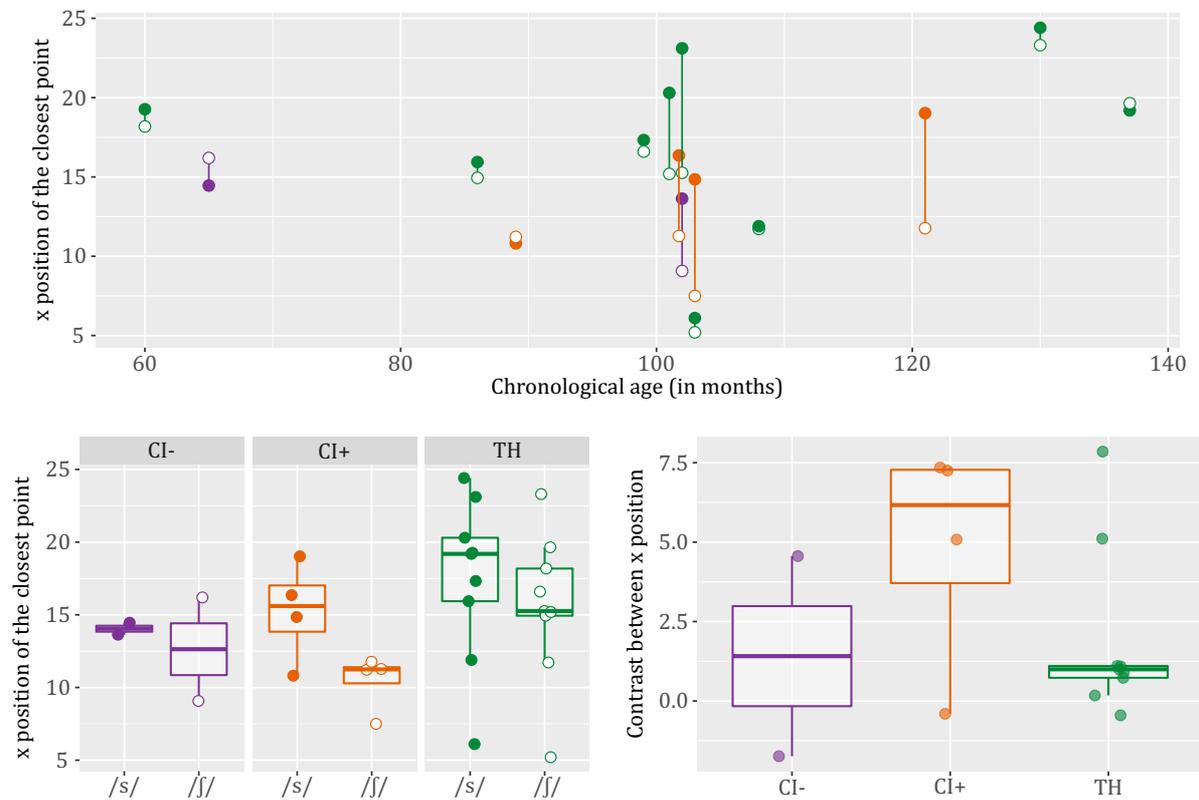


Figure 7.12: Mean x position of the constriction place for each fricative consonant (/s/ solid circle, and /ʃ/ open circle) by group (CI- in purple, CI+ in orange, and TH in green). Upper panel is according to chronological age (in months). Distributions are illustrated by boxplots in the bottom left panel. Contrasts between mean x are illustrated in the bottom right panel.

DISCUSSION

The objective of the present study was to assess whether and how cued speech reading skills may improve speech articulation in French-speaking children with cochlear implants compared to typical-hearing peers. To that aim, acoustic measurements on the formant values at consonant offset for the stops consonants /t/ and /k/ and on formant values at consonant offset and center of gravity for fricatives /s/ and /ʃ/, and articulatory measurements of the front-back index of the highest point of the tongue, of the place of constriction, and of the Mean Curvature Index were performed in two groups of children

with cochlear implants presenting different receptive cued speech proficiency (i.e., the CI+ group with high proficiency vs. the CI- group with low proficiency) and a group of children with typical hearing (the TH group). The main features explored were the contrasts along the place of articulation feature in plosives and in sibilant fricatives. Another question explored was the impact of cued speech reading skills on the production of these contrasts.

Consonant production

As concerns the acoustics of stop consonants, the only significant differences that were found are that F1 values at consonant offset are higher for /t/ than for /k/, F2 values are lower for /t/ than for /k/, and F3 values are equal for both places of articulation for all three groups of children. These results are similar to what was found in our previous study on the same corpus recorded without the ultrasound probe (Machart et al., submitted). As argued in that previous study, F1 values may be influenced indirectly by place of articulation, whereas F2 values seem to be a more direct correlate for place of articulation in children, and F3 is not affected by the alveolar vs velar contrast (contrary to what is usually found for adults, see Schwartz, Boë, et al. (2012)). In sum, our three groups of children produce a significant distinction between the places of articulation for the alveolar /t/ and the velar /k/ stops. Moreover, they seem to produce these places of articulation in the same way, since no group effect was found.

Regarding articulatory data, a consonant effect was found for the horizontal position of the highest point of the tongue, which means that all three groups distinguish between alveolar and velar stops according to the front-back position of the tongue: the tongue is in a more anterior position for the alveolar stop than for the velar stop. There was no group effect for that first articulatory measurement, which means that children in the three groups (CI-, CI+ and TH) produce alveolar and velar stops in the same way. The second articulatory feature we analyzed was the place of constriction, measured as the closest point of the tongue to the palate. Once again, a consonant effect was found, meaning that children do produce a distinction along that parameter, whereas the absence of a group effect showed that all groups produce the contrast in the same way. Finally, the third articulatory parameter was the full contour analysis, using MCI values. MCI values themselves were only distinguished according to place of articulation, with no group effect, confirming that all groups distinguish significantly between consonants with

a more complex curvature in velar stops, as shown in Figure 7.13. However, when the contrast between the MCI values for the two places of articulation was considered, a group effect appeared, and a slightly lower contrast was observed in the CI- group, indicating a reduced distinction between consonants in these children as compared to the other two groups. This result suggests that children with cochlear implants and with low receptive cued speech proficiency might have difficulty producing distinctive tongue shapes for the alveolar and velar stops, and that high receptive cued speech proficiency might allow children with cochlear implants to better adjust tongue curvature to differentiate between stop consonants and to reach productions similar to those of peers with typical hearing.

Concerning the fricative consonants /s/ and /ʃ/, the formant patterns for the children with typical hearing found in this study are consistent with those found in Machart et al. (submitted). They have lower F2 values for /s/ than for /ʃ/, but similar F1 and F3 values for the two consonants. Once again F2 values appear as correlates for place of articulation, and children with typical hearing clearly distinguish between the alveolar and postalveolar places of articulation. The CI+ group (i.e., children with high receptive cued speech proficiency) produce the F2 distinction exactly in the same way as children with typical hearing, whereas children in the CI- group (i.e., with low receptive cued speech proficiency) do not have any difference between /s/ and /ʃ/ for this parameter. Children in the CI- group therefore do not seem to produce a distinction between the alveolar and postalveolar places of articulation for these fricatives. There are two more inter-group effects that are more difficult to interpret: children in the CI+ group produce higher F1 for /s/ than for /ʃ/, and higher F1 for /s/ than the other two groups, and children in the CI+ and CI- groups produce higher F3 for /s/ than for /ʃ/. Articulatory-acoustic simulation will be needed to understand this phenomenon.

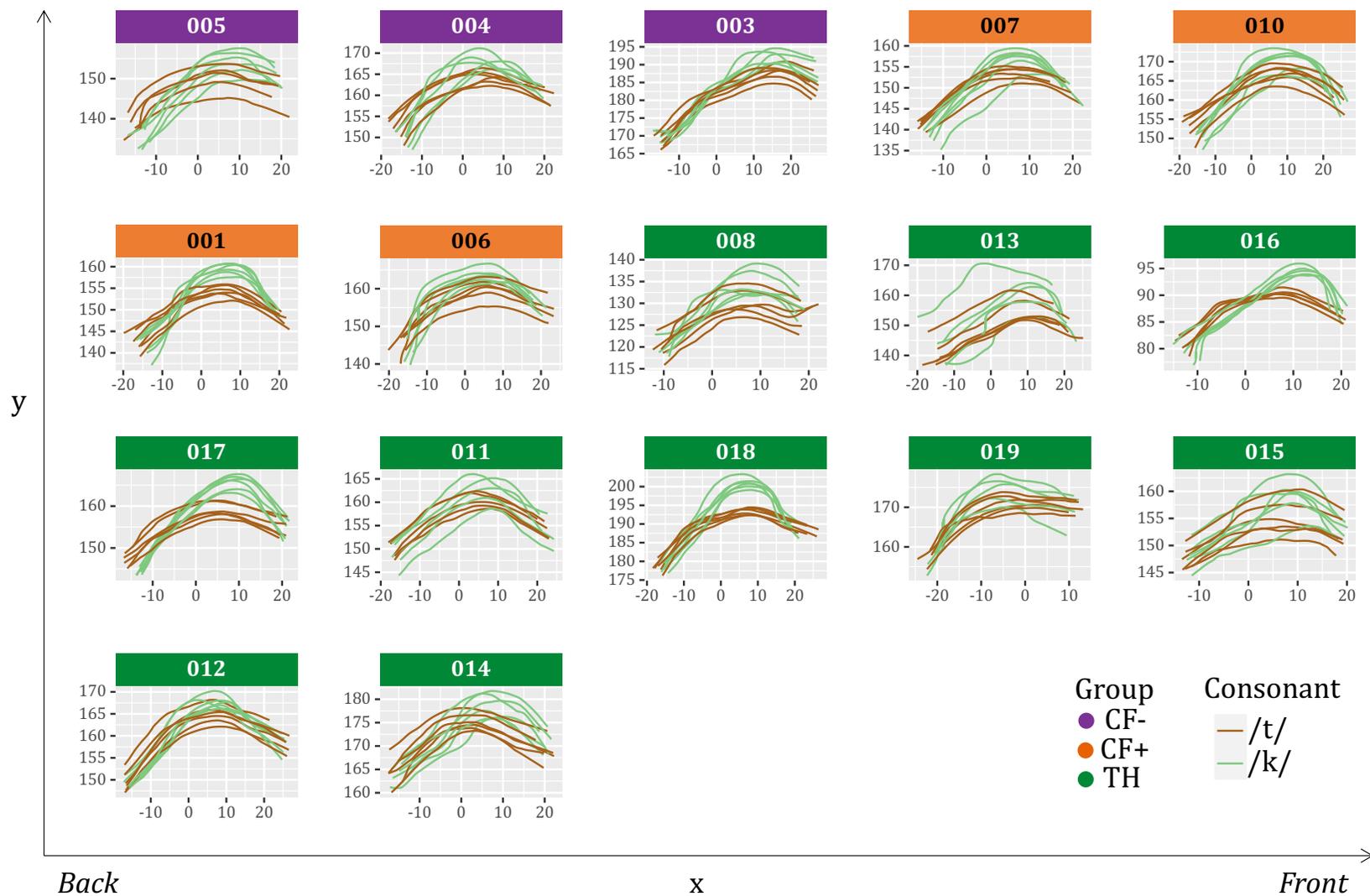


Figure 7.13: Tongue contours for each plosive consonant (/t/ in brown, and /k/ in light green) by group (CF- in purple, CF+ in orange, and TH in dark green). In each group, participants are ranked by chronological age.

In sum, the distinction between alveolar and postalveolar places of articulation according to F2 values distinction suggests that children with cochlear implants and with high cued speech proficiency distinguish significantly between the fricative places of articulation, as well as children with typical hearing, whereas children with lower cued speech reading skills do not distinguish between both fricatives. This result is also observed for the center of gravity: children in the CI- group have equal centers of gravity in /s/ and /ʃ/ whereas children in the CI+ and TH groups distinguish significantly between the two fricatives with a higher center in /s/ than /ʃ/. More importantly, the contrast between centers of gravity of the CI- group is significantly lower than that of the CI+ and TH groups. These observations plead for the view that the higher the receptive cued speech proficiency, the better the differentiation of fricative consonants is, according to place of articulation.

Articulatory data reveal that the highest point of the tongue for /s/ is more anterior than that of /ʃ/ in the CI+ group, whereas the CI- and TH groups do not distinguish significantly between the two consonants. Moreover, the contrast between the highest points of the tongue for the two fricatives is higher in the CI+ than in the TH group. Cued speech proficiency appears to allow children with cochlear implants to distinguish more accurately between later acquired sibilant fricatives than children with typical hearing. As concerns the second articulatory measurement, however, no group effect is found, and all groups produce a more anterior place of constriction in /s/ than in /ʃ/ with no contrast difference between groups. Finally, the MCI values of all three groups are lower in /s/ than in /ʃ/ which is consistent with the adult's production. There is no contrast difference between groups. That is, the CI-, CI+ and TH groups distinguish similarly between tongue contours in fricative consonants, as illustrated in Figure 7.14.



Figure 7.14: Tongue contours for each fricative consonant ($/s/$ in pink, and $/ʃ/$ in blue) by group (CF- in purple, CF+ in orange, and TH in dark green). In each group, participants are ranked by chronological age.

In brief, the results of this study plead for the use of articulatory measurements to further assess speech production in children. Indeed, some differences may appear between acoustic and articulatory results according to consonant distinction. Our acoustic results reveal that CI-, CI+ and TH children all distinguish significantly between alveolar and velar stops which is confirmed by measures on the highest point of the tongue and of the place of constriction but the tongue curvature measure indicates that CI- children distinguish less between both consonants than the other groups. Regarding fricative consonants, acoustic data suggest that CI- children have difficulties in distinguishing between /s/ and /ʃ/ according to F2 values and centers of gravity whereas articulatory data show that the CI- group distinguish between alveolar and postalveolar according to constriction place and Mean Curvature Index but not to the front-back index of the highest point of the tongue. Such differences between groups and measures indicate that children may use different strategies to produce a similar target to peers with typical hearing or with a different cued speech reading level, but also that one measure is not sufficient to characterize speech production in children (Barbier et al., 2020).

Influence of the ultrasound probe on speech production

Although the study of articulatory gestures by ultrasound is not an invasive technique, the addition of the ultrasound probe under the chin of the child can disturb the production of some phonemes, in particular by slightly constraining the movements of the jaw. A study by Villegas et al. (2015), found a small but not significant effect of the ultrasound probe on jaw movements, with an over-articulation with the ultrasound probe. Pucher et al. (2020), for their part, have shown different stabilization headsets may influence formant values in vowel production. To ensure the reliability of our results in the ultrasound modality, a first series of recordings without the probe was performed. The comparison of these two modalities (i.e., noUS vs US) showed an effect of the probe on some acoustic measurements. An effect of the ultrasound probe was observed on the F2 and F3 values of the consonant /k/ in children with cochlear implants and high cued speech reading skills (i.e., CI+ group). In fricative production, an effect of the ultrasound probe was observed on the F2 values of /s/ and /ʃ/ in TH, on the F3 values of /ʃ/ in CI- and CI+ and on the center of gravity of /s/ in CI-. A slight effect was also observed on the F1 values of /s/ in CI- and the F2 values of /s/ in CI+. However, these differences between modalities did not influence the distinction between places of articulation: formant values can be

higher or lower with the addition of the ultrasound probe but the difference between consonants is not altered.

These results show that the ultrasound probe may impact the production of stop and fricative consonants in children but this modification of the movements of the jaw does not interfere with the distinction between places of articulation. Therefore, this possible modification of productions does not invalidate our results concerning acoustic and articulatory measures during stop and fricative consonants production. However, it is important to emphasize this point and to keep this observation in mind when making acoustic and articulatory measurements by ultrasound.

Our results also have important clinical implications. Indeed, our data provide quantitative measures about how children with cochlear implants and children with typical hearing articulate stop and fricative consonants. Such data, especially in French, could help better understand the link between speech motor development and sensory deprivation, mediated or not by exposure to cued speech. Furthermore, in view of recent studies showing how ultrasound images used as a biofeedback technique can be used to improve speech production in clinical settings, as in Haldin et al. (2022) and Preston et al. (2020), it would be interesting to test the effects of ultrasound biofeedback in CI children who are exposed to cued speech. It is likely that since these children have gained refined abilities to decode the visual code, using a visual modality like ultrasound imaging to finely tune speech motor control would be very useful.

Limitations

Although the results of this study support the hypothesis that cued speech reading skills may improve the production of acoustic and articulatory correlates in children with cochlear implants and, thus allow them to produce stops and fricatives in the same way as their peers with typical hearing, some limitations should be noted. First, the sample size of our study is small and the same analyses have to be done with more participants. Particularly, the analysis of fricative consonants only includes two children in the CI-group which does not allow us to make solid observations but rather to highlight trends in their articulatory gestures.

Moreover, our study compares children with cochlear implants according to their cued speech reading skills but to better characterize the positive impact of cued speech on the

production of stop and fricative consonants in children with cochlear implants, it will be necessary to supplement these data by recording children with cochlear implants who have never been exposed to cued speech. Another factor that should potentially influence speech production is duration of cued speech exposure. Many studies has shown that the longer the exposure, the higher the decoding skills (Clarke & Ling, 1976; Périer et al., 1990; Leybaert & Charlier, 1996). In our sample, only one participant in the CI+ group had been exposed for only 14 months to Canadian French Cued Speech. All the other participants have been exposed to Canadian French Cued Speech since, at least, 48 months. As argued by Machart et al. (submitted), but also by Colin et al. (2015, 2017), it appears that a long exposure to cued speech does not seem to be sufficient to promote speech development in children with cochlear implants. Indeed, cued speech reading skills seem to play a more important role in speech production too.

The age at implantation could also influence speech production but our present sample only includes one child in the CI- group with an early implantation (i.e., before 24 months). Our observations therefore seem to confirm that cued speech reading skills can compensate for a late implantation, and allow children with cochlear implants to reach similar production to peers with typical hearing.

As mentioned in previous studies (Machart et al., submitted), socioeconomic status may also influence the development of cued speech reading skills and, therefore, the development of speech production in children with cochlear implants. It would be important to further examine the influence of this factor on speech production abilities.

Since our groups were too small and heterogeneous with regard to these factors, it was not relevant to integrate them into our statistical models. Further studies, with more participants, should take these factors into account to more precisely describe the impact of Canadian Cued French exposure on acoustic production in children with CIs.

CONCLUSION

The results of this study support the claim that cued speech reading skills sustain the development of speech production in children with cochlear implants, by improving their articulatory gestures, particularly for plosive and fricative consonants. Our data highlight that higher cued speech reading skills compensate for the non-visibility of posteriorly articulated phonemes, which allows children with cochlear implants to better produce

tongue gestures in stop and fricative consonants. That is, children with high cued speech reading skills and typical hearing peers distinguish accurately between consonants in the vocal tract, and also according to tongue curvature.

Finally, this work points out the importance of studying objective data and comparing acoustic and articulatory measurements to better characterize speech production. Further investigations with more participants and another group of children with cochlear implants never exposed to cued speech are needed to confirm our observations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the ANR project HEARCOG [grant number ANR-17-CE28-0006-05], and has received a grant from IDEX UGA to the first author. We thank all the children who participated in this study and their parents, as well as St-Jude's school for their help with recruitment and for finding a space to conduct the experiment. We also want to thank Kathleen Bull and all the Speech and Language Therapists of St-Jude's School for their partnership in this project and their availability.

7.3. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

Les résultats de cette troisième et dernière étude exploratoire soutiennent l'hypothèse selon laquelle les compétences phonologiques développées à travers la perception de parole avec LfPC sont transférées vers la production de parole, ce qui permet l'amélioration des gestes articulatoires chez les enfants porteurs d'implants cochléaires, en particulier pour les consonnes plosives et fricatives. Nos données mettent en évidence qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC compense la non-visibilité des phonèmes articulés postérieurement, ce qui permet aux enfants porteurs d'implants cochléaires de produire plus précisément les gestes articulatoires de la langue pour les consonnes plosives et fricatives. Plus précisément, les enfants avec un niveau élevé de décodage de la LfPC, ainsi que leurs pairs normo-entendants, distinguent avec précision le lieu d'articulation des consonnes plosives /t/ et /k/ et des consonnes fricatives /s/ et /ʃ/ en fonction de la position de la langue dans le conduit vocal ainsi que de sa forme. Le tableau 7.3 résume les principaux résultats de cette troisième étude expérimentale.

Par ailleurs, tout comme notre seconde étude, ce travail souligne l'importance d'étudier des données objectives mais également de comparer des mesures acoustiques et articulatoires pour mieux caractériser la production de la parole. Cette étude fournit, enfin, des preuves scientifiques aux cliniciens concernant la façon dont les enfants porteurs d'implants cochléaires et les enfants normo-entendants articulent les consonnes plosives et fricatives. Les techniques non invasives d'échographie par ultrasons pourraient, ainsi, participer à la rééducation de la parole comme le montrent déjà Haldin et al. (2022) ou Preston et al. (2020). Des analyses supplémentaires avec un plus grand nombre de participants ainsi qu'un groupe d'enfants porteurs d'implants cochléaires n'ayant jamais été exposés à la LfPC sont nécessaires pour confirmer nos observations.

		Plosives	Fricatives
ACOUSTIQUE	F1	/t/ > /k/	CI+ : /s/ > /ʃ/ CI- et TH : /s/ = /ʃ/ F1 /s/ CI+ > F1 /s/ TH
	F2	/t/ < /k/	CI+ et TH : /s/ < /ʃ/ CI- : /s/ = /ʃ/ F2 CI+ > F2 TH
	F3	/t/ = /k/	CI- et CI+ : /s/ > /ʃ/ TH : /s/ = /ʃ/
	Centre		CI+ et TH : /s/ > /ʃ/ CI- : /s/ = /ʃ/ Centre CI- < Centre CI+ et TH
	Contraste centre		CI- < TH CI- = CI+ CI+ = TH
ARTICULATOIRE	Antéro-postériorité	/t/ plus antérieur	CI+ : /s/ plus antérieur CI- et TH : /s/ = /ʃ/
	Contraste antéro-postériorité	CI- = CI+ = TH	CI+ > TH CI- = CI+ CI- = TH
	Lieu de constriction	/t/ plus antérieur	/s/ plus antérieur
	Contraste lieu de constriction	CI- = CI+ = TH	CI- = CI+ = TH
	MCI	/t/ < /k/	/s/ < /ʃ/
	Contraste MCI	CI- < TH CI- = CI+ CI+ = TH	CI- = CI+ = TH

Tableau 7.3 : Résumé des résultats de l'étude expérimentale 3

SECTION 4 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CH8. DISCUSSION GENERALE

L'implant cochléaire est l'un des dispositifs de remédiation auditive les plus utilisés aujourd'hui pour pallier la déficience auditive chez l'enfant (cf. Chapitre 1). De nombreux travaux ont porté sur les effets de cette prothèse sur la perception de parole. Il a été démontré que cette technologie, de plus en plus performante grâce notamment à l'augmentation du nombre d'électrodes actives, favorise considérablement l'accès à l'information auditive et, par conséquent améliore la perception de la parole. Toutefois, une grande variabilité demeure dans les résultats post-implantation chez l'enfant ? (Borel & Leybaert, 2020; Colin et al., 2017; Dillon et al., 2004; Leybaert et al., 2011; Sundström et al., 2018). L'information auditive transmise à travers l'implant cochléaire est transformée et partielle, puisqu'elle est codée par un processeur puis véhiculée par un nombre limité d'électrodes, ce qui induit des difficultés de perception de certaines caractéristiques acoustiques fines telles que le trait de nasalité (Borel, 2015; Bouton et al., 2012; Fagniard et al., 2020) ainsi que le trait de lieu d'articulation (Borel, 2015; Bouton et al., 2012). Les traits de voisement et de mode d'articulation semblent mieux perçus, ce qui est probablement lié au type de codage des indices temporels (Leybaert & LaSasso, 2010). Ces difficultés de perception auditive entraînent une limitation des compétences phonologiques avec la mise en place de représentations phonologiques sous-spécifiées (Colin et al., 2017; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2018), ce qui donne lieu à des troubles du langage persistants à dix ans chez un tiers des enfants porteurs d'implants cochléaires (Bouton et al., 2015; Geers et al., 2016; Hansson et al., 2018). Cependant, il apparaît que l'implantation cochléaire précoce, avant 24 mois, améliore les performances langagières post-implantation (Colin et al., 2017; Dillon et al., 2004; Govaerts et al., 2002; Hansson et al., 2018; Leybaert & LaSasso, 2010; Nittrouer et al., 2014) et que la durée d'utilisation de l'implant cochléaire augmente également les bénéfices (Bayard, 2014; Connor et al., 2006; Grandon, 2016; Havy et al., 2013).

Quelques travaux se sont également attachés à décrire les bénéfices de l'implantation cochléaire sur la production de parole. Les études basées sur des évaluations perceptives (transcription phonétique des productions par des auditeurs adultes) mettent en évidence des difficultés à produire le lieu d'articulation (Baudonck et al., 2010; Dillon et al., 2004; Grandon, 2016), les traits de voisement et de mode d'articulation (Kim & Chin, 2008) ainsi que le contraste de nasalité (Fagniard et al., 2020; Sundarrajan et al., 2020).

Les résultats de ces évaluations perceptives sont confirmées par quelques études acoustiques, avec des difficultés de production des contrastes de voisement pour les consonnes plosives (Horga & Liker, 2006), de mode d'articulation (Grandon & Vilain, 2020) et de lieu d'articulation (Grandon, 2016; Grandon & Vilain, 2020; Mildner & Liker, 2008). Enfin, peu d'études se sont intéressées aux aspects articulatoires de la production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires. A notre connaissance, seule une étude met en évidence une production du lieu d'articulation des voyelles similaire à celle de pairs normo-entendants (Turgeon et al., 2017). Les difficultés de production mises en évidence par ces différents travaux sont fortement liées aux difficultés de perception mises en évidence par d'autres auteurs, puisqu'elles concernent les mêmes traits phonétiques.

Cette thèse visait à évaluer les bénéfices éventuels d'un accompagnement en LfPC sur la production de parole des enfants porteurs d'implants cochléaires. En effet, pour compenser l'information acoustique partielle, ainsi que l'information labiale par essence limitée, certains parents font le choix de compléter leur parole à l'aide des clés manuelles du *cued speech* et, ainsi, rendent visibles toutes les caractéristiques phonologiques du discours prononcé (cf. Chapitre 2). Un grand nombre d'études a montré que le fait de parler à un enfant sourd en utilisant simultanément le *cued speech* améliore sa perception de la parole (voir Leybaert et al. (2016) pour une revue), y compris dans le bruit (Bayard et al., 2019), à condition bien sûr que l'enfant ait reçu un entraînement suffisant au décodage du *cued speech*. Mais au-delà de ces bénéfices immédiats, il a été démontré également que l'exposition au *cued speech* favorise ensuite les compétences phonologiques de l'enfant (Charlier & Leybaert, 2000; C. LaSasso & Leybaert, 2003; Paire-Ficout et al., 2003). Et cette amélioration des compétences phonologiques semble avoir pour conséquence une amélioration du traitement des informations audio-visuelles de parole, puisque deux études ont montré que les enfants ayant reçu une exposition au *cued speech* possèdent de meilleures compétences que leurs pairs en lecture labiale sans information manuelle (Aparicio et al., 2012), et dans des tâches de perception auditive sans information labiale ni manuelle (Kos et al., 2009). Nous avons donc fait l'hypothèse que l'amélioration des compétences phonologiques et de perception de parole liée à l'exposition au *cued speech* pourrait avoir pour conséquence un meilleur développement des compétences en production de parole, ce qu'aucune étude à ce jour n'avait testé (Gardiner-Walsh et al., 2021).

Pour explorer cette hypothèse, trois études expérimentales ont été menées dans le cadre de cette thèse, avec trois niveaux d'analyse et trois méthodologies différentes. Une première étude fondée sur une évaluation perceptive a permis de caractériser phonétiquement les productions d'enfants porteurs d'implants cochléaires en fonction de leur niveau de décodage de la LfPC, comparativement à leurs pairs normo-entendants. Une seconde étude a porté sur les caractéristiques acoustiques de la production de consonnes plosives et fricatives chez l'enfant porteur d'implant(s) cochléaire(s) lorsqu'il est exposé à la LfPC et chez l'enfant au développement typique. Enfin, une troisième étude a consisté en une exploration des caractéristiques articulatoires de la production de parole des enfants porteurs d'implant cochléaires en fonction de leur niveau de décodage de la LfPC, en comparaison avec des enfants normo-entendants.

Ce dernier chapitre propose une discussion générale des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse. Nous commencerons par faire une synthèse des principaux résultats de nos trois études expérimentales puis nous aborderons les limites inhérentes à ce travail. Enfin, nous conclurons avec les perspectives envisagées pour la suite de nos travaux.

8.1. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS

Notre première étude expérimentale (Chapitre 5), qui portait sur une évaluation perceptive des performances en production de parole lors d'une tâche de dénomination, a mis en évidence que l'implantation cochléaire seule ne permet pas à tous les enfants d'atteindre des compétences en langue vocale similaires à celles de leurs pairs normo-entendants. En effet, les enfants porteurs d'implants cochléaires ayant de faibles compétences en LfPC présentent des difficultés de production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles, et leurs scores de production sont systématiquement plus bas que ceux des enfants normo-entendants.

D'autre part, cette étude montre que les enfants porteurs d'implants cochléaires ayant de bonnes compétences en LfPC, quant à eux, ont développé des performances équivalentes à celles de leurs pairs normo-entendants et font peu d'erreurs phonémiques. En effet, en plus d'un nombre d'erreurs de production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles significativement réduit par rapport aux enfants ayant un faible niveau en LfPC, nos données indiquent une amélioration considérable de la production des contrastes de voisement, de nasalité et de mode d'articulation pour les consonnes du

français. Bien que quelques substitutions du lieu d'articulation demeurent, les enfants porteurs d'implants cochléaires présentant un niveau élevé de décodage de la LfPC semblent avoir des productions vocales semblables à celles de leurs pairs normo-entendants (Étude 1, Chapitre 5). Ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse générale d'un transfert des compétences phonologiques développées grâce à l'exposition à la LfPC vers la production de parole.

Ces observations réalisées à partir d'analyses perceptives ont été objectivées par des mesures acoustiques et articulatoires, qui permettent d'observer des différences phonétiques infra-catégorielles. Notre seconde étude expérimentale (Chapitre 6) comparait des enfants normo-entendants et des enfants ayant reçu une exposition à la LfPC, et portait sur les aspects acoustiques spectraux de la production de parole. Cette étude a montré également que l'exposition à la LfPC permet aux enfants porteurs d'implants cochléaires de développer des compétences phonologiques égales à celles des enfants normo-entendants du même âge, puisque nos deux groupes produisaient les contrastes consonantiques étudiés de façon similaire, en termes de formants et de moments spectraux.

Notre étude 3 (Chapitre 7) contrastait trois groupes d'enfants : des enfants normo-entendants, des enfants porteurs d'implants cochléaires ayant un faible niveau de LfPC, et des enfants porteurs d'implants cochléaires ayant un bon niveau de LfPC, et consistait en une analyse des corrélats acoustiques et articulatoires (mesures par échographie ultrasons) de leur production de consonnes. Les résultats de cette étude soulignent que le niveau de décodage de la LfPC améliore significativement la production du contraste de lieu d'articulation pour les consonnes plosives et fricatives. En effet, les corrélats acoustiques étudiés (i.e., formants F1, F2, F3 et centre de gravité spectral) ont montré que les enfants porteurs d'implants cochléaires, quel que soit leur niveau de LfPC, contrastent tous les lieux d'articulation des consonnes plosives alvéolaires et vélares mais que seuls les enfants bénéficiant d'un niveau élevé de décodage de la LfPC produisent les fricatives alvéolaires de façon différenciée des fricatives postalvéolaires. Ces résultats sont, en partie, confirmés et même amplifiés par l'analyse des corrélats articulatoires de la production de ces mêmes consonnes. En effet, les enfants porteurs d'implants cochléaires avec de faibles compétences de décodage de la LfPC contrastent moins précisément que leurs pairs les plosives alvéolaires des plosives vélares, pour ce qui concerne la courbure

de la langue. De plus, les enfants porteurs d'implants cochléaires avec un niveau élevé de décodage de la LfPC produisent de façon significativement différenciée les fricatives alvéolaires et postalvéolaires sur toutes les mesures articulatoires réalisées, alors que les enfants avec un faible niveau de décodage de la LfPC et les enfants normo-entendants ne les contrastent pas pour ce qui concerne l'antéro-postériorité du point le plus haut de la langue ou le lieu de constriction. Il semble donc qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC, favorise la production d'un geste articulatoire plus précis, permettant une production de phonèmes similaire à celle des enfants normo-entendants, voire encore plus précise dans le cas des consonnes fricatives. Ce dernier résultat est particulièrement intéressant car les erreurs de substitution entre les consonnes fricatives /s/ et /ʃ/ sont fréquentes chez le jeune enfant typique ou avec trouble du développement des sons de parole (cf. par exemple Meloni (2022)). On peut faire l'hypothèse que la différenciation manuelle de ces deux sons permet à l'enfant de construire des représentations phonologiques différenciées plus précoces même que chez l'enfant tout venant, qui n'a pas accès à cet indice supplémentaire.

En ce qui concerne l'âge d'implantation, notre étude 1 (Chapitre 5) a mis en avant les bénéfices de l'implantation précoce. En effet, les enfants implantés avant l'âge de 24 mois présentent des scores de production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles similaires à ceux de leurs pairs normo-entendants. Par ailleurs, les enfants bénéficiant d'une implantation précoce ne présentent pas de difficultés particulières avec les contrastes phonologiques de voisement, de nasalité, de mode d'articulation et de lieu d'articulation. L'implantation tardive (i.e., après 24 mois), quant à elle, induit des difficultés de production de plusieurs contrastes phonologiques. Le contraste de voisement ne semble pas tout à fait acquis avec des erreurs de pré-voisement (i.e., voisement d'un phonème non voisé) et des erreurs de dévoisement (i.e., dévoisement d'un phonème voisé). Ces mêmes observations sont faites pour le contraste de nasalité avec des erreurs de pré-nasalisation (i.e., nasalisation d'un phonème oral) et de dénasalisation (i.e., oralisation d'un phonème nasal) chez les enfants implantés après 24 mois. L'implantation tardive semble aussi affecter l'acquisition du mode d'articulation, avec de nombreuses substitutions, notamment des consonnes nasales et fricatives. Enfin, les enfants implantés tardivement éprouvent de grandes difficultés de production du lieu d'articulation, principalement pour les phonèmes postérieurs qu'ils ont tendance à

antérioriser. Cette tendance est probablement liée au manque d'indices visuels pour faciliter la perception des lieux postérieurs avec le seul appui de la lecture labiale.

Toutefois, nos résultats font également valoir que l'exposition à la LfPC, et plus particulièrement le développement d'un niveau élevé de décodage de la LfPC, peut compenser l'implantation tardive. En particulier, nous avons montré que les enfants implantés tardivement mais bénéficiant d'un niveau élevé de décodage de la LfPC atteignent des compétences similaires aux enfants implantés de manière précoce ainsi qu'aux enfants normo-entendants. Plus spécifiquement, nos résultats permettent de supposer qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC permet l'encodage des contrastes de voisement et de nasalité dans les représentations phonologiques, ce qui va compenser les manques acoustiques liés à l'implantation tardive et ainsi, réduire, voire supprimer, les différences significatives entre les enfants implantés avant et après 24 mois. En ce qui concerne l'encodage du mode d'articulation, un niveau élevé de décodage de la LfPC permet une réduction considérable du nombre de substitutions. Enfin, le contraste de lieu d'articulation, qui semble le plus difficile à acquérir, est mieux produit par les enfants implantés tardivement lorsqu'ils ont développé un niveau élevé de décodage de la LfPC, bien qu'ils conservent une tendance à antérioriser les phonèmes post-alvéolaires et vélaires. Cependant, les résultats de nos études 2 et 3 (Chapitres 6 et 7) mettent en évidence qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC permet bien aux enfants porteurs d'implants cochléaires de produire les plosives alvéolaires de façon différenciée des plosives vélaires ainsi que les fricatives alvéolaires de façon différenciée des fricatives alvéolaires, en termes de corrélats acoustiques (i.e., F1, F2, F3 et centre de gravité spectral) et articulatoires (i.e., antéro-postériorité du point le plus haut de la langue, lieu de constriction, courbure de la langue).

Ces différentes observations soulignent l'importance de compléter les mesures perceptives (Étude 1, Chapitre 5) par des données objectives telles que des mesures acoustiques (Étude 2, Chapitre 6) et articulatoires (Étude 3, Chapitre 7) afin d'avoir une compréhension plus fine de la production de parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires ainsi que des bénéfices de l'exposition à la LfPC, particulièrement dans le cas de compétences de décodage élevées. Plus généralement, nos travaux de thèse ont montré que les enfants porteurs d'implants cochléaires peuvent utiliser différentes stratégies de production pour atteindre la même cible, et ce en fonction de leur niveau de décodage de

la LfPC. En effet, nous n’observons pas tout à fait les mêmes distinctions sur les plans acoustiques et articulatoires entre nos groupes de participants bien qu’ils produisent tous la même cible (cf. Chapitre 7).

Par ailleurs, nos études 2 et 3 apportent des éclairages méthodologiques sur le type de mesures acoustiques et articulatoires adaptées à l’évaluation de la production de consonnes plosives et fricatives chez l’enfant. Tout d’abord, les mesures de formants et de centres de gravité semblent adaptées à l’étude acoustique du lieu d’articulation des consonnes plosives et fricatives chez l’enfant. Nos résultats mettent en évidence un patron de transition formantique différent chez l’enfant par rapport à celui de l’adulte (Ménard et al., 2004; Schwartz, Boë, et al., 2012). Des simulations articulatoires sont nécessaires pour comprendre les raisons de ces différences. En ce qui concerne les corrélats articulatoires, il a déjà été démontré que l’utilisation d’échographie par ultrasons permet la description de contrastes articulatoires chez l’adulte (Tabain, 2019). Toutefois, nos analyses d’échographies linguales par ultrasons mettent en évidence qu’il est parfois difficile d’obtenir précisément l’image de l’apex de la langue chez l’enfant. De ce fait, les mesures du point le plus haut de la langue ainsi que du lieu de constriction fournissent des informations indirectes sur le lieu d’articulation des consonnes plosives et fricatives. Cependant, nos résultats indiquent que ces mesures sont exploitables pour caractériser le contraste entre les lieux alvéolaire et vélaire pour les plosives et entre les lieux alvéolaire et postalvéolaire pour les fricatives. Enfin, la mesure de courbure de la langue (MCI) semble également être adaptée à l’étude des productions d’enfants et permet de mettre en évidence des différences significatives entre les plosives alvéolaires et vélaire ainsi qu’entre les fricatives alvéolaires et postalvéolaires. La prise en compte de la globalité du contour de langue permet d’obtenir des informations de complexité linguale mais, également, de lieu d’articulation en fonction de la forme de la langue dans le conduit vocal.

Ce travail de thèse fournit également deux corpus de données de référence sur la production de parole d’enfants au développement typique ainsi que d’enfants porteurs d’implants cochléaires. Un premier corpus regroupe des données phonétiques tandis que le second rassemble des données acoustiques et articulatoires, données très peu disponibles dans la littérature actuellement, en français comme dans d’autres langues, y compris l’anglais. Ces données perceptives, acoustiques et articulatoires peuvent

informer la pratique clinique en fournissant des pistes d'intervention orthophonique pour faciliter la prise en charge de l'enfant porteur d'implants cochléaires mais, également, en fournissant des pistes développementales chez l'enfant normo-entendant.

De plus, dans une démarche de « science ouverte », nous avons fait le choix de stocker nos données sur la plateforme numérique Sharedocs (Huma-Num) qui permet le partage et le traitement des données entre tous les membres du projet de recherche. Les données recueillies dans le cadre de l'étude 1 (Chapitre 5) seront, par la suite, mises à la disposition des chercheurs de la communauté internationale par le biais de la plateforme CHILDES/PhonBank (Rose & MacWhinney, 2014). Les données acoustiques et articulatoires des études 2 et 3 (Chapitres 6 et 7) seront, quant à elles, mises à disposition sur OSF dans la continuité du pré-enregistrement ([10.17605/OSF.IO/V8JAQ](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/V8JAQ)).

8.2. LIMITES

Bien que ces différentes études soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'exposition à la LfPC, et plus particulièrement le niveau de décodage de la LfPC, favorise la production de la parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires grâce à un transfert des représentations phonologiques perceptives vers la production de parole, certaines limites doivent être prises en compte.

Tout d'abord le nombre de participants dans chacune de nos études est limité, ce qui réduit considérablement le nombre de sujets dans chaque sous-groupe et, par conséquent, la puissance statistique de nos résultats. Plus particulièrement, nous ne sommes pas parvenues à constituer un groupe d'enfants porteurs d'implants cochléaires jamais exposés à la LfPC. Afin de confirmer nos observations concernant les bénéfices de l'exposition à la LfPC sur le développement de la parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires, il semble nécessaire de comparer nos données à un groupe d'enfants porteurs d'implants cochléaires ne bénéficiant d'aucune autre aide en dehors de leurs implants.

D'autres facteurs peuvent également influencer les capacités de production de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. Il a, en effet, été démontré que le type d'implantation (i.e., bilatérale (un implant cochléaire sur chaque oreille) ou bimodale (un implant cochléaire associé à une prothèse auditive de l'autre côté)) peut impacter la perception de parole (Sturm et al., 2020) ce qui pourrait également influencer la

production de parole. Le faible nombre de participants dans nos études ne nous permet pas de comparer les types d'implantation. Cependant, Boons et al. (2012) n'observent aucune différence entre les appareillages bilatéraux et bimodaux lorsque l'implantation précoce est considérée. Nos observations actuelles mettant en évidence que le niveau de décodage de la LfPC peut compenser les difficultés liées à l'implantation tardive, il serait possible que l'exposition à la LfPC puisse également compenser des différences de type d'appareillage.

Comme nous l'avons vu dans le cadre de l'étude 1, l'âge d'implantation joue un rôle conséquent dans le développement des compétences en langue vocale. Ce facteur n'a cependant pas été pris en compte dans nos études 2 et 3. En effet, très peu de participants ont bénéficié d'une implantation précoce, c'est pourquoi nous avons fait le choix de ne pas introduire cette variable dans nos analyses. Toutefois, cela renforce l'hypothèse selon laquelle l'exposition à la LfPC peut compenser l'implantation tardive étant donné que les participants de notre étude 3 qui présentent un niveau élevé de décodage de la LfPC distinguent significativement les consonnes plosives et fricatives selon leur lieu d'articulation, malgré un âge d'implantation relativement tardif.

On pourrait être tenté de supposer, d'après les résultats de notre étude 1, que les enfants ayant reçu un implant à un âge précoce n'auraient pas besoin d'un accompagnement en LfPC, puisque leurs résultats sont déjà très comparables à ceux des enfants normo-entendants. Il faut cependant souligner que la tâche utilisée dans cette étude est une tâche de dénomination, qui porte sur des mots très fréquents de la langue française. Il s'agit donc d'une tâche relativement simple, qui porte sur des représentations phonologiques lexicales pour lesquelles les enfants ont reçu des *inputs* multiples. L'analyse des données de la tâche de répétition de pseudomots récoltées au cours de ce travail de thèse pourra apporter des éléments complémentaires sur ce sujet, puisque cette tâche implique que l'enfant décode, conserve en mémoire à court terme et produise un nouveau schéma phonologique. Il s'agit donc d'une tâche plus exigeante pour les compétences phonologiques des enfants.

Une question importante dans notre travail concerne les facteurs explicatifs de la compétence en LfPC. En effet, dans notre étude 1 (Chapitre 5) comme dans notre étude 3 (Chapitre 7), une partie des enfants ayant un faible niveau de LfPC avait cependant reçu une certaine exposition à ce code. Il serait donc nécessaire d'explorer plus précisément

quels sont les facteurs qui déterminent les performances de l'enfant. Un facteur potentiellement influent concerne la durée de l'exposition à la LfPC. Il a été démontré à de nombreuses reprises que plus l'exposition à la LfPC est longue, plus la perception de parole est facilitée (Clarke & Ling, 1976; Leybaert & Charlier, 1996). Un autre concerne l'intensité de l'exposition (Périer et al., 1990), c'est-à-dire la quantité et la fréquence d'exposition reçue par l'enfant ainsi que les types d'exposition (avec les parents, avec l'équipe pédagogique, etc.). On ne peut cependant pas écarter l'hypothèse que les différents niveaux de décodage atteints par les enfants puissent être expliqués par des capacités cognitives différentes. Cette question mériterait d'être explorée dans une étude spécifiquement dédiée.

Un autre facteur potentiellement explicatif des performances des enfants serait l'implication parentale dans le parcours communicationnel de l'enfant. En effet, comme nous l'avons souligné, l'usage de la LfPC au sein d'une famille demande un grand investissement des membres de la famille, d'une part pour apprendre le code, mais aussi et surtout pour maintenir la pratique du code au quotidien. Les enfants qui ont un bon niveau de décodage en LfPC sont donc probablement des enfants dont les parents sont très investis, et cet investissement pourrait être un facteur confondant dans nos résultats. Malheureusement, quantifier l'implication parentale n'est pas chose aisée, puisque certains parents ont souvent tendance, dans les questionnaires, à donner une image exagérément positive de leur pratique du code. Les données récoltées ne constituent donc pas des éléments fiables. Un élément de réponse pourra en tous cas être apporté par une étude en cours à laquelle nous collaborons. Les travaux de Van Bogaert et al. (2022) s'intéressent, entre autres, à l'impact de *Auditory Verbal Therapy* sur les compétences vocales de l'enfant porteur d'implants cochléaires en comparaison à celui de la LfPC. La méthode AVT comme la LfPC demandent une grande implication parentale, et sont comparables sur ce point, mais elles diffèrent radicalement en ce qui concerne leurs fondements théoriques. En effet là où la LfPC se base sur la multimodalité des indices phonologiques (auditifs, labiaux, et manuels), l'AVT se focalise sur le renforcement de la modalité auditive.

Enfin, le statut socio-économique peut également avoir un impact sur le développement de la production de parole chez les enfants porteurs d'implants cochléaires. Même si l'influence potentielle du statut socioéconomique familial sur nos données a été réduite

par le recrutement de participants lors de stages d'été organisés par l'ALPC en France ou dans une école spécialisée au Québec dont le projet d'école est la version québécoise du *cued speech*, il serait pertinent d'examiner plus précisément l'influence de ce facteur sur la production de parole mais également sur le niveau de décodage de la LfPC. Des données sur la catégorie socio-professionnelle des parents de certains de nos participants ont été recueillies selon la typologie de l'INSEE, mais les catégories proposées sont difficilement interprétables en terme de statut socio-économique. Certaines études montrent que le niveau d'éducation des parents pourrait être un paramètre plus informatif.

8.3. PERSPECTIVES

Ce travail de thèse offre toutefois de nombreuses perspectives de recherche. Nous avons mis en lumière les bénéfices de l'exposition à la LfPC sur le développement des habiletés en langue vocale chez l'enfant porteur d'implants cochléaires et, également, l'importance de l'évaluation du niveau de décodage de la LfPC pour augmenter davantage les bénéfices sur la production de parole. La batterie de tests EULALIES, conçue dans le cadre d'un modèle psycholinguistique (Meloni, 2022), permet l'analyse d'un ensemble de processus de production et de perception de la parole afin de déterminer le profil linguistique du participant. De ce fait, les tâches ont été pensées les unes en lien avec les autres. L'analyse des résultats à la tâche de jugement de lexicalité (i.e., permettant l'évaluation des représentations phonologiques perceptives) nous permettra de confirmer encore plus précisément notre hypothèse selon laquelle les représentations phonologiques développées en perception via l'exposition à la LfPC sont transférées vers la production de parole. De premiers travaux exploratoires (Machart et al., 2019; Van Bogaert et al., in prep.) ont mis en évidence une tendance des enfants porteurs d'implants cochléaires avec un niveau élevé de décodage de la LfPC à effectuer des jugements lexicaux plus pertinents que leurs pairs avec un niveau faible de décodage de la LfPC mais également que leurs pairs normo-entendants. Ces observations sont en accord avec les différents résultats présentés dans le cadre de ce travail de thèse, concernant la production de parole.

Une étude pionnière est également en cours pour observer l'apport éventuel de la production, par l'enfant lui-même, de la LfPC, simultanément à sa production de parole. Nous évaluons pour cela la précision articulatoire chez des enfants porteurs d'implants cochléaires aptes à produire la parole tout en codant eux-mêmes manuellement (résultats

préliminaires décrits dans Machart, Vilain, Løevenbruck, et al., 2020). Nos résultats préliminaires suggèrent que l'ajout du geste manuel n'altère pas le geste articulatoire. En effet, les mesures de courbure de la langue (MCI) sont similaires lorsque l'enfant accompagne sa production de la LfPC ou non. Pour mieux évaluer l'impact de l'ajout du geste manuel à la production vocale, nous souhaitons maintenant comparer nos premières données à des données de parole d'enfants porteurs d'implants cochléaires n'ayant jamais été exposés à la LfPC et ne sachant pas coder eux-mêmes.

Enfin, un projet d'envergure est en cours, en partenariat avec l'école St-Jude de Montréal au Québec, autour de l'utilisation de la LfPC pour favoriser le développement des habiletés phonologiques chez l'enfant normo-entendant (Clarté et al., 2022). Très peu de données existent aujourd'hui sur le potentiel apports de l'exposition à la LfPC sur le développement langagier de l'enfant normo-entendant. L'objectif principal de cette étude longitudinale est d'évaluer l'apport de l'exposition à la LfPC en milieu scolaire sur le développement de la conscience phonologique chez les enfants scolarisés en classe de maternelle. Différents tests de conscience phonologique (i.e., segmentation syllabique, fusion syllabique, identification de phonème, fusion et segmentation phonémiques) sont réalisés tous les six mois afin d'observer l'évolution des habiletés phonologiques des participants. De plus, le degré d'exposition à la LfPC est mesuré : certains enfants sont exposés intensivement en classe alors que d'autres ne bénéficient que d'une exposition ponctuelle. Les premiers résultats exploratoires mettent en exergue que les enfants exposés de manière intensive obtiennent des scores significativement plus élevés aux épreuves de conscience phonologique dès un an d'exposition.

8.4. CONCLUSIONS

Ce travail de thèse met en lumière trois études pionnières concernant le développement des habiletés en langue vocale chez l'enfant sourd. Tout d'abord, nos travaux ont étudié pour la première fois les apports du *cued speech* sur la production de parole de l'enfant. Plus spécifiquement, nous nous sommes attachée à décrire les bénéfices d'un niveau élevé de décodage de la LfPC sur la production de parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires, ce qui n'a jamais été démontré jusqu'à aujourd'hui. De plus, nous présentons des données articulatoires obtenues par échographies linguales chez l'enfant porteur d'implants cochléaires ce qui, à notre connaissance, n'a été proposé qu'une seule fois

jusqu'à maintenant (production de voyelles, Turgeon et al. (2017)). Enfin, nos données font partie des rares études à exposer des résultats sur les corrélats articulatoires des productions vocales de consonnes chez l'enfant, qu'il soit sourd ou normo-entendant.

Nos données ont permis de mettre en avant l'impact positif de l'exposition à la LfPC sur la production de parole de l'enfant porteur d'implants cochléaires. Une première série d'analyses des caractéristiques perceptives des productions vocales de quatorze enfants francophones porteurs d'implants cochléaires a montré qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC améliore significativement la production de consonnes, de groupes consonantiques et de voyelles. Par ailleurs, le niveau de décodage de la LfPC influence fortement l'encodage phonologique des contrastes de voisement, de nasalité, de mode d'articulation et de lieu d'articulation. Bien que l'implantation précoce favorise grandement la production de parole, nous avons montré qu'un niveau élevé de décodage de la LfPC permet de compenser les difficultés liées à l'implantation tardive. Davantage de participants sont nécessaires pour valider ces différentes observations.

Une seconde série de mesures sur les caractéristiques acoustiques et articulatoires des productions de parole de neuf enfants francophones porteurs d'implants cochléaires a objectivé les bénéfices d'un niveau élevé de décodage de la LfPC sur la production du trait phonologique de lieu d'articulation. En effet, les enfants porteurs d'implants cochléaires, lorsqu'ils présentent un niveau élevé de décodage de la LfPC, distinguent significativement les plosives alvéolaires des plosives vélaires ainsi que les fricatives alvéolaires des fricatives post-alvéolaires. Ces données suggèrent également que l'exposition à la LfPC, et plus particulièrement un niveau élevé de décodage, favorise la production de gestes articulatoires linguaux de la même façon que les enfants normo-entendants.

Le recueil de ces données de parole constitue également deux corpus de référence sur la production de parole d'enfants au développement typique ainsi que d'enfants porteurs d'implants cochléaires.

Enfin, comme l'ont soutenu plusieurs équipes de recherche, l'exposition à la LfPC est fonctionnellement bénéfique pour la perception de parole puisqu'elle fournit un accès visuel à tous les phonèmes du français. Les résultats de nos travaux mettent en avant ses effets à plus long terme sur la production de parole, probablement expliqués par le fait

qu'un meilleur accès perceptif fournit de meilleures représentations phonologiques. Plus spécifiquement, ces travaux démontrent le rôle crucial du niveau de décodage de la LfPC sur le développement des compétences en langue vocale. Ce travail fournit des données quantitatives sur l'apport de l'exposition à la LfPC en milieu familial et scolaire et pourra ainsi nourrir les réflexions et politiques gouvernementales sur l'école inclusive.

L'exposition à la LfPC permet donc à l'enfant sourd de devenir plus performant dans sa perception de la parole mais également dans sa production de la parole. La LfPC, qui peut servir de « béquille » dans les premiers temps, se transforme finalement en tremplin vers plus d'autonomie dans la communication en langue vocale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboutabit, N. (2007). *Reconnaissance de la Langue Française Parlée Complétée (LPC): Décodage phonétique des gestes main-lèvres*. [Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00270162>
- AG Bell Academy. (2018, June 28). *Principles of LSL Specialists—AG Bell Academy | The AG Bell Academy for Listening and Spoken Language*. <https://agbellacademy.org/certification/principles-of-lsl-specialists/>
- Alegria, J., Charlier, B. L., & Mattys, S. (1999). The Role of Lip-reading and Cued Speech in the Processing of Phonological Information in French-educated Deaf Children. *European Journal of Cognitive Psychology, 11*(4), 451–472. <https://doi.org/10.1080/095414499382255>
- Alegria, J., & Lechat, J. (2005). Phonological Processing in Deaf Children: When Lipreading and Cues Are Incongruent. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 10*(2), 122–133. <https://doi.org/10.1093/deafed/eni013>
- Aparicio, M., Peigneux, P., Charlier, B., Neyrat, C., & Leybaert, J. (2012). Early experience of Cued Speech enhances speechreading performance in deaf: Cued Speech. *Scandinavian Journal of Psychology, 53*(1), 41–46. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2011.00919.x>
- Aronson, J. (Director) (2000). *Sound and Fury*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sound_and_Fury_\(film\)&oldid=1097776910](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sound_and_Fury_(film)&oldid=1097776910)
- Attina, V. (2005). *La Langue Française Parlée Complétée: Production et Perception*. [Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/384080>
- Attina, V., Beautemps, D., & Cathiard, M.-A. (2002). Organisation spatiotemporelle main-lèvres-son de séquences CV en Langage Parlé Complété. *XXIVèmes Journées d'Étude Sur La Parole*, 241–244.
- Attina, V., Beautemps, D., Cathiard, M.-A., & Odisio, M. (2004). A pilot study of temporal organization in Cued Speech production of French syllables: Rules for a Cued Speech synthesizer. *Speech Communication, 44*(1–4), 197–214.
- Attina, V., Cathiard, M.-A., & Beautemps, D. (2005). Temporal measures of hand and speech coordination during French Cued Speech production. *International Gesture Workshop*, 13–24.
- Barbier, G., Perrier, P., Ménard, L., Payan, Y., Tiede, M. K., & Perkell, J. S. (2015). *Speech planning in 4-year-old children versus adults: Acoustic and articulatory analyses*. 6. <https://doi.org/DOI:10.21437/Interspeech.2015-158>

- Barbier, G., Perrier, P., Payan, Y., Tiede, M. K., Gerber, S., Perkell, J. S., & Ménard, L. (2020). What anticipatory coarticulation in children tells us about speech motor control maturity. *PLOS ONE*, *15*(4), e0231484. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231484>
- Baudonck, N., Dhooge, I., D'haeseleer, E., & Van Lierde, K. (2010). A comparison of the consonant production between Dutch children using cochlear implants and children using hearing aids. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, *74*(4), 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2010.01.017>
- Bayard, C. (2014). *Perception de la Langue française Parlée Complétée: Intégration du trio lèvres-main-son*. [Thèse, Université Libre de Bruxelles].
- Bayard, C., Colin, C., & Leybaert, J. (2014). How is the McGurk effect modulated by Cued Speech in deaf and hearing adults? *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2014.00416>
- Bayard, C., Leybaert, J., & Colin, C. (2015, September). Integration of auditory, labial and manual signals in cued speech perception by deaf adults: An adaptation of the McGurk paradigm. *FAAVSP 2015 - 1st Joint Conference on Facial Analysis, Animation and Auditory-Visual Speech Processing*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01302422>
- Bayard, C., Machart, L., Strauß, A., Gerber, S., Aubanel, V., & Schwartz, J. L. (2019). Cued Speech Enhances Speech-in-Noise Perception. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, *24*(3), 223–233. <https://doi.org/10.1093/deafed/enz003>
- Beckman, M. E., & Edwards, J. (2000). The Ontogeny of Phonological Categories and the Primacy of Lexical Learning in Linguistic Development. *Child Development*, *71*(1), 240–249. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00139>
- Berland, A., Collett, E., Gaillard, P., Guidetti, M., Strelnikov, K., Cochard, N., Barone, P., & Deguine, O. (2019). Categorization of everyday sounds by cochlear implanted children. *Scientific Reports*, *9*(1), 3532. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39991-9>
- Bernstein, L. E., Tucker, P. E., & Demorest, M. E. (2000). Speech perception without hearing. *Perception & Psychophysics*, *62*(2), 233–252. <https://doi.org/10.3758/BF03205546>
- Boersma, P., & Weenink, D. (2019). *Praat: Doing Phonetics by Computer*. <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

- Boons, T., Brokx, J. P. L., Frijns, J. H. M., Peeraer, L., Philips, B., Vermeulen, A., Wouters, J., & van Wieringen, A. (2012). Effect of Pediatric Bilateral Cochlear Implantation on Language Development. *ARCH PEDIATR ADOLESC MED*, 166(1), 8.
- Borel, S. (2015). *Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds. Lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral*. (Issue 2015USPCA016) [Thèse, Université Sorbonne Paris Cité]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01162201>
- Borel, S., & Leybaert, J. (2020). *Surdités de l'enfant et de l'adulte: Bilans et interventions orthophoniques*. De Boeck Supérieur.
- Bouton, S., Bertoncini, J., Serniclaes, W., & Cole, P. (2011). Reading and Reading-Related Skills in Children Using Cochlear Implants: Prospects for the Influence of Cued Speech. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 16(4), 458–473. <https://doi.org/10.1093/deafed/enr014>
- Bouton, S., Colé, P., Serniclaes, W., Duncan, L. G., & Giraud, A. L. (2015). Atypical phonological processing impairs written word recognition in children with cochlear implants. *Language, Cognition and Neuroscience*, 30(6), 684–699. <https://doi.org/10.1080/23273798.2014.1002796>
- Bouton, S., Serniclaes, W., Bertoncini, J., & Colé, P. (2012). Perception of Speech Features by French-Speaking Children With Cochlear Implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(1), 139–153. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2011/10-0330\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2011/10-0330))
- Bratakos, M. S., Duchnowski, P., & Braid, L. D. (1998). Toward the automatic generation of Cued Speech. *Cued Speech Journal*, 6, 1–37.
- Brennan-Jones, C. G., White, J., Rush, R. W., & Law, J. (2014). Auditory-verbal therapy for promoting spoken language development in children with permanent hearing impairments. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 3.
- Briec, J. (2012). *Implant cochléaire et développement du langage chez les jeunes enfants sourds profonds* [Thèse, Université Rennes 2]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00775862>
- Brosseau-Lapré, F., Rvachew, S., MacLeod, A. A., Findlay, K., Bérubé, D., & Bernhardt, B. M. (2018). Une vue d'ensemble : les données probantes sur le développement phonologique des enfants francophones canadiens. An Overview of Data on the Phonological Development of French-Speaking Canadian Children. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 42(1), 1-19.
- Burden, V., & Campbell, R. (1994). The development of word-coding skills in the born deaf: An experimental study of deaf school-leavers. *British Journal of Developmental Psychology*, 12(3), 331–349. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1994.tb00638.x>

Busquet, D., & Descourtieux, C. (2000). *TERMO Test d'évaluation de la réception du message oral par l'enfant sourd*. Unithèque. <https://www.unitheque.com/termo-test-evaluation-reception-message-oral-par-enfant-sourd/ortho/Livre/4074>

Campbell, R. (1992). Speech in the head? Rhyme skill, reading, and immediate memory in the deaf. *Auditory Imagery*, 73, 92.

Caudrelier, T., Ménard, L., Perrier, P., Schwartz, J.-L., Gerber, S., Vidou, C., & Rochet-Capellan, A. (2019). Transfer of sensorimotor learning reveals phoneme representations in preliterate children. *Cognition*, 192, 103973.

Charlier, B. L. (1994). *Le développement des représentations phonologiques chez l'enfant sourd: Étude comparative du Langage Parlé Complété avec d'autres outils de communication*. Université Libre de Bruxelles.

Charlier, B. L., & Leybaert, J. (2000). *The Rhyming Skills of Deaf Children Educated with Phonetically Augmented Speechreading*. 27.

CISIC. (2020). *L'ambition d'entendre*. <https://www.cisic.fr/publications/l-ambition-d-entendre>

CISIC. (2021). *L'enquête CISIC 2021 (enfants implantés)*. <https://www.cisic.fr/publications/l-enquete-cisic-2021>

Clarke, B. R., & Ling, D. (1976). The Effects of Using Cued Speech: A Follow-Up Study. *Volta Review*.

Clarté, C., Machart, L., Ménard, L., Lœvenbruck, H., Vilain, A., Bull, K., Girard, M., Poirier, E., & Rivard, M. (2022). *L'effet d'un apprentissage de la Langue française Parlée Complétée (LPC) sur la conscience phonologique d'enfants entendants francophones en maternelle*. [89ème Congrès de l'ACFAS].

Cochard, N. (2003). Impact du LPC sur l'évolution des enfants implantés. *Actes Des Journées d'études Nantes*, 40, 65–77.

Colin, S. (2004). *Développement des habiletés phonologiques précoces et apprentissage de la lecture et de l'écriture chez l'enfant sourd: Apport du Langage Parlé Complété (LPC)* [Université Lumière Lyon 2]. http://theses.univ-lyon2.fr/documents/lyon2/2004/colin_s#p=0&a=top

Colin, S., Ecalle, J., & Magnan, A. (2015). *Techniques d'intervention (implant cochléaire et Langue française Parlée Complétée) auprès d'adolescents sourds: Quels effets sur les performances en lecture et compétences associées?*

- Colin, S., Ecalle, J., Truy, E., Lina-Granade, G., & Magnan, A. (2017). Effect of age at cochlear implantation and at exposure to Cued Speech on literacy skills in deaf children. *Research in Developmental Disabilities, 71*, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.09.014>
- Colin, S., Magnan, A., Ecalle, J., & Leybaert, J. (2007). Relation between deaf children's phonological skills in kindergarten and word recognition performance in first grade. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 48*(2), 139–146. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01700.x>
- Colletti, L., Mandalà, M., Zocante, L., Shannon, R. V., & Colletti, V. (2011). Infants versus older children fitted with cochlear implants: Performance over 10 years. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 75*(4), 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2011.01.005>
- Connor, C. M., Craig, H. K., Raudenbush, S. W., Heavner, K., & Zwolan, T. A. (2006). The Age at Which Young Deaf Children Receive Cochlear Implants and Their Vocabulary and Speech-Production Growth: Is There an Added Value for Early Implantation?: *Ear and Hearing, 27*(6), 628–644. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240640.59205.42>
- Cornett, R. O. (1967). Cued Speech. In *American Annals of the Deaf* (pp. 3–13).
- Cornett, R. O. (1994). Adapting Cued Speech to additional languages. *Cued Speech Journal, 5*, 19–29.
- Dawson, K. M., Tiede, M. K., & Whalen, D. H. (2016). Methods for quantifying tongue shape and complexity using ultrasound imaging. *Clinical Linguistics & Phonetics, 30*(3–5), 328–344. <https://doi.org/10.3109/02699206.2015.1099164>
- Descourtieux, C. (2006). *Annexe 1. Le TERMO: Test d'Évaluation de la Réception du Message Oral par l'enfant sourd*. Mardaga. <https://www.cairn.info/competences-cognitives-linguistiques-et-sociales-d--9782870099339-page-267.htm>
- Descourtieux, Ch., Groh, V., Rusterholtz, A., Simoulin, I., & Busquet, D. (1999). Cued speech in the stimulation of communication: An advantage in cochlear implantation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 47*(2), 205–207. [https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(98\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(98)00145-1)
- Dillon, C., Pisoni, D. B., Cleary, M., & Carter, A. K. (2004). Nonword Imitation by Children With Cochlear Implants: Consonant Analyses. *Archives of Otolaryngology–Head & Neck Surgery, 130*(5), 587. <https://doi.org/10.1001/archotol.130.5.587>
- Dodd, B. (1979). Lip reading in infants: Attention to speech presented in- and out-of-synchrony. *Cognitive Psychology, 11*(4), 478–484. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(79\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(79)90021-5)

- Duchnowski, P., Lum, D. S., Krause, J. C., Sexton, M. G., Bratakos, M. S., & Braid, L. D. (2000). Development of speechreading supplements based on automatic speech recognition. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 47(4), 487–496. <https://doi.org/10.1109/10.828148>
- Elbro, C. (1996). Early linguistic abilities and reading development: A review and a hypothesis. *Reading and Writing*, 8(6), 453–485. <https://doi.org/10.1007/BF00577023>
- Estève, I. (2011). *Approche bilingue et multimodale de l'oralité chez l'enfant sourd: Outils d'analyses, socialisation, développement* [These de doctorat, Grenoble]. <https://www.theses.fr/2011GRENL026>
- Fagniat, S., Charlier, B. L., Delvaux, V., Huberlant, A., Huet, K., Piccaluga, M., & Watterman, I. (2020). Perception et production du trait de nasalité vocalique chez l'enfant porteur d'implants cochléaires. *Actes de la 6e conférence conjointe Journées d'Études sur la Parole (JEP, 33e édition)*, 606–616.
- Farinetti, A., Gharbia, D. B., Mancini, J., Roman, S., Nicollas, R., & Triglia, J.-M. (2014). Cochlear implant complications in 403 patients: Comparative study of adults and children and review of the literature. *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, 131(3), 177–182.
- Fleetwood, E., & Metzger, M. (1998). Cued Language Structure: An Analysis of Cued American English Based on Linguistic Principles. In *American Annals of the Deaf* (Vol. 144, pp. 4–6). Gallaudet University Press. <https://muse.jhu.edu/article/384105>
- Fowler, A. E. (1991). How early phonological development might set the stage for phoneme awareness. *Phonological Processes in Literacy: A Tribute to Isabelle Y. Liberman*, 106, 97–117.
- Gardiner-Walsh, S. J., Giese, K., & Walsh, T. P. (2021). Cued Speech: Evolving Evidence 1968–2018. *Deafness & Education International*, 23(4), 313–334. <https://doi.org/10.1080/14643154.2020.1755144>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02699200701653634>
- Geers, A. E., Nicholas, J., Tobey, E., & Davidson, L. (2016). Persistent Language Delay Versus Late Language Emergence in Children With Early Cochlear Implantation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 59(1), 155–170. https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-H-14-0173
- Geffner, D. (1980). Feature characteristics of spontaneous speech production in young deaf children. *Journal of Communication Disorders*, 13(6), 443–454. [https://doi.org/10.1016/0021-9924\(80\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0021-9924(80)90044-1)
- Gibert, G. (2006). *Conception et évaluation d'un système de synthèse 3D de Langue française Parlée Complétée (LPC) à partir du texte* [PhD Thesis]. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

- Govaerts, P. J., De Beukelaer, C., Daemers, K., De Ceulaer, G., Yperman, M., Somers, T., Schatteman, I., & Offeciers, F. E. (2002). Outcome of Cochlear Implantation at Different Ages from 0 to 6 Years: *Otology & Neurotology*, 23(6), 885–890. <https://doi.org/10.1097/00129492-200211000-00013>
- Grandchamp, R., Rapin, L., Perrone-Bertolotti, M., Pichat, C., Haldin, C., Cousin, E., ... & Lœvenbruck, H. (2019). The ConDialInt model: Condensation, dialogality, and intentionality dimensions of inner speech within a hierarchical predictive control framework. *Frontiers in Psychology*, 10, 2019.
- Grandon, B. (2016). *Développement typique et atypique de la production de parole: Caractéristiques segmentales et intelligibilité de la parole d'enfants porteurs d'un implant cochléaire et d'enfants normo-entendants de 5 à 11 ans*. Université Grenoble Alpes.
- Grandon, B., & Vilain, A. (2020). Development of fricative production in French-speaking school-aged children using cochlear implants and children with normal hearing. *Journal of Communication Disorders*, 86, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2020.105996>
- Grandon, B., Vilain, A., Lœvenbruck, H., Schmerber, S., & Truy, E. (2017). Realisation of voicing by French-speaking CI children after long-term implant use: An acoustic study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 31(7–9), 598–611. <https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1302511>
- Gravel, J. S., & O’Gara, J. (2003). Communication options for children with hearing loss. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, 9(4), 243–251. <https://doi.org/10.1002/mrdd.10087>
- Gregory, J. F. (1987). An Investigation of Speechreading With and Without Cued Speech. *American Annals of the Deaf*, 132(5b), 393–398. <https://doi.org/10.1353/aad.2012.1466>
- Hage, C. (1994). Développement de certains aspects de la morpho-syntaxe chez l’enfant à surdité profonde: Rôle du Langage Parlé Complété. *Unpublished Doctoral Dissertation, Free University of Brussels, Belgium*.
- Hage, C., Alegría, J., & Périer, O. (1991). *Cued Speech and Language Acquisition: With Specifics Related to Grammatical Gender*. 5.
- Hage, C., & Leybaert, J. (2005). The Effect of Cued Speech on the Development of Spoken Language. In P. E. Spencer & M. Marschark (Eds.), *Advances in the Spoken Language Development of Deaf and Hard-of-Hearing Children* (pp. 193–211). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195179873.003.0009>

- Haldin, C., Løevenbruck, H., & Baciú, M. (2022). Complémenter la méthode orthophonique avec des nouvelles approches de rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC Complementing the speech therapy method with new approaches to speech and language rehabilitation in post-stroke aphasia. *Revue de Neuropsychologie, 14*, 43–58. <https://doi.org/10.1684/nrp.2022.0701>
- Hall, M. L., Hall, W. C., & Caselli, N. K. (2019). Deaf children need language, not (just) speech. *First Language, 39*(4), 367–395. <https://doi.org/10.1177/0142723719834102>
- Hansson, K., Ibertsson, T., Asker-Árnason, L., & Sahlén, B. (2018). Language impairment in children with CI: An investigation of Swedish. *Lingua, 213*, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.lingua.2018.07.001>
- Havy, M., Nazzi, T., & Bertoncini, J. (2013). Phonetic processing during the acquisition of new words in 3-to-6-year-old French-speaking deaf children with cochlear implants. *Journal of Communication Disorders, 46*. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2012.12.002>
- Heather Artinian (Director). (2013, December 11). *Not the hearing or Deaf world | Heather Artinian | TEDxGeorgetown*. <https://www.youtube.com/watch?v=jhm5OaXJVMQ>
- Hedlund, G., & Rose, Y. (2016). *Phon software* [Topic]. https://www.phon.ca/phon-manual/getting_started.html
- Hintermair, M. (2014). Psychosocial development in Deaf and hard-of-hearing children in the twenty-first century. *Bilingualism and Bilingual Deaf Education, 152*.
- Hocevar-Boltezar, I., Boltezar, M., & Zargi, M. (2008). The influence of cochlear implantation on vowel articulation. *Wiener Klinische Wochenschrift, 120*(7–8), 228–233. <https://doi.org/10.1007/s00508-008-0944-2>
- Horga, D., & Liker, M. (2006). Voice and pronunciation of cochlear implant speakers. *Clinical Linguistics & Phonetics, 20*(2–3), 211–217. <https://doi.org/10.1080/02699200400027015>
- Jacquier-Roux, M., Valdois, S., Zorman, M., Lequette, C., & Pouget, G. (2005). *ODEDYS : un outil de dépistage des dyslexie version 2 (a Dyslexia Screening Tool version 2)*. <http://www.cognisciences.com/accueil/outils/article/odedys-version-2>
- Kabakoff, H., Beames, S. P., Tiede, M., Whalen, D. H., Preston, J. L., & McAllister, T. (2022). Comparing metrics for quantification of children's tongue shape complexity using ultrasound imaging. *Clinical Linguistics & Phonetics, 36*(1), 1–27. <https://doi.org/10.1080/02699206.2022.2039300>
- Khomsí, A. (2001). *ELO - Évaluation du Langage Oral*. Pearson Clinical & Talent Assessment. <https://www.pearsonclinical.fr/elo-evaluation-du-langage-oral>

- Kim, J., & Chin, S. B. (2008). Fortition and lenition patterns in the acquisition of obstruents by children with cochlear implants. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 22(3), 233–251.
- Kos, M.-I., Deriaz, M., Guyot, J.-P., & Pelizzone, M. (2009). What can be expected from a late cochlear implantation? *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 73(2), 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2008.10.009>
- Kunisue, K., Fukushima, K., Nagayasu, R., Kawasaki, A., & Nishizaki, K. (2006). Longitudinal formant analysis after cochlear implantation in school-aged children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 70(12), 2033–2042. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2006.07.012>
- Laporte, C. (2018). *SLURP* [Matlab]. <https://github.com/cathylaporte/SLURP> (Original work published 2018)
- Laporte, C., & Ménard, L. (2018). Multi-hypothesis tracking of the tongue surface in ultrasound video recordings of normal and impaired speech. *Medical Image Anal.* <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.12.003>
- LaSasso, C. J. (2010). Why a book about Cued Speech and Cued Language and why now? In *Cued Speech and cued language for deaf and hard of hearing children* (pp. 3–26).
- LaSasso, C. J., Crain, K., & Leybaert, J. (2003). Rhyme Generation in Deaf Students: The Effect of Exposure to Cued Speech. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 8(3), 250–270. <https://doi.org/10.1093/deafed/eng014>
- Lefebvre, P., Girard, C., Desrosiers, K., Trudeau, N., & Sutton, A. (2008). Phonological Awareness Tasks for French-Speaking Preschoolers Tâches de mesure de la conscience phonologique chez les enfants d'âge préscolaire francophones. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 32(4), 158–168.
- LeFevre, J.-A., Fast, L., Skwarchuk, S.-L., Smith-Chant, B. L., Bisanz, J., Kamawar, D., & Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance. *Child Development*, 81(6), 1753–1767. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01508.x>
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX: A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(1), 156–166. <https://doi.org/10.3758/BF03195560>
- Leybaert, J. (2000). Phonology Acquired through the Eyes and Spelling in Deaf Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 75(4), 291–318. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2539>

- Leybaert, J., Aparicio, M., & Alegria, J. (2011). *The Role of Cued Speech in Language Development of Deaf Children*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199750986.013.0020>
- Leybaert, J., Bayard, C., Colin, C., & LaSasso, C. (2016). Cued Speech and Cochlear Implants: A Powerful Combination For Natural Spoken Language Acquisition and the Development of Reading. In M. Marschark & P. E. Spencer (Eds.), *The Oxford Handbook of Deaf Studies in Language*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190241414.013.24>
- Leybaert, J., & Charlier, B. (1996). Visual Speech in the Head: The Effect of Cued-Speech on Rhyming, Remembering, and Spelling. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 1(4), 234–248. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.deafed.a014299>
- Leybaert, J., & LaSasso, C. J. (2010). Cued Speech for Enhancing Speech Perception and First Language Development of Children With Cochlear Implants. *Trends in Amplification*, 14(2), 96–112. <https://doi.org/10.1177/1084713810375567>
- Leybaert, J., & Van Reybroeck, M. (2004). L'évaluation de la conscience phonologique et des mécanismes de production écrite de mots: Que peuvent nous apprendre les enfants sourds et les enfants dysphasiques? In *Développement cognitif et troubles des apprentissages: Évaluer, comprendre, rééduquer et prendre en charge*. (Marie-Noëlle Metz-Lutz, pp. 193–218). Solal.
- Liker, M., Mildner, V., & Šindija, B. (2007). Acoustic analysis of the speech of children with cochlear implants: A longitudinal study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 21(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/02699200400026991>
- Lina-Granade, G., & Truy, E. (2005). Conduite à tenir devant une surdité de l'enfant. *EMC - Oto-rhino-laryngologie*, 2(3), 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.emcorl.2005.05.001>
- Ling, D., & Clarke, B. R. (1975). Cued Speech: An Evaluative Study. *American Annals of the Deaf*, 120(5), 480–488. JSTOR.
- Löfkvist, U., Bäckström, K., Dahlby-Skoog, M., Gunnarsson, S., Persson, M., & Lohmander, A. (2020). Babbling and consonant production in children with hearing impairment who use hearing aids or cochlear implants – a pilot study. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 45(4), 172–180. <https://doi.org/10.1080/14015439.2019.1695929>
- Machart, L., Løevenbruck, H., Vilain, A., & Ménard, L. (submitted). Consonant acoustics in children fitted with Cochlear Implants and exposed to Canadian French Cued Speech compared to children with typical hearing. *Clinical Linguistics & Phonetics*.

- Machart, L., Meloni, G., Vilain, A., Løevenbruck, H., & Shott-Brua, V. (2019). *Le développement phonologiques de l'enfant implanté: L'apport de la Langue française Parlée Complétée*. [VIIIème Journées de Phonétique Clinique].
- Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Gerber, S., & EULALIES Consortium. (submitted). Positive impact of French Cued Speech exposure on speech production in children fitted with Cochlear Implants. *Plos One*.
- Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Meloni, G., & Puissant, C. (2020). Production de parole chez l'enfant porteur d'implant cochléaire: Apport de la Langue française Parlée Complétée. *JEP-TALN-RECITAL 2020-6e Conférence Conjointe 33e Journées d'Études Sur La Parole, 27e Traitement Automatique Des Langues Naturelles, 22e Rencontre Des Étudiants Chercheurs En Informatique Pour Le Traitement Automatique Des Langues*, 388–396.
- Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., & Ménard, L. (2020). *Influence of French Cued Speech exposure on consonant production in children with cochlear implants: An ultrasound study*. [12th International Seminar on Speech Production (ISSP)].
- MacLeod, A., Sutton, A., Trudeau, N., & Thordardottir, E. (2011). The acquisition of consonants in Québécois French: A cross-sectional study of pre-school aged children. *International Journal of Speech-Language Pathology*. <https://doi.org/10.3109/17549507.2011.487543>
- Mahshie, J., Core, C., & Larsen, M. D. (2015). Auditory Perception and Production of Speech Feature Contrasts by Pediatric Implant Users. *Ear & Hearing*, 36(6), 653–663. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000181>
- Mathworks Inc. (2019). *MATLAB*. <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746–748. <https://doi.org/10.1038/264746a0>
- Medina, V., & Serniclaes, W. (2006). *Evolution de la perception des phonèmes, mots et phrases chez l'enfant avec Implant Cochléaire: Un suivi de trois ans post-implant*. 4.
- Meloni, G. (2022). *Évaluation des Troubles du Développement des Sons de Parole dans le cadre d'un modèle psycholinguistique chez l'enfant francophone*. [Thèse, Université Grenoble Alpes et Université de Montréal].

- Meloni, G., Schott-Brua, V., Vilain, A., Lœvenbruck, H., Consortium, E., & MacLeod, A. A. N. (2020). Application of childhood apraxia of speech clinical markers to French-speaking children: A preliminary study. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 22(6), 683-695. <https://doi.org/10.1080/17549507.2020.1844799>
- Meloni, G., Vilain, A., Lœvenbruck, H., & MacLeod, A. (2018, October). Integrating production and perception tasks in a psycholinguistic approach to assessment of Speech Sound Disorder in French: A case study. *ICPLA 2018 - 17th International Clinical Phonetics and Linguistics Association Conference*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01950372>
- Meloni, G., Vilain, A., Lœvenbruck, H., & MacLeod, A. A. N. (2015). Projet TDSP France-Québec: Évaluation et dépistage des troubles du développement des sons de parole. *Colloque International Atylang, Atypies Langagières: Mais de Quoi Parle-t-on Vraiment?*
- Ménard, L., Aubin, J., Thibeault, M., & Richard, G. (2012). Measuring Tongue Shapes and Positions with Ultrasound Imaging: A Validation Experiment Using an Articulatory Model. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 64(2), 64–72. <https://doi.org/10.1159/000331997>
- Ménard, L., Leclerc, A., & Tiede, M. (2014). Articulatory and acoustic correlates of contrastive focus in congenitally blind adults and sighted adults. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 57(3), 793–804.
- Ménard, L., Perrier, P., & Aubin, J. (2013). The role of auditory feedback in speech development: A study of compensation strategies for a lip-tube perturbation. *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013*, 19(1), 060181.
- Ménard, L., Prémont, A., Trudeau-Fisette, P., Turgeon, C., & Tiede, M. (2020). Phonetic Implementation of Prosodic Emphasis in Preschool-Aged Children and Adults: Probing the Development of Sensorimotor Speech Goals. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 63(6), 1658–1674. https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-20-00017
- Ménard, L., Schwartz, J.-L., & Boë, L.-J. (2004). *Role of vocal tract morphology in speech development*.
- Ménard, L., Toupin, C., Baum, S. R., Drouin, S., Aubin, J., & Tiede, M. (2013). Acoustic and articulatory analysis of French vowels produced by congenitally blind adults and sighted adults. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 2975–2987. <https://doi.org/10.1121/1.4818740>
- Mildner, V., & Liker, M. (2008). Fricatives, affricates, and vowels in Croatian children with cochlear implants. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 22(10–11), 845–856.

Millet, A., Estève, I., & Guigas, L. (2008). *Pratiques communicatives d'un groupe de jeunes sourds adultes* (p. 100).

Mondain, M., Blanchet, C., Venail, F., & Vieu, A. (2005). Classification et traitement des surdités de l'enfant. *EMC - Oto-rhino-laryngologie*, 2(3), 301–319. <https://doi.org/10.1016/j.emcorl.2005.04.001>

Mousty, P., Leybaert, J., Alegria, J., Content, A., & Morais, J. (1994). BELEC: Une batterie d'évaluation du langage écrit et de ses troubles: analyse conjointe des habiletés linguistiques et métalinguistiques. In *Evaluer les troubles de la lecture: Les nouveaux modèles théoriques et leurs implications diagnostiques*. (De Boeck, pp. 127–145).

Mugnier, S. (2006). Surdités, plurilinguisme et Ecole Approches sociolinguistiques et sociodidactiques des bilinguismes d'enfants sourds de CE2. [Thesis]. In *Le serveur TEL (thèses-en-ligne)*. Le serveur TEL (thèses-en-ligne).

Munson, B., Edwards, J., & Beckman, M. E. (2012). *Phonological Representations in Language Acquisition: Climbing The Ladder of Abstraction*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199575039.013.0012>

Nicholls, G. H., & Ling, D. (1982). Cued Speech and the Reception of Spoken Language. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 25(2), 262–269. <https://doi.org/10.1044/jshr.2502.262>

Niederberger, N. (2004). *Capacités langagières en langue des signes française et en français écrit chez l'enfant sourd bilingue: Quelles relations?* <https://doi.org/10.13097/ARCHIVE-OUVERTE/UNIGE:248>

Niederberger, N., & Prinz, P. (2005). La connaissance d'une langue des signes peut-elle faciliter l'apprentissage de l'écrit chez l'enfant sourd? *Enfance*, 57(4), 285. <https://doi.org/10.3917/enf.574.0285>

Nittrouer, S., Caldwell-Tarr, A., Sansom, E., Twersky, J., & Lowenstein, J. H. (2014). Nonword Repetition in Children With Cochlear Implants: A Potential Clinical Marker of Poor Language Acquisition. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 23(4), 679–695. https://doi.org/10.1044/2014_AJSLP-14-0040

Nittrouer, S., Muir, M., Tietgens, K., Moberly, A. C., & Lowenstein, J. H. (2018). Development of Phonological, Lexical, and Syntactic Abilities in Children With Cochlear Implants Across the Elementary Grades. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 61(10), 2561–2577. https://doi.org/10.1044/2018_JSLHR-H-18-0047

- Noiray, A., Abakarova, D., Rubertus, E., Krüger, S., & Tiede, M. (2018). How do children organize their speech in the first years of life? Insight from ultrasound imaging. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 61*(6), 1355–1368.
- Noiray, A., Popescu, A., Killmer, H., Rubertus, E., Krüger, S., & Hintermeier, L. (2019). Spoken Language Development and the Challenge of Skill Integration. *Frontiers in Psychology, 10*, 2777. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02777>
- Noiray, A., Ries, J., Tiede, M., Rubertus, E., Laporte, C., & Ménard, L. (2020). Recording and analyzing kinematic data in children and adults with SOLLAR: Sonographic & Optical Linguo-Labial Articulation Recording system. *Laboratory Phonology: Journal of the Association for Laboratory Phonology, 11*(1), 14. <https://doi.org/10.5334/labphon.241>
- Ohala, J. J. (1983). The origin of sound patterns in vocal tract constraints. In *The production of speech* (pp. 189–216). Springer.
- Ohkubo, M., & Scobbie, J. M. (2019). Tongue Shape Dynamics in Swallowing Using Sagittal Ultrasound. *Dysphagia, 34*(1), 112–118. <https://doi.org/10.1007/s00455-018-9921-8>
- Padden, C., & Ramsey, C. (2000). *American Sign Language and reading ability in deaf children*.
- Paire-Ficout, L., Colin, S., Magnan, A., & Ecalle, J. (2003). *Les habiletés phonologiques chez des enfants sourds prélecteurs*. 15.
- Périer, O., Charlier, B., Hage, C., & Alegría, J. (1990). *Evaluation of the Effects of Prolonged Cued Speech Practice Upon the Reception of Spoken Language*. 8.
- Preston, J. L., Benway, N. R., Leece, M. C., Hitchcock, E. R., & McAllister, T. (2020). Tutorial: Motor-based treatment strategies for/r/distortions. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools, 51*(4), 966–980.
- Pucher, M., Klingler, N., Luttenberger, J., & Spreafico, L. (2020). Accuracy, recording interference, and articulatory quality of headsets for ultrasound recordings. *Speech Communication, 123*, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2020.07.001>
- R Development Core Team. (2012). *RStudio | Open source & professional software for data science teams*. <https://www.rstudio.com/>
- Read, C. (1978). Children's Awareness of Language, with Emphasis on Sound Systems. In A. Sinclair, R. J. Jarvella, & W. J. M. Levelt (Eds.), *The Child's Conception of Language* (pp. 65–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67155-5_5

- Reidy, P. F., Kristensen, K., Winn, M. B., Litovsky, R. Y., & Edwards, J. R. (2017). The Acoustics of Word-Initial Fricatives and Their Effect on Word-Level Intelligibility in Children With Bilateral Cochlear Implants. *Ear & Hearing, 38*(1), 42–56. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000349>
- Rose, Y., & MacWhinney, B. (2014). *CHILDES/PhonBank*. <https://childes.talkbank.org/>
- Rvachew, S., Nowak, M., & Cloutier, G. (2004). Effect of Phonemic Perception Training on the Speech Production and Phonological Awareness Skills of Children With Expressive Phonological Delay. *American Journal of Speech-Language Pathology, 13*(3), 250–263. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2004/026\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2004/026))
- Rvachew, S., Ohberg, A., Grawburg, M., & Heyding, J. (2003). Phonological Awareness and Phonemic Perception in 4-Year-Old Children With Delayed Expressive Phonology Skills. *American Journal of Speech-Language Pathology, 12*(4), 463–471. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2003/092\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2003/092))
- Ryalls, J., Larouche, A., & Giroux, F. (2003). Acoustic comparison of CV syllables in French-speaking children with normal hearing, moderate-to-severe and profound hearing impairment. *Journal of Multilingual Communication Disorders, 1*(2), 99–114. <https://doi.org/10.1080/1476967021000042137>
- Sacher, P., Beautemps, D., Cathiard, M.-A., & Aboutabit, N. (2008). Analyse de la production d'un codeur LPC sourd. *Actes Des Journées d'Etude Sur La Parole 2008*, 4.
- Schott-Brua, V. (2018). *Diagnostic différentiel de la dyspraxie verbale dans le cadre de l'évaluation des Troubles du Développement des Sons de la Parole: Analyse d'une sélection de marqueurs au travers d'une étude de cas multiples d'enfants francophones* [Mémoire d'orthophonie].
- Schwartz, J.-L., Basirat, A., Ménard, L., & Sato, M. (2012). The Perception-for-Action-Control Theory (PACT): A perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of Neurolinguistics, 25*(5), 336–354. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2009.12.004>
- Schwartz, J.-L., Boë, L.-J., Badin, P., & Sawallis, T. R. (2012). Grounding stop place systems in the perceptuo-motor substance of speech: On the universality of the labial–coronal–velar stop series. *Journal of Phonetics, 40*(1), 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2011.10.004>
- Seifert, E., Oswald, M., Bruns, U., Vischer, M., Kompis, M., & Haeusler, R. (2002). Changes of voice and articulation in children with cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 66*(2), 115–123. [https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(02\)00216-1](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(02)00216-1)
- Shull, T., & Crain, K. (2010). Fundamental principles of Cued Speech and cued language. In *Cued Speech and cued language for deaf and hard of hearing children* (pp. 27–52).

- Stackhouse, J., Wells, B., & Snowling, M. J. (1997). *Children's Speech and Literacy Difficulties, Book I: A Psycholinguistic Framework*. Wiley. <https://books.google.co.uk/books?id=wVs4AQAAIAAJ>
- Sturm, J. J., Kuhlmeier, M., Alexiades, G., Hoffman, R., & Kim, A. H. (2020). Comparison of Speech Performance in Bimodal versus Bilateral Cochlear Implant Users. *The Laryngoscope*, lary.29062. <https://doi.org/10.1002/lary.29062>
- Sundarrajan, M., Tobey, E. A., Nicholas, J., & Geers, A. E. (2020). Assessing consonant production in children with cochlear implants. *Journal of Communication Disorders*, 84, 105966. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2019.105966>
- Sundström, S., Löfkvist, U., Lyxell, B., & Samuelsson, C. (2018). Prosodic and segmental aspects of nonword repetition in 4- to 6-year-old children who are deaf and hard of hearing compared to controls with normal hearing. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(10), 950–971. <https://doi.org/10.1080/02699206.2018.1469671>
- Tabain, M. (2019). The phonetic properties of consonants. In *The Routledge Handbook of Phonetics* (William F. Katz and Peter F. Assmann). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429056253-11>
- Terband, H., Maassen, B., & Maas, E. (2019). A psycholinguistic framework for diagnosis and treatment planning of developmental speech disorders. *Folia Phoniatria et Logopaedica*, 71(5-6), 216-227. <https://doi.org/10.1159/000499426>
- Tiede, M. (2020). *GetContours* [MATLAB]. <https://github.com/mktiede/GetContours> (Original work published 2015)
- Traunmüller, H. (1981). Perceptual dimension of openness in vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(5), 1465–1475. <https://doi.org/10.1121/1.385780>
- Trezek, B. J. (2017). Cued Speech and the Development of Reading in English: Examining the Evidence. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 22(4), 349–364. <https://doi.org/10.1093/deafed/enx026>
- Troille, E. (2009). *De la perception audiovisuelle des flux oro-faciaux en parole à la perception des flux manuo-faciaux en langue française parlée complétée adultes et enfants: Entendants, aveugles ou sourds* [Thèse, Grenoble 3].
- Turgeon, C., Trudeau-Fisette, P., Fitzpatrick, E., & Ménard, L. (2017). Vowel intelligibility in children with cochlear implants: An acoustic and articulatory study. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 101, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2017.07.022>

- Tye-Murray, N., & Kirk, K. I. (1993). Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the phonetic level evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 36(3), 488–502.
- Uchanski, R. M., Delhorne, L. A., Dix, A. K., Braida, L. D., Reed, C. M., & Durlach, N. I. (1994). Automatic speech recognition to aid the hearing impaired: Prospects for the automatic generation of cued speech. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 31(1), 20–41.
- Van Bogaert, L., Løevenbruck, H., & Vilain, A. (2021). *Speech communication tools used for children with hearing loss in France*.
- Van Bogaert, L., Machart, L., Løevenbruck, H., & Vilain, A. (in prep.). *Speech perception and speech production in children with cochlear implants: A study of Auditory Verbal Therapy and French Cued Speech*.
- Van Bogaert, L., Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., & EULALIES Consortium. (2022). Perception de la parole chez les enfants porteurs d’implants cochléaires: Étude sur l’Auditory Verbal Therapy et la Langue française Parlée Complétée. *Journées d’Etudes Sur Le Parole (JEP)*.
- Van Der Merwe, A. (2021). New perspectives on speech motor planning and programming in the context of the four-level model and its implications for understanding the pathophysiology underlying apraxia of speech and other motor speech disorders. *Aphasiology*, 35(4), 397-423. <https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1765306>
- Vieu, A., Mondaina, M., Blanchard, K., Sillon, M., Reuillard-Artieres, F., Tobey, E., Uziela, A., & Piron, J. P. (1998). Influence of communication mode on speech intelligibility and syntactic structure of sentences in profoundly hearing impaired French children implanted between 5 and 9 years of age. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 44(1), 15–22. [https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(98)00031-7)
- Villegas, J., Wilson, I., Iguro, Y., & Erickson, D. (2015). *Effect of a fixed ultrasound probe on jaw movement during speech*.
- Virole, B. (2006). *Psychologie de la surdité*. <https://doi.org/10.3917/DBU.VIROL.2006.01>
- Warner-Czyz, A. D., Davis, B. L., & MacNeilage, P. F. (2010). *Accuracy of consonant–vowel syllables in young cochlear implant recipients and hearing children in the single-word period*.
- Watterman, I. (2020). *La discrimination et l’identification des voyelles orales et nasales du français dans le flux de parole chez les enfants sourds cong nitaux porteurs d’implants cochléaires*.

Whalen, D. H., Iskarous, K., Tiede, M. K., Ostry, D. J., Lehnert-LeHouillier, H., Vatikiotis-Bateson, E., & Hailey, D. S. (2005). *The Haskins optically corrected ultrasound system (HOCUS)*.

Whalen, D. H., Kang, J., Iwasaki, R., Shejaeya, G., Kim, B., Roon, K. D., Preston, J. L., Phillips, E., McAllister, T., & Boyce, S. E. (2019). Accuracy assessment of hand and automatic measurements of ultrasound images of the tongue. *Proceedings of the 19th International Congress of Phonetic Sciences*, 542–546.

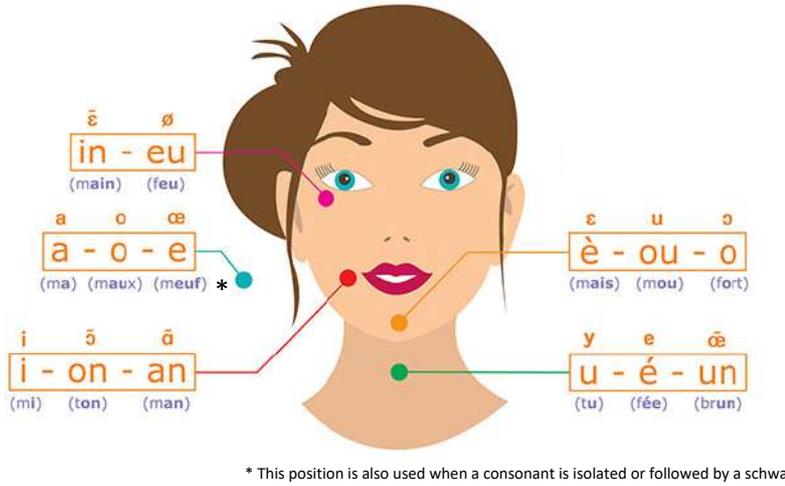
Zharkova, N. (2019). Differentiating tongue shapes for alveolar-postalveolar and alveolar-velar contrasts. *Speech Communication*, 113, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.08.004>

APPENDICES

Appendix 5.1. Cues in Cued French	264
Appendix 5.2. List of items for the picture-naming task from the EULALIES battery (Meloni et al., 2018)	265
Appendix 5.3. TERMO tasks for the Cued Speech + Lipreading modality	266
Appendix 5.4. TERMO results to define the Cued French reading level	267
Appendix 5.5. Mean scores for the digit span task (ODEDYS) and the morphosyntax production module (ELO).....	268
Appendix 5.6. Results of statistical analyses using Hearing_Age instead of Chronological_Age for consonant and vowel production.....	269
Appendix 5.7. Statistical results and power estimates of the statistical analysis for manner and place of articulation substitution	270
Appendix 7.1. Canadian French Cued Speech reading scale.....	272

APPENDIX 5.1. CUES IN CUED FRENCH

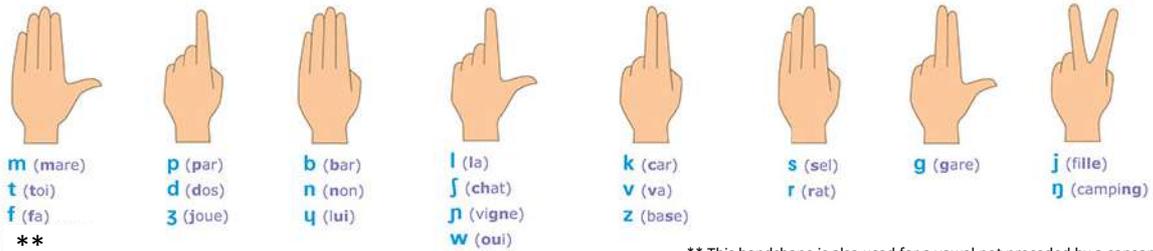
Hand positions for **vowels**



Cues for the French word *bonjour* /bɔ̃ʒuʁ/ (hello)



Handshapes for **consonants**



The five hand positions for vowels (upper left) and the eight handshapes for the consonants (bottom).

Adapted with permission from the French version of the ALPC (Association pour la promotion de la Langue française Parlée Complétée)

<https://alpc.asso.fr/les-cles-du-code-lpc/>

APPENDIX 5.2. LIST OF ITEMS FOR THE PICTURE-NAMING TASK FROM THE EULALIES BATTERY (MELONI ET AL., 2018)

oreiller	fourchette	camion	livre
locomotive	tigre	bonhomme	ordinateur
hippopotame	hibou	yaourt	crocodile
indien	escargot	aquarium	ciseaux
griffe	médicament	langue	bibliothèque
jambe	uniforme	menton	téléphone
docteur	citron	zèbre	robe
hélicoptère	neige	ventilateur	enveloppe
machine à laver	main	extraterrestre	stade
supermarché	capuche	tomate	toboggan
huile	parapluie	euro	cinéma
pyjama	chaussette	couverture	ongle
peigne	avion	rhinocéros	chocolat
farine	biberon	dentiste	voiture
œuf	grenouille	pieuvre	fraise
poisson	éléphant	ours	loup
déguisement	aspirateur	gare	vétérinaire

APPENDIX 5.3. TERMO TASKS FOR THE CUED SPEECH + LIPREADING MODALITY

Word repetition		Sentence repetition	
Before 8 years old	After 8 years old	Before 8 years old	After 8 years old
poire	volcan	Le chat joue sur le tapis	Tu as de belles chaussures
feu	refrain	La maîtresse distribue les cahiers	La statue s'élève sur la place
bateau	tailleur	Attends moi, j'arrive !	Non, c'est trop difficile !
couteau	tissu	Le pantalon est tâché	Le courrier est arrivé en retard
marché	signal	Les enfants vont à la montagne	La lampe est suspendue au plafond
champignon	soldat		
oiseau	départ		
malade	boucher		
savon	berger		
ananas	moineau		

APPENDIX 5.4. TERMO RESULTS TO DEFINE THE CUED FRENCH READING LEVEL

Sex	Chronological age (months)	Word repetition	Sentence repetition	Cued French reading scale	Cued French reading level	Group
F	77	10	5	1	High	CF+ early
M	110	8	5	1	High	CF+ early
F	118	10	5	1	High	CF+ early
M	128	10	no data	2	High	CF+ early
M	139	9	5	1	High	CF+ early
M	60	9	1	2	High	CF+ late
M	107	8	4	1	High	CF+ late
F	125	9	5	1	High	CF+ late
F	114	2		4	Low	CF-early
M	135	4		3	Low	CF-early
F	139	3		4	Low	CF-early
M	74	1		4	Low	CF-late
F	79	3		4	Low	CF-late
M	100	2		4	Low	CF-late

APPENDIX 5.5. MEAN SCORES FOR THE DIGIT SPAN TASK (ODEDYS) AND THE MORPHOSYNTAX PRODUCTION MODULE (ELO)

a. Mean scores of children with normal hearing

Chronological age (months)	Digit Span (ODEDYS)		Morphosyntax (ELO)	
	Our TH group	Norm	Our TH group	Norm
60 - 71 months	4.0 (sd=.79)	mean=4.1 (sd=.98)	11.0 (sd=2.52)	mean=10.5 (sd=3.1)
72 - 83 months	4.6 (sd=.73)	mean=4.3 (sd=.96)	18.3 (sd=2.27)	mean=15.6 (sd=3.8)
84 - 95 months	5.0 (sd=.71)	mean=4.6 (sd=.6)	19.3 (sd=2.59)	mean=17.6 (sd=3.7)
96 - 107 months	4.8 (sd=1.30)	mean=4.5 (sd=.6)	18.0 (sd=2.56)	mean=20.6 (sd=2.5)
108 - 119 months	5.0 (sd=.82)	mean=4.7 (sd=.5)	19.5 (sd=2.37)	mean=21.7 (sd=2.1)
120 - 139 months	5.3 (sd=.95)	mean=5.5 (sd=1.1)	21.8 (sd=.83)	mean=22.6 (sd=1.7)

b. Scores of children with cochlear implants

Chronological age (months)	Group	Digit Span (ODEDYS)		Morphosyntax (ELO)	
		Our CF group	Norm	Our CF group	Norm
77	CF+ early	3	mean=4.3 (sd=.96)	14	mean=15.6 (sd=3.8)
110	CF+ early	5	mean=4.7 (sd=.5)	23	mean=21.7 (sd=2.1)
118	CF+ early	5	mean=4.7 (sd=.5)	22	mean=21.7 (sd=2.1)
128	CF+ early	4	mean=5.5 (sd=1.1)	20	mean=22.6 (sd=1.7)
139	CF+ early	3	mean=5.5 (sd=1.1)	24	mean=22.6 (sd=1.7)
60	CF+ late	4	mean=4.1 (sd=.98)	9	mean=10.5 (sd=3.1)
107	CF+ late	4	mean=4.7 (sd=.5)	17	mean=21.7 (sd=2.1)
125	CF+ late	5	mean=5.5 (sd=1.1)	22	mean=22.6 (sd=1.7)
114	CF- early	5	mean=4.7 (sd=.5)	24	mean=21.7 (sd=2.1)
135	CF- early	4	mean=5.5 (sd=1.1)	21	mean=22.6 (sd=1.7)
139	CF- early	6	mean=5.5 (sd=1.1)	23	mean=22.6 (sd=1.7)
74	CF- late	4	mean=4.3 (sd=.96)	10	mean=15.6 (sd=3.8)
79	CF- late	2	mean=4.3 (sd=.96)	no data	mean=15.6 (sd=3.8)
100	CF- late	3	mean=4.5 (sd=.6)	8	mean=20.6 (sd=2.5)

APPENDIX 5.6. RESULTS OF STATISTICAL ANALYSES USING HEARING_AGE INSTEAD OF CHRONOLOGICAL_AGE FOR CONSONANT AND VOWEL PRODUCTION

a. Results of statistical analyses

Consonant production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
p < .001	p = .036	p = .001	n.s.

Consonant cluster production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
p = .007	n.s.¹	p < .001	n.s.

Vowel production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
n.s.¹	n.s.¹	p < .001	n.s.

¹results in bold differ from the results with Chronological_Age

b. Estimates of the statistical power

Consonant production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
100%	68,9%²	94,2%	94,3%

Consonant cluster production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
81,8%	66,5%	100%	96%

Vowel production			
CF- late vs CF- early	CF+ late vs CF+ early	CF- late vs CF+ late	CF- early vs CF+ early
85,3%²	94,9%²	99,9%	98,6%

²results in bold differ from the results with Chronological_Age

APPENDIX 5.7. STATISTICAL RESULTS AND POWER ESTIMATES OF THE STATISTICAL ANALYSIS FOR MANNER AND PLACE OF ARTICULATION SUBSTITUTION

a. Manner of articulation substitution

Plosive		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,5%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	58,1%
CF- late vs CF+ late	p < .001	96,8%
CF- early vs CF+ early	n.s.	92,7%
Nasal		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,5%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	58,1%
CF- late vs CF+ late	p < .001	96,8%
CF- early vs CF+ early	n.s.	92,7%
Fricative		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,5%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	58,1%
CF- late vs CF+ late	p < .001	96,8%
CF- early vs CF+ early	n.s.	92,7%
Approximant		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,5%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	58,1%
CF- late vs CF+ late	p < .001	96,8%
CF- early vs CF+ early	n.s.	92,7%
Lateral approximant		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,5%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	58,1%
CF- late vs CF+ late	p < .001	96,8%
CF- early vs CF+ early	n.s.	92,7%

b. Place of articulation substitution

Labial		
CF- late vs CF- early	p < .001	95,6%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	p = .001	86,1%
CF- early vs CF+ early	n.s.	99,3%
Alveolar		
CF- late vs CF- early	p < .001	98,7%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	p = .015	78,5%
CF- early vs CF+ early	n.s.	99,3%
Postalveolar		
CF- late vs CF- early	p < .001	62%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	p < .001	89,1%
CF- early vs CF+ early	n.s.	90,9%
Palatal		
CF- late vs CF- early	n.s.	72,1%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	n.s.	96,5%
CF- early vs CF+ early	n.s.	100%
Velar		
CF- late vs CF- early	p < .001	85,9%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	p = .022	56,4%
CF- early vs CF+ early	n.s.	72,2%
Uvular		
CF- late vs CF- early	p < .001	97,2%
CF+ late vs CF+ early	n.s.	86,3%
CF- late vs CF+ late	n.s.	51%
CF- early vs CF+ early	n.s.	98,9%

APPENDIX 7.1. CANADIAN FRENCH CUED SPEECH READING SCALE

Date :
Participant :
SLT :

Canadian French Cued Speech reading level



Low	Medium	Good	High
Few syllables are decoded at slow speed, in particular according to lip reading	Few familiar words are decoded at slow speed	Words and simple sentences are decoded at a slightly reduced speed of speech	Words and simple or complex sentences are decoded at speed of speech

ANNEXES

Annexe 3.1. Fiche de passation du TERMO, avant huit ans.....	275
Annexe 3.2. Fiche de passation du TERMO, dès huit ans	276
Annexe 3.3. Fiche de passation empan de chiffre endroit (ODEDYS, Jacquier-Roux et al., 2005)	277
Annexe 3.4. Formulaire de consentement pour l'étude EULALIES	278
Annexe 3.5. Questionnaire de langage et BD.....	280
Annexe 3.6. Tâche de dénomination d'images de la batterie EULALIES.....	288
Annexe 3.7. Liste des amorces proposées pour la tâche de dénomination d'images	291
Annexe 3.8. Scores aux tâches d'inclusion.....	293
Annexe 3.9. Guides d'utilisation PHON	296
Annexe 3.10. Consignes de transcription.....	312
Annexe 4.1. Différences entre le protocole enregistré sur OSF et le protocole effectif	315
Annexe 4.2. Test de conscience phonologique	316
Annexe 4.3. Formulaire de consentement et questionnaires de langage de l'étude ArtiMtl.....	319
Annexe 4.4. Scores aux épreuves de conscience phonologique	326
Annexe 5.1. Poster présenté dans le cadre de la conférence ICPC 2019.....	328
Annexe 7.1. Poster présenté dans le cadre de la conférence ISSP 2020	329
Annexe 7.2. Poster présenté dans le cadre de la conférence SMC 2022.....	330

ANNEXE 3.1. FICHE DE PASSATION DU TERMO, AVANT HUIT ANS

Numéro de participant : Date :
--

Répétition de mots

papillon		poire	
fumée		feu	
bébé		bateau	
lit		couteau	
noix		marché	
orange		champignon	
moto		oiseau	
vache		malade	
garçon		savon	
canard		ananas	
	/10		/10

Réception de phrases simples

Le chien dort sur le canapé	
Les élèves regardent le tableau	
Attention, c'est très chaud !	
La feuille est déchirée	
La fille va au cinéma	
	/5

Le chat joue sur le tapis	
La maîtresse distribue les cahiers	
Attends moi, j'arrive !	
Le pantalon est taché	
Les enfants vont à la montagne	
	/5

NIVEAU DE DECODAGE (sans voix)			
<input type="checkbox"/> Faible	<input type="checkbox"/> Moyen	<input type="checkbox"/> Bon	<input type="checkbox"/> Très Bon
Perception de mots simples < 5	Perception de mots simples > 5	Perception de mots simples > 7	Perception de mots simples ± 10
Perception de phrases simples	Perception de phrases simples	Perception de phrases simples ± 5	Perception de phrases simples ± 10
Très faible perception de mots simples (vocabulaire courant)	Perception de quelques mots simples (vocabulaire courant) mais pas de phrases simples	Perception de mots simples (vocabulaire courant) et de phrases simples (pas trop longues)	Très bonne perception de mots simples et de phrases simples, peu importe leur longueur

ANNEXE 3.2. FICHE DE PASSATION DU TERMO, DES HUIT ANS

Numéro de participant : Date :
--

Répétition de mots

repas		volcan	
milieu		refrain	
sapin		tailleur	
sourcil		tissu	
museau		signal	
talon		soldat	
cadeau		départ	
réveil		boucher	
bouquet		berger	
grenier		moineau	
	/10		/10

Réception de phrases simples

La voiture est rouge et jaune	
Le garçon est parti à l'école	
Attention, c'est très chaud !	
La bague scintille au doigt	
Le départ est prévu pour demain	
	/5

Tu as de belles chaussures	
La statue s'élève sur la place	
Non, c'est trop difficile !	
Le courrier est arrivé en retard	
La lampe est suspendue au plafond	
	/5

NIVEAU DE DECODAGE (sans voix)			
<input type="checkbox"/> Faible	<input type="checkbox"/> Moyen	<input type="checkbox"/> Bon	<input type="checkbox"/> Très Bon
Perception de mots simples < 5	Perception de mots simples > 5	Perception de mots simples > 7	Perception de mots simples ± 10
Perception de phrases simples	Perception de phrases simples	Perception de phrases simples ± 5	Perception de phrases simples ± 10
Très faible perception de mots simples (vocabulaire courant)	Perception de quelques mots simples (vocabulaire courant) mais pas de phrases simples	Perception de mots simples (vocabulaire courant) et de phrases simples (pas trop longues)	Très bonne perception de mots simples et de phrases simples, peu importe leur longueur

ANNEXE 3.3. FICHE DE PASSATION EMPAN DE CHIFFRE ENDROIT (ODEDYS, JACQUIER-ROUX ET AL., 2005)

Numéro du participant : _____ Date : _____

Âge : _____ Classe : _____

Epreuve d’empan de chiffres : empan endroit (extrait ODEDYS)

Enoncer dans l’ordre les suites de chiffres de la fiche, en séparant bien chaque chiffre d’une seconde. L’enfant répète les chiffres dans le même ordre. On arrête lorsque l’enfant a deux échecs pour une suite de même nombre de chiffres (ex : échoue 2 fois pour une suite de 5 chiffres).

Mettre une croix quand la suite est donnée juste. L’empan endroit est le nombre de chiffres de la plus longue suite donnée juste.

	Empan endroit
2-9	
1-5-3	
7-2-4	
2-6-7-1	
3-9-4-6	
4-7-2-9-5	
8-3-6-2-4	
6-3-2-1-4-8	
5-7-9-3-6-4	
3-5-1-8-7-9-2	
2-8-9-4-6-1-7-3	

NOTICE D'INFORMATION ET FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ÉCLAIRÉ

Titre du projet :

Production et perception de la parole chez les enfants âgés de 3 à 11 ans

Chercheuses titulaires responsables scientifiques du projet :

Mme Vilain Anne, Université Grenoble Alpes, GIPSA-lab, UMR CNRS 5216

Mme Løevenbruck Héléne, Université Grenoble Alpes, CNRS, LPNC, UMR CNRS 5105

But du projet de recherche :

Cette étude a pour objectif de proposer une description détaillée de la production et de la perception de la parole des enfants francophones âgés de 3 à 11 ans. Il s'agit d'enregistrer votre enfant en situation de répétition/production/perception de mots et de sons du langage. L'objectif n'est pas d'évaluer le niveau de langage de votre enfant mais de collecter des données sur les étapes de l'acquisition du langage par les enfants francophones.

Ce que l'on attend de votre enfant (méthodologie)

Tout d'abord, si votre enfant n'a pas passé récemment de test auditif prescrit par un professionnel de santé, un court test d'acuité auditive lui sera proposé : on lui fera écouter des sons calibrés avec un casque audio et il/elle devra nous dire lorsqu'il/elle entend les sons (en levant la main par exemple). Ce test durera environ 5 minutes.

Votre enfant passera également deux courts tests de langage : pour le premier, on lui demandera de montrer les images correspondant aux mots prononcés par l'expérimentatrice ; pour le second, il/elle devra produire des phrases décrivant les images présentées. Ce test de langage durera environ 5 minutes. Ensuite, différentes tâches d'écoute de mots et de sons du langage, de répétition et de production de mots ou de sons du langage vont être proposées à votre enfant. Ces tâches ont pour objectif de décrire la façon dont les enfants articulent et perçoivent les mots et les sons du français. Dans un premier temps, des images d'objets de la vie quotidienne seront présentées à votre enfant sur un écran d'ordinateur ou sur une tablette et celui-ci devra dire ce qu'il/elle voit. Par exemple, si l'image représente un chat, l'enfant doit dire le mot « chat ». Puis, des séquences seront proposées en répétition. Votre enfant devra répéter des syllabes simples de type « pa », « ta » et des mots qui n'existent pas comme « minpa » ou « joté ». Il sera également proposé à votre enfant de répéter le plus vite possible des séquences de sons. Enfin, l'enfant portera un casque audio dont le volume sonore sera réglé à un niveau confortable (inférieur à 80 dB, seuil de confort homologué) pour écouter des mots et juger si les mots sont dits correctement ou non (par exemple « pankalon»). Votre enfant sera assis/e sur une chaise, devant une table sur laquelle seront posés un ordinateur (ou une tablette) et un microphone. Sa voix sera enregistrée (uniquement sa voix, pas d'images).

Les enregistrements durent entre 45 mn et 1h et peuvent se faire en 2 séances d'environ 30 mn ou en une seule séance.

Vos droits à la confidentialité

Toutes les informations recueillies à partir de l'étude resteront confidentielles. Les résultats des mesures peuvent être publiés à des fins scientifiques, mais l'identité des participants ne sera pas révélée, elle sera masquée par un identifiant anonyme et aucun autre renseignement ne sera dévoilé qui puisse révéler l'identité du participant. Les enregistrements audio et les résultats de la tâche d'écoute ne contiendront pas le nom du participant ni d'autres informations personnelles. La correspondance entre l'identité du participant et cet identifiant sera gardée dans un endroit sécurisé et seules les responsables scientifiques de l'étude (Anne Vilain et Héléne Løevenbruck) y auront accès.

Vos droits de vous retirer de la recherche en tout temps

La participation à cette étude est entièrement volontaire. Si vous décidez de ne pas laisser votre enfant y participer, il n'y aura pas de conséquences négatives. Sachez que même si vous décidez dans un premier temps de laisser votre enfant participer à l'étude, vous pouvez retirer votre consentement et cesser la participation de votre enfant à tout moment. Par ailleurs votre enfant pourra à tout moment demander à cesser sa participation. Vous pourrez aussi demander à supprimer toutes les données déjà enregistrées.

Bénéfices

L'expérience ne présente pas pour vous/votre enfant de bénéfice personnel. Cette étude permettra d'améliorer notre compréhension de la production et de la perception de la parole chez les enfants présentant ou non des troubles du développement des sons de parole. Bien que l'objectif immédiat soit théorique, l'objectif à plus long terme est d'obtenir des résultats permettant de mieux comprendre les mécanismes de production de la parole et ainsi d'améliorer les méthodes de remédiation déjà existantes chez les enfants présentant des troubles du langage oral.

Risques possibles

Ces expériences ne présentent aucun risque ou danger connu. Néanmoins, si votre enfant manifeste un inconfort ou s'il ne souhaite pas continuer l'expérimentation, il pourra s'arrêter à tout moment.

Diffusion

Les résultats de cette recherche pourront être publiés dans des revues scientifiques ou lors de congrès scientifiques.

Vos droits de poser des questions en tout temps

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche à tout moment en communiquant avec les responsables du projet par courrier électronique à :

Anne.Vilain@univ-grenoble-alpes.fr ou Helene.Loevenbruck@univ-grenoble-alpes.fr

Consentement à la participation

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, qu'on a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'on vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche en tout temps, sans préjudice.

D'autre part, avant l'enregistrement, des explications seront fournies à votre enfant et son consentement oral lui sera demandé. Il ou elle pourra arrêter les exercices à tout moment s'il ou elle n'a plus envie de participer.

Nom, Prénom de l'enfant :

Nom, Prénom du parent :

J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte que mon enfant participe à cette recherche :

oui non

J'accepte que l'INJS transmette des informations sur le suivi audiolinguistique et le développement langagier de mon enfant aux membres du projet EULALIES :

oui non

Date :

Signature :

DROIT À LA DIFFUSION D'ENREGISTREMENTS AUDIO

Je donne mon autorisation pour la diffusion de courts extraits sonores de mon enfant lors de communications scientifiques et universitaires (conférences, séminaires, ...), à condition que les dispositions suivantes d'anonymisation soient prises :

- utilisation de pseudonymes pour les participants
- masquage sonore des informations qui pourraient conduire à l'identification des participants, celle de leurs proches ou d'autres personnes (utilisation du prénom de l'enfant par exemple).

NB : Le projet portant sur la production de parole, ses auteurs ne peuvent pas s'engager à rendre anonymes par brouillage de la voix les enregistrements audio, mais s'engagent à ne pas diffuser d'extraits compromettant des personnes enregistrées.

Je donne mon autorisation pour la diffusion d'enregistrements de mon enfant dans le cadre universitaire :

oui non

Date :

Signature :

Cet exemplaire est à retourner aux chercheuses

a. Enfants au développement typique

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 1/2

(À remplir par le parent/représentant légal)

1. INFORMATIONS PERSONNELLES



Date :



Nom et Prénom de l'enfant :



Date de naissance :



École : - Classe :



Profession du parent :
.....

2. INFORMATIONS MÉDICALES



Est-ce que votre enfant est suivi en orthophonie (difficultés langagières) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....



Est-ce que votre enfant est suivi en audiologie (difficultés auditives) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....



Est-ce que votre enfant est suivi en ophtalmologie (difficultés visuelles) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 2/2

(À remplir par le parent/représentant légal)

3. MOYENS DE COMMUNICATION

 Depuis quand est-ce que votre enfant est en contact avec le français ?



depuis sa naissance



depuis l'entrée à la garderie (ou crèche ou assistante maternelle)



depuis l'entrée à l'école maternelle (3 ans)



depuis l'entrée à l'école élémentaire (6 ans)

autre :

 Est-ce que d'autres langues sont utilisées à la maison ? oui non



 Lesquelles ?



 Qui les utilise ?



Dans quelles situations ?



Est-ce que votre enfant parle ou comprend d'autres langues ? oui non



 Lesquelles ?



 Si votre enfant parle plusieurs langues, où est-ce qu'il les utilise ?



 Combien de fois par jour ou par semaine ?

.....

Y a-t-il d'autres informations que vous souhaiteriez nous communiquer concernant le langage de votre enfant ?

.....

.....

.....

Si vous acceptez d'être re-contacté, merci de nous laisser vos coordonnées :

.....

.....

.....



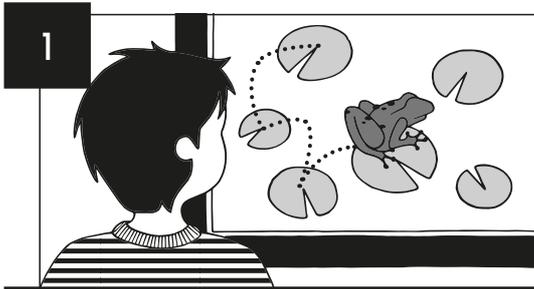
45 minutes



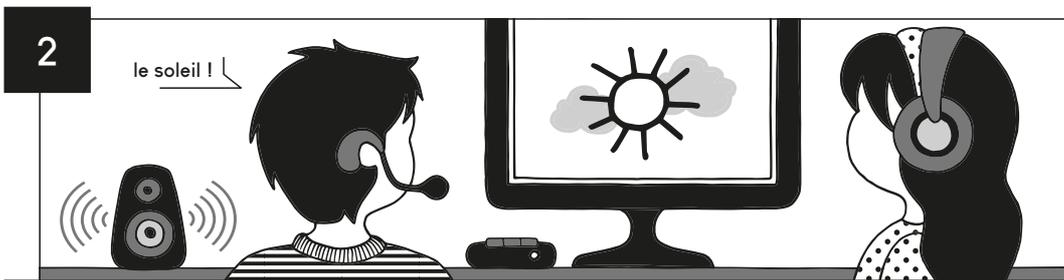
anonyme



sans danger



L'enfant suit les déplacements d'une grenouille sur une tablette.



le soleil !

L'enfant dit ce qu'il voit sur l'ordinateur et répète des mots.



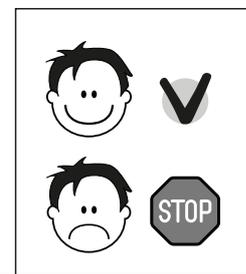
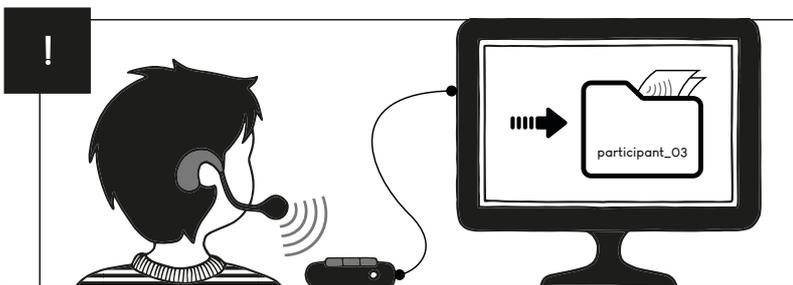
ici, c'est le
boulanger



là, c'est la...

la boulangère !

L'enfant regarde des images et termine les phrases de l'adulte.



Les réponses de l'enfant sont enregistrées et conservées (anonyme).
On peut arrêter le test à tout moment si l'enfant ne veut plus continuer.

b. Enfants porteurs d'implants cochléaires

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 1/4

(À remplir par le parent/représentant légal)

1. INFORMATIONS PERSONNELLES

-  Date :
-  Nom et Prénom de l'enfant :
-  Date de naissance :
-  École : - Classe :
-  Profession du parent :
.....

2. SURDITÉ

-  Degré de surdité : léger moyen sévère profond
-  Âge de dépistage :
-  Présence de surdité dans la famille ? (parents sourds, frères et soeurs sourds) :
.....
-  Seuil auditif (sans aide) : gauche : droit :

3. AIDES TECHNIQUES

- | | OREILLE GAUCHE | | OREILLE DROITE | |
|---|---|---|--|---|
|  Appareillage : |  |  |  |  |
| | <input type="checkbox"/> prothèse | <input type="checkbox"/> implant | <input type="checkbox"/> prothèse | <input type="checkbox"/> implant |
|  Date de pose : | | | | |
|  Seuil auditif : | | | | |
|  Fréquence d'utilisation : | | | | |

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 2/4

(À remplir par le parent/représentant légal)

4. MOYENS DE COMMUNICATION

 Quel moyen de communication utilisez-vous avec votre enfant ?
 Oral Oral + AVT Oral + LPC Oral + signes Langue des signes

 Est-ce que votre enfant suit un programme AVT en ce moment ? oui non

Est-ce que votre enfant a suivi un programme AVT dans le passé ? oui non

 Si oui, quel était son âge lorsque les séances ont été arrêtées ?

 À quel âge votre enfant a-t-il commencé à suivre un programme AVT ?
.....



Est-ce que votre enfant utilise le CODE LPC ? oui non

 Depuis quel âge ?

 Où est-ce que votre enfant utilise le CODE LPC ?



à la maison à l'école chez ses grands-parents

autres lieux :

 Combien de fois par jour ou par semaine ?



Est-ce que votre enfant utilise la LANGUE DES SIGNES FRANÇAISE (LSF) ?

oui non

 Depuis quel âge ?

 Comment évaluez-vous son niveau en LSF ?

faible moyen bon très bon

 Où est-ce que votre enfant utilise la LSF ?



à la maison à l'école chez ses grands-parents

autres lieux :

 Combien de fois par jour ou par semaine ?

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 3/4

(À remplir par le parent/représentant légal)

 Depuis quand est-ce que votre enfant est en contact avec le français ?



depuis sa naissance



depuis l'entrée à la garderie (ou crèche ou assistante maternelle)



depuis l'entrée à l'école maternelle (3 ans)



depuis l'entrée à l'école élémentaire (6 ans)

autre :

 Est-ce que d'autres langues sont utilisées à la maison ? oui non



? Lesquelles ?



Qui les utilise ?



Dans quelles situations ?



Est-ce que votre enfant parle ou comprend d'autres langues ? oui non



? Lesquelles ?



Si votre enfant parle plusieurs langues, où est-ce qu'il les utilise ?



 Combien de fois par jour ou par semaine ?

Y a-t-il d'autres informations que vous souhaiteriez nous communiquer concernant le langage de votre enfant ?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

QUESTIONNAIRE PROJET EULALIES

p. 4/4

(À remplir par le parent/représentant légal)

5. INFORMATIONS MÉDICALES



Est-ce que votre enfant est suivi en orthophonie (difficultés langagières) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....



Est-ce que votre enfant est suivi en audiologie (difficultés auditives) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....



Est-ce que votre enfant est suivi en ophtalmologie (difficultés visuelles) ?

oui (actuellement ou par le passé) non

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

.....
.....

Si vous acceptez d'être re-contacté, merci de nous laisser vos coordonnées :

.....
.....
.....



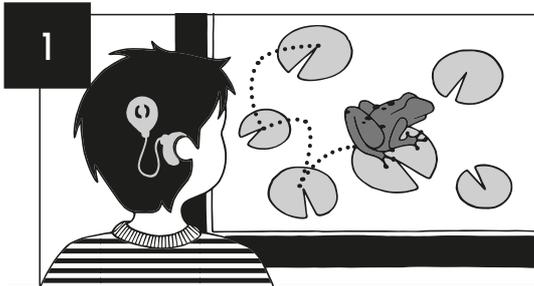
45 minutes



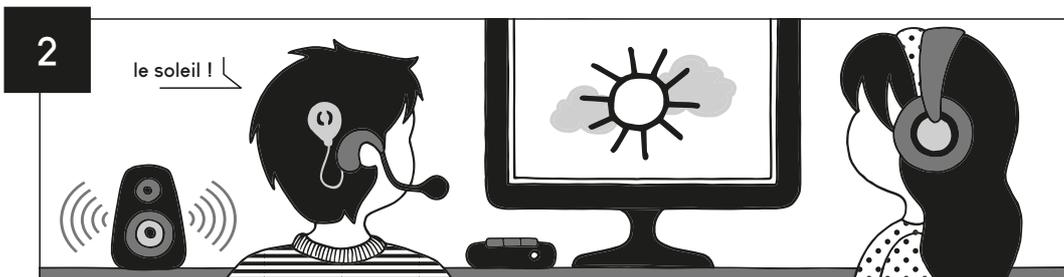
anonyme



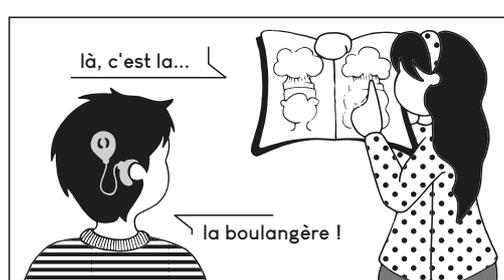
sans danger



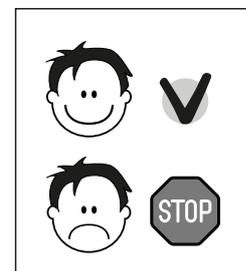
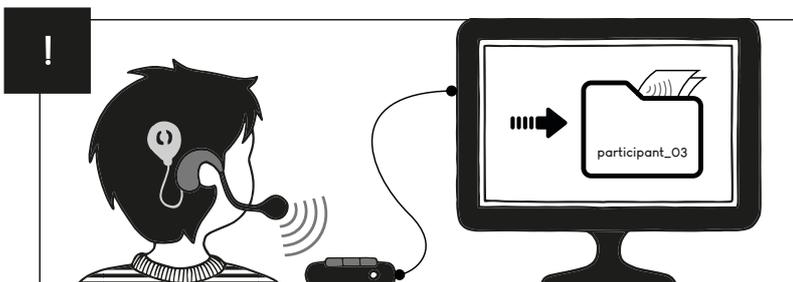
L'enfant suit les déplacements d'une grenouille sur une tablette.



L'enfant dit ce qu'il voit sur l'ordinateur et répète des mots.

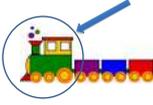


L'enfant regarde des images et termine les phrases de l'adulte.



Les réponses de l'enfant sont enregistrées et conservées (anonyme).
On peut arrêter le test à tout moment si l'enfant ne veut plus continuer.

ANNEXE 3.6. TACHE DE DENOMINATION D'IMAGES DE LA BATTERIE EULALIES

Essais :			
C'est parti :			
			
			
			
			
			
			





ANNEXE 3.7. LISTE DES AMORCES PROPOSEES POUR LA TACHE DE DENOMINATION D'IMAGES

Stimuli	Spontané	Amorçage sémantique	Amorçage phonologique	Répétition
Essai				
Le chien		C'est un animal qui fait "ouaf-ouaf", c'est le...	C'est le ch...	
Le piano		On appuie sur ses touches et ça fait de la musique, c'est le...	C'est le pi...	
La goutte		C'est une petite quantité d'eau qui reste quand on ferme le robinet, c'est la...	C'est la g...	
Test				
L'oreiller		On pose sa tête dessus quand on dort dans le lit, c'est...	C'est l'o...	
La locomotive		C'est la machine qui tire les autres wagons du train, c'est la...	C'est la l...	
L'hippopotame		C'est un gros animal qui vit en Afrique et qui marche dans l'eau, c'est...	C'est l'hi...	
L'indien		C'est une personne qui vit en Amérique et qui porte des coiffures avec des plumes, c'est...	C'est l'in...	
La griffe		C'est ce qui est pointu au bout des pattes de certains animaux, c'est les...	C'est les g...	
La jambe		C'est la partie du corps qui permet aux humains de marcher, c'est la... (possibilité de pointer ses jambes)	C'est la j...	
Le docteur		C'est la personne qui soigne quand on est malade, c'est le...	C'est le d...	
L'hélicoptère		C'est un objet qui permet de voler avec 4 grandes pales, c'est...	C'est l'hé...	
La machine à laver		On lave les habits avec, c'est la...	C'est la m...	
Le supermarché		C'est un grand magasin où on achète des aliments, c'est le...	C'est le s...	
L'huile		C'est du gras qui permet de cuisiner, c'est de...	C'est l'hu...	
Le pyjama		C'est le vêtement qu'on porte pour dormir, c'est le...	C'est le py...	
Le peigne		Ca sert à démêler les cheveux, c'est le...	C'est le p...	
La farine		C'est la poudre blanche qui permet de faire les gâteaux et le pain, c'est la...	C'est la f...	
L'œuf		C'est ce qu'on trouve dans le nid des oiseaux, c'est...	C'est l'oe...	
Le poisson		C'est un animal qui vit dans l'eau et qui a des nageoires, c'est le...	C'est le p...	
Le déguisement		C'est un costume qu'on porte pour carnaval ou pour halloween, c'est le...	C'est le d...	
La fourchette		C'est un ustensile avec lequel on mange, c'est la...	C'est la f...	
Le tigre		C'est un animal sauvage qui ressemble à un très gros chat et qui a des rayures, c'est le...	C'est le t...	
Le hibou		C'est un oiseau qui vit la nuit et qui fait "hou-hou", c'est le...	C'est le hi...	
L'escargot		? C'est un mollusque qui a une coquille, c'est...	C'est l'è...	
Le médicament		C'est la pilule qu'on prend lorsqu'on est malade, c'est le...	C'est le m...	
L'uniforme		Ce sont les habits tous pareils que portent les pompiers, les policiers et certains écoliers, c'est...	C'est l'u...	
Le citron		C'est un fruit jaune et acide, c'est le...	C'est le ci...	
La neige		C'est des flocons qui tombent du ciel quand il fait froid, c'est la...	C'est la n...	
La main		C'est la partie qui est au bout du bras et qui a 5 doigts, c'est la...	C'est la m...	
La capuche		C'est la partie d'un manteau ou d'un gilet qui peut se mettre sur la tête, c'est la...	C'est la c...	
Le parapluie		C'est un objet qui permet de se protéger de la pluie, c'est le...	C'est le p...	
La chaussette		C'est un petit vêtement qui s'enfile sur le pied, c'est la...	C'est la ch...	
L'avion		C'est un moyen de transport qui permet de voler, c'est...	C'est l'a...	
Le biberon		C'est un objet avec une tétine qui permet de donner le lait au bébé, c'est le...	C'est le b...	
La grenouille		C'est un animal qui saute et qui fait "quoi-quoi", c'est la...	C'est la g...	
L'éléphant		C'est un gros animal qui vit en Afrique et qui a une trompe, c'est...	C'est l'é...	
L'aspirateur		C'est un appareil qui sert à faire le ménage et à ramasser la poussière, c'est...	C'est l'a...	

Le camion		C'est un gros véhicule, c'est le...	C'est le c...	
Le bonhomme		C'est un dessin qui représente un humain, c'est le...	C'est le b...	
Le yaourt		C'est un aliment avec du lait qu'on mange à la fin des repas, c'est le...	C'est le ya...	
L'aquarium		C'est le réservoir où on peut garder les poissons, c'est...	C'est l'a...	
La langue		C'est ce qu'il y a dans la bouche, c'est la...	C'est la l...	
Le menton		C'est la partie du visage sous la bouche, c'est le...	C'est le m...	
Le zèbre		C'est un animal qui vit en Afrique et qui ressemble à un cheval avec des rayures, c'est le...	C'est le z...	
Le ventilateur		C'est un appareil qui sert à faire du vent quand on a chaud, c'est le...	C'est le v...	
L'extraterrestre		C'est un habitant d'une autre planète, c'est...	C'est l'è...	
La tomate		C'est un aliment rouge et rond qu'on mange en salade, c'est la...	C'est la t...	
L'euro		C'est le nom des pièces qu'on utilise pour payer, c'est...	C'est l'eu...	
La couverture		C'est un tissu qui sert à tenir chaud dans le lit, sur les draps, c'est la...	C'est la c...	
Le rhinocéros		C'est un gros animal qui a une corne au bout du nez, c'est le...	C'est le r...	
Le dentiste		C'est la personne qui soigne les dents et les caries, c'est le...	C'est le d...	
La pieuvre		C'est un animal qui vit dans l'eau et qui a des tentacules avec des ventouses, c'est la...	C'est la p...	
L'ours		C'est un animal qui vit dans les forêts et qui dort tout l'hiver, c'est...	C'est l'ou...	
La gare		C'est le lieu où on prend le train, c'est la...	C'est la g...	
Le livre		C'est un objet avec des pages et qui raconte une histoire, c'est le...	C'est le l...	
L'ordinateur		C'est l'objet qui permet d'aller sur internet, écrire des textes et jouer à des jeux, c'est...	C'est l'o...	
Le crocodile		C'est un animal vert qui a une grande bouche avec des dents et qui vit dans les rivières, c'est le...	C'est le c...	
Les ciseaux		C'est l'objet qui permet de découper du papier, c'est les...	C'est les c...	
La bibliothèque		C'est le lieu où l'on trouve beaucoup de livre qu'on peut emprunter, c'est la...	C'est la b...	
Le téléphone		C'est un objet qui permet d'appeler d'autres personnes, c'est le...	C'est le t...	
La robe		C'est un habit souvent porté par les filles, c'est la...	C'est la r...	
L'enveloppe		C'est une pochette de papier pour mettre une lettre dedans, c'est...	C'est l'en...	
Le stade		C'est le lieu où on peut voir des matchs de sport, c'est le...	C'est le s...	
Le toboggan		C'est un jeu où les enfants peuvent glisser, c'est le...	C'est le t...	
Le cinéma		C'est la salle où on peut voir des films sur un grand écran, c'est le...	C'est le c...	
L'ongle		C'est ce qu'on a au bout des doigts, c'est...	C'est l'on...	
Le chocolat		C'est un aliment sucré qui vient du cacao et qu'on trouve souvent en tablette, c'est le...	C'est le ch...	
La voiture		C'est un véhicule qui roule sur des routes, c'est la...	C'est la v...	
La fraise		C'est un fruit rouge, c'est la...	C'est la f...	
Le loup		C'est un animal qui vit en meute dans la forêt et qui fait "ahou", c'est le...	C'est le l...	
Le vétérinaire		C'est la personne qui soigne les animaux, c'est le...	C'est le v...	

ANNEXE 3.8. SCORES AUX TACHES D'INCLUSION

Participant	Age (mois)	Classe	Groupe	Période d'implantation	Score PathSpan	Score Odedys	Score ELO
LM_069	77	GSM	CF+	précoce	4	3	14
LM_064	110	CE2	CF+	précoce	6	5	23
LM_018	118	CM1	CF+	précoce		5	22
LM_005	128	CM2	CF+	précoce		4	20
LM_012	139	6eme	CF+	précoce		3	24
LM_019	60	GSM	CF+	tardive		4	9
LM_010	107	CE1	CF+	tardive		4	17
LM_009	125	CM1	CF+	tardive		5	22
LM_065	114	CM1	CF-	précoce	5	5	24
LM_056	135	CM2	CF-	précoce		4	21
LM_066	139	6eme	CF-	précoce	6	6	23
LM_067	74	CP	CF-	tardive	4	4	10
LM_068	79	GSM	CF-	tardive	6	2	
LM_061	100	CE1	CF-	tardive	5	3	8
CP_076	61	GSM	TH	/	4	5	10
LZ_005	61	GSM	TH	/		4	13
LZ_004	62	GSM	TH	/	5	4	10
LZ_003	63	GSM	TH	/	2	6	13
LM_044	66	GSM	TH	/		4	9
LZ_010	66	GSM	TH	/		4	15
CP_068	67	GSM	TH	/	2	3	6
LM_048	67	GSM	TH	/		4	13
CP_070	68	GSM	TH	/	2	4	13
LM_035	68	GSM	TH	/			12
CP_066	69	GSM	TH	/	3	4	16
LM_034	69	GSM	TH	/			9
LM_043	69	GSM	TH	/		4	9
LM_049	69	GSM	TH	/		5	12
VB_010	70	CP	TH	/			
CP_071	71	GSM	TH	/	0	4	9
LM_041	71	GSM	TH	/		3	10
LM_046	71	GSM	TH	/		3	8
VB_008	72	CP	TH	/			
VB_011	73	CP	TH	/			
VB_009	74	CP	TH	/			
VB_021	74	CP	TH	/			
LM_037	75	GSM	TH	/		3	10
VB_018	75	CP	TH	/			
LM_032	76	CP	TH	/			17

OC_001	77	CP	TH	/		5	18
JS_008	78	CP	TH	/		5	24
VB_022	78	CP	TH	/			
CP_053	79	CP	TH	/		4	17
CP_058	79	CP	TH	/		4	18
CP_061	80	CP	TH	/		4	17
VB_012	80	CP	TH	/			
VB_020	80	CP	TH	/			
CP_051	81	CP	TH	/		6	18
JS_005	81	CP	TH	/		4	19
VB_019	81	CP	TH	/			
SH_008	82	CP	TH	/		4	14
JS_015	83	CP	TH	/		4	20
CP_055	84	CP	TH	/		5	16
VB_006	84	CE1	TH	/			
CP_057	87	CP	TH	/		4	17
VB_005	87	CE1	TH	/			
SH_009	88	CP	TH	/		6	18
VB_001	88	CE1	TH	:			
CP_056	89	CP	TH	/		5	20
CP_063	89	CP	TH	/		4	21
VB_016	90	CE1	TH	/			
VB_024	90	CE1	TH	/			
CP_034	92	CE1	TH	/		5	16
CP_036	92	CE1	TH	/		5	20
VB_023	94	CE2	TH	/			
CP_042	95	CE1	TH	/		4	18
CP_001	97	CE1	TH	/		6	23
VB_014	97	CE2	TH	/			
VB_017	97	CE2	TH	/			
VB_013	100	CE2	TH	/			
LM_033	101	CE2	TH	/			
VB_003	101	CE2	TH	/			
VB_007	102	CE2	TH	/			
CP_046	104	CE2	TH	/		4	18
CP_005	105	CE2	TH	/		6	21
VB_015	105	CE2	TH	/			
CP_044	108	CE2	TH	/		6	19
LM_026	108	CM1	TH	/			20
CP_014	117	CM1	TH	/		5	23
LM_031	118	CM1	TH	/			22
LM_029	119	CM1	TH	/			18

LM_030	127	CM2	TH	/			21
CP_017	129	CM2	TH	/		6	23
CP_019	131	CM2	TH	/		6	22
LM_059	133	CM2	TH	/		4	21

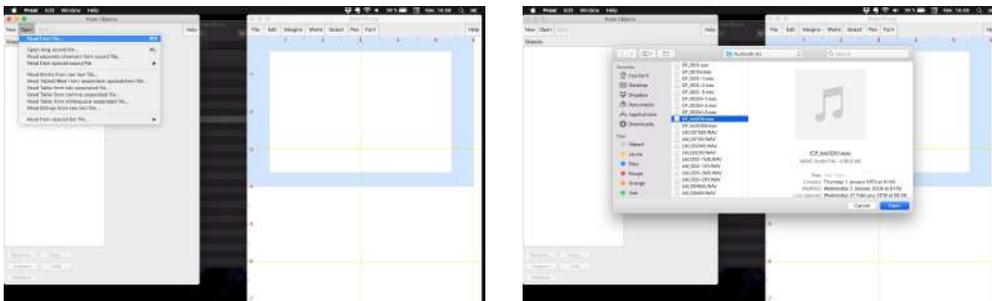
a. Méthodologie de transcription en double aveugle

PRAAT

Créer un fichier par tâche sous PRAAT

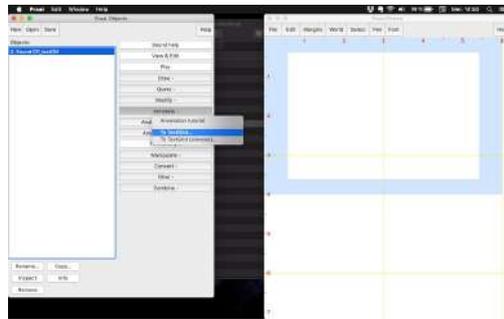
Ouvrir PRAAT

- **Read from file** > Sélectionner le fichier audio que l'on veut découper
/!\ Avec le nouvel enregistreur zoom, on sélectionne le fichier I (il correspond au micro tête)
Ex.: CP_Test01il.wav



Créer un fichier par tâche sous PRAAT

- **Annotate** > **To TextGrid** > Création d'un textgrid pour découper le fichier

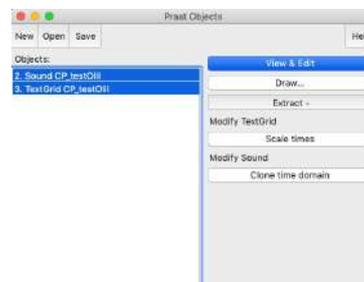


Tier names = decoupage
Point tiers = vide

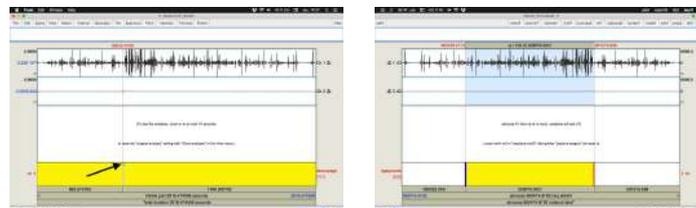


Créer un fichier par tâche sous PRAAT

- **View & Edit** : Sélectionner le fichier audio + le TextGrid

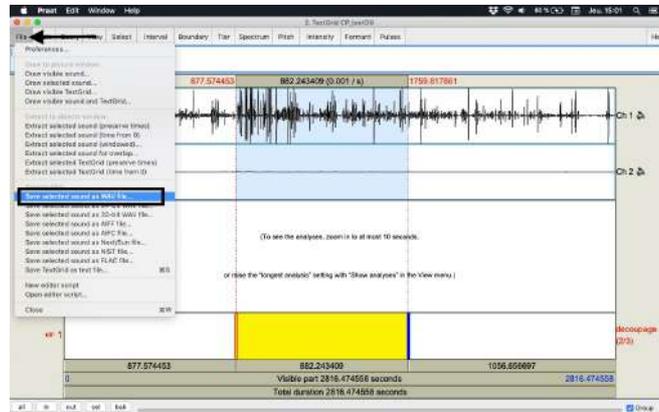


- Placer des frontières en début et fin de tâche : sélectionner l'endroit où la frontière doit être placée et cliquer pour l'ajouter



Créer un fichier par tâche sous PRAAT

- Sélectionner la portion audio correspondant à une tâche, bornée par les frontières (Ex.: Dénomination) et l'enregistrer au format .wav : *File > Save selected sound as WAV file*



- Répéter pour chaque tâche séparément

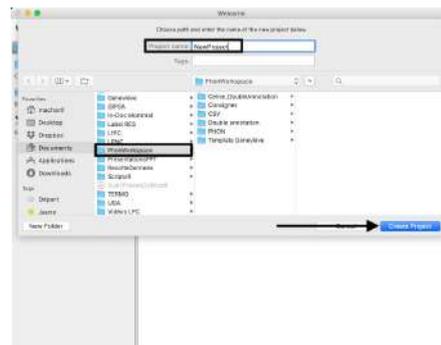
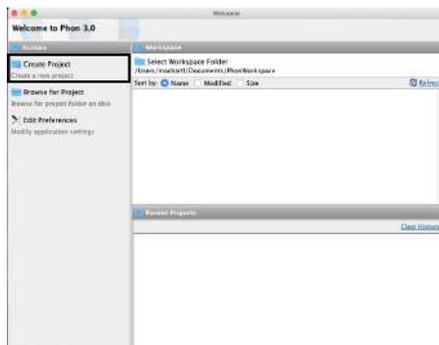
PHON

Ouvrir un fichier sous PHON

Ouvrir PHON

SOIT

Create project > Sélectionner le dossier dans lequel on veut enregistrer notre projet (*PhonWorkspace*) > Créer et nommer le dossier de notre projet (ex. : NewProject)

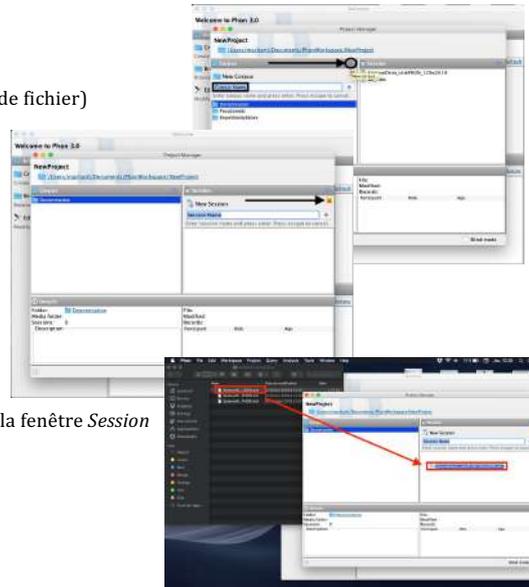


Ouvrir un fichier sous PHON

- Créer un corpus pour chaque tâche :
Denomination, Pseudomots, RepetitionSyllabes
(pas d'accent ni d'espace dans les noms de dossier)

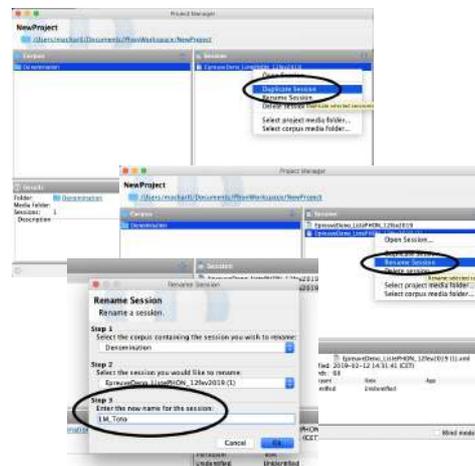
- Ne pas créer de session (croix rouge)

- Récupérer le *template* de la tâche et le faire glisser dans la fenêtre *Session*
 - Il existe un *template* pour chaque tâche



Ouvrir un fichier sous PHON

- Dupliquer le *template* pour transcrire les données d'un nouveau sujet (clic droit, *Duplicate*)
- Renommer le *template* à partir du numéro d'anonymat du sujet (clic droit, *Rename*)
Ex. : LM_Toto



- La Session LM_Toto s'ajoute dans Le Corpus Denomination

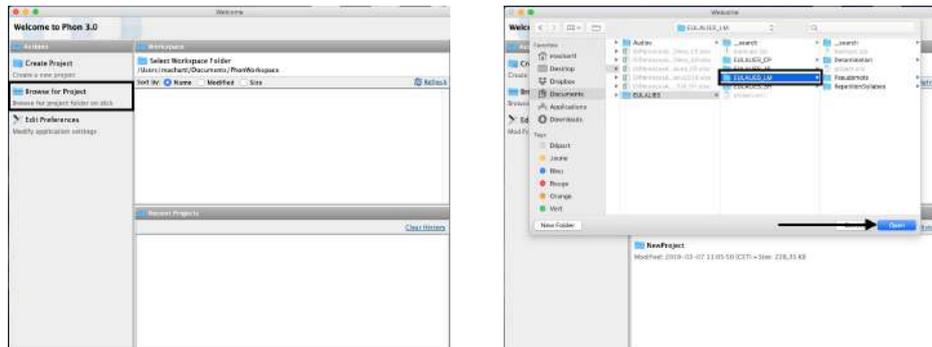


Ouvrir un fichier sous PHON

SOIT

Browse for project > Choisir le dossier dans lequel on souhaite travailler (il est préférable de le ranger dans votre dossier *PhonWorkspace*)

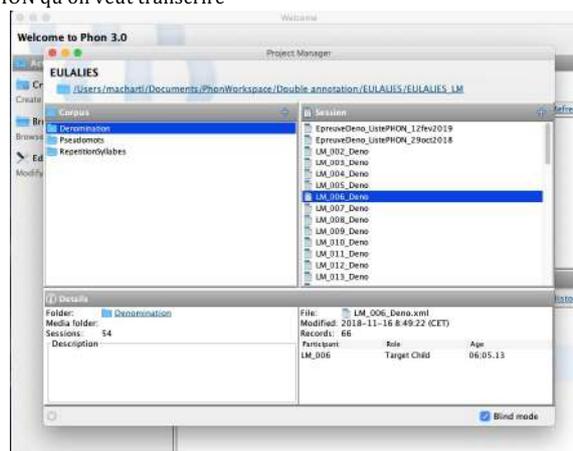
Ex.: EULALIES_LM



Ouvrir un fichier sous PHON

Ouverture du *ProjectManager*

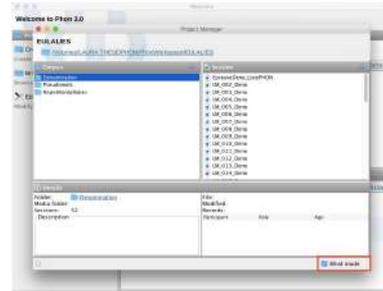
- Chaque corpus apparaît sous forme d'un dossier et contient les fichiers PHON de chaque sujet + le *template* de base de la tâche
- Ouvrir le fichier PHON qu'on veut transcrire



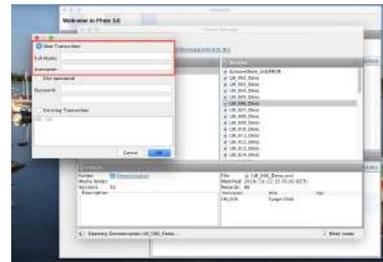
Transcription sous PHON

Activation du *Blind mode*

- Cocher la case *Blind mode* en bas à droite du *Project Manager*
- Ouvrir le fichier à traiter



- Ajouter un *New Transcriber*
Ou sélectionner un *Existing Transcriber* dans la liste
(si on reprend une transcription sur laquelle on a déjà travaillé)
/!\ Utiliser ses initiales en *Full name* et en *Username*
Ex : *Full Name* = LM et *Username* = LM



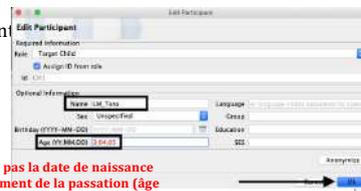
Transcription sous PHON

Session Information

- Récupérer le fichier audio correspondant au sujet
Session information > *Media* > Sélectionner le fichier



- Editer le participant

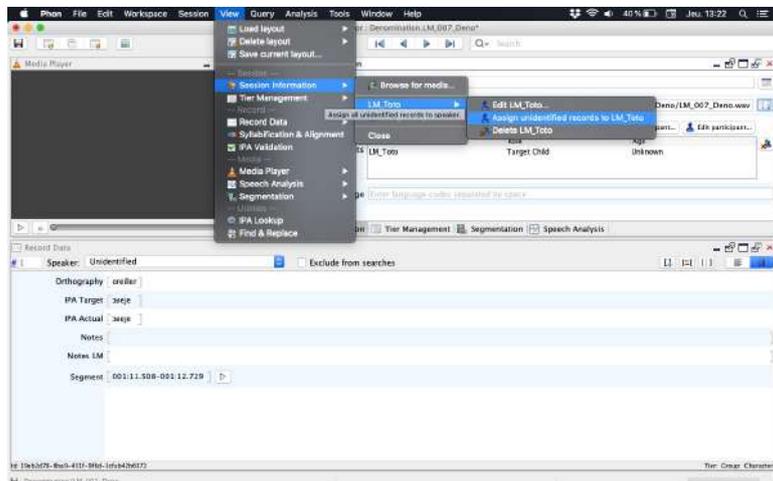


/!\ Nous ne rentrons pas la date de naissance
mais bien l'âge au moment de la passation (âge exact)



Transcription sous PHON

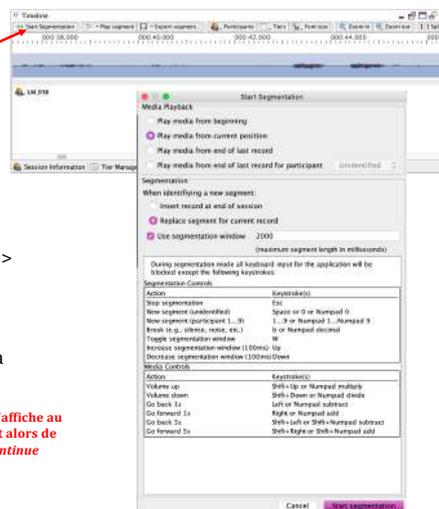
- Assigner le *Target Child* (sujet) à toutes les fiches : *View > Session Information > LM_Toto* (nom du participant)
> *Assign unidentified records to LM_Toto* (toutes les fiches seront donc assignées au participant LM_Toto)



Transcription sous PHON

Segmenter le fichier son en fonction des items de la tâche

- Sélectionner le menu *Timeline* (*View > Timeline*)
- Cliquer sur *Start Segmentation*



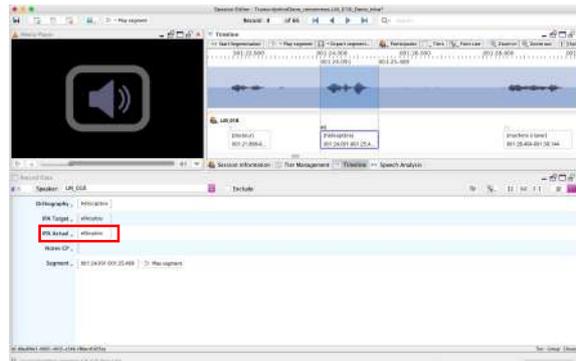
- Sélectionner *Replace Segment for current mode*
- Définir une fenêtre temporelle > *Use segmentation window > 2000*
- *Start segmentation*
- L'audio se lance tout seul, il suffit de cliquer sur la barre d'espace à chaque item produit > la fenêtre temporelle sera automatiquement enregistrée sur la fiche de l'item traité

!/\ Il est possible qu'un message d'erreur s'affiche au moment de lancer la segmentation, il suffit alors de cliquer sur *Close Speech Analysis and continue*

Transcription sous PHON

Transcrire les productions

- Une fois tout le fichier audio découpé en fiches (une fiche par item), ouvrir *Speech Analysis*
- Lancer l'audio du segment > *Play* en haut à gauche
- Réajuster la *Segmentation* si besoin > Sélectionner à la main l'intervalle de temps où la production de l'enfant a lieu et cliquer sur Entrée, la sélection est validée
- Transcrire la production dans *IPA Actual*



- Passer à la fiche suivante et poursuivre la transcription pour tous les items

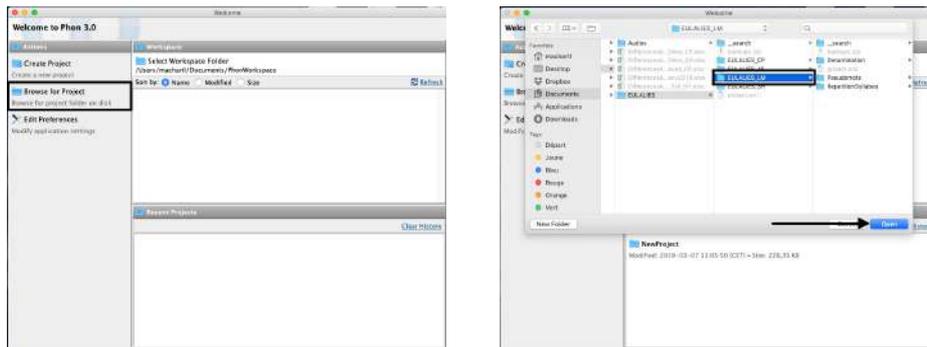
b. Méthodologie de validation, syllabation et alignement

Editer un fichier sous PHON

Ouvrir PHON

Browse for project > Choisir le dossier dans lequel on souhaite travailler (il est préférable de le ranger dans votre dossier *PhonWorkspace*)

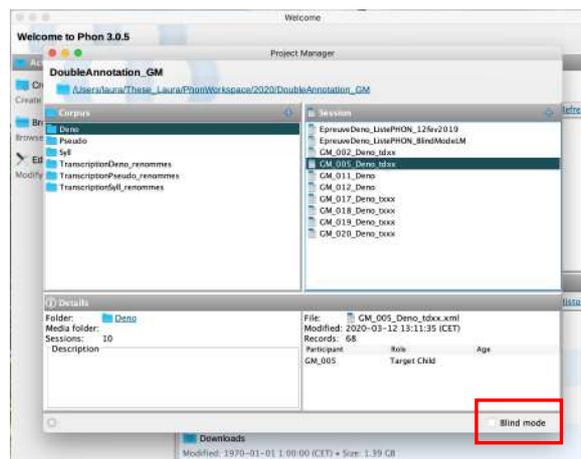
Ex.: EULALIES_LM



Editer un fichier sous PHON

Ouverture du *ProjectManager*

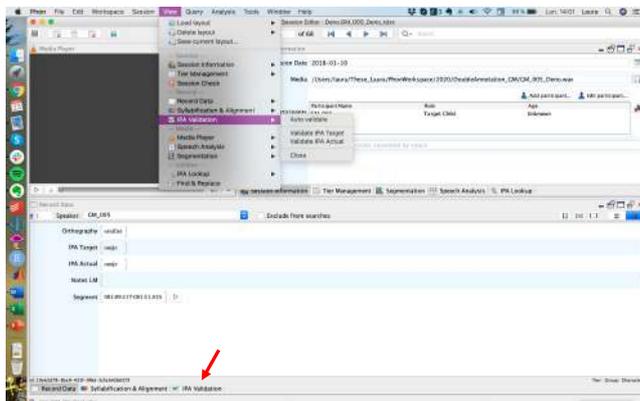
- Chaque tâche apparaît sous forme d'un corpus et contient les fichiers PHON de chaque sujet
- Ouvrir le fichier PHON qu'on veut valider **en désactivant le Blind Mode**



Validation sous PHON

Ouverture de IPA Validation

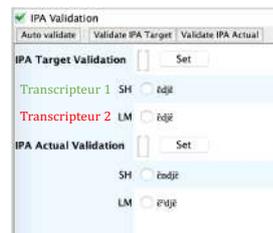
- View > clic sur IPA Validation
- Un nouvel onglet s'ouvre dans les différents onglets PHON (l'organisation peut être un peu différente de l'image ci-dessous)



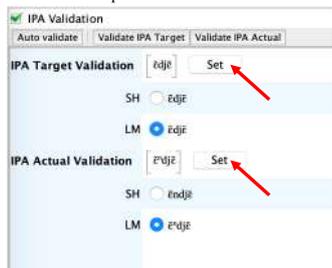
Validation sous PHON

IPA Validation – Double annotation

- Les transcriptions de tous les transcripteurs s'affichent (IPA Target + IPA Actual)



- On va choisir manuellement la transcription qui convient le mieux > clic sur Set pour valider
- On pense ici aussi à valider la IPA Target pour avoir une transcription de la cible



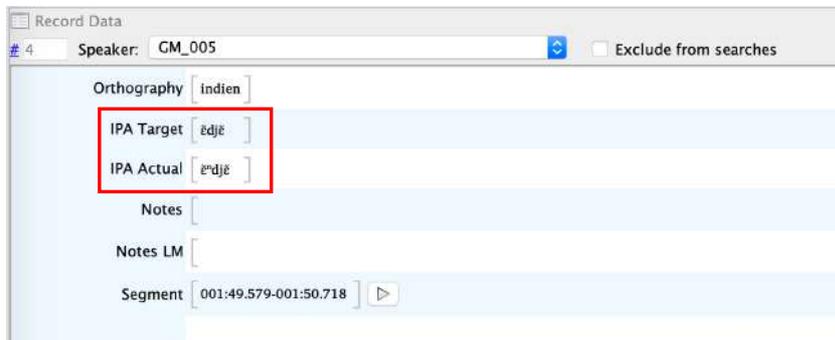
!/ il faut aussi penser à valider la transcription quand les transcripteurs sont d'accord !
(Sinon PHON gardera la transcription du fichier de base, à savoir la même que la IPA Target)

!/ il arrive parfois que la IPA Target ne soit pas tout à fait bien transcrite, penser à modifier les phonèmes concernés
(C'est le cas notamment pour certains /r/ qui doivent être transcrits /ʁ/ et certains /t/ à transcrire /t/)

Validation sous PHON

Record Data

- Si on retourne dans l'onglet *Record Data*, on constate que la validation a été prise en compte

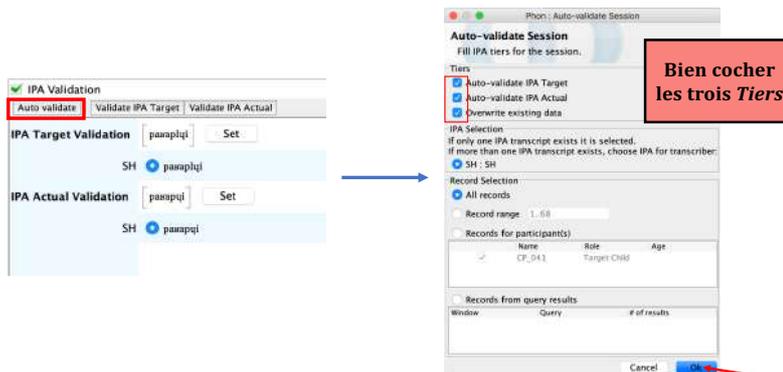


- Faire le même travail pour toutes les fiches
- Modifier le **nom du fichier** une fois la validation terminée > GM_005_tdvx

Validation sous PHON

IPA Validation – Un seul transcripateur

- Dans le cas où il n'y a qu'un seul transcripateur, il est possible de valider toutes les transcriptions avant de les réécouter une à une et de les modifier, si besoin > Outil **Auto-validate**

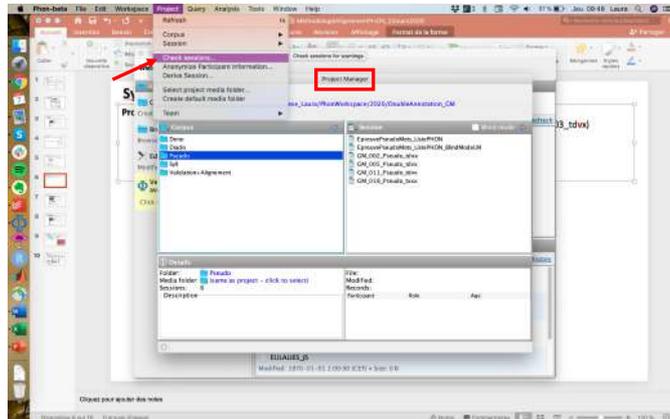


- Il suffit ensuite de modifier une à une les transcriptions qui nécessitent une correction (en respectant les points énoncés précédemment)
 - On corrige la transcription dans *IPA Actual* directement
- Modifier le **nom du fichier** et enregistrer une fois la validation terminée > GM_005_tdvx

Syllabification sous PHON

Project Manager

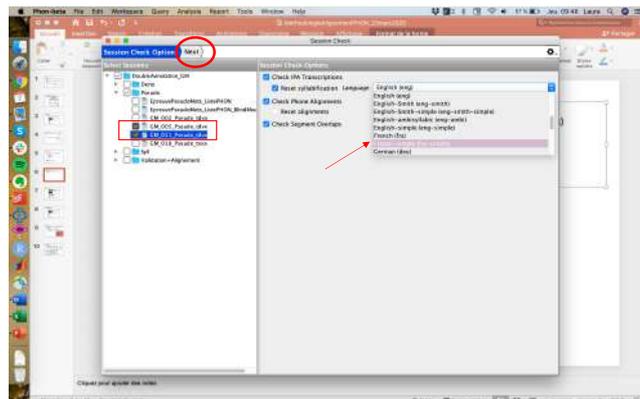
- Les fichiers que nous voulons aligner ont tous été validés > on le vérifie dans leur nom (ex. : LM_003_tdvx)
- Il s'agit donc maintenant de corriger la *Syllabification* avant de passer à l'*Alignement*
- *Project > Check sessions*



Syllabification sous PHON

Project Manager

- On choisit les fichiers concernés et on renseigne les infos essentielles
 - *Reset Syllabification*
 - *Language : French-simple (fra-simple)*
 - *Next*



Syllabification sous PHON

Session Check

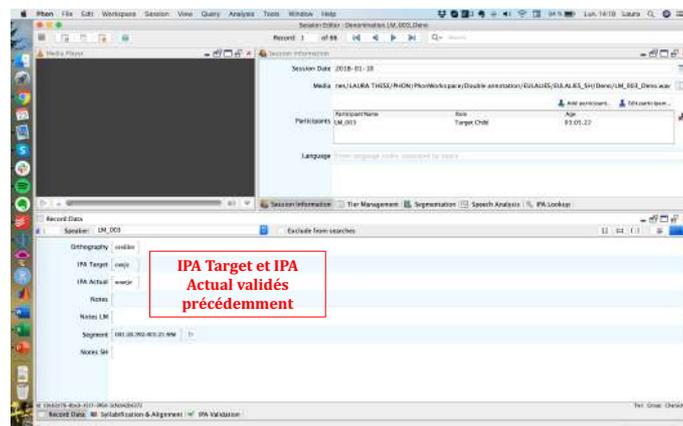
- PHON nous propose un *Report*, il suffit de le fermer, les modifications ont été faites

- On peut maintenant passer à l'*Alignement*

Alignement sous PHON

Record Data

- Le fichier ouvert a été validé (et la syllabification corrigée) > on le vérifie dans son nom LM_003_tdvx

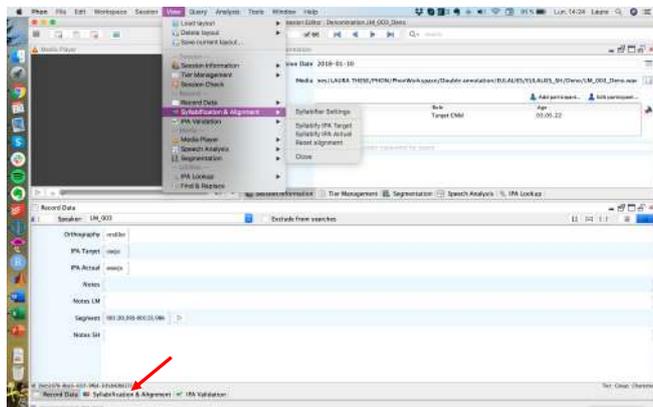


- On va maintenant aligner la transcription *IPA Actual* à celle de *IPA Target*

Alignement sous PHON

Ouverture de *Syllabification & Alignement*

- View > clic sur *Syllabification & Alignement*
- Un nouvel onglet s'ouvre dans les différents onglets PHON (l'organisation peut être un peu différente de l'image ci-dessous)

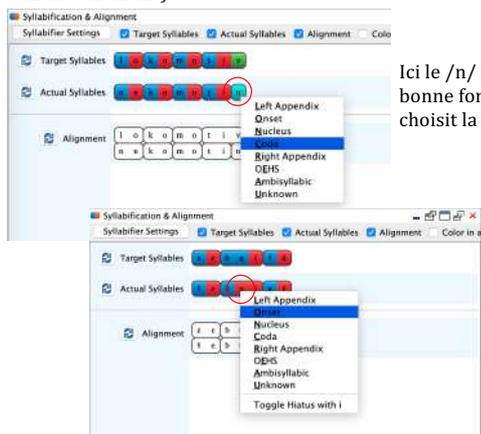


- On va maintenant aligner la transcription *IPA Actual* à celle de *IPA Target*

Alignement sous PHON

Syllabification & Alignement

- On vérifie que chaque phonème occupe la bonne « fonction » (normalement oui puisque la *Syllabification* a été corrigée une fois la *Validation* effectuée, il convient toutefois de vérifier, les glides sont à **corriger manuellement**)



Ici le /n/ de *IPA Actual* n'a pas la bonne fonction > clic droit, on choisit la bonne option (*Coda*)

Rappel :

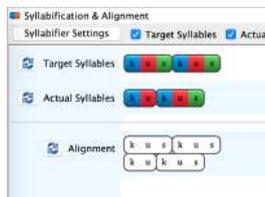
- *Onset* = consonne(s) en début de syllabe
- *Nucleus* = voyelle (noyau de la syllabe)
- *Coda* = consonne(s) en fin de syllabe

/!\ les glides sont considérées comme des consonnes, on utilisera donc *Onset* et *Coda* pour les qualifier

Alignement sous PHON

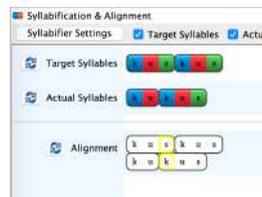
Syllabification & Alignement

- On vérifie que les phonèmes de *IPA Actual* sont alignés avec ceux de *IPA Target*



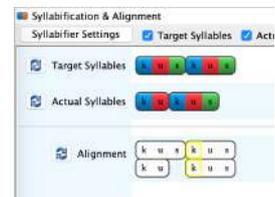
Le /s/ n'est pas produit

/!\ l'alignement considère que le /s/ est réalisé /k/, le /k/ est réalisé /u/ et le /u/ est réalisé /s/



Avec la souris, on clic sur le phonème à déplacer et on le fait glisser vers la gauche ou la droite

/!\ ici on va déplacer les 3 derniers phonèmes en même temps en glissant /k/ vers la droite



L'alignement est maintenant correct

- Faire le même travail pour toutes les fiches, en se basant sur les **Règles d'alignement** établies
- Une fois l'alignement terminé, renommer le fichier > GM_005_tdv**a**
- Les résultats peuvent être extraits

ANNEXE 3.10. CONSIGNES DE TRANSCRIPTION

Diacritiques utilisés

Dévoisement partiel	◌◌	[tiɣɤ]	LM_004_Item18_tigre_DevoisementPartiel
Voisement partiel	◌̣	[iɾopotam]	LM_019_Item3_hippopotame_VoisementPartiel
Phonème non relâché (en fin de mot ou de syllabe)	◌̚	[faɪi̯n̚] [pijaɪ̯m̚ã]	LM_010_Item13_farine_NonRelache GM_002_Item12_pyjama_NonRelache
Relâchement nasal (attention : sur mac il apparaît comme ɲ) Ne pas confondre avec la prénasalisation !	◌̤	[dã̤tist]	LM_015_Item47_dentiste_RelachementNasal
Relâchement glottal	◌̚		
Aspiré	◌ ^h	[p ^h amjɔ̃]	GM_002_Item35_camion_Aspiration
Labialisé	◌ ^w	[v ^w a]	GM_002_Item10_va_Labialise
Apical : réalisation avec la pointe de la langue	◌̟	[nɛ̟ʃ]	LM_010_Item24_neige_Apical
Dental : lieu d'articulation plus avancé qu'alvéolaire	◌̠	[pwaʃ̠ɔ̃]	LM_037_item15_poisson_Dental
Plus arrondi : arrondissement vocalique plus important	◌̙		
Moins arrondi : arrondissement vocalique moins important	◌̘		
Sliding : passage d'un phonème à un autre pendant la production	→	[zjau̯ɔ̃t]	LM_017_Item36_yaourt_Sliding
Diphthongue : variation de la voyelle pendant la production Liaison : on entend deux articulations différentes mais qui ne constituent qu'un seul phonème	◌̥	[kɔ̥kɔ̥diɔ̃l] [lḁl̥ju]	GM_017_Item54_crocodile_Liaison GM_002_Item37_yaourt_Liaison
Phonème nasal (autre que les nasales classiques)	◌̃	[õvĩlehe]	GM_002_Item1_oreiller_Nasalisation

Phonèmes utilisés

Occlusive glottal : marque la position d'un phonème qui n'est pas produit (coup de glotte)	ʔ (sourde)	[dɔʔtœʒ] [daʔtist]	LM_020_Item7_docteur_OcclusiveGlottalSourde LM_020_Item47_dentiste_OcclusiveGlottalSourde
Vibrante uvulaire : /R/ de Edith Piaf	ʀ (voisée)	[piʒiʁɔʀ]	GM_002_Item49_R
Fricatives interdentales : 'th' anglais (three, this,...)	θ (sourde) ð (voisée)	[maθinalave] [piðama]	LM_019_Item9_machinalaver_FricativeInterdentaleSourde LM_019_Item11_pyjama_FricativeInterdentaleSonore
Fricatives latérales : schlissement (bruit d'air qui passe sur les côtés de la langue)	ɬ (sourde) ɮ (voisée)	[aʔ] [kiʒeʒemã]	LM_019_Item25_as_FricativeLateraleSourde LM_003_Item16_déguisement_FricativeLateraleVoisee
Fricatives palatales : 'ch' allemand	ç (sourde) j (voisée)	[kapyç] [jãb]	LM_002_Item26_capuche_FricativePalataleSourde LM_017_Item6_jambe_FricativePalataleVoisee
Fricative vélaire sourde : 'jamon' espagnol 'ach' allemand	x (sourde) ɣ (voisée)	[xɛikɛɔ] [doxtœʁ] [kɣoɣodil]	LM_020_Item23_citron_FricativeVelaireSourde LM_045_Item7_docteur_FricativeVelaireSourde GM_005_Item54_crocodile_FricativeVelaireVoisee
Fricative uvulaire	χ (sourde)	[dɔχtœʒ]	GM_011_Item7_docteur_FricativeUvulaireSourde
Fricative glottale : marque la position d'un phonème non produit (aspiration) 'hot' anglais	h (sourde)	[ɛhtitytœʁ]	LM_014_Item46_instituteur_FricativeGlottale
Fricative alveolo- palatale	ç (sourde)	[aç]	GM_002_Item26_as_alveolo-palatale

Autres règles

1. On transcrit (**depuis avril 2020**) :
 - L'allongement vocalique à l'aide du diacritique :
Ex. 1 :
Ex. 2 :
 - Les pauses : si l'enfant fait une pause dans sa production, celle-ci sera symbolisée un .
Ex. 1 : target « machine à laver », production [ʃi.awajʒe] avec pause entre la première syllabe et la suite de la production : GM_002_Item9_machinalaver_Pause
Ex. 2 : target « biberon », production [pi.mu] avec pause entre la première et la deuxième syllabe : GM_002_Item31_biberon_Pause
 -
2. On utilise, si besoin :
 - Les affriquées : pour n'avoir qu'un seul phonème de comptabilisé dans l'alignement syllabique
 - Le dévoisement du [ʒ] (sensation de [ʁ] « rapeux ») lorsque la cible est [ʁ] (et non le son [χ])
Ex. 1 : [ʁakʒjom] GM_011_Item38_aquarium_VoyelleDevoisee
Ex. 2 : [dɔχtœʒ] GM_011_Item7_docteur_Rdevoise
 - Le son [χ] lorsque la cible n'est pas un [ʁ] : GM_011_Item7_docteur_FricativeUvulaireSourde
 - Le dévoisement de la voyelle
Ex. 1 : [eskegg] GM_011_Item21_escargot_VoyelleDevoisee
Ex. 2 : [ʁakʒjom] GM_011_Item38_aquarium_VoyelleDevoisee
3. Production inaudible/Chevauchement des voix :
 - On met une étoile pour chaque phonème produit
[jauʁt] = ***** : LM_049_Item36_yaourt_Inaudible
[œf] = ** : LM_029_Item14_oeuf_Inaudible
4. Utilisation du schwa :
 - En fin de mot, si on transcrit le /ə/ final dans l'*IPA Actual*, on l'ajoute également à la *IPA Target* pour conserver le même nombre de phonèmes
 - A l'intérieur d'une syllabe, si on transcrit le /ə/ dans la *IPA Actual* et qu'on considère que cette production est « admise », on le transcrit également dans la *IPA Target* pour conserver le même nombre de phonèmes
5. Absence de production :
 - Si l'enfant ne produit pas l'item demandé, on ne note rien dans la partie *IPA Actual*
Ex1 : target « locomotive », l'enfant dit « train » : on ne note rien dans l'*IPA Actual*
Ex2 : target « main », l'enfant ne produit rien : on ne note rien dans l'*IPA Actual*
6. Bénéfice du doute :
 - Si on hésite entre deux phonèmes dont un correspondant à la cible, on utilisera ce dernier
Ex. : target « indien », hésitation entre [ɛ̃dja] et [ɛ̃djɛ] > on conservera [ɛ̃djɛ]
7. Astuce quand on a des difficultés à déterminer le phonème utilisé
 - On peut utiliser le site <https://www.seeingspeech.ac.uk/ipa-charts/?chart=1> pour s'aider lorsqu'on a un doute sur le phonème produit

A noter :

- Pour la tâche de répétition de syllabes, on transcrit aussi les voyelles lorsqu'elles ne sont pas produites /a/ (**depuis avril 2020**)

ANNEXE 4.1. DIFFERENCES ENTRE LE PROTOCOLE ENREGISTRÉ SUR OSF ET LE PROTOCOLE EFFECTIF

Protocole pré-enregistré sur OSF	Protocole effectivement réalisé
<p><u>Groupes de participants :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Enfants au développement typique • Enfants porteurs d'implants cochléaires exposés à la LfPC • Enfants porteurs d'implants cochléaires sans aucune aide supplémentaire (qu'elle soit gestuelle, visuelle ou auditive) 	<p><u>Groupes de participants :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Enfants au développement typique • Enfants porteurs d'implants présentant un niveau élevé de décodage de la LfPC • Enfants porteurs d'implants cochléaires présentant un niveau faible de décodage de la LfPC
<p><u>Matériel :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Enregistrement des données ultrasons à partir de l'HOCUS (<i>Head-Optically_Corrected Ultrasound System</i>) (Whalen et al., 2005) 	<p><u>Matériel :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Enregistrement des données ultrasons à partir d'un échographe ultrasons SonoSite 180 Plus (d'après la même procédure que (Turgeon et al., 2017)
<p><u>Analyses acoustiques :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les consonnes plosives : F1 et F2 au début de la voyelle qui suit (i.e., fin de la consonne) et au milieu de la voyelle • Pour les consonnes fricatives : moments spectraux au milieu de la consonne (i.e., centre de gravité, écart-type, skewness et kurtosis) 	<p><u>Analyses acoustiques :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les consonnes plosives : F1, F2 et F3 au début de la voyelle qui suit (i.e., fin de la consonne) • Pour les consonnes fricatives : F1, F2 et F3 au début de la voyelle qui suit (i.e., fin de la consonne), premier moment spectral au milieu de la consonne (i.e., centre de gravité), différence entre les centres de gravité des deux consonnes étudiées
<p><u>Analyses articulatoires</u> (identiques pour toutes les consonnes) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Courbure de la langue (<i>Mean Curvature Index</i> (MCI) de Dawson et al. (2016)) • Point le plus haut de la langue (Ménard, Toupin, et al., 2013) 	<p><u>Analyses articulatoires</u> (identiques pour toutes les consonnes) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Courbure de la langue (<i>Mean Curvature Index</i> (MCI) de Dawson et al. (2016)) • Point le plus haut de la langue (Ménard, Toupin, et al., 2013) • Point d'occlusion ou de constriction (i.e., lieu de la plus faible distance entre le contour de langue et le palais)

TEST DE CONSCIENCE PHONOLOGIQUE
--

Tu as super bien travaillé. On va encore faire 3 petits jeux mais ils ne durent pas longtemps. Après ça j'ai une surprise pour toi !

- Besoin d'aller à la toilette ?
 Tu es prêt pour la suite ? Alors, on y va !

Pour toutes les tâches :

- Arrêt de la tâche si 2 refus
- Arrêt de la tâche si 5 items manqués

Tâche 1 : Jugement de rimes (Tâche 1 EPCP)

Matériel : 2 cubes, 2 rectangles courts	
Consignes : Je vais te dire des mots. Ce ne sont pas des vrais mots, ce sont des mots inventés. On va dire que mes blocs (<i>suivre les blocs</i>) sont des mots. Je veux que tu écoutes la fin des mots (<i>pointer les cubes</i>). Si tu entends que les mots finissent pareil (<i>coller les cubes</i>), tu dis oui (<i>oui de la tête</i>), ça rime. Si tu entends que les mots ne finissent pas pareil (<i>éloigner les cubes</i>), tu dis non (<i>non de la tête</i>), ça ne rime pas.	
Exemple : Je vais te montrer.	
Écoute bien : /pilu/ (<i>suivre le bloc et pointer le cube</i>), /na3u/ (<i>suivre le bloc et pointer le cube</i>). Est-ce que ça rime ? Est-ce que ça finit pareil ? (<i>pointer les cubes</i>). Oui (<i>coller les cubes, oui de la tête</i>), les deux finissent par /u/. /pilu/ (<i>montrer le cube</i>), /na3u/ (<i>montrer le cube</i>). Oui, ça rime (<i>coller les cubes, oui de la tête</i>).	<input type="checkbox"/> OUI
On en fait un autre ensemble. /lako/ (<i>suivre sur le bloc et pointer le cube</i>), /tuvi/ (<i>suivre le bloc et pointer le cube</i>). Est-ce que ça rime ? (<i>pointer les cubes</i>). Non (<i>éloigner les cubes, non de la tête</i>). /lako/ finit par /o/ (<i>montrer le cube</i>), /tuvi/ finit par /i/ (<i>montrer le cube</i>). Non, ça ne rime pas (<i>éloigner les cubes, non de la tête</i>).	<input type="checkbox"/> NON
Entraînement : Essaie le tout seul maintenant.	
/fuka/ (<i>suivre le bloc et pointer le cube</i>), /bɔla/ (<i>suivre le bloc et pointer le cube</i>). Est-ce que ça rime ? (<i>pointer les cubes, attendre une réponse</i>). Si l'enfant ne réussit pas de lui-même : Écoute bien : /fuka/ (<i>suivre sur le bloc et pointer le cube</i>), /bɔla/ (<i>suivre sur le bloc et pointer le cube</i>). Est-ce que ça rime ? (<i>pointer les cubes, attendre une réponse en faisant oui de la tête</i>). Oui , ça rime, ça finit pareil (<i>coller les cubes, oui de la tête</i>). Tu es un champion ! Si l'enfant a encore besoin d'entraînement :	<input type="checkbox"/> OUI
/levu/ /bigu/ : est-ce que ça rime ? /ɔibe/ /luma/ : est-ce que ça rime ? /zube/ /jale/ : est-ce que ça rime ?	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI
Test : Maintenant, tu es capable de le faire tout seul. Écoute bien, je vais dire les mots une seule fois. On y va.	
1. /mɔui/ /leti/ : est-ce que ça rime ? 2. /vokɔ/ /dimu/ : est-ce que ça rime ? 3. /jemi/ /loti/ : est-ce que ça rime ? 4. /sedo/ /jiba/ : est-ce que ça rime ? 5. /levu3/ /ɔofip/ : est-ce que ça rime ? 6. /takɔv/ /ni3ɔv/ : est-ce que ça rime ? 7. /pofas/ /lu3as/ : est-ce que ça rime ? 8. /nevug/ /fidug/ : est-ce que ça rime ? 9. /mezɔt/ /fitab/ : est-ce que ça rime ? 10. /pevat/ /3unik/ : est-ce que ça rime ?	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> NON
Total :/10	

Tâche 2 : Soustraction syllabique (Chapitre 2.3.2, Partie 1, BELEC)

Matériel : 2 cubes			
Consignes : Je vais te dire des mots inventés (<i>suivre les cubes</i>) et je vais enlever une syllabe (<i>enlever le 1er cube</i>). Toi tu vas me dire la syllabe qui reste (<i>pointer le dernier cube</i>).			
Exemple : Je vais te montrer.			
Si je te dis /nu ₃ e/ (<i>suivre les cubes</i>) et qu'on enlève /nu/ (<i>enlever le premier cube</i>), il reste / <u>3e</u> / (<i>pointer le dernier cube</i>).			
Si je te dis /fāgo/ (<i>suivre les cubes</i>) et qu'on enlève /fā/ (<i>enlever le premier cube</i>), il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>).			
Entraînement : Essaie le tout seul maintenant.			
Si je te dis /gōnu/ (<i>suivre les cubes</i>) et qu'on enlève le premier morceau (<i>enlever le premier cube</i>), qu'est-ce qu'il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>)			/nu/
Si je te dis / <u>3</u> efā/ (<i>suivre les cubes</i>) et enlever le premier cube , qu'est-ce qu'il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>)			/fā/
Test : Maintenant, tu es capable de le faire tout seul. Écoute bien, je vais dire les mots une seule fois et toi tu enlèves la première syllabe (<i>enlever le premier cube</i>) et tu me dis celle qui reste (<i>pointer la dernière syllabe</i>). On y va.			
1. /fepa/	1.	9. /ɛfɔ̃/	9.
2. / <u>3</u> use/	2.	10. /du ₃ y/	10.
3. /nidu/	3.	11. /sega/	11.
4. /gale/	4.	12. /pani/	12.
5. /mōti/	5.	13. /ʃko/	13.
6. /uøʃ/	6.	14. /vymo/	14.
7. /kozē/	7.	15. /zēbā/	15.
8. /bāv/	8.	16. /tiø/	16.
Total :/16			

Tâche 3 : Soustraction phonémique CVC (Chapitre 2.3.2, Partie 2, BELEC)

Matériel : 2 cubes, 1 rectangle court			
Consignes : Maintenant on va faire un jeu qui ressemble à celui qu'on vient de faire. Je vais te dire des mots qui n'existent pas (<i>suivre les cubes</i>) et je vais enlever un petit morceau au début (<i>enlever le 1er cube</i>) et toi tu vas me dire ce qui reste (<i>pointer le dernier cube</i>). Attention, cette fois-ci le morceau à enlever est plus petit.			
Exemple : Je vais te montrer.			
Si je te dis /nu <u>u</u> / (<i>suivre les cubes</i>) et qu'on enlève /n/ (<i>enlever le premier cube</i>), il reste / <u>uu</u> / (<i>pointer le dernier cube</i>).			
Si je te dis /fā <u>p</u> / (<i>suivre les cubes</i>) et qu'on enlève /f/ (<i>enlever le premier cube</i>), il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>).			
Entraînement : Essaie le tout seul maintenant.			
Si je te dis /g <u>ɔ</u> / (<i>suivre sur les cubes</i>) et qu'on enlève le premier petit morceau (<i>enlever le premier cube</i>), qu'est-ce qu'il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>)			/ɔ/
Si je te dis / <u>3</u> es/ (<i>suivre sur les cubes</i>) et enlever le premier cube , qu'est-ce qu'il reste ? (<i>pointer le dernier cube</i>)			/es/
Test : Maintenant, tu es capable de le faire tout seul. Écoute bien, je vais dire les mots une seule fois et toi tu enlèves le petit morceau au début (<i>enlever le premier cube</i>) et tu me dis ce qui reste (<i>pointer la dernière syllabe</i>). On y va.			
1. /fep/	1.	9. /vym/	9.
2. / <u>3</u> ys/	2.	10. /zēb/	10.
3. /nid/	3.	11. /ʃk/	11.
4. /gal/	4.	12. /tiø/	12.
5. /mōt/	5.	13. /ɛf/	13.
6. /uøʃ/	6.	14. /du ₃ /	14.
7. /koz/	7.	15. /seg/	15.
8. /bāv/	8.	16. /pan/	16.
Total :/16			

Tâche 4 : Soustraction phonémique CCV (Chapitre 2.3.2, Partie 3, BELEC)

Matériel : 2 cubes, 1 rectangle court			
Consignes : On va continuer le même jeu avec des mots un peu différents.			
Exemple : Je vais te montrer.			
Si je te dis /kwi/ (suivre les cubes) et qu'on enlève /k/ (enlever le premier cube), il reste /wi/ (pointer le dernier cube). Si je te dis /blo/ (suivre les cubes) et qu'on enlève /b/ (enlever le premier cube), il reste ? (pointer le dernier cube).			
Entraînement : Essaie le tout seul maintenant.			
Si je te dis /fve/ (suivre les cubes) et qu'on enlève le premier petit morceau (enlever le premier cube), qu'est-ce qu'il reste ? (pointer le dernier cube)			/ve/
Si je te dis /plo/ (suivre les cubes) et enlever le premier cube , qu'est-ce qu'il reste ? (pointer le dernier cube)			/lo/
Test : Maintenant, tu es capable de le faire tout seul. Écoute bien, je vais dire les mots une seule fois et toi tu enlèves le petit morceau au début (enlever le premier cube) et tu me dis ce qui reste (pointer la dernière syllabe). On y va.			
1. /gũʒ/	1.	6. /ply/	6.
2. /pɔo/	2.	7. /kio/	7.
3. /flø/	3.	8. /bwa/	8.
4. /kve/	4.	9. /fɔu/	9.
5. /bli/	5.	10. /giẽ/	10.
Total :/10			

a. Formulaire de consentement



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (participant mineur)

« Le développement de la parole : une étude de la production des sons de parole en français »

PRÉAMBULE:

Votre enfant est invité à participer à un projet de recherche qui vise à étudier le développement de la parole de l'enfance à l'âge adulte. Avant d'accepter que votre enfant participe à ce projet, il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas, n'hésitez pas à poser des questions.

IDENTIFICATION:

Chercheur(e) responsable du projet : Lucie Ménard Tél : (514) 987-3000 poste 3515
Département, centre ou institut : Département de linguistique
Adresse postale : 320, Ste-Catherine Est, Montréal, H2X 1L7
Adresse courriel : menard.lucie@uqam.ca

OBJECTIFS DU PROJET et FINANCEMENT (s'il y a lieu) :

Le projet porte plus spécifiquement sur la production des sons de la parole. Nous savons qu'au cours du développement, l'enfant acquiert différents sons et raffine ses compétences en production et perception de la parole. Par exemple, afin de produire différents mots, l'enfant de 4 ans n'utilise pas les mêmes mouvements des lèvres, de la langue et de la mâchoire que l'adulte. L'objet de notre étude est donc de caractériser ces différences articulatoires et acoustiques (dans l'onde sonore), au cours du développement.

Ce projet de recherche reçoit l'appui financier du Conseil de Recherche en Sciences Humaines du Canada.

PROCÉDURE(S) OU TÂCHES DEMANDÉES AU PARTICIPANT :

Avec votre permission et l'accord de votre enfant, il sera invité à dénommer une soixantaine d'images qui lui seront présentées sur un écran d'ordinateur (par exemple « C'est le chat »). Ses productions seront enregistrées et utilisées pour les fins de l'étude.

La procédure expérimentale sera la suivante. Le signal sonore sera enregistré par le biais d'un microphone. Les mouvements de la langue seront enregistrés par échographie. Ce système permet le suivi des contours de la langue par émission de sons de très haute fréquence. Une sonde d'environ 2 cm de largeur est maintenue par l'expérimentateur sous le menton du participant, et les images sont transmises à l'ordinateur d'acquisition. Les mouvements des lèvres et de la mâchoire seront également recueillis par le biais d'un système d'enregistrement audiovisuel. De petites étiquettes autocollantes bleues seront posées sur les lèvres et la mâchoire. Cette méthode d'enregistrement, largement utilisée pour l'étude de séquences produites par des

adultes et des bébés âgés de quelques mois est totalement inoffensive. Elle ne comporte aucun risque. Le système est utilisé depuis 15 ans dans notre laboratoire au Québec et dans plusieurs laboratoires de France.

Les enregistrements se dérouleront dans l'établissement que fréquente votre enfant (CEP UQAM). Les enregistrements auront lieu dans la journée, au moment qui convient le mieux à votre enfant. La durée de la séance sera d'environ 30 minutes, en incluant le temps consacré à la familiarisation.

Il va sans dire que des mesures précises seront prises par les chercheurs afin de s'assurer de l'utilisation sans risques pour le participant du matériel. Après chaque séance, la sonde de l'échographe sera soigneusement nettoyée et désinfectée.

AVANTAGES et RISQUES POTENTIELS :

La participation de votre enfant contribuera à l'avancement des connaissances par une meilleure compréhension de la production de la parole. Il n'y a pas de risque d'inconfort important associé à la participation de votre enfant à cette expérience. Le seul inconfort possible est léger et est relié à la fatigue physique que peut engendrer le maintien d'une station assise avec le dos droit pendant la durée de l'enregistrement. À tout moment, votre enfant pourra prendre une pause s'il le souhaite.

ANONYMAT ET CONFIDENTIALITÉ :

Il est entendu que tous les renseignements recueillis auprès de votre enfant lors de l'enregistrement sont confidentiels. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. Tout le matériel de recherche ainsi que votre formulaire de consentement seront conservés séparément en lieu sûr au laboratoire de phonétique (DS-4425 de l'UQAM) ou sur le serveur du laboratoire pour la durée totale du projet.

Afin de protéger l'identité de votre enfant et la confidentialité des données recueillies, votre enfant sera toujours identifié par un code alphanumérique. Ce code associé à son nom ne sera connu que du chercheur responsable du projet (et de son délégué).

Les enregistrements audio numériques seront effacés au terme de la recherche. La fiche de renseignements ainsi que votre formulaire d'informations et de consentement seront conservés pour une période de 2 ans avant d'être détruits.

PARTICIPATION VOLONTAIRE et DROIT DE RETRAIT :

La participation de votre enfant à ce projet est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à ce que votre enfant participe à ce projet de recherche, il demeure entièrement libre de ne pas participer ou de mettre fin à sa participation en tout temps sans justification ni pénalité. Ce retrait du projet n'aura aucune conséquence sur les services qu'il reçoit à l'école. Vous pouvez également retirer votre enfant du projet en tout temps. Dans ce cas, et à moins d'une directive contraire de votre part, les documents et l'enregistrement concernant votre enfant seront détruits.

Votre accord à participer implique également que vous acceptez que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, mémoires et thèses des étudiants membres de l'équipe, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant d'identifier votre enfant ne soit divulguée publiquement à moins d'un consentement explicite de votre part et de l'accord de votre enfant.

COMPENSATION FINANCIÈRE ou AUTRE :

Votre enfant recevra un petit cadeau en guise de remerciement pour sa participation.

CLAUSE DE RESPONSABILITÉ :

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez pour lui à aucun de ses droits ni ne libérez les chercheurs, le commanditaire ou les institutions impliquées de leurs obligations légales et professionnelles.

DES QUESTIONS SUR LE PROJET OU SUR VOS DROITS?

Pour des questions additionnelles sur le projet, sur la participation de votre enfant et sur ses droits en tant que participant de recherche, ou bien en cas de retrait, vous pouvez communiquer avec:

_____ Lucie Ménard, professeure et responsable du projet _____

Numéro de téléphone : 514-987-3000, poste 3515

Adresse courriel : menard.lucie@uqam.ca

Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'UQAM a approuvé le projet de recherche auquel vous allez participer. Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de recherche au plan de l'éthique de la recherche avec des êtres humains ou pour formuler une plainte, vous pouvez contacter la présidence du Comité, par l'intermédiaire de son secrétariat au numéro (514) 987-3000 # 7753 ou par courriel à CIEREH@UQAM.CA

REMERCIEMENTS :

La participation de votre enfant est importante à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

SIGNATURES :

En tant que parent ou tuteur légal de _____

- a) je reconnais avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement;
- b) je consens volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet de recherche;
- c) je comprends les objectifs du projet et ce que la participation de mon enfant implique;
- d) je confirme avoir disposé de suffisamment de temps pour discuter avec mon enfant de la nature des implications de sa participation;
- e) je reconnais aussi que le responsable du projet (ou son délégué) a répondu à mes questions de manière satisfaisante; et
- f) je comprends que sa participation à cette recherche est totalement volontaire et que je peux ou qu'il peut y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner.

Signature de l'enfant (optionnelle) :

Date :

Signature du parent/tuteur légal :

Date :

Nom (lettres moulées) et coordonnées (si souhait d'obtenir un résumé des principaux résultats)

b. Questionnaire de langage pour les enfants au développement typique

QUESTIONNAIRE DE LANGAGE
(A remplir par le parent/représentant légal)

1. INFORMATIONS PERSONNELLES

Date :	
Nom et Prénom de l'enfant :	Date de naissance :
Ecole :	Classe :
Profession du parent ou du/de la représentant-e légal-e :	

2. MOYENS DE COMMUNICATION

Depuis quand votre enfant est-il-elle en contact avec le français ?	
Depuis sa naissance	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à la garderie (ou crèche ou chez assistante maternelle)	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à l'école maternelle (ses 3 ans)	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à l'école primaire (ses 6 ans)	<input type="checkbox"/>
Autre :	<input type="checkbox"/>

<p>D'autres langues sont-elles utilisées à la maison ? Lesquelles ? qui les utilise ? dans quelles situations ?</p> <p>Votre enfant parle-t-il-elle ou comprend-il-elle d'autres langues ?</p> <p>Si votre enfant utilise plus d'une langue, où est-ce qu'il-elle utilise ces langues ?</p> <p>Combien de fois par jour (ou par semaine) ?</p>

Y-a-t-il d'autres informations que vous souhaiteriez nous communiquer concernant le langage de votre enfant ?

3. INFORMATIONS MEDICALES

Votre enfant est-il suivi en **orthophonie** ?

Oui (actuellement ou par le passé)		Non	
------------------------------------	--	-----	--

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

Votre enfant est-il suivi en **audiologie** (difficultés auditives)?

Oui (actuellement ou par le passé)		Non	
------------------------------------	--	-----	--

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

Votre enfant est-il suivi en **ophtalmologie** (difficultés visuelles) ?

Oui (actuellement ou par le passé)		Non	
------------------------------------	--	-----	--

Si oui, précisez quel type de prise en charge :

c. Questionnaire de langage pour les enfants porteurs d'implants cochléaires

QUESTIONNAIRE DE LANGAGE
(A remplir par le parent/représentant légal)

1. INFORMATIONS PERSONNELLES

Date :	
Nom et Prénom de l'enfant :	Date de naissance :
Ecole :	Classe :
Profession du parent ou du-de la représentant-e légal-e :	

2. SURDITE

Type de surdité : <input type="checkbox"/> transmission <input type="checkbox"/> perception
Degré de surdité : <input type="checkbox"/> léger <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> sévère <input type="checkbox"/> profond
Age de dépistage : Cause de la surdité (évolutivité) :
Seuil auditif (sans aide) Gauche : Droit :

3. LES AIDES TECHNIQUES

OREILLE GAUCHE	OREILLE DROITE
Appareillage : <input type="checkbox"/> prothèse <input type="checkbox"/> implant	Appareillage : <input type="checkbox"/> prothèse <input type="checkbox"/> implant
Modèle :	Modèle :
Date appareillage ou implantation :	Date appareillage ou implantation :
Seuil auditif (avec aide) :	Seuil auditif (avec aide) :
Fréquence d'utilisation des aides auditives :	

4. MOYENS DE COMMUNICATION

Votre enfant utilise-t-il-elle le code LPC (modalité décodage) ? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Depuis combien de temps est-il-elle exposé-e au code LPC ?
Comment évaluez-vous son niveau de décodage ? <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Très bon
Quels sont les lieux où votre enfant utilise du code LPC (maison, travail, école, grands-parents, ...) ?
Combien de fois par semaine votre enfant utilise-t-il-elle la LPC ?

Votre enfant utilise-t-il-elle la Langue des Signes Québécoise (LSQ) ? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Depuis combien de temps est-il-elle exposé-e à la LSQ ?
Comment évaluez-vous son niveau en LSQ ? <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Très bon
Quels sont les lieux où votre enfant utilise la LSQ (maison, travail, école, grands-parents, ...) ?
Combien de fois par semaine votre enfant utilise-t-il-elle la LSQ ?

Depuis quand votre enfant est-il-elle en contact avec le français ?	
Depuis sa naissance	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à la garderie (ou crèche ou chez assistante maternelle)	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à l'école maternelle (ses 3 ans)	<input type="checkbox"/>
Depuis l'entrée à l'école primaire (ses 6 ans)	<input type="checkbox"/>
Autre :	<input type="checkbox"/>

D'autres langues sont-elles utilisées à la maison ? Lesquelles ? qui les utilise ? dans quelles situations ?
Votre enfant parle-t-il-elle ou comprend-il-elle d'autres langues ?
Si votre enfant utilise plus d'une langue, où est-ce qu'il-elle utilise ces langues ?
Combien de fois par jour (ou par semaine) ?

Y-a-t-il d'autres informations que vous souhaiteriez nous communiquer concernant le langage de votre enfant ?

5. INFORMATIONS MEDICALES

Votre enfant est-il-elle suivi en orthophonie (difficultés langagières) ?
<input type="checkbox"/> Oui (actuellement ou par le passé) <input type="checkbox"/> Non
Si oui, précisez quel type de prise en charge :

Votre enfant est-il suivi en ophtalmologie (difficultés visuelles) ?
<input type="checkbox"/> Oui (actuellement ou par le passé) <input type="checkbox"/> Non
Si oui, précisez quel type de prise en charge :

ANNEXE 4.4. SCORES AUX EPREUVES DE CONSCIENCE PHONOLOGIQUE

Participant	Age (mois)	Groupe	Tâche	Score
Arti_LM_002	51	CI-	Rime	8
	51	CI-	Soustraction syllabique	14
	51	CI-	Soustraction CVC	
Arti_LM_005	65	CI-	Rime	6
	65	CI-	Soustraction syllabique	
	65	CI-	Soustraction CVC	
Arti_LM_004	102	CI-	Rime	10
	102	CI-	Soustraction syllabique	15
	102	CI-	Soustraction CVC	10
	102	CI-	Soustraction CCV	7
Arti_LM_003	133	CI-	Rime	7
	133	CI-	Soustraction syllabique	15
	133	CI-	Soustraction CVC	12
	133	CI-	Soustraction CCV	10
Arti_LM_007	89	CI+	Rime	10
	89	CI+	Soustraction syllabique	16
	89	CI+	Soustraction CVC	12
	89	CI+	Soustraction CCV	9
Arti_LM_009	102	CI+	Rime	9
	102	CI+	Soustraction syllabique	10
	102	CI+	Soustraction CVC	9
	102	CI+	Soustraction CCV	9
Arti_LM_010	102	CI+	Rime	10
	102	CI+	Soustraction syllabique	16
	102	CI+	Soustraction CVC	16
	102	CI+	Soustraction CCV	9
Arti_LM_001	103	CI+	Rime	10
	103	CI+	Soustraction syllabique	15
	103	CI+	Soustraction CVC	14
	103	CI+	Soustraction CCV	
Arti_LM_006	121	CI+	Rime	9
	121	CI+	Soustraction syllabique	16
	121	CI+	Soustraction CVC	11
	121	CI+	Soustraction CCV	7
Arti_LM_013	52	TH	Rime	
	52	TH	Soustraction syllabique	
	52	TH	Soustraction CVC	

Arti_LM_008	60	TH	Rime	
	60	TH	Soustraction syllabique	11
	60	TH	Soustraction CVC	1
Arti_LM_016	84	TH	Rime	10
	84	TH	Soustraction syllabique	16
	84	TH	Soustraction CVC	16
	84	TH	Soustraction CCV	10
Arti_LM_017	86	TH	Rime	10
	86	TH	Soustraction syllabique	14
	86	TH	Soustraction CVC	14
	86	TH	Soustraction CCV	3
Arti_LM_011	99	TH	Rime	10
	99	TH	Soustraction syllabique	12
	99	TH	Soustraction CVC	16
	99	TH	Soustraction CCV	10
Arti_LM_018	101	TH	Rime	10
	101	TH	Soustraction syllabique	16
	101	TH	Soustraction CVC	16
	101	TH	Soustraction CCV	9
Arti_LM_019	103	TH	Rime	10
	103	TH	Soustraction syllabique	16
	103	TH	Soustraction CVC	15
	103	TH	Soustraction CCV	10
Arti_LM_015	108	TH	Rime	10
	108	TH	Soustraction syllabique	16
	108	TH	Soustraction CVC	15
	108	TH	Soustraction CCV	9
Arti_LM_012	130	TH	Rime	10
	130	TH	Soustraction syllabique	16
	130	TH	Soustraction CVC	16
	130	TH	Soustraction CCV	10
Arti_LM_014	137	TH	Rime	9
	137	TH	Soustraction syllabique	16
	137	TH	Soustraction CVC	15
	137	TH	Soustraction CCV	10



Phonological skills in children with cochlear implants Contribution of a Cued Speech education

MACHART, L.^{1,2}, MELONI, G.^{1,2,3}, VILAIN, A.², LÖEVENBRUCK, H.¹ & SCHOTT-BRUA, V.¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS LPNC UMR 5105

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS GIPSA-lab UMR 5216

³Ecole d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal

laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr

CONTEXT & AIMS RESULTS

1/1000 child is born deaf [3]
95% to hearing parents

CI = remedial device proposed
Information provided is limited [4,5]
Persistent language disorders [4]

Choice of a Cued Speech education
A manual code which reduces lip-reading ambiguities
Full transmission of the oral message and reinforcement of phonological representations [1]

5 hand positions around the face for the vowels
8 handshapes for the consonants

Aims
Assess the **phonological abilities** of children with Cochlear Implant(s) (CI) in production and perception
Examine the **impact of a Cued Speech education** on these skills

Hypotheses
Skills are improved by **device type** (CI > HA) and/or **communication mode** (CS > no CS)

METHOD & PARTICIPANTS

The EULALIES battery test[®] (Meloni et al.)

Picture Naming	Diadochokinesis	Syllable Repetition	Pseudoword Repetition	Lexicality Judgement
----------------	-----------------	---------------------	-----------------------	----------------------

Screening : memory span, morphosyntactic level, audiometry, Cued Speech decoding level
45 minute session – Audio-visual stimuli with Cued Speech for deaf children

Double-blind data transcription with PHON (Hedlund & Rose, 2016)

```

    graph TD
      A[25 with deafness] --> B[15 with hearing-aids (HA)]
      A --> C[10 with cochlear implant(s) (CI)]
      B --> D[8 with Cued Speech (CS)]
      B --> E[7 with oral alone]
      C --> F[9 with Cued Speech (CS)]
      C --> G[1 with oral alone]
    
```

Acknowledgment
All the children and their parents who participated in this study. Schools and teachers who welcomed us. The association ALPC for its support and assistance in the recruitment of deaf subjects. Clarisse Püssant for her help in collecting data.

References
[1] Charlier, B. L., & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 53A(2), 349-375. <http://dx.doi.org/10.1080/02724980039029>
[2] Colin, S., Escalle, J., Truy, E., Lima-Grande, G., & Magnan, A. (2017). Effect of age at cochlear implantation and at exposure to Cued Speech on literacy skills in deaf children. *Research in Developmental Disabilities*, 71, 61-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ridd.2017.09.014>
[3] French Health Department.
[4] Geers, A., Nicholas, J., Tobey, E., & Davidson, L. (2015). Persistent language delay versus late language emergence in children with early cochlear implantation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, Volume 58, 155-170.
[5] Leybaert, J., & LaSasso, C. J. (2010). Cued Speech for Enhancing Speech Perception and First Language Development of Children With Cochlear Implants. *Trends in Amplification*, 14(2), 96-112. <https://doi.org/10.1177/1084713810375567>
[6] Meloni, G., Loevenbruck, H., Vilain, A., & Macleod, A. (2017). EULALIES, The France-Quebec Speech Sound Disorders project. Poster présenté, WASL, juillet 2017, Lyon, France.

Picture Naming

- PCC scores: children with NH and children with CI are equivalent, children with HA lower > more variability for children with HA and NH than children with CI
- PCC scores increase with age for children with NH (but not for children with CI nor HA)
- The higher the CS decoding level, the higher the PCC scores
- Variability decreases with the CS decoding level
- Children with HA and a high CS decoding level reach scores of children with CI

Pseudoword Repetition

- The scores are equivalent regardless of the CS decoding level > more variability for children with HA
- Unlike in the Picture Naming task, we cannot observe an effect of the CS decoding level on the scores in these preliminary data

Lexicality Judgement Correct reject

- Correct reject scores: children with CI and NH are equivalent, children with HA lower > we observed more variability for children with HA and CI than children with NH
- The CS decoding level seems to improve scores to reach a level equivalent to or higher than that of children with NH

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Benefits of cochlear implantation
In speech production
 Less variability in children with cochlear implants but lower scores than hearing pairs
 Cochlear implants seem to **improve scores** compared to hearing-aids
In speech perception
 Cochlear implants seem to **improve perceptual abilities** relative to hearing-aids (Children with CI lexicality judgment similar to Children with NH) but **perception remains limited** (pseudoword scores lower than NH)

Impacts of Cued Speech education
In speech production
 Cued Speech seems to **facilitate isolated syllables production** (Syllable repetition task) and to **improve scores in Picture-naming**
In speech perception
 Cued Speech seems to **improve the perception of some phonological features perception** (voicing) and to **help detect syllable or phoneme deletion** (Lexicality Judgement)

Perspectives
Further data collection
Analysis of phonological features: is there a link between production difficulties and perception difficulties ?
Comparisons based on different factors (CS exposure time, duration of implant use, multilingualism, auditory age,...)



Influence of French Cued Speech exposure on consonant production in children with cochlear implants: an ultrasound study

MACHART, L.^{1,2}, VILAIN, A.², LÖEVENBRUCK, H.¹ & MENARD, L.³

¹Univ.Grenoble, Alpes, CNRS, LPNC, 38000 Grenoble, France, ²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, France, ³Laboratoire de Phonétique de l'UQAM, Montréal, Québec

✉ laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr

CONTEXT & AIMS

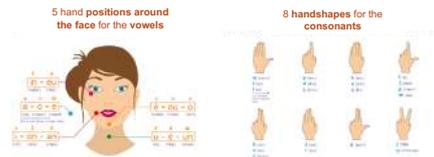


Fig. 1: Positions and handshapes of Cued French
Source: <https://ajpc.asso.fr>

Research questions

- (1) **Relevance of the Mean Curvature Index (MCI) measure [9] for the characterization of stop production** in children
- (2) **Influence of Cued French on articulatory precision** in children with cochlear implants: do children with cochlear implants have a better representation of speech sounds when they benefit from Cued French? Are their articulatory gestures more accurate? Are their lingual configurations comparable to those of children with typical development?
- (3) **Impact of simultaneous speech and Cued French production on articulatory accuracy**: does combining speech production with manual cues improve articulatory control in children with cochlear implants?

METHODS & PARTICIPANTS

Task

Picture-naming task: word-initial consonants in vowel /a/ context (stops, nasals and sibilants)
Ultrasound recording of lingual movement during production with or without simultaneous Cued French gesture production

Participants

10 children from 52 to 137 months with typical hearing (mean=96;sd=25.7)
4 children with cochlear implants, aged from 89 to 121 months, exposed to Cued French and able to use Cued French during speech production (mean=103.8;sd=11.8)

Data processing and analysis: preliminary analysis restricted to stop consonants

Tongue shapes are extracted 30ms before burst using the SLURP software [11]
Tongue curvatures are characterized with the MCI measure [10]

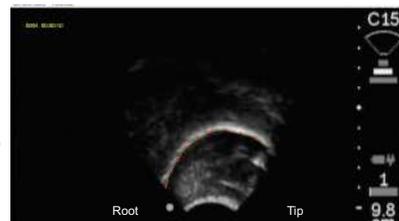


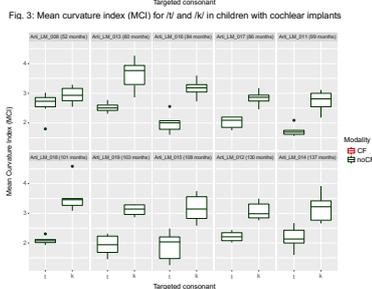
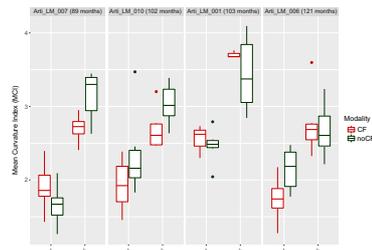
Fig. 2: SLURP software tracking tongue shapes during the production of the sentence /selekaest/ by a child with cochlear implants who is simultaneously cueing

PRELIMINARY RESULTS

Tongue curvature

Mean curvature index (MCI) seems well-adapted to the description of children stop production

- /t/ and /k/ are well distinguished in both normal hearing children and children with cochlear implants
- MCI measures are consistent with those of Dawson et al. (2015) [10]: higher curvature for dorsal /k/ than coronal /t/ stops



DISCUSSION & PERSPECTIVES

Discussion

- MCI seems applicable to tongue shape description during coronal and dorsal stop production in children
- Children with cochlear implants and exposed to Cued French display similar tongue curvature patterns to their hearing peers
- Children with cochlear implants and exposed to Cued French produce clear articulatory distinction between dorsal and coronal stop and the addition of the hand does not interfere with their production

Perspectives

- Comparison with children with cochlear implants and never exposed to Cued French
- Analysis of fricative (/f/ vs /s/) and nasal (/n/ vs /ɲ/) consonants: confrontation of articulatory measures with acoustic characterization for all consonants (formant transition, spectral moments, formant values)

References

- [1] Grandin, B., Martinez, M. J., Samson, A. & Vilain, A. (2020). Long-term effects of cochlear implantation on the intelligibility of speech in French-speaking children. *Journal of Child Language*.
- [2] Turgeon, C., Trudeau-Fiset, P., Fitzpatrick, E., & Ménard, L. (2017). Vowel intelligibility in children with cochlear implants: An acoustic and articulatory study. *Int. Journ. Ped. Otor.*, 101, 87-96.
- [3] Colin, S., Ecalle, J., Truy, E., Lina-Granade, G., & Magnan, A. (2017). Effect of age at cochlear implantation and at exposure to Cued Speech on literacy skills in deaf children. *Research in Developmental Disabilities*, 71, 61-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ridd.2017.09.014>.
- [4] Boutou, S., Semiecienski, W., Bertoni, J., Leuwers, C., & Cole, P. (2011). Apprentissage de la lecture et développement des habiletés associées à la réussite chez les enfants munis d'un implant cochléaire : Apport de la Langue Parlée Complétée (pp. 163-168). In J. Leybaert (Ed.), *La Langue Française Complétée : fondements et perspectives*. Solal.
- [5] Geers, A., Nicholas, J., Tobey, E., & Davidson, L. (2015). Persistent language delay versus late language emergence in children with early cochlear implantation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, Volume 59, 155-170.
- [6] Hage, C. & Leybaert, J. (2006). The Effect of Cued Speech on the Development of Spoken Language, in: Spencer, P.E., Marschark, M. (Eds.), *Advances in the Spoken Language Development of Deaf and Hard-of-Hearing Children*. Oxford University Press, pp. 193-211.
- [7] Leybaert, J., Collin, C., Hage, C., LaSasso, C.J. (2010). Cued Speech for Enhancing Speech Perception and First Language Development of Children With Cochlear Implants. *Trends Amplif.* 14, 96-112.
- [8] Charlier, B. L. & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 53(2), 349-375.
- [9] Dawson, K. M., Tiede, M. K., & Whalen, D. H. (2015). Methods for quantifying tongue shape and complexity using ultrasound imaging. *Clinical linguistics & phonetics*, 30(3-5), 328-344.
- [10] Laporte, C., Ménard, L. (2018). Multi-hypothesis tracking of the tongue surface in ultrasound video recordings of normal and impaired speech. *Medical Image Analysis*, 44, 98-114.

Acknowledgment

All the children and their parents who participated in this study, St. Jude school and all the teachers and speech pathologists who welcomed us in Montreal.
This study has received a grant from IDEX UGA to the first author.



Consonant production in children with cochlear implants and exposed to Canadian French Cued Speech: An acoustic and articulatory study

Machart, L.^{1,2}, Vilain, A.¹, Løevenbruck, H.² & Ménard, L.³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP^{*}, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, France; ²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LPNC, 38000 Grenoble, France; ³Laboratoire de Phonétique de l'UQAM, Montréal, Québec

✉ laura.machart@univ-grenoble-alpes.fr  <https://comoves.hypotheses.org/>

CONTEXT & AIMS



Cochlear Implants (CI) provides access to speech sounds But acoustic information remains limited^[1]

Speech perception and production is affected Place of articulation is particularly impacted^{[2][3]}

Cued speech enhances speech perception^{[4][5]} and phonological development^{[1][2]}

Cued speech enhances speech production: voicing, nasality, manner and place of articulation^[6]

Cued speech use before implantation improves speech intelligibility^{[6][7]}

Research question
Canadian French Cued Speech proficiency may improve articulatory precision in children with CIs

- Do children with CIs have a better representation of speech sounds when they benefit from cued speech?
- Are their articulatory gestures more accurate?
- Are their lingual configurations comparable to that of children with typical hearing?

METHODS & PARTICIPANTS

Task
Picture-naming task with word-initial consonants in vowel /a/ context: "tapis" /tapi/ carpet, "carotte" /kaʁot/ carrot, "sapin" /sapɛ̃/ fir tree and "chapeau" /ʃapo/ hat

Simultaneous acoustic and ultrasound recordings during production

Participants

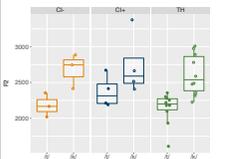
CI-	CI+	TH*
N = 3 From 65 to 133 months (age = 101 months, SD = 27.95)	N = 5 From 89 to 121 months (age = 103.55 months, SD = 10.85)	N = 10 From 52 to 137 months (age = 96.25 months, SD = 25.68)

Data processing
Formant values F1, F2 and F3 at consonant offset and spectral centers of gravity at fricative mid-point were extracted using PRAAT^[9]
Tongue contours were automatically extracted at burst point using the SLURP algorithm^[10] and characterized with the front-back index^[12], the constriction place^[13] and the MCI values^[11]

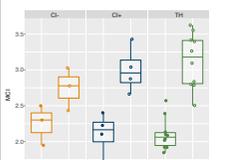
Statistical analysis
Linear mixed-effect models (*lme*) with a backward step-wise variable selection and multiple comparisons

RESULTS

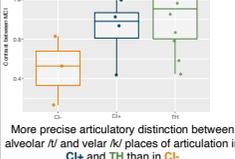
	Stops	Fricatives
F1	/t/ > /k/	CI+: /s/ > /ʃ/; CI- and TH: /s/ = /ʃ/
F2	/t/ < /k/	CI+ and TH: /s/ < /ʃ/; CI-: /s/ = /ʃ/
F3	/t/ = /k/	CI- and TH: /s/ > /ʃ/; TH: /s/ = /ʃ/
Center of gravity		CI+ and TH: /s/ > /ʃ/; CI-: /s/ = /ʃ/
Front-back	/t/ more anterior	CI+: /s/ more anterior; CI- and TH: /s/ = /ʃ/
Constriction	/t/ more anterior	Higher contrast in CI+
MCI	/t/ < /k/ Slightly lower contrast in CI-	/s/ < /ʃ/



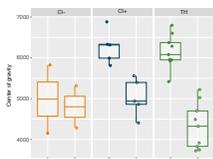
Acoustic distinction between alveolar /t/ and velar /k/ places of articulation, with no group effect



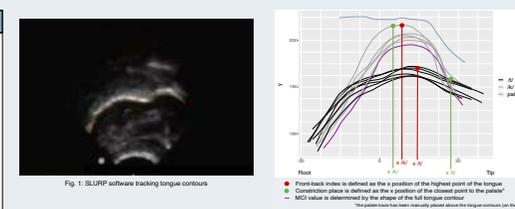
Acoustic distinction between alveolar /s/ and postalveolar /ʃ/ places of articulation in CI+ and TH but not in CI-



More precise articulatory distinction between alveolar /t/ and velar /k/ places of articulation in CI+ and TH than in CI-



More precise articulatory distinction between alveolar /s/ and postalveolar /ʃ/ places of articulation in CI+ than in TH and CI-



DISCUSSION & PERSPECTIVES

Discussion

- Quantitative measures of stop and fricative articulation in children with CIs and typical hearing
- F2 can be used as an acoustic correlate of stop and fricative place of articulation in children
- The results argue for the use of articulatory measures to further assess speech production in children
- Because different strategies are used by children to produce a similar target, a single measure is not sufficient to characterize speech production in children
- The higher the receptive cued speech proficiency, the better the differentiation of places of articulation in stop and fricative consonants

Perspectives

- Record more participants in each group
- Comparison with children with cochlear implants and who have never been exposed to cued speech
- Testing the effect of adding cued speech gestures simultaneously to speech production

References

- [1] Colin S. Eassey, J. Truy E., Lina-Granada, G. & Magnan, A. (2017). Effect of age at cochlear implantation and to exposure to Cued Speech on literacy skills in deaf children. *Research in Developmental Disabilities*, 71, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.09.014>.
- [2] Bialystok, S., Serniclaes, W., Benrath, J. & 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. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2011\)110-0330](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2011)110-0330)
- [3] Grandon, B. & Vilain, A. (2020). Development of fricative production in French-speaking school-aged children using cochlear implants and children with normal hearing. *Journal of Communication Disorders*, 86, 102696. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2020.102696>
- [4] Descurieux, C., Groh, V., Rusterholz, A., Simoulin, L. & Busquet, D. (1999). Cued speech in the stimulation of communication: An advantage in cochlear implantation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 47(2), 205-207. [https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(98\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(98)00146-1)
- [5] Leybaert, J., Bayard, C., Collin, C. & LaSasso, C. (2016). Cued Speech and Cochlear Implants: A Powerful Combination For Natural Spoken Language Acquisition. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 86, 102696. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2016.10.009>
- [6] Vieu, A., Mondana, M., Blanchard, K., Sillon, M., Reuillard-Arterres, F., Tobey, E., Uzella, A. & Piron, J. P. (1998). Influence of communication mode on speech intelligibility and syntactic structure of sentences in profoundly hearing impaired French children implanted between 5 and 8 years of age. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 44(1), 15-22. [https://doi.org/10.1016/S0165-5876\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0165-5876(98)00031-7)
- [7] Koo, M.-I., Dennis, M., Gayet, J.-P., & Pelizzoni, M. (2009). What can be expected from a late cochlear implantation? *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 73(2), 189-193. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2008.10.009>
- [8] Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Genter, S., & ÉQUALES Consortium. (in revision). Positive impact of French Cued Speech exposure on speech production in children fitted with Cochlear Implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*.
- [9] Boersma, P. & Weenink, D. (2019). Praat: Doing Phonetics by Computer. <https://www.konkord.com/nl/praat/>
- [10] Laporte, C., Ménard, L. (2019). Multi-hypothesis tracking of the tongue surface in ultrasound video recordings of normal and impaired speech. *Medical Image Analysis*, 44, 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.media.2018.08.014>
- [11] Dawson, K. M., Tiede, M. K., & Whalen, D. H. (2015). Methods for quantifying tongue shape and complexity using ultrasound imaging. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 30(3-5), 329-344.
- [12] Ménard, L., Touzin, C., Siam, S. R., Drouin, S., Aubin, J., & Tiede, M. (2013). Acoustic and articulatory analysis of French vowels produced by congenitally blind adults and sighted adults. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 2975-2987. <https://doi.org/10.1121/1.4818740>
- [13] Okubo, M., & Scobbe, J. M. (1919). Tongue Shape Dynamics in Swallowing Using Sagittal Ultrasound. *Dysphagia*, 34(1), 112-118. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-8992-8>