

Lien entre les profils de production acoustique et les performances linguistiques d'enfants porteurs d'implants cochléaires

Auteurs :

Sophie Fagniard^{1,5}, Véronique Delvaux^{1,2,4,5}, Bernard Harmegnies^{1,2,5}, Anne Huberlant³, Kathy Huet^{1,5}, Myriam Piccaluga^{1,5} & Brigitte Charlier^{2,3}

Affiliations :

¹Service de Métrologie et Sciences du Langage, UMONS, Mons, Belgique

²ULB - Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique

³Centre de réhabilitation fonctionnelle « Comprendre et Parler », Bruxelles, Belgique

⁴Fonds pour la Recherche Nationale Scientifique (F.R.S.-FNRS), Belgique

⁵Institut de Recherche en Sciences et Technologies du Langage, UMONS, Mons, Belgique

Autrice de correspondance :

Sophie Fagniard
sophie.fagniard@umons.ac.be

Dates :

Soumission : 28 octobre 2025

Acceptation : 19 avril 2026

Publication : 6 juillet 2026

Comment citer cet article :

Fagniard, S., Charlier, B., Delvaux, V., Harmegnies, B., Huberlant, A., Piccaluga, M., & Huet, K. (2026). Lien entre les profils de production acoustique et les performances linguistiques d'enfants porteurs d'implants cochléaires. *Glossa*, 146, 56-104. <https://doi.org/10.61989/ct6s1342>

e-ISSN : 2117-7155

Licence :

© Copyright Sophie Fagniard, Véronique Delvaux, Bernard Harmegnies, Anne Huberlant, Kathy Huet, Myriam Piccaluga & Brigitte Charlier 2026. Ce travail est disponible sous licence [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Contexte : Bien que l'implantation cochléaire précoce permette à de jeunes enfants présentant une surdité congénitale d'atteindre des niveaux linguistiques proches de ceux d'enfants entendants, certains domaines restent à risque, notamment les niveaux phonologique et morphosyntaxique, avec une variabilité importante des performances. L'un des facteurs explicatifs évoqués est la dégradation spectrale du signal transmis par l'implant, susceptible d'entraîner des représentations phonologiques imprécises et, par conséquent, des faiblesses linguistiques. Toutefois, plusieurs travaux ont montré que certaines stratégies de compensation (par exemple, exploitation d'indices visuellement accessibles) peuvent limiter l'impact de ces limitations perceptives.

Objectifs : La présente étude visait à examiner les liens entre les profils de production de sons de parole susceptibles d'être mal codés par l'implant cochléaire (IC) et les performances linguistiques d'enfants porteurs d'un IC et d'enfants à audition typique (AT), afin de déterminer si des stratégies de compensation des limites perceptives sont associées à de meilleures performances linguistiques.

Méthodes : Vingt-trois enfants âgés de 3 ans et 8 mois à 7 ans et 10 mois présentant une surdité congénitale et porteurs d'un IC, ainsi qu'un groupe de 47 enfants à audition typique appariés en âge chronologique et auditif, ont participé à des tâches de dénomination, de production narrative et de traitement morphémique. Des mesures acoustiques ont été extraites pour trois types de segments (voyelles nasales/orales, fricatives et occlusives) afin de caractériser les profils productifs et de les relier aux indices linguistiques reflétant les niveaux phonologique, lexical et morphosyntaxique. Des analyses en composantes principales (ACP) suivies de classifications hiérarchiques ascendantes ont permis d'identifier des profils de performance. Treize enfants porteurs d'un IC ont été réévalués un an plus tard pour analyser l'évolution longitudinale de leurs performances.

Résultats : Trois dimensions principales ont été extraites de l'ACP : la première, discriminant les deux groupes, était liée aux performances linguistiques, tandis que les deux suivantes rendaient compte des profils acoustiques de production. La classification a mis en évidence quatre classes de performance : la classe 1 (IC uniquement) regroupait les enfants aux performances linguistiques les plus faibles et aux productions les moins distinctives ; la classe 4 (AT uniquement) correspondait aux meilleures performances et à des productions acoustiquement typiques. Les classes 2 et 3, mixtes, présentaient des niveaux

intermédiaires et des stratégies de production efficaces compensant l'impact des difficultés perceptives (exploitation des indices articulatoires visuellement plus accessibles par exemple). L'analyse longitudinale a montré une amélioration générale mais hétérogène, seuls quatre enfants progressant vers une classe associée à un niveau linguistique supérieur.

Conclusion : Les enfants du groupe IC dont les profils de production témoignaient de compensations efficaces face aux limites perceptives ont obtenu de meilleures performances linguistiques. Toutefois, leur progression lors du suivi à un an reste variable, ce qui suggère un possible coût cognitif associé à ces compensations.

Mots-clés : implant cochléaire, surdité, phonétique, phonologie, morphosyntaxe, analyses factorielles

Link Between Acoustic Production Profiles and Linguistic Performance in Children With Cochlear Implants

Background. Although early cochlear implantation allows young children with congenital deafness to reach linguistic levels close to those of typically hearing (TH) peers, certain domains remain at risk, particularly phonology and morphosyntax, with substantial variability in performance. One explanatory factor often mentioned is the degraded spectral quality of the auditory signal transmitted through the cochlear implant (CI), which may lead to imprecise phonological representations and, consequently, weaker linguistic skills. However, several studies have shown that some compensatory strategies can mitigate the impact of these perceptual limitations, such as the use of visually accessible cues.

Objectives. This study aimed to examine the relationship between the production profiles of speech sounds that are likely to be poorly encoded through the CI and the linguistic performance of children with CI and their TH peers, to determine whether compensatory strategies for perceptual limitations are associated with better linguistic outcomes.

Methods. Twenty-three children aged from 3 years and 8 months to 7 years and 10 months with congenital deafness using cochlear implants, and a control group of 47 typically hearing children matched for chronological and hearing age, completed picture-naming, narrative production, and morphological processing tasks. Acoustic measurements were extracted for three types of speech segments (nasal/oral vowels, fricatives, and plosives) to characterize production profiles and relate them to linguistic scores reflecting phonological, lexical, and morphosyntactic levels. A principal components analysis followed by hierarchical clustering made it possible to identify distinct performance profiles. Thirteen CI children were reassessed one year later to analyze longitudinal changes in performance.

Results. Three main dimensions were extracted from the PCA: the first, discriminating between groups, was related to linguistic performance, while the second and third accounted for acoustic production profiles. Hierarchical classification revealed four performance clusters: Cluster 1 (CI participants only) included children with the lowest linguistic performance and the least distinctive productions, while Cluster 4 (TH participants only) included those with the best linguistic and acoustic performance. Clusters 2 and 3, composed of participants from both groups, showed intermediate levels of linguistic performance and effective production strategies that compensated for the impact of perceptual difficulties (for example, by exploiting articulatory cues that are more visually accessible). The longitudinal analysis showed overall but heterogeneous improvement, with only four children moving to a cluster associated with higher linguistic performance.

Conclusion. Children in the CI group whose production profiles indicated effective compensation for perceptual limitations achieved better linguistic performance. However, their progress at the one-year follow-up remained variable, suggesting a possible cognitive cost associated with these compensations.

Keywords: cochlear implant, deafness, phonetics, phonology, morphosyntax, factorial analyses

INTRODUCTION

Les compétences langagières des enfants porteurs d'un implant cochléaire (IC) ont été largement étudiées afin de déterminer si ces derniers parviennent à atteindre le niveau langagier de leurs pairs entendants. Les niveaux de performance varient selon les composantes du langage investiguées : des performances inférieures à celles d'enfants ayant une audition typique sont fréquemment rapportées dans les domaines phonologique (Bouton et al., 2012; Gaul Bouchard et al., 2007) et morphosyntaxique (Bourdin et al., 2016; Caselli et al., 2012; Duchesne et al., 2010; Le Normand & Thai-Van, 2023), même si ces résultats présentent une forte variabilité. Le développement lexical, en revanche, a été plus souvent rapporté comme pouvant montrer des niveaux de développement proches de ceux d'enfants à audition typique (Caselli et al., 2012; Duchesne et al., 2009; Rinaldi et al., 2013).

Ces performances linguistiques hétérogènes peuvent s'expliquer, d'une part, par le retard d'exposition à la langue orale avant l'implantation et d'autre part, par les limitations perceptives liées au traitement du signal sonore par l'IC. Ces limitations perceptives affecteraient davantage certains sons de la parole reposant sur des indices acoustiques fins, tels que la nasalisation vocalique (Borel, 2015; Bouton et al., 2012; Fagniat et al., 2024a) ou les lieux d'articulation des consonnes (Bouton et al., 2012; Cheng & Chen, 2020; Medina et al., 2004; Peng et al., 2019). Les sons dont les corrélats acoustiques dépendent des hautes fréquences semblent également vulnérables, comme observé pour les consonnes fricatives (Grandon, 2016; Mildner et al., 2006; Reidy et al., 2017; Todd et al., 2011; Warner-Czyz & Davis, 2008).

Cependant, malgré ces contraintes perceptives, la majorité des enfants porteurs d'un IC parviennent à se constituer des représentations phonologiques de ces sons de parole davantage « vulnérables ». Lors d'une étude comparant les performances de 13 enfants porteurs d'IC à celles de 25 enfants à audition typique de même âge chronologique à des tâches d'identification et de discrimination de pseudomots contenant des voyelles nasales et orales, les performances des enfants porteurs d'IC, bien qu'en deçà de leurs pairs entendants, se situaient au-dessus du hasard (Fagniat et al., 2024a). On peut supposer que ces enfants, ayant

construit leurs représentations phonologiques à partir d'un signal auditif limité, ont pu s'appuyer davantage sur des indices acoustiques mieux transmis par l'IC, tels que les indices temporels ou les fréquences formantiques, en particulier lorsque ces indices sont accompagnés de gestes articulatoires visibles (arrondissement des lèvres, ouverture buccale). Cette proposition peut être appuyée par l'observation de liens entre les performances des enfants et l'exploitation de ces indices acoustiques davantage accessibles. En effet, les enfants ayant de meilleures performances d'identification/discrimination semblent être ceux ayant tiré davantage profit de très légères distances temporelles entre les voyelles nasales et orales.

Une seconde étude (Fagniat et al., 2025a) a permis d'investiguer les performances en production de voyelles nasales et orales auprès des mêmes enfants, à l'aide d'analyses perceptives (identification, par des juges, de la voyelle produite et du degré de nasalisation) et acoustiques (visant à étudier les caractéristiques formantiques des productions, le degré de nasalisation et la durée des voyelles). Il a pu être constaté que les enfants dont les productions étaient le mieux identifiées par des juges étaient également ceux qui marquaient davantage la distinction entre les voyelles nasales et orales à l'aide de patrons formantiques différenciés et d'allongements vocaliques. Ces stratégies de production s'avéraient donc efficaces pour obtenir une distinction entre les voyelles nasales et orales, distinctes en termes de configuration oro-pharyngée et de longueur segmentale. Ces stratégies étaient principalement retrouvées chez les enfants ayant une exposition intensive et régulière à la Langue française Parlée Complétée (LfPC)¹. Par ailleurs, les analyses acoustiques révèlent significativement moins de distinction entre les voyelles nasales et orales sur la base de la structure de résonance nasale chez les enfants porteurs d'IC par rapport à leurs pairs entendants, semblant témoigner des limites perceptives des enfants porteurs d'IC pour traiter cette information acoustique particulièrement complexe sur le plan spectral (voir Fagniat et al., 2025a) pour plus de détails sur les caractéristiques acoustiques des voyelles nasales).

Dans ce contexte, il n'est guère surprenant d'observer une grande variabilité des performances linguistiques : les limites perceptives de l'IC

1 Système de codes gestuels accompagnant la langue orale afin de fournir des indices visuels complétant la lecture labiale, rendant ainsi tous les contrastes phonologiques d'une langue parlée visuellement accessibles (Charlier, 2020).

engendrent des difficultés à percevoir certains sons de parole, ce qui a un impact sur la qualité des représentations phonologiques. Or, le développement des composantes lexicales et morphosyntaxiques repose sur la mémorisation et la manipulation de formes phonologiques précises. La plus grande vulnérabilité du domaine morphosyntaxique par rapport au domaine lexical, ainsi que les liens étroits entre phonologie et morphosyntaxe dans les populations présentant des troubles du langage, ont été interprétés comme le reflet d'une faible saillance perceptive des éléments grammaticaux dans la chaîne parlée (i.e., morphophonologie) par rapport aux éléments lexicaux plus saillants, et d'un avantage cognitif des éléments lexicaux, dotés d'un contenu conceptuel concret et plus aisément enseignables (Hage, 2005). Ces propositions fondent les théories phonologiques des troubles morphosyntaxiques chez les enfants présentant un trouble développemental du langage (Chiat, 2001; Joanisse & Seidenberg, 1998; Leonard et al., 1992; Parisse & Maillart, 2008). Des résultats convergents ont été obtenus dans une étude précédente (Fagniat et al., 2025b) portant sur des enfants avec IC, révélant des corrélations spécifiques entre niveaux phonologique et morphosyntaxique, ainsi qu'une corrélation entre l'ensemble des niveaux linguistiques (phonologique, lexical et morphosyntaxique) auprès de pairs à audition typique d'âge chronologique ou auditif équivalent. Forts des constats de possibilité de compensation des limitations perceptives par l'exploitation d'indices acoustiques mieux transmis par l'IC chez certains enfants, il semble raisonnable de se demander si ces compensations sont associées à de meilleures performances sur le plan linguistique, particulièrement pour le traitement et la production morphosyntaxique.

Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, cette étude vise à examiner le lien entre les caractéristiques acoustiques des sons de parole vulnérables dans la production des enfants porteurs d'un implant cochléaire et leurs performances langagières dans les domaines phonologique, lexical et morphosyntaxique. En effet, la forte variabilité observée parmi les utilisateurs d'IC quant à leur capacité à traiter certains segments vulnérables pourrait contribuer à expliquer la variabilité constatée dans les performances phonologiques et, par conséquent, dans les compétences morphosyntaxiques — celles-ci reposant sur des représentations

phonologiques précisément spécifiées.

Deux groupes d'enfants ont été recrutés :

- un groupe d'enfants porteurs d'un IC;
- un groupe d'enfants à audition typique, appariés selon l'âge chronologique ou auditif.

Les capacités perceptives ne seront pas directement évaluées, mais inférées à partir d'analyses acoustiques des productions de segments présentant un large éventail de corrélats acoustiques et différents degrés de difficulté pour la transmission via l'IC. Trois catégories de segments ont donc été sélectionnées pour explorer des indices de production présentant des degrés de difficulté perceptive différenciés :

- Voyelles nasales et orales : leur distinction repose sur deux stratégies de production de la nasalisation vocalique qui seront analysées acoustiquement : (1) le degré de résonance nasale, reposant sur des indices acoustiques fins (ratio d'amplitude des premiers harmoniques entre autres) particulièrement vulnérables dans le traitement par l'IC ; (2) la configuration oropharyngée spécifique de la voyelle cible qui sera analysée via des mesures formantiques, ces indices étant plus aisément exploitables lorsque les formants sont distincts et associés à des dimensions articulatoires visibles (ouverture, arrondissement; Fagniat et al., 2025a; Fagniat et al., 2024a).
- Consonnes fricatives : des difficultés spécifiques ont été rapportées tant dans la discrimination des lieux d'articulation (Giezen et al., 2010; Hedrick et al., 2011; Lane et al., 2001; Mildner & Liker, 2008; Reidy et al., 2017) que dans les caractéristiques acoustiques du bruit de friction, se manifestant par une moindre représentation de l'énergie haute fréquence (Fagniat et al., 2024b ; 2024c), reflétant directement les limites du codage des hautes fréquences par l'IC.
- Consonnes occlusives sourdes et sonores : leur distinction repose sur des corrélats temporels (Voice Onset Time) réputés bien codés par l'IC. Toutefois, les résultats de la littérature sont contradictoires (Bouton et al., 2012; Giezen et al., 2010; Grandon et al., 2017; Horga & Liker, 2006; Peng et al., 2019; Uchanski & Geers, 2003), indiquant une variabilité dans la capacité des enfants avec IC à percevoir et produire ces indices de voisement.

Les capacités de production associées à ces différents segments, évaluées par des mesures acoustiques, seront mises en relation avec les performances linguistiques dans les domaines phonologique, lexical et morphosyntaxique.

Les objectifs poursuivis sont les suivants :

- comparer les performances des enfants porteurs d'un IC à celles de leurs pairs entendants ;
- examiner les relations entre variables acoustiques et linguistiques (lexicale et morphosyntaxique) à l'aide d'une analyse factorielle ;
- déterminer si cette analyse permet de dégager des profils de performance différenciés, mettant en évidence des profils perceptivo-productifs manifestant des compensations des limitations acoustiques et associés à de bonnes performances linguistiques.
- observer les profils d'évolution d'un sous-groupe d'enfants par un re-test à un an d'intervalle, afin d'étudier la perspective développementale de l'ensemble des compétences investiguées.

MÉTHODOLOGIE

Participants

Un groupe d'enfants porteurs d'implants cochléaires (groupe IC) et un groupe d'enfants à audition typique (groupe AT) ont été recrutés pour l'étude. Le groupe IC était constitué de 23 enfants francophones (âge moyen : 67 ± 15 mois) avec une surdité bilatérale profonde congénitale. Parmi eux, 22 étaient implantés bilatéralement et un enfant était implanté unilatéralement. Tous les participants du groupe IC ont bénéficié d'une rééducation auditive oraliste, à la fois dans leurs centres de rééducation et au sein de leur famille. Tous les enfants étaient francophones monolingues, à l'exception de quatre issus de milieux familiaux bilingues : deux étaient bilingues français-portugais et deux bilingues français-arabe. Le groupe IC a été subdivisé selon l'exposition à la Langue française Parlée Complétée (LfPC) : 8 enfants sans exposition (LfPC0), 8 enfants exposés à la LfPC lors de séances d'orthophonie (2 à 3 séances/semaine – groupe LfPC-) et 7 également ou en milieu familial (groupe LfPC+). Le groupe a également été catégorisé selon l'âge d'implantation : les enfants ayant reçu un premier implant avant 16 mois ont été classés en implantation précoce et ceux implantés après 16 mois en implantation tardive ($n = 11$). Le seuil de 16 mois a été retenu

en cohérence avec des travaux montrant des bénéfices substantiels d'une implantation avant 18 mois (Sharma et al., 2020) ; au vu de la distribution des âges d'implantation, il a été abaissé à 16 mois pour obtenir des sous-groupes de tailles comparables. Les caractéristiques des enfants du groupe IC sont présentées en tableau 1.

Le groupe AT comprenait 47 enfants francophones monolingues d'un âge moyen de 56 ± 13 mois, ne présentant ni retard d'apprentissage ni trouble auditif. Les enfants de ce groupe ont été sélectionnés de façon à pouvoir être appariés en âge chronologique ou en âge auditif avec les enfants du groupe IC.

Tous les participants ont pris part à une première session de tests (T1). L'ensemble du groupe IC a été recontacté pour un second test un an plus tard ; treize enfants ont pu participer à cette évaluation (T2), permettant une comparaison longitudinale.

Tâches

Quatre tâches ont été administrées à l'ensemble des enfants. Ces tâches ont été sélectionnées de façon à recueillir des productions contrôlées permettant la réalisation d'analyses acoustiques (dénomination d'images) et l'obtention de deux récits narratifs, l'un induit, l'autre libre, afin de collecter des échantillons de parole semi-spontanée permettant des analyses linguistiques sur le plan lexical et morphosyntaxique. Une tâche de traitement morphémique a également été proposée, afin d'examiner la morphosyntaxe sur son versant réceptif, en lien avec certaines difficultés perceptives reconnues chez les utilisateurs d'implant cochléaire (notamment le traitement du trait de nasalité vocalique). Les performances des groupes d'enfants à l'ensemble de ces tâches ont été décrites précisément dans des études auxquelles les auteurs invitent le lecteur à se référer (Fagniat et al., 2024a ; Fagniat et al., 2025a). La présente étude vise à examiner conjointement ces différentes mesures dans une perspective multivariée.

Tâche de dénomination

La tâche de dénomination d'images a d'abord été proposée, afin d'étudier les productions des enfants sur les plans acoustique et phonologique. Quarante-huit mots cibles ont été sélectionnés pour couvrir l'ensemble des phonèmes du français en positions initiale, médiane et finale de syllabe. Les items ont été choisis pour leur âge d'acquisition

Tableau 1*Tableau descriptif des participants du groupe IC*

Participant	Sexe	Âge chronologique (année; mois)	Âge de la première implantation (mois)	Groupe d'âge d'implantation	Type d'implantation	Environnement linguistique	Groupe d'exposition à la LfPC	Retest en T2
CI1	M	4;6	9	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	/
CI2	M	6;5	39	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	/
CI3	F	5;10	15	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	/
CI4	F	6;7	7	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	/
CI5	F	6;6	31	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	/
CI6	F	4;7	7	< 16M.	Unilatéral	Monolingue	LfPC+	/
CI7	F	7;3	13	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC-	/
CI8	M	4;7	13	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC-	/
CI9	M	4;9	13	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	Oui
CI10	M	4;6	12	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC-	Oui
CI11	F	4;6	18	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC-	Oui
CI12	M	5;6	9	< 16M.	Bilatéral	Bilingue français-portugais	LfPC-	Oui
CI13	F	7;3	24	> 16M.	Bilatéral	Bilingue français-portugais	LfPC-	Oui
CI14	G	7;10	26	> 16M.	Bilatéral	Bilingue français-arabe	LfPC-	Oui
CI15	G	6;11	23	> 16M.	Bilatéral	Bilingue français-arabe	LfPC-	Oui
CI16	F	6;9	20	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	Oui
CI17	M	6;0	20	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	/
CI18	F	3;9	23	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	Oui
CI19	F	5;0	12	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	/
CI20	F	3;8	32	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC-	Oui
CI21	M	4;11	11	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC0	Oui
CI22	F	6;7	17	> 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	Oui
CI23	F	5;0	13	< 16M.	Bilatéral	Monolingue	LfPC+	Oui

précoce (d'après Chalard et al., 2003) afin de faciliter l'évocation (voir Philippart De Foy et al., 2018, pour plus de détails).

Les images cibles étaient présentées une à une dans un livret; l'enfant devait nommer oralement chaque image. En cas d'absence de réponse ou de production non conforme à la cible (p. ex., paraphrasie sémantique, réponse aléatoire), des amorces étaient fournies : d'abord des indices sémantiques (p. ex., « on l'utilise quand il pleut » pour /*paʁaplɥi*/ parapluie), puis, si nécessaire, un indice phonologique par la présentation du phonème initial (p. ex., « ça commence par /s/ » pour /*suri*/ souris). Si l'enfant ne produisait toujours pas le mot cible, l'expérimentateur le prononçait et demandait une répétition.

Tâche de traitement morphémique

Une tâche de traitement morphémique a suivi, consistant en un appariement phrase/mot-image. Un mot ou une courte phrase était présenté auditivement (enregistrements audio), puis l'enfant devait désigner l'image correspondante parmi la cible et un distracteur, ce dernier formant une paire minimale avec la cible. La tâche comprenait 28 items au total : 13 marques du nombre (p. ex., « il va » /*il va*/ vs « ils vont » /*il vɔ̃*/), 7 marques du genre (p. ex., « boulanger » /*bulɑ̃ʒe*/ vs « boulangère » /*bulɑ̃ʒɛʁ*/) et 8 paires minimales (p. ex., « bain » /*bɛ̃*/ vs « banc » /*bɑ̃*/). Ces distinctions grammaticales et lexicales s'appuyaient sur divers contrastes phonologiques : substitutions vocaliques oral/nasal (n = 10), oral/oral (n = 3) ou nasal/nasal (n = 3), ainsi que des ajouts phonémiques (n = 12).

Deux images (cible, distracteur) étaient présentées sur tablette. Les stimuli étaient diffusés via haut-parleurs (Bose Soundlink) avec un niveau moyen de 60 dB SPL, contrôlé par décibelmètre. Cinq items d'entraînement précédaient la tâche pour s'assurer de la compréhension des consignes et ajuster le volume.

Tâches de production narrative

Deux tâches de narration étaient proposées de façon à analyser les compétences en production morphosyntaxique : une narration induite et une narration libre. La tâche de narration induite commençait par la présentation d'une histoire animée présentée sur tablette, l'animation fournissant un support visuel tandis qu'un narrateur enregistré racontait l'histoire. Pour éviter que l'enfant ne se focalise exclusivement sur l'un ou

l'autre canal, narration et animation alternaient sans chevauchement. À l'issue de la présentation complète, l'enfant devait raconter l'histoire à partir des images animées. L'histoire présentée visait à introduire des rebondissements sollicitant divers temps et modes verbaux (passé, futur, conditionnel) ainsi que des marques de genre et de nombre, afin de favoriser la production de marqueurs grammaticaux variés. La narration libre consistait en la présentation de l'album sans texte largement utilisé en clinique et en recherche, *Frog, Where Are You?* (Mayer, 1969) pendant laquelle l'enfant devait raconter l'histoire.

Procédure

Les quatre tâches étaient réalisées en environnement calme, en présence de l'expérimentateur et, dans certains cas, de l'orthophoniste. L'ordre était le suivant : dénomination, narration induite, traitement morphémique, puis narration libre. La passation totale durait 35 à 60 minutes, avec des pauses proposées entre les tâches. Toutes les productions étaient enregistrées à l'aide d'un enregistreur audio portable Zoom H5; les réponses à la tâche de traitement morphémique étaient consignées en séance. Les tests répétés à un an d'intervalle (sous-groupe de 13 enfants) ont été conduits de manière identique.

Mesures

Diverses mesures ont été recueillies pour décrire les profils de production selon des dimensions acoustiques et linguistiques (phonologie, morphologie, lexique, morphosyntaxe). Les mesures, détaillées ci-dessous, ont été moyennées par enfant afin d'alimenter des analyses factorielles représentant chaque enfant sur les dimensions extraites.

Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques ont été réalisées uniquement sur les productions collectées lors de la tâche de dénomination d'images. La description complète des mesures et de la procédure d'analyse semi-automatique du signal est fournie dans des études précédemment menées (Fagniat et al., 2025a; Fagniat et al., 2024b ; 2024c); seuls des éléments essentiels sont repris ici.

- Voyelles : l'objectif était de documenter (i) la configuration oropharyngée spécifique de la voyelle cible via les mesures formantiques, ces indices étant plus aisément exploitables

lorsque les formants sont distincts et associés à des dimensions articulatoires visibles (ouverture, arrondissement) et (ii) le degré de résonance nasale, la distinction oro-nasale/orale reposant sur des indices acoustiques fins (i.e. ratio d'amplitude des premiers harmoniques) particulièrement vulnérables dans le traitement par l'IC. Les formants ont été examinés pour la configuration oro-pharyngée ; la résonance nasale a été indexée par la Nasalization from Acoustic Features (NAF, Carignan et al., 2023). Au total, 6605 voyelles ont été analysées. Pour étudier les stratégies de mise en œuvre phonétique du contraste phonologique nasal/oral, des comparaisons par paires ont été réalisées, en s'appuyant sur la proximité phonétique (*/ā/-ɔ/, /ā/-o/, /ɔ/-o/, /ɔ/-ɔ/, /ɔ/-u/, /ē/-a/*) et phonologique (*/ā/-a/, /ɔ/-ɔ/, /ē/-ē/*) des voyelles en français (Borel, 2015). Pour chaque enfant, chaque voyelle nasale produite a été appariée avec toutes les voyelles orales phonétiquement ou phonologiquement proches, générant 30402 paires et permettant de comparer les indices acoustiques au sein de chaque paire. Les distances euclidiennes dans le plan F1-F2-F3 (Bark) et les différences de NAF ont été calculées pour chaque paire. Deux mesures ont été retenues pour l'analyse factorielle :

- o distances euclidiennes F1-F2-F3 entre paires nasal/oral phonologiques et phonétiques ;
- o différences de NAF entre paires nasal/oral phonologiques et phonétiques.
- Fricatives : la caractérisation acoustique s'est appuyée sur des mesures récentes (Shadle et al., 2023) pour identifier les pics spectraux liés au lieu d'articulation (siège de l'obstruction) et la qualité du bruit de friction via des rapports d'intensité dans les bandes basses, médianes et hautes fréquences. 1917 fricatives ont été analysées. Trois mesures ont été retenues :
 - o différences de pics spectraux entre fricatives antérieures (*/f/-v/*) et médianes (*/s/-z/*), et entre médianes (*/s/-z/*) et postérieures (*/ʃ/-ʒ/*) (SP_1_2, SP_2_3) ;
 - o AmpDiff : rapport d'énergie médianes vs basses fréquences du bruit de friction ;
 - o LevelD : rapport d'énergie hautes vs médianes fréquences. Un bon bruit de friction présente une part importante d'énergie dans les médianes et surtout hautes fréquences : on attend donc des valeurs AmpDiff élevées (médianes > basses) et des valeurs LevelD

faibles (forte proportion d'énergie en hautes fréquences).

- Occlusives (voisement) : le Délai d'Établissement du Voisement (DEV) a été mesuré sur 3012 occlusives. Une mesure composite a été calculée : différence entre le DEV moyen des sonores et celui des sourdes.

Mesures linguistiques

Les résultats complets obtenus par les deux groupes d'enfants aux différentes tâches linguistiques sont décrits dans les études précédemment réalisées (Fagniat et al., 2024a ; 2024b ; Fagniat et al., 2025a ; 2025b). Les sections qui suivent visent à préciser les mesures employées pour les analyses factorielles.

Score phonologique

Les productions de la tâche de dénomination ont été annotées par un examinateur puis vérifiées par la première autrice dans Phon 3.1 (Hedlung & Rose, 2020). Le logiciel compare la forme cible et la production annotée, et extrait divers indices d'exactitude phonologique. Nous retenons ici un score global : le pourcentage de phonèmes corrects (PPC).

Scores à la tâche de traitement morphémique

Des scores *d'* ont été calculés pour toutes les catégories de marqueurs (genre, nombre) ainsi que pour les paires minimales, en tenant compte des mécanismes phonologiques sous-jacents (contrastes oral/nasal, oral/oral, nasal/nasal, ajout phonémique). Les *d'* ont été obtenus en soustrayant les valeurs normalisées, centrées et standardisées du taux d'atteinte (détections correctes) et du taux de fausses alarmes (détections incorrectes), selon la théorie de la détection du signal (MacMillan & Creelman, 1991). Les valeurs extrêmes 0 et 1 ont été ajustées à 0,01 et 0,99 pour permettre la transformation en Z-scores. Pour les analyses factorielles, ont été utilisés le score total (TM_tot) et le score restreint aux items contrastés par alternance morphophonologique oral/nasal (TM_or_nas).

Scores de production narrative et types d'erreurs

Les narrations (audios) ont été transcrites dans PHON (Hedlund & Rose, 2020), puis exportées vers CLAN (MacWhinney, 2000) pour une annotation morphosyntaxique via MOR et POST (Parijsse & Le Normand, 2000). Le programme KidEval a

servi à extraire divers indices de développement morphosyntaxique et à catégoriser mots-outils et temps verbaux.

Pour l'analyse factorielle, les indices suivants ont été retenus :

- Longueur moyenne des énoncés en morphèmes (MLUm), indice fréquemment employé pour refléter le développement morphosyntaxique
- Nombre de pronoms réfléchis (Refl_pro)
- Fréquence d'emploi de l'imparfait parmi les verbes (Simple_past)

Le choix de ces indices a été fait sur base des constats réalisés dans une étude précédente (Fagniat et al., 2025b), montrant significativement plus de vulnérabilité de ces indices parmi les enfants porteurs d'IC en comparaison à leurs pairs entendants du même âge.

Les erreurs de production sur le plan morphosyntaxique ont été identifiées et catégorisées par la première autrice (Fagniat et al., 2025b). Seules les omissions de déterminant avant noms monosyllabiques (om_det_1syll) vs bisyllabiques (om_det_2syll) ont été retenues pour l'analyse factorielle, car plus fréquentes dans le groupe IC et modulées par l'âge d'implantation et l'exposition à la LfPC. Enfin, un indice de diversité lexicale, l'indice D, a été calculé via la procédure VOCD de CLAN (Durán et al., 2004), fournissant une probabilité d'introduction d'un nouveau mot indépendamment de la taille du corpus.

Analyse statistique

L'objectif de la présente étude étant de caractériser les performances langagières des enfants à partir de l'ensemble des mesures réalisées, les analyses ont été conduites dans une perspective multivariée, à l'aide d'analyses factorielles. Ce type d'analyse permet, à partir de l'examen des corrélations entre les variables, de réduire les variables étudiées en dimensions, ou composantes, qui synthétisent le jeu de données. Cette procédure permet de positionner l'ensemble des enfants selon leurs performances exprimées dans un nombre réduit de dimensions et ainsi d'observer des tendances dans les profils en tenant compte de l'ensemble des variables considérées. Les analyses factorielles en composantes principales (ACP) ont été réalisées avec FactoMineR (Husson et al., 2024) et des représentations graphiques produites avec Factoextra (Kassambara & Mundt, 2020). Les

analyses ont porté sur un jeu de données moyenné par enfant, comprenant des mesures acoustiques agrégées (moyennes) et converties en z-scores, incluant :

- Variables acoustiques liées à la distinction entre voyelles nasales et orales : moyennes des différences (paires phonologiques et phonétiques) pour la résonance nasale (NAF) (NAF_phono, NAF_phone) et pour les distances euclidiennes F1-F2-F3 (F123_phono, F123_phone).
- Variables acoustiques liées à la production de fricatives : différences de pics spectraux moyens entre /f-v/ et /s-z/ (SP_1_2), et entre /s-z/ et /ʃ-ʒ/ (SP_2_3) et valeurs moyennes des rapports AmpDiff et LevelD.
- Variable acoustique liée à la production des occlusives voisées et non voisées : différence dans la Durée d'Établissement du Voisement (DEV) : VOT_UV_V.
- Variables liées à la tâche de traitement morphémique : score total (TM_tot) et score oral/nasal (TM_or_nas).
- Variables liées à la tâche de dénomination : PPC en dénomination et pourcentage d'évocation au premier essai (Naming).
- Variables liées aux tâches de narration : MLUm, indice D, fréquence d'emploi de l'imparfait (Simple_past), nombre de pronoms réfléchis (Refl_pro), omissions de déterminant avant mots monosyllabiques (Det_del_1syll) et bisyllabiques (Det_del_2syll).

L'ensemble des variables collectées au sein de chaque tâche, ainsi que leur objectif et la composante langagière évaluée associée sont synthétisés en tableau 2.

Les caractéristiques des enfants ont été introduites comme variables supplémentaires (sans contribution à la construction des axes) afin d'examiner leur distribution le long des dimensions. Après extraction des dimensions, des classifications hiérarchiques ascendantes (Husson et al., 2024) ont été menées pour former des classes de performance résumant les axes retenus. La méthode repose sur des indices de dissimilarité entre individus et un indice d'agrégation entre classes, aboutissant à un dendrogramme. Cette approche a été choisie pour typologiser les profils indépendamment du statut auditif. La classification s'est appuyée sur les trois premières dimensions

de l'analyse factorielle, représentant 52,9 % de la variance expliquée. Le dendrogramme a servi à fixer un seuil de coupe optimal, afin d'obtenir une partition suffisamment discriminante sans être sur-simplificatrice, selon la procédure décrite par Cornillon et al. (2018).

Pour identifier les profils des classes, des analyses comparatives ont été réalisées via des modèles linéaires mixtes généralisés, contrôlant l'effet aléatoire sujet, avec lme4 (v. 1.1-34; Bates et al., 2015) et emmeans (Lenth et al., 2023) sous R (R Core Team, 2022).

Tableau 2

Description des variables linguistiques et acoustiques utilisées dans l'analyse en composantes principales

Variable	Description	Compétence langagière évaluée	Tâche
PPC	Pourcentage de phonèmes corrects	Phonologie (production)	
Naming	Nombre d'évocations spontanées correctes	Lexique	
NAF_phone	Indice acoustique de nasalité mesurant la présence de résonance nasale dans les voyelles (paires phonétiques - phonologiques)	Phonétique - voyelles nasales/orales	
NAF_phono		Phonétique - voyelles nasales/orales	
F1_F2_F3_phone	Distance euclidienne calculée à partir des formants F1-F2-F3 entre voyelles orales et nasales (paires phonétiques - phonologiques)	Phonétique - voyelles nasales/orales	
F1_F2_F3_phono		Phonétique - voyelles nasales/orales	
AmpDiff	Ratio d'énergie entre fréquences moyennes et basses dans le bruit des fricatives	Phonétique - consonnes fricatives	Tâche 1 : dénomination d'images
LevelD	Ratio d'énergie entre fréquences hautes et moyennes dans le bruit des fricatives	Phonétique - consonnes fricatives	
SP_1_2	Différence de pics spectraux distinguant les lieux d'articulation : Entre les fricatives antérieures //-// et médianes //-// (_1_2) Entre les fricatives médianes //-// et postérieures //-// (_2_3)	Phonétique - consonnes fricatives	
SP2_3		Phonétique - consonnes fricatives	
VOT_UV_V	Différence de Délai d'Établissement du Voisement ou DEV (Voice Onset Time ou VOT) entre consonnes occlusives non voisées et voisées	Phonétique - consonnes occlusives	
TM_tot	Score total à la tâche de traitement morphémique	Traitement morphophonologique	Tâche 2 : traitement morphémique
TM_or_nas	Score spécifique aux items impliquant l'opposition oral/nasal		
MLUm	Longueur moyenne des énoncés en morphèmes	Morphosyntaxe (production)	Tâches 3-4 : narrations
D	Indice de diversité lexicale		
Simple_past	Fréquence d'utilisation de l'imparfait		
Refl_pro	Nombre de pronoms réfléchis utilisés		
Det_del_1syll	Omissions de déterminant avant mots monosyllabiques		
Det_del_2syll	Omissions de déterminant avant mots bisyllabiques		

RÉSULTATS

Résultats à T1

Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse factorielle a extrait 19 dimensions, correspondant au nombre de variables intégrées au modèle (voir tableau 2). Seules les trois premières dimensions, qui cumulent 52,9 % de la variance expliquée, sont décrites ici. La figure 1 illustre la contribution des différentes variables aux trois dimensions.

La Dimension 1 (30,7 % de variance expliquée) apparaît directement liée aux performances linguistiques. Contribuent le plus aux valeurs positives de l'axe : Longueurs Moyennes des Énoncés morphémiques (MLUm : 0,8), Pourcentage de Phonèmes Corrects (PPC : 0,8), nombre d'évocations spontanées en dénomination (0,8) et score à la tâche d'appariement phrase/mot-image spécifique aux voyelles nasales et orales (0,73). Des corrélations fortes avec la Dimension 1 sont aussi observées pour l'indice de diversité lexicale D (0,61) et l'emploi de l'imparfait (0,62). Du côté négatif de l'axe, les omissions d'articles devant les mots monosyllabiques (-0,64) et bisyllabiques (-0,75) sont les contributeurs majeurs. Cela signifie que les valeurs positives sur la dimension 1 sont associées à des compétences linguistiques plus élevées, tandis que les valeurs négatives sont associées à des compétences plus faibles et à un plus grand nombre d'erreurs morphosyntaxiques.

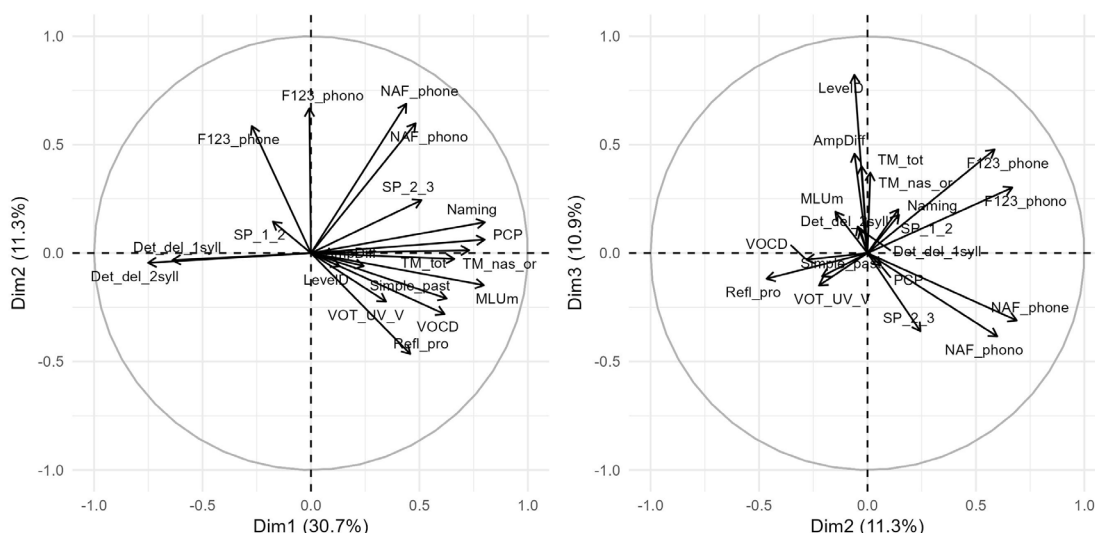
La Dimension 2 (11,3 % de variance expliquée) est directement associée au marquage acoustique

de la distinction oral/nasal. Les variables les plus contributives du côté positif sont celles liées aux valeurs NAF (NAF_phono : 0,59; NAF_phone : 0,69) et aux distances euclidiennes F1-F2-F3 (F123_phono : 0,67; F123_phone : 0,59). Cette dimension reflète une distinction acoustique plus nette entre les voyelles orales et nasales, indépendamment de la stratégie acoustique spécifique utilisée pour l'encoder, qu'elle repose sur des indices de résonance nasale ou sur des différences sur le plan formantique.

La dimension 3 (10,9 % de la variance expliquée) semble refléter des différences dans les indices acoustiques utilisés pour encoder les contrastes phonétiques. Les valeurs positives sont principalement associées à des valeurs plus élevées du ratio LevelD (0,82), indiquant des productions de fricatives dans lesquelles l'énergie est relativement plus concentrée dans la bande de fréquences moyennes que dans les hautes fréquences, ainsi qu'à une distinction plus marquée entre voyelles orales et nasales fondée sur la structure formantique (F123_phono : 0,3; F123_phone : 0,47). À l'inverse, les valeurs négatives sont associées à un marquage plus fort de la nasalité via la résonance nasale (NAF_phono : -0,38; NAF_phone : -0,31) et à une distinction plus nette entre lieux d'articulation médians et postérieurs pour les fricatives (SP2_3 : -0,36). Dans l'ensemble, cet axe semble opposer des productions reposant davantage sur la distribution spectrale de l'énergie et la structure formantique à des productions s'appuyant davantage sur des indices de nasalité et des contrastes de lieu d'articulation.

Figure 1

Cercle des corrélations des variables initiales pour les dimensions 1 et 2 (à gauche) et 2 et 3 (à droite), selon leur degré de contribution à la construction des axes (indiqué par la longueur des flèches)



La figure 2 montre une tendance nette du groupe IC à se placer du côté négatif de la Dimension 1 par rapport au groupe AT (côté positif), indiquant des valeurs plus faibles aux scores linguistiques. La Dimension 2 ne discrimine pas les groupes, ceux-ci se situant plutôt près de zéro. La répartition sur les Dimensions 2 et 3 met en évidence une tendance

sur la Dimension 3 : le groupe IC se positionne davantage du côté positif en comparaison au groupe AT. Ceci traduit un marquage plus fort de l'opposition oral/nasal via les distances F1-F2-F3 et des valeurs plus élevées de levelD et ampDiff. On note toutefois une forte variabilité intra-groupe chez les enfants IC.

Figure 2

Représentation des participants selon les dimensions 1 et 2 (à gauche) et 2 et 3 (à droite), pour les groupes IC et AT, avec ellipses d'intervalle de confiance à 95 %

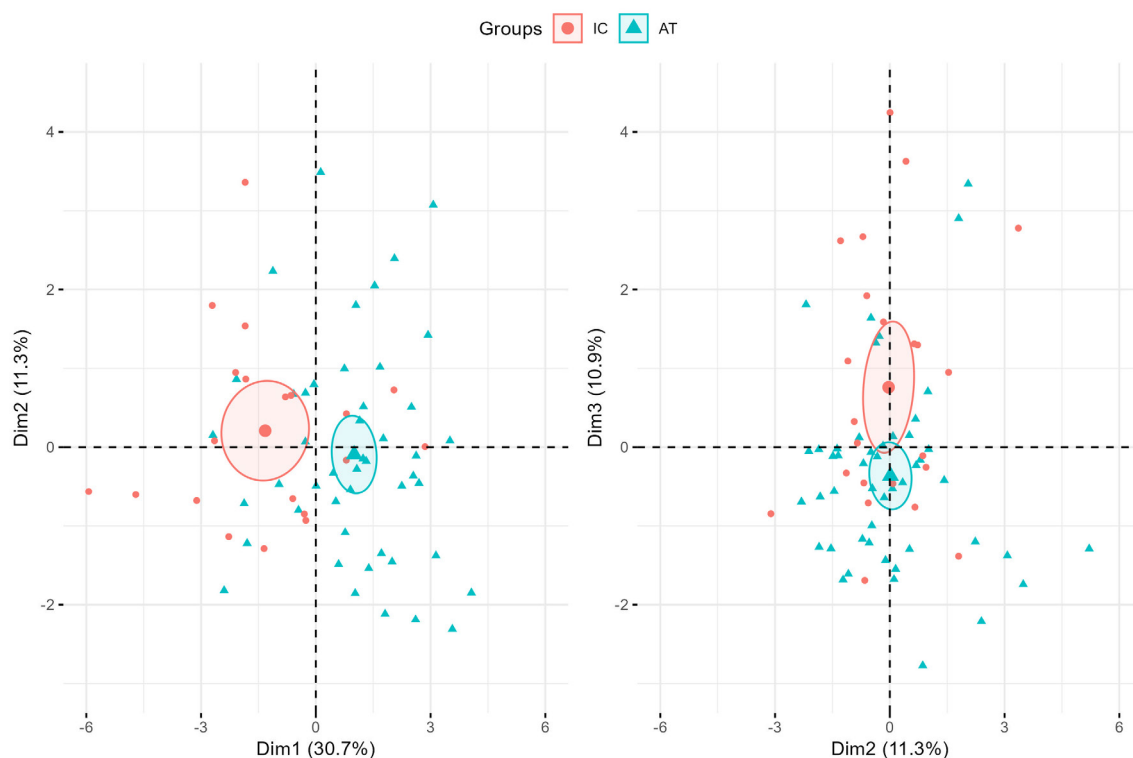
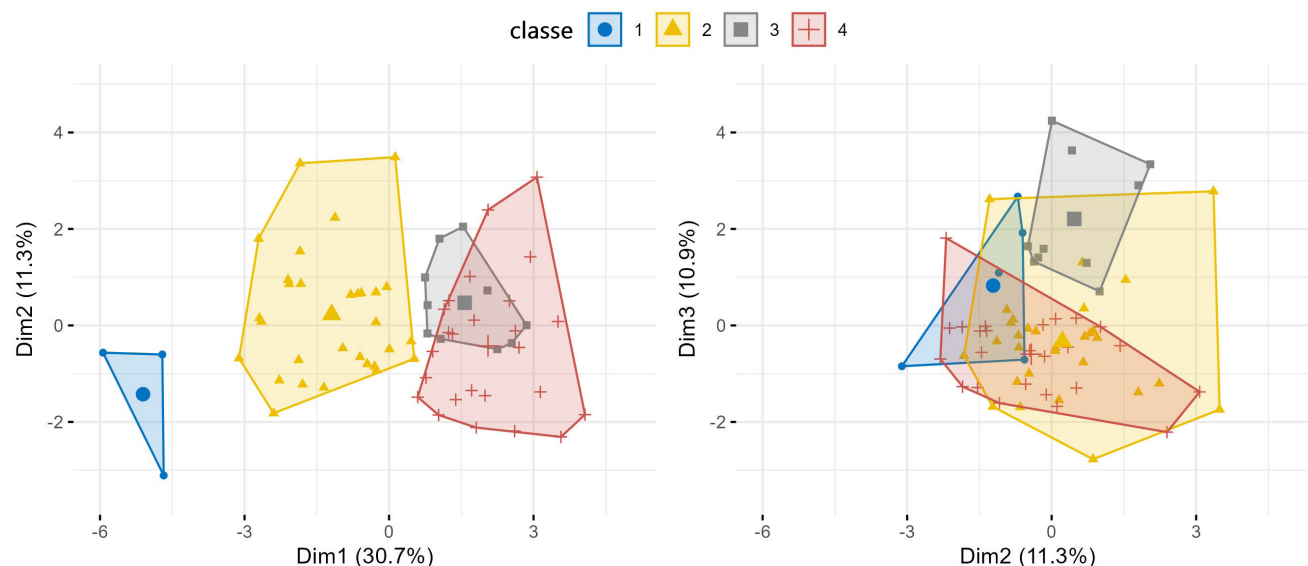


Figure 3

Répartition des quatre classes de participants le long des dimensions 1 et 2 de l'ACP (à gauche) et des dimensions 2 et 3 (à droite)



Classification hiérarchique ascendante (CHA)

Afin de catégoriser finement les profils de performance (acoustique et linguistique), des analyses non supervisées par classification hiérarchique ont été menées à partir des trois dimensions de l'ACP. L'analyse a permis de mettre en évidence 4 classes de performances (voir figure 3 ci-avant).

La classe 1 se distingue nettement sur la Dimension 1 et correspond aux performances linguistiques les plus faibles; la classe 2 occupe une position intermédiaire; les classes 3 et 4 se situent clairement du côté droit de l'axe de la Dimension 1, de manière similaire. La classe 1 se différencie aussi par des valeurs négatives sur la Dimension 2, les autres classes étant proches de zéro. Sur la Dimension 3, les tendances divergent: classes 1 et 3 en positif (davantage pour la 3), classe 4 en négatif et classe 2 avec une variabilité importante.

Pour caractériser les classes, diverses variables ont été analysées. Le tableau 3 présente les effectifs selon le statut auditif et les âges moyens de chaque classe, ainsi que les p-valeurs des tests du χ^2 (indépendance) ou Kruskal-Wallis.

On observe que la classe 1 ne comprend que des enfants IC ($n = 5$), tandis que la classe 4 ne comprend que des enfants AT ($n = 25$). Les classes 2 et 3 présentent des proportions équivalentes d'enfants IC et AT. Pour l'âge chronologique, les enfants AT sont plus jeunes en classe 2 que dans les classes 3 et 4, alors que les enfants de la classe 1 sont les plus âgés parmi les IC. Pour l'âge auditif, les IC sont équivalents statistiquement entre les trois

classes. Notons qu'en classe 2, les âges auditifs des enfants IC et AT sont équivalents. Les tests du chi carré n'ont révélé aucune association significative entre les classes et les groupes d'exposition à la LfPC ($\chi^2(4) = 5,24$, $p = .30$), ni entre les classes et les groupes d'âge à l'implantation ($\chi^2(2) = 1,44$, $p = .50$), ce qui suggère que ces variables sont réparties de manière similaire entre les classes.

Pour approfondir les constats généraux issus de l'ACP, des comparaisons des valeurs brutes des différentes variables ont été réalisées et sont résumées dans la figure 4, permettant une caractérisation détaillée des quatre classes.

- Classe 1 (enfants IC uniquement): les enfants de la classe 1 présentent globalement les performances linguistiques les plus faibles, avec des valeurs plus basses de longueurs moyennes des énoncés en morphèmes (MLUM), de pourcentages de phonèmes corrects (PPC) et de scores d'évocations spontanées que dans les autres classes. Pour la diversité lexicale (D) et la tâche de traitement morphémique (score total et items oral-nasal), leurs performances sont similaires à celles de la classe 2 mais restent inférieures à celles des classes 3 et 4. Du point de vue acoustique, le marquage oral-nasal via l'indice NAF est plus faible que dans les autres classes, bien que les distances formantiques (F1–F2–F3) soient comparables. Pour les fricatives, la distinction entre lieux d'articulation médians et postérieurs est moins nettement marquée que dans les autres classes. Pour les occlusives, le contraste de VOT entre consonnes voisées et non voisées est également moins marqué que dans la classe 4.

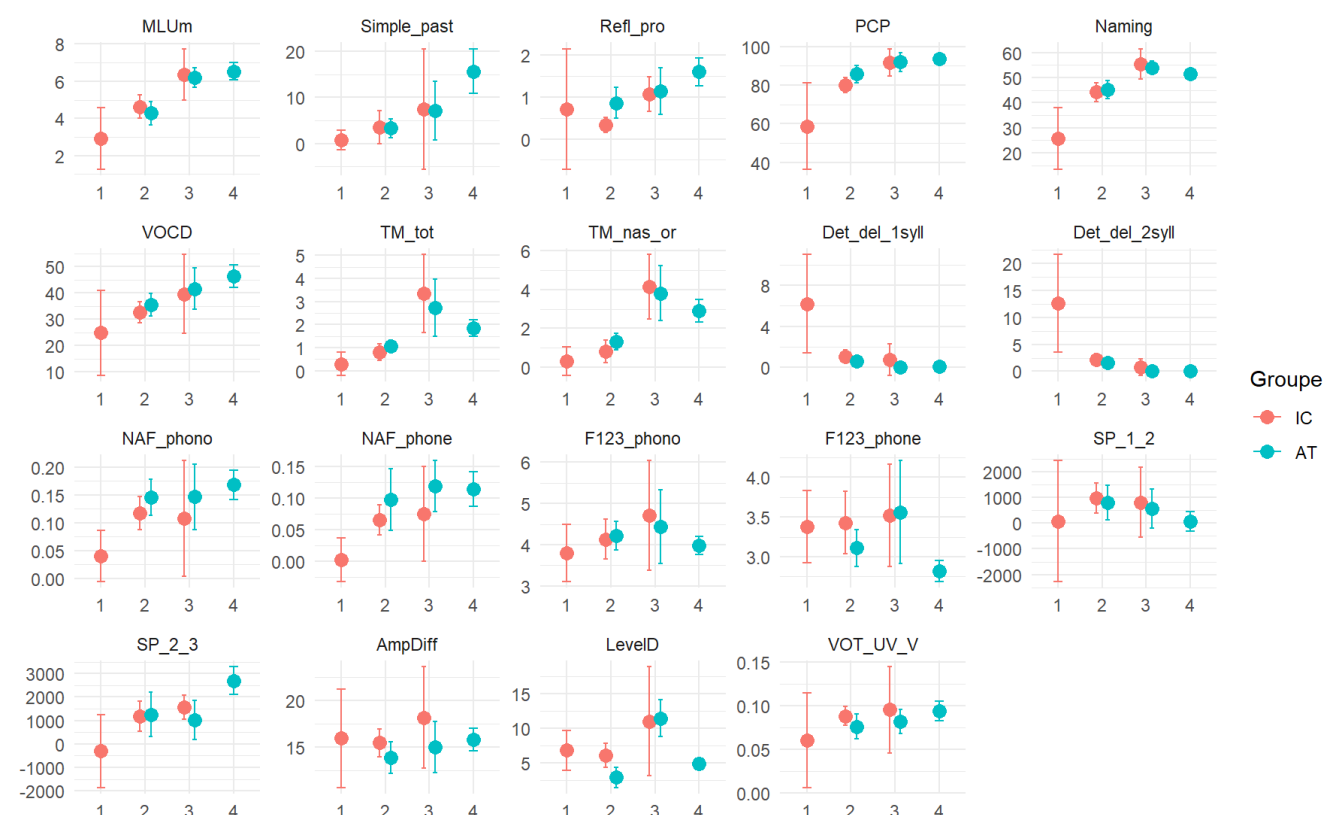
Tableau 3

Effectifs ou moyennes des différentes classes selon le statut auditif, l'âge chronologique et auditif, avec les tests de comparaison intergroupes associés (χ^2 ou Kruskal-Wallis)

Variable	Groupe	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	p-valeurs
Statut auditif (N)	IC	5	14	4	0	<.001
	AT	0	17	6	25	
	Total	5	31	10	25	
Âge chronologique (mois)	IC	71,6	64,3	72,7	NA	NS
	AT	NA	47,7	54,1	63,5	<.001
	Total	71,6	55,1	61,6	63,5	<.001
Âge auditif (mois)	IC	49,8	47,4	54,5	NA	NS
	AT	NA	47,7	54,1	63,5	<.001
	Total	49,8	47,4	54,3	63,5	<.001

Figure 4

Valeurs moyennes avec intervalle de confiance à 95 % des variables initiales de l'ACP, regroupées par classe (axe des abscisses) et différenciées selon le statut auditif (couleur)



- Classe 2 (proportions équivalentes d'enfants IC et AT) : les enfants de la classe 2 présentent des performances linguistiques intermédiaires. Les scores de MLUm, de PCP et d'évocations spontanées sont supérieurs à ceux de la classe 1 mais restent inférieurs à ceux des classes 3 et 4, et la diversité lexicale (D) est plus faible que dans la classe 4. Sur le plan acoustique, le marquage oral-nasal via l'indice NAF est plus marqué que dans la classe 1. De plus, les distances formantiques pour les contrastes oral-nasal (paires phonétiques) sont plus élevées que dans la classe 4. La distinction entre fricatives médianes et postérieures est plus nette que dans la classe 1 mais moins marquée que dans la classe 4, tandis que les valeurs de LevelD sont comparables à celles des classes 1 et 4. Aucune différence inter-classes n'est observée pour le contraste de VOT entre consonnes voisées et non voisées.

- Classe 3 : la classe 3 présente des performances linguistiques élevées, avec des scores de MLUm, de PCP, de diversité lexicale (D) et d'évocations spontanées supérieurs à ceux des classes 1 et

2 et comparables à ceux de la classe 4. Pour le marquage oral-nasal basé sur l'indice NAF, les valeurs sont similaires à celles observées dans les classes 2 et 4. En revanche, les distances formantiques (pour les paires phonologiques) sont plus élevées que dans la classe 4. Pour les fricatives, la distinction entre lieux d'articulation médians et postérieurs est moins marquée que dans la classe 4, et cette classe présente les valeurs de LevelD les plus élevées.

- Classe 4 (enfants AT uniquement) : la classe 4 présente globalement les meilleures performances linguistiques, souvent comparables à celles de la classe 3, mais caractérisées par un usage plus fréquent du passé simple et des pronoms réfléchis. Sur le plan phonétique, les distances formantiques pour les contrastes oral-nasal sont plus faibles que dans certaines autres classes. En revanche, les enfants de cette classe montrent la distinction la plus nette entre fricatives médianes et postérieures, indiquant un marquage particulièrement robuste du lieu d'articulation.

Les différences moyennes entre classes pour

les distances F1-F2-F3 (paires phonologiques), les pics spectraux (fricatives antérieures vs médianes) et l'indice ampDiff ne sont pas statistiquement différents. Pour les classes 2 et 3 (avec une proportion d'enfants des groupes IC/AT équivalente), des tests ont examiné l'effet du statut auditif, de la classe et de leur interaction. Des valeurs plus élevées chez AT, quelle que soit la classe, sont observées pour PPC ($\chi^2(1) = 3,5$; $p = .05$) et pour le score des items oral/nasal ($\chi^2(1) = 3,4$; $p = .06$). Sur le plan acoustique, un effet de groupe en faveur des AT apparaît pour NAF (paires phonologiques : $\chi^2(1) = 4,39$; $p = .03$; phonétiques : $\chi^2(1) = 3,42$; $p = .05$). Des valeurs plus élevées des ratios ampDiff ($\chi^2(1) = 4,44$; $p = .03$) et levelD ($\chi^2(1) = 3,41$; $p = .05$) sont notées chez les IC.

Résultats à T2

Un sous-groupe de 13 enfants IC issus de l'échantillon total a repassé l'ensemble des tâches un an après T1 (T2).

Comparaisons T1-T2

Les analyses à mesures répétées montrent des progrès significatifs pour différentes mesures liées au domaine linguistique :

- MLUm ($\beta = 1,26$; SE = 0,25; $t(12) = 5,04$; $p < .001$)
- Pronoms réfléchis ($\beta = 4,5$; SE = 1,15; $t(12) = 3,95$; $p = .001$)
- PPC ($\beta = 5$; SE = 1,4; $t(12) = 2,55$; $p = .003$)
- Nombre d'évocations spontanées en dénomination ($\beta = 7$; SE = 2,02; $t(12) = 3,46$; $p = .004$)
- Indice de diversité lexicale D ($\beta = 11,4$; SE = 7,07; $t(12) = 2,81$; $p = .01$).

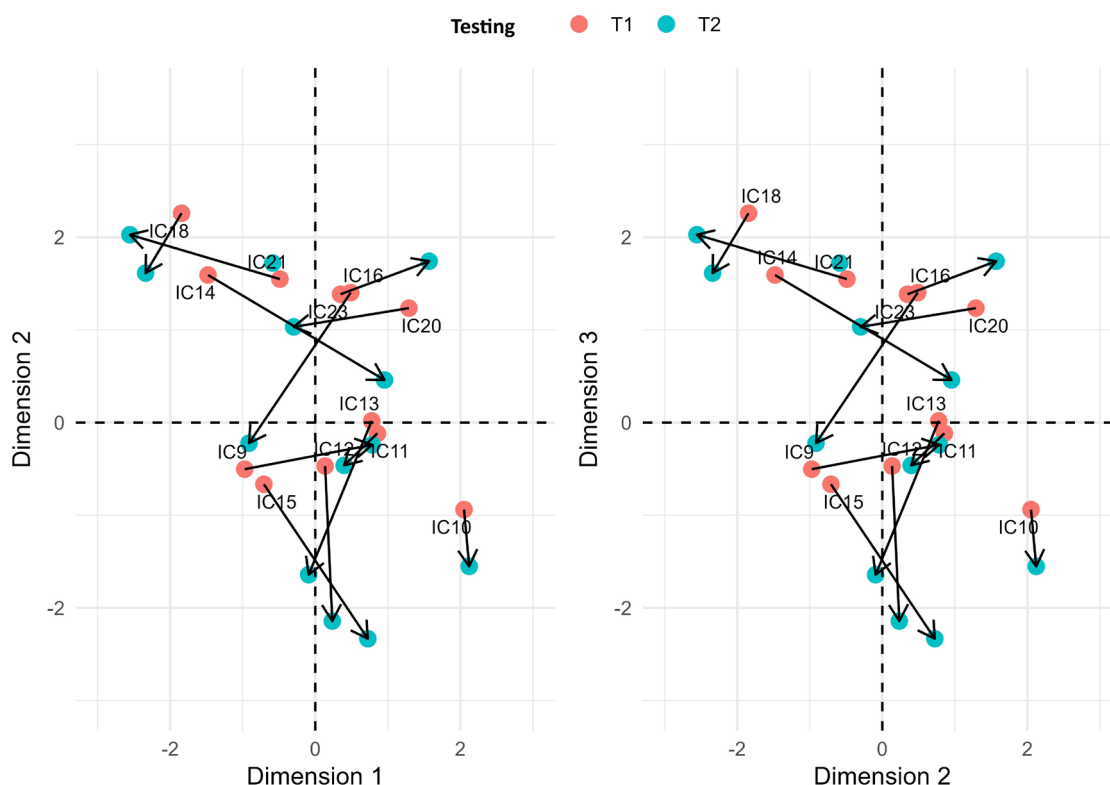
Sur le plan acoustique, des évolutions sont observées pour les fricatives : meilleure distinction médiane/postérieure ($\beta = 1\,203$; SE = 276; $t(12) = 4,36$; $p < .001$) et augmentation d'ampDiff ($\beta = 1,57$; SE = 0,75; $t(12) = 2,1$; $p = .05$). À noter : pour la plupart des mesures, la variabilité diminue à T2.

Analyse factorielle et classification hiérarchique

Les données du sous-groupe ont été projetées sur le plan factoriel initial (coordonnées prédites sur les dimensions obtenues à T1), permettant de comparer les positions T1 vs T2 (figure 5).

Figure 5

Représentation des enfants aux temps T1 et T2 sur les dimensions 1 et 2 (à gauche) et sur les dimensions 2 et 3 (à droite). Les flèches relient les coordonnées entre les deux évaluations



Sur la Dimension 1, on observe, selon les participants, un déplacement vers les valeurs positives, signe d'une amélioration sur le plan linguistique. Sur la Dimension 2, les déplacements sont partagés (vers le positif : N = 7 ; vers le négatif : N = 6). Sur la Dimension 3, on note une tendance plus générale vers le négatif (N = 10), pouvant indiquer une meilleure exploitation des indices de résonance nasale pour l'opposition oral/nasal et/ou une réalisation phonétique plus adéquate des fricatives (meilleure distinction des lieux ; meilleur bruit de friction). Certains participants (p. ex., IC10, IC12) présentent des déplacements très faibles entre T1 et T2.

À partir des coordonnées T2 projetées, il a été possible de situer les performances T2 au regard des classes définies à T1. Le tableau 4 indique l'affectation aux classes à T1 et T2, ainsi que les âges chronologiques (AC) et auditifs (AA).

Quatre enfants (30,7%) changent de classe : IC14 passe de la classe 1 à la classe 2, IC18 et IC23 passent de la classe 2 à la classe 3, et IC16 passe de la classe 3 à la classe 4. Neuf enfants (69,3%) restent dans la même classe qu'à T1.

Pour IC16 (qui rejoint la classe 4 à T2), les changements concernent surtout : hausse du PPC et des évocations spontanées, diminution

des omissions de déterminant devant les mots monosyllabiques (avec augmentation devant bisyllabiques), augmentation du marquage oral/nasal via la configuration oropharyngée et meilleure distinction des lieux d'articulation des fricatives. Chez les autres enfants, les améliorations portent davantage sur les scores linguistiques globaux : hausse de MLUm, de l'emploi de l'imparfait et des pronoms personnels dans les récits, ainsi que de la diversité lexicale. IC18 montre aussi un meilleur marquage de la configuration oropharyngée pour les voyelles oral/nasal, une meilleure distinction des lieux des fricatives et des valeurs ampDiff plus élevées.

DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'examiner conjointement les profils de production des enfants porteurs d'un implant cochléaire (IC) et des enfants à audition typique (AT) pour trois types de segments dont les corrélats acoustiques posent des défis différenciés à l'implant (voyelles nasales/orales, consonnes fricatives et occlusives), en lien avec leurs compétences linguistiques phonologiques, lexicales et morphosyntaxiques. Pour ce faire, des analyses factorielles ont été conduites, puis des classes ont été constituées par classification hiérarchique. Divers facteurs

Tableau 4

Âges chronologiques (AC) et auditifs (AA), ainsi qu'appartenance aux classes lors des passations 1 et 2, pour le sous-groupe d'enfants porteurs d'un implant cochléaire (IC)

Sujet	AC - T1	AA - T1	Classe - T1	AC - T2	AA - T2	Classe - T2
IC9	57	44	2	69	56	2
IC10	54	42	2	66	54	2
IC11	54	36	2	66	48	2
IC12	66	42	2	71	57	2
IC13	87	61	2	99	73	2
IC14	94	71	1	106	83	2
IC15	83	63	2	95	75	2
IC16	81	61	3	96	76	4
IC18	45	33	2	60	48	3
IC20	44	33	2	58	47	2
IC21	59	42	3	74	57	3
IC22	79	66	3	61	48	3
IC23	60	39	2	75	54	3

Note. Les changements de classe entre T1 et T2 sont mis en évidence en gras dans la dernière colonne.

d'influence ont été pris en compte : âge chronologique / auditif, exposition à la LfPC et âge de première implantation. Un sous-groupe d'enfants IC a également été ré-évalué au travers des différentes tâches précédemment administrées un an après la première session, permettant une comparaison longitudinale des performances.

L'analyse factorielle a mis en évidence trois dimensions expliquant environ 50 % de la variance totale. La première dimension était directement reliée à l'ensemble des performances linguistiques : scores phonologiques, nombre d'évocations spontanées en dénomination, indice de diversité lexicale, scores à la tâche d'appariement phrase/mot-image, ainsi qu'aux indices de développement morphosyntaxique. Cette dimension discriminait clairement les enfants selon leur statut auditif, les enfants IC présentant généralement des performances linguistiques plus faibles. L'association des différentes compétences, phonologiques, lexicales et morphosyntaxiques, suggère un développement conjoint relativement homogène dans notre échantillon. Cela peut sembler contraster avec certaines études qui attribuent un statut particulier au lexique, potentiellement mieux préservé en raison d'une saillance perceptive et conceptuelle plus forte des unités lexicales (Caselli et al., 2012 ; Duchesne et al., 2009 ; Le Normand & Moreno-Torres, 2014 ; Rinaldi et al., 2013). Toutefois, ce constat n'est pas universellement confirmé, d'autres travaux (Cambra et al., 2021 ; Le Normand & Moreno-Torres, 2014) soulignant également une vulnérabilité accrue des enfants IC sur le plan lexical, surtout dans des tâches narratives. Ces divergences pourraient s'expliquer par des différences méthodologiques : les études concluant à une préservation du lexique reposent le plus souvent sur des tests formels (dénomination ou identification d'images), tandis que la production narrative mobilise des processus linguistiques plus complexes et plus proches des situations de communication naturelles. Nos résultats suggèrent ainsi que le développement lexical peut également constituer un point de fragilité chez certains enfants porteurs d'implant cochléaire, en particulier dans des tâches de production langagière plus écologiques.

Les Dimensions 2 et 3 de l'ACP étaient liées à des profils de production sur le plan acoustique : des valeurs élevées sur l'axe 2 témoignaient de la capacité à distinguer l'opposition oral/nasal quelle que soit la stratégie de production (résonance oro-nasale vs configuration oropharyngée spécifique) ;

la dimension 3 différenciait précisément ces deux stratégies. Sur cette dimension, les groupes d'enfants étaient à nouveau bien séparés : les enfants IC montrant une tendance à marquer l'opposition oral/nasal par la configuration oropharyngée, à la différence des enfants AT, recourant plus souvent à la résonance orale vs nasale. Ce résultat était attendu, car il corrobore des observations issues de répétitions de pseudo-mots contenant des voyelles nasales et orales (Fagniat et al., 2025a). Ce profil de performance semble directement lié aux limitations perceptives associées à l'IC, qui se répercutent sur les stratégies de production : tandis que les corrélats acoustiques portant la différence de timbre nasal/oral liée à la résonance sont très complexes et davantage susceptibles d'être mal codés par l'IC, les patterns formantiques associés aux configurations oropharyngées semblent être mieux codés. Ces types d'indices ont par ailleurs l'avantage d'être au moins partiellement accessibles visuellement, dans le cas des voyelles, à travers des degrés d'ouverture et d'arrondissement distincts. À noter que la dimension 3 était également associée à la qualité de production des fricatives (valeurs de LevelD) ainsi qu'à la distinction entre lieux d'articulation médians et postérieurs. Les enfants IC étaient davantage associés à un mode de production des fricatives caractérisé par une énergie plus concentrée dans les fréquences moyennes (plutôt que dans les hautes fréquences) et par une distinction moins marquée des consonnes fricatives reposant sur des pics spectraux de haute fréquence. Ce profil de performance semble également lié aux limitations perceptives de l'implant cochléaire, notamment aux difficultés technologiques de codage des fréquences supérieures à 8 kHz (Loizou, 2006) et est cohérent avec des observations précédemment faites auprès d'utilisateurs d'IC (Grandon & Vilain, 2020 ; Reidy et al., 2017 ; Yang & Xu, 2023).

Les classifications hiérarchiques établies à partir des dimensions factorielles ont scindé l'échantillon en quatre classes. Ces classes étaient très distinctes sur la Dimension 1 (performance linguistique) et sur la Dimension 3 (distinction oral/nasal par résonance nasale vs configuration oropharyngée). Deux profils très contrastés ressortaient particulièrement : alors que la classe 4, composée exclusivement d'enfants AT, présentait les meilleures performances linguistiques, la classe 1, constituée uniquement d'enfants IC, affichait les performances les plus faibles. Ces différences ne semblaient pas attribuables à l'âge : bien que les

enfants de la classe 1 aient un âge auditif inférieur à celui des enfants de la classe 4, leur âge auditif moyen était équivalent à celui des enfants IC des classes 2 et 3, et même à celui des enfants AT de la classe 2, sans atteindre pourtant des niveaux de performance comparables. Ces enfants, dont les performances demeuraient nettement inférieures à celles de pairs de même âge auditif, pourraient refléter des profils développementaux atypiques évoqués dans la littérature (Benassi et al., 2021 ; Majorano et al., 2024) et/ou contribuer à la variabilité inter-individuelle souvent rapportée et difficile à expliquer. Les profils de production différaient également : les enfants de la classe 4 marquaient l'opposition nasal/oral à l'aide de mécanismes typiques (résonance orale vs oro-nasale ; configuration orale spécifique), distinguaient clairement les lieux d'articulation des fricatives avec un bruit de friction riche en médianes et hautes fréquences et opposaient nettement les occlusives sonores/sourdes en DEV. À l'inverse, les enfants de la classe 1 marquaient faiblement l'opposition nasal/oral sur la base d'indices de résonance nasale, sans compensation par un sur-marquage de la configuration oropharyngée ; les lieux d'articulation fricatifs (pics spectraux haute fréquence) étaient peu distingués, avec un bruit de friction surtout médian, et la distinction DEV des occlusives était moins marquée. Ce profil productif reflète pleinement les limitations de transmission propres à l'IC : faiblesse de la résolution spectrale fine en basses fréquences (affectant la distinction nasal/oral) et faiblesse du codage des hautes fréquences (lieux fricatifs, bruit de friction – Shadle et al., 2023). Or, les enfants de la classe 1 ne semblaient pas compenser par une meilleure exploitation d'indices mieux codés par l'IC, tels que les indices temporels (DEV) ou ceux liés à la configuration oropharyngée (fréquences formantiques). Ces difficultés perceptives marquées et peu compensées, entraînant des représentations phonologiques sous-spécifiées, sont susceptibles de rejaillir sur les compétences linguistiques globales, comme observé ici — un lien cohérent avec les modèles reliant phonologie et développement linguistique dans les troubles développementaux du langage (Chiat, 2001 ; Joanisse & Seidenberg, 1998 ; Leonard et al., 1992), appliqué ici aux limitations perceptives associées à l'IC.

Les classes 2 et 3, comprenant des proportions équivalentes d'enfants IC et AT, présentaient des profils intermédiaires en performance linguistique.

La classe 2 se montrait supérieure à la classe 1 sur l'ensemble des mesures linguistiques, tandis que la classe 3 ne différait de la classe 4 que sur les marqueurs grammaticaux plus complexes (pronoms réfléchis, utilisation de l'imparfait). Sur le plan acoustique, les classes 2 et 3 divergeaient légèrement : les enfants des deux groupes affichaient un marquage relativement équilibré de l'opposition oral/nasal entre résonance nasale et configuration oropharyngée ; ils distinguaient également les lieux fricatifs, mais les enfants de la classe 3 avaient les valeurs levelD les plus élevées, indiquant une moindre concentration d'énergie en très hautes fréquences dans le bruit de friction. Un effet de statut auditif similaire apparaissait dans les deux classes : chez les IC, le marquage par résonance nasale était plus faible que chez les AT, mais le marquage par configuration oropharyngée était plus fort ; par ailleurs, les valeurs levelD étaient systématiquement plus basses (moins d'énergie en hautes fréquences) que chez les AT. Ainsi, les sous-groupes d'enfants IC des classes 2 et 3 semblent produire une parole influencée par les limitations spécifiques de l'IC (réduction des indices mal codés : résonance nasale, hautes fréquences), mais, à la différence de la classe 1, ils ont mis en place des stratégies compensatoires efficaces. En effet, le sur-marquage de l'opposition nasal/oral par la configuration oropharyngée a été associé à une intelligibilité accrue (Fagniard et al., 2025a). De plus, la distinction DEV sonore/sourde témoigne d'une bonne exploitation des indices temporels réputés mieux codés par l'IC. Plus généralement, une exploitation efficace des indices temporels chez les enfants IC est reliée à une meilleure résolution spectrale (Landsberger et al., 2019) et à de meilleures performances d'identification/discrimination des voyelles nasales et orales (Fagniard et al., 2024a), ce qui pourrait expliquer leurs performances supérieures à celles de la classe 1.

Nous avons tenté d'examiner si les caractéristiques des participants pouvaient expliquer leur répartition dans les classes. Un effet d'âge chronologique est apparu chez les AT : l'âge moyen augmente progressivement des classes 2 → 3 → 4, reflétant une maturation des compétences linguistiques et des mécanismes phonétiques. Le profil de production des AT de la classe 3 était plus surprenant : les plus âgés montraient une représentation plus faible des hautes fréquences dans le bruit de friction et un sur-marquage de la configuration oropharyngée pour l'opposition

nasal/oral. La présence d'un tel profil chez des enfants entendants illustre une forte variabilité interindividuelle des habiletés productives dans la population générale, sans impact majeur sur le développement linguistique, comme l'atteste le haut niveau de ce groupe. Chez les IC, les différences inter-classes ne s'expliquaient ni par l'âge chronologique ni par l'âge auditif (moyennes équivalentes). Néanmoins, l'écart d'âge entre IC et AT variait selon les classes et selon que l'on considère l'âge chronologique ou l'âge auditif. Par exemple, les IC étaient en moyenne plus âgés chronologiquement que les AT dans les classes 2 et 3, mais présentaient des âges auditifs moyens équivalents à l'âge chronologique des AT en classe 2. Les performances intermédiaires des IC de cette classe pourraient donc s'expliquer par un retard d'exposition au signal auditif via l'IC, en cohérence avec des travaux rapportant des performances équivalentes entre AT et IC lorsqu'appariés en âge auditif (Guo & Spencer, 2017). Dans ce sens, les IC de la classe 3 pourraient représenter un profil plus favorable : malgré un âge auditif moyen inférieur à l'âge chronologique des AT du même groupe, ils présentent des mécanismes productifs avancés (compensations efficaces) conduisant à un haut niveau linguistique.

Les différentes caractéristiques individuelles (et, pour les IC, implantation précoce / exposition à la LPC) n'ont pas montré de lien statistique avec la répartition en classes. Il apparaît donc, dans notre échantillon, que la mise en place de stratégies compensatoires face aux difficultés perceptives peut (ou non) se faire indépendamment d'une stimulation multimodale via la LfPC ou d'un profil d'implantation précoce. Ces résultats contrastent avec des travaux soulignant l'impact positif d'une implantation précoce (Karlton et al., 2020; Kral et al., 2019) ou de l'exposition à la LfPC (Leybaert et al., 2016; Machart et al., 2024; Van Bogaert et al., 2023). Il est toutefois possible que nos analyses, combinant performances de production acoustique et mesures linguistiques diverses, captent une variabilité interindividuelle plus grande que des études ciblant un seul aspect. La conjonction de ces dimensions révèle des profils ne permettant pas d'identifier clairement des facteurs favorables/défavorables sur le plan statistique. Toutefois, bien que les analyses statistiques n'aient pas mis en évidence de lien significatif entre les variables individuelles et la répartition dans les classes, l'examen descriptif des enfants composant la classe 1 apporte quelques éléments de contexte.

Parmi eux, trois ont été implantés après l'âge de deux ans, condition souvent considérée comme moins favorable au développement langagier dans la littérature (Karlton et al., 2020; Kral et al., 2019; Sharma et al., 2020). L'exposition à la LfPC apparaît également limitée dans ce groupe : deux enfants n'y sont pas exposés et deux autres ne bénéficient que d'une exposition occasionnelle. Enfin, certaines caractéristiques individuelles pourraient également jouer un rôle, comme la présence d'un environnement bilingue pour un enfant ou une implantation unilatérale pour un autre. Bien que ces éléments ne puissent être interprétés comme des facteurs explicatifs au sens statistique, ils suggèrent que plusieurs conditions potentiellement moins favorables peuvent se cumuler chez certains enfants présentant les profils linguistiques les plus fragiles.

La comparaison à un an du sous-groupe IC a révélé une tendance générale à l'amélioration linguistique (MLU, pronoms réfléchis, % de phonèmes corrects, dénomination, diversité lexicale) et une amélioration de la qualité des fricatives (meilleure distinction médian/postérieur, ampDiff plus élevé). Ces évolutions pourraient expliquer les déplacements observés sur les dimensions factorielles lors de la projection sur le modèle initial : vers le positif sur D1 (meilleures compétences linguistiques) et vers le négatif sur D3, vraisemblablement en lien avec la qualité accrue des fricatives, les indices liés aux voyelles nasales n'ayant pas évolué. Le fait que les enfants progressent sur la distinction des lieux fricatifs mais non sur la résonance nasale des voyelles éclaire le rôle différencié des contraintes spectrales et articulatoires : la résolution spectrale fine en basses fréquences, critique pour l'oral/nasal, est souvent imprécise avec l'IC (Başkent & Shannon, 2005), ce qui pourrait expliquer des niveaux initiaux variables sans amélioration nette. À l'inverse, les limites de hautes fréquences pour les fricatives peuvent être partiellement compensées par l'expérience linguistique, via l'exploitation de corrélats somatosensoriels et d'indices visuels (différences labiales visibles selon le lieu d'articulation). Le développement multimodal (maturation + expérience) peut ainsi favoriser la maîtrise productive de ces contrastes malgré les limites perceptives. Le fait que seul ampDiff (énergie médianes fréquences) et non levelD (énergie très hautes fréquences) s'améliore, étaye la persistance des limites de très hautes fréquences.

La nouvelle classification hiérarchique a entraîné peu de changements (4/13 enfants). Il est encourageant qu'un enfant de la classe 1 ait rejoint une classe intermédiaire. Cet enfant est parmi les plus âgés (en âge auditif et chronologique) et vit en milieu bilingue. Le bilinguisme familial est parfois évoqué comme facteur de risque chez les enfants sourds (Vukkadala et al., 2018), bien que les résultats soient nuancés chez les IC (Deriaz et al., 2014 ; van der Straten Waillet et al., 2023) et fortement modulés par le niveau socio-économique, l'implication parentale et la stimulation orale dans les deux langues. Son passage en classe 2 suggère toutefois un profil non atypique, susceptible d'évoluer positivement avec la maturation et l'expérience. Chez les trois autres enfants ayant changé de classes, on note des facteurs favorables : implantation < 16 mois et exposition précoce et soutenue à la LfPC pour deux d'entre eux. Le participant IC16 a même atteint un niveau lui permettant d'intégrer la classe 4, initialement composée d'enfants à AT et au plus haut niveau linguistique. Néanmoins, 9/13 enfants sont restés dans la même classe, traduisant une progression qui ne suffit pas à rejoindre les niveaux des classes 3 et 4, malgré la hausse des âges. Ce sous-groupe demeure en classe 2, avec désormais un décalage entre leur âge auditif moyen et l'âge chronologique moyen des AT de cette classe à T1. Ce résultat soutient l'idée d'un rythme d'acquisition plus lent chez les enfants IC (Chilosi et al., 2013; Moreno-Torres et al., 2016), possiblement lié au coût cognitif des stratégies compensatoires perceptivo-productives, rapprochant leur développement de celui d'AT plus jeunes (chronologiquement et auditivement).

L'ensemble de ces résultats suggère plusieurs pistes pour la pratique clinique. Il apparaît notamment important de s'intéresser très précocement à la qualité de la perception de certains contrastes phonologiques particulièrement vulnérables à travers l'implant, tels que l'opposition entre voyelles nasales et orales, ainsi qu'à l'impact que ces difficultés peuvent avoir sur le développement des compétences linguistiques, en particulier sur le plan morphémique. Par ailleurs, le soutien de stratégies visuo-perceptives efficaces susceptibles de compenser partiellement les limitations perceptives liées à l'implant, semble particulièrement pertinent, ces stratégies paraissant associées à des profils linguistiques plus proches de ceux d'enfants à audition typique. Enfin, une vigilance accrue dans le suivi apparaît nécessaire :

bien que l'acquisition du langage oral puisse se rapprocher de celle observée chez les pairs à audition typique, elle peut néanmoins demeurer plus lente. Cet aspect est d'autant plus crucial avec l'avancée en âge, qui s'accompagne d'une complexification des apprentissages et d'une augmentation du coût cognitif des traitements linguistiques.

Cette étude ouvre de nombreuses perspectives, mais comporte également d'importantes limites qu'il convient de souligner : taille modeste de l'échantillon et difficultés d'équilibrage (âges chronologique et auditif, âge d'implantation, etc.), imposant une certaine prudence dans l'interprétation des résultats. De plus, la dimension longitudinale reste partielle : seule une fraction du sous-groupe IC a été retestée, ce qui ne permet pas d'évaluer la progression globale ni celle de chaque classe dans son ensemble et limite l'analyse des facteurs d'influence. Par ailleurs, des données supplémentaires et une approche longitudinale chez les enfants du groupe AT auraient également été souhaitables. Les effets d'âge observés dans ce groupe doivent être interprétés avec prudence, car ils reposent sur des échantillons d'âges distincts. Enfin, il convient de noter que le protocole d'évaluation de la présente étude a été conçu de manière à pouvoir être administré en une seule séance, tout en restant exploitable auprès d'enfants d'âges variés (3 à 7 ans). Il n'a donc pas permis d'évaluer l'ensemble des compétences langagières, notamment au travers de tâches perceptives et/ou d'une plus grande variété de tâches de production. Une tâche de répétition de pseudo-mots pourrait par exemple s'avérer particulièrement pertinente, car elle permet d'évaluer les capacités de production phonologique sans s'appuyer sur des représentations lexicales internes ; ce type de tâche a par ailleurs montré une bonne sensibilité pour discriminer différents profils de performances chez les enfants porteurs d'IC (David et al., 2021). Dans cette perspective, la réplication d'études multivariées intégrant à la fois des mesures acoustiques objectivant les stratégies de production et des mesures plus larges des compétences linguistiques, dans une approche longitudinale et en documentant davantage l'environnement linguistique des enfants (notamment, précision dans l'exposition à la LfPC et contrôle des compétences en décodage, durée de port quotidien des implants, etc.), permettrait de consolider ces résultats et d'en approfondir

l'interprétation, tout en fournissant des pistes d'amélioration des méthodes diagnostiques et du suivi des enfants porteurs d'IC.

CONCLUSION

L'examen global des performances phonologiques, lexicales et morphosyntaxiques, ainsi que l'analyse acoustique de la production de différents segments phonétiques, mettent en évidence une hétérogénéité marquée des profils linguistiques chez les enfants porteurs d'IC comparés à leurs pairs à AT. Un premier groupe d'enfants présente des difficultés dans l'ensemble des compétences linguistiques évaluées, associées à des profils de production compatibles avec des limitations perceptives importantes et faiblement compensées. Deux autres groupes montrent des performances linguistiques comparables à celles d'enfants AT appariés en âge auditif. Chez ces enfants, les profils de production suggèrent le recours à différentes stratégies compensatoires permettant de pallier, au moins partiellement, les contraintes perceptives liées à l'implant. Enfin, l'évolution des performances observée sur un intervalle d'un an révèle des trajectoires développementales hétérogènes, soulignant l'importance d'un suivi longitudinal des compétences linguistiques chez les enfants porteurs d'IC.

DÉCLARATION D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt en relation avec cet article.

FINANCEMENTS

Aucun financement n'a été sollicité pour la réalisation de cette recherche.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient chaleureusement les enfants et leurs parents pour leur participation à l'étude, ainsi que les équipes de logopèdes et d'enseignants ayant permis la réalisation des testings.

RÉFÉRENCES

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Başkent, D., & Shannon, R. V. (2005). Interactions between cochlear implant electrode insertion depth and frequency-place mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(3), 1405-1416. <https://doi.org/10.1121/1.1856273>
- Benassi, E., Boria, S., Berghenti, M. T., Camia, M., Scorza, M., & Cossu, G. (2021). Morpho-syntactic deficit in children with cochlear implant: Consequence of hearing loss or concomitant impairment to the language system? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9475. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189475>
- Borel, S. (2015). *Perception auditive, visuelle et audiovisuelle des voyelles nasales par les adultes devenus sourds. Lecture labiale, implant cochléaire, implant du tronc cérébral*. [Thèse de doctorat, Université Sorbonne Paris Cité]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-01162201v1>
- Bourdin, B., Ibernou, L., Le Driant, B., Levrez, C., & Vandromme, L. (2016). Troubles morphosyntaxiques chez l'enfant sourd et chez l'enfant dysphasique : similarités et spécificités. *Revue de Neuropsychologie*, 8(3), 161-172. <https://doi.org/10.1684/nrp.2016.0386>
- 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))
- Cambra, C., Losilla, J. M., Mena, N., & Pérez, E. (2021). Differences in picture naming between children with cochlear implants and children with typical hearing. *Heliyon*, 7(12), e08507. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08507>
- Carignan, C., Chen, J., Harvey, M., Stockigt, C., Simpson, J., & Strangways, S. (2023). An investigation of the dynamics of vowel nasalization in Arabana using machine learning of acoustic features. *Laboratory Phonology*, 14(1). <https://doi.org/10.16995/labphon.9152>
- Caselli, M. C., Rinaldi, P., Varuzza, C., Giuliani, A., & Burdo, S. (2012). Cochlear implant in the second year of life: Lexical and grammatical outcomes. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(2), 382-394. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2011/10-0248\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2011/10-0248))
- Chalard, M., Bonin, P., Méot, A., Boyer, B., & Fayol, M. (2003). Objective age-of-acquisition (AoA) norms for a set of 230 object names in French: Relationships with psycholinguistic variables, the English data from Morrison et al. (1997), and naming latencies. *European Journal of Cognitive Psychology*, 15(2), 209-245. <https://doi.org/10.1080/09541440244000076>
- Charlier, B. (2020). Communication, ressenti psychologique et qualité de vie. In J. Leybaert & S. Borel (dir.), *Surdités de l'enfant et de l'adulte. Bilans et interventions orthophoniques* (p.223-231). De Boeck Supérieur.
- Cheng, K., & Chen, X. (2020). The effects of intrinsic acoustic cues on categorical perception in children with cochlear implants. *International Journal of English Linguistics*, 10(5), 110-124. <https://doi.org/10.5539/ijel.v10n5p110>
- Chiat, S. (2001). Mapping theories of developmental language impairment: Premises, predictions and evidence. *Language and Cognitive Processes*, 16(2-3), 113-142. <https://doi.org/10.1080/01690960042000012>
- Chilosi, A. M., Comparini, A., Scusa, M. F., Orazini, L., Forli, F., Cipriani, P., & Berrettini, S. (2013). A longitudinal study of lexical and grammar development in deaf Italian children provided with early cochlear implantation. *Ear & Hearing*, 34(3), e28-e37. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e31827ad687>
- Cornillon, P.-A., Guyader, A., Husson, F., Jégou, N., Josse, J., Klutchnikoff, N., Le Pennec, E., Matzner-Løber, E., Rouvière, L., & Thieurmél, B. (2018). Classification non supervisée. In F. Husson (dir.), *R pour la statistique et la science des données* (p.243-262) Saic Edition. <https://hal.science/hal-02321839v1>

- David, C., Tuller, L., Schweitzer, E., Lescanne, E., Bonnet-Brilhault, F., Gomot, M., & Ferré, S. (2021). Does phonological complexity provide a good index of language disorder in children with cochlear implants? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 64(11), 4271-4286. https://doi.org/10.1044/2021_JSLHR-20-00642
- Deriaz, M., Pelizzone, M., & Fornos, A. P. (2014). Simultaneous development of 2 oral languages by child cochlear implant recipients. *Otology & Neurotology*, 35(9), 1541-1544. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000497>
- Duchesne, L., Sutton, A., & Bergeron, F. (2009). Language achievement in children who received cochlear implants between 1 and 2 years of age: Group trends and individual patterns. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(4), 465-485. <https://doi.org/10.1093/deafed/enp010>
- Duchesne, L., Sutton, A., Bergeron, F., & Trudeau, N. (2010). Le développement lexical précoce des enfants porteurs d'un implant cochléaire. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology & Audiology*, 34(2), 132-145. https://cjslpa.ca/files/2010_CJSLPA_Vol_34/No_02_81-152/Duchesne_sutton_bergeron_trudeau_CJSLPA_2010.pdf
- Durán, P., Malvern, D., Richards, B., & Chipere, N. (2004). Developmental trends in lexical diversity. *Applied Linguistics*, 25(2), 220-242. <https://doi.org/10.1093/applin/25.2.220>
- Fagniat, S., Delvaux, V., Harmegnies, B., Huberlant, A., Huet, K., Piccaluga, M., Watterman I., & Charlier, B. (2024a). Nasal/oral vowel perception in French-speaking children with cochlear implants and children with typical hearing. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 67(4), 1243-1267. https://doi.org/10.1044/2024_JSLHR-23-00274
- Fagniat, S., Charlier, B., Delvaux, V., Huberlant, A., Harmegnies, B. G., Piccaluga, M., & Huet, K. (2024b). Consonant and vowel production in children with cochlear implants: Acoustic measures and multiple factor analysis. *Frontiers in Audiology and Otology*, 2, 1425959. <https://doi.org/10.3389/fauot.2024.1425959>
- Fagniat, S., Charlier, B., Delvaux, V., Harmegnies, B., Huberlant, A., Piccaluga, M., & Huet, K. (2024c). Production of fricative consonants in French-speaking children with cochlear implants and typical hearing: Acoustic and phonological analyses. *Proceedings Interspeech 2024* (p. 877-881). <https://doi.org/10.21437/interspeech.2024-871>
- Fagniat, S., Delvaux, V., Harmegnies, B., Huberlant, A., Huet, K., Piccaluga, M., Watterman I., & Charlier, B. (2025a). Producing nasal vowels without nasalization? Perceptual judgments and acoustic measurements of nasal/oral vowels produced by children with cochlear implants and typically hearing peers. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 68(1), 301-322. https://doi.org/10.1044/2024_JSLHR-24-00083
- Fagniat, S., Charlier, B., Delvaux, V., Harmegnies, B., Huberlant, A., Piccaluga, M., & Huet, K. (2025b). Morphosyntactic production and processing skills in relation to age effects and lexical-phonological levels among children with cochlear implants and typically hearing peers: A focus on vowel nasality. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1528388. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1528388>
- 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>
- Giezen, M. R., Escudero, P., & Baker, A. (2010). Use of acoustic cues by children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 53(6), 1440-1457. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2010\)09-0252](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2010)09-0252)
- 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*. [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-01690615v1>
- 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>
- 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, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2020.105996>
- Guo, L.-Y., & Spencer, L. J. (2017). Development of grammatical accuracy in English-Speaking children with cochlear implants: A longitudinal study. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 60(4), 1062-1075. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-H-16-0182
- Hage, C. (2005). De la communication au langage : développement du langage oral chez l'enfant atteint de déficience auditive profonde. In C. Transler, J. Leybaert, & J. E. Gombert (dir.), *L'acquisition du langage par l'enfant sourd. Les signes, l'oral et l'écrit* (p. 121-146). Solal.
- Hedlung, G., & Rose, Y. (2020). *Phon* (version 3.1) [Logiciel]. <https://phon.ca>
- Hedrick, M., Bahng, J., von Hapsburg, D., & Younger, M. S. (2011). Weighting of cues for fricative place of articulation perception by children wearing cochlear implants. *International Journal of Audiology*, 50(8), 540-547. <https://doi.org/10.3109/14992027.2010.549515>
- 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>
- Husson, F., Josse, J., Lê, S., & Mazet, J. (2024). *FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining* (version 2.11) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>
- Joanisse, M. F., & Seidenberg, M. S. (1998). Specific language impairment: A deficit in grammar or processing? *Trends in Cognitive Sciences*, 2(7), 240-247. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01186-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01186-3)
- Karltorp, E., Eklöf, M., Östlund, E., Asp, F., Tideholm, B., & Löfkvist, U. (2020). Cochlear implants before 9 months of age led to more natural spoken language development without increased surgical risks. *Acta Paediatrica*, 109(2), 332-341. <https://doi.org/10.1111/apa.14954>
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses* (version 1.0.7) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra/index.html>
- Kral, A., Dorman, M. F., & Wilson, B. S. (2019). Neuronal development of hearing and language: Cochlear implants and critical periods. *Annual Review of Neuroscience*, 42(1), 47-65. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-080317-061513>
- Landsberger, D. M., Stupak, N., Green, J., Tona, K., Padilla, M., Martinez, A. S., Eisenberg, L. S., & Waltzman, S. (2019). Temporal modulation detection in children and adults with cochlear implants: Initial results. *Otology & Neurotology*, 40(3), e311-e315. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002122>

- Lane, H., Matthies, M., Perkell, J., Vick, J., & Zandipour, M. (2001). The effects of changes in hearing status in cochlear implant users on the acoustic vowel space and CV coarticulation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44(3), 552-563. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2001/043\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2001/043))
- Le Normand, M.-T., & Moreno-Torres, I. (2014). The role of linguistic and environmental factors on grammatical development in French children with cochlear implants. *Lingua*, 139, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.lingua.2013.02.012>
- Le Normand, M.-T., & Thai-Van, H. (2023). Early grammar-building in French-speaking deaf children with cochlear implants: A follow-up corpus study. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 58(4), 1204-1222. <https://doi.org/10.1111/1460-6984.12854>
- Lenth, R. V., Piastowski, J., Banfai, B., Bolker, B., Buerkner, P., Giné-Vázquez, I., Herve, M., Jung, M., Love, J., Miguez, F., Riebl, H., & Singmann, H. (2023). *emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means* (version 1.8.8) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>
- Leonard, L. B., McGregor, K. K., & Allen, G. D. (1992). Grammatical morphology and speech perception in children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 35(5), 1076-1085. <https://doi.org/10.1044/jslr.3505.1076>
- Leybaert, J., Bayard, C., Colin, C., & LaSasso, C. J. (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 (dir.), *The Oxford handbook of deaf studies in language* (p.359-376). Oxford University Press.
- Loizou, P. C. (2006). Speech processing in vocoder-centric cochlear implants. *Advances in Oto-Rhino-Laryngology*, 64, 109-143. <https://doi.org/10.1159/000094648>
- Machart, L., Vilain, A., Løevenbruck, H., Tiede, M., & Ménart, L. (2024). Exposure to Canadian French cued speech improves consonant articulation in children with cochlear implants: Acoustic and articulatory data. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 67(10S), 4069-4095. https://doi.org/10.1044/2023_JSLHR-23-00078
- Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (1991). *Detection theory. A user's guide*. Cambridge University Press.
- MacWhinney, B. (2000, 3rd ed.). *The CHILDES Project: Tools for analyzing talk*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Majorano, M., Persici, V., Santangelo, M., Ferrari, R., Bertelli, B., Florit, E., Lavelli, M., Bastianello, T., Guerzoni, L., & Cuda, D. (2024). Narrative skills and language comprehension in preschool children with cochlear implants: A comparison with children with developmental language disorder or typical development. *Journal of Communication Disorders*, 109, 106424. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2024.106424>
- Mayer, M. (1969). *Frog, where are you?* Dial Press.
- Medina, V., Loundon, N., Busquet, D., Petroff, N., & Serniclaes, W. (2004). *Perception catégorielle des sons de parole chez des enfants avec implants cochléaires*. 25es Journées d'Etude sur la Parole (JEP-TALN-RECITAL 2004). Fès, Maroc. https://www.afcp-parole.org/doc/Archives_JEP/2004_XXVe_JEP_Fes/actes/jep2004/Medina.pdf
- Mildner, V., & Liker, M. (2008). Fricatives, affricates, and vowels in Croatian children with cochlear implants. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 22(10-11), 845-856. <https://doi.org/10.1080/02699200802130557>
- Mildner, V., Šindija, B., & Vrban Zrinski, K. (2006). Speech perception of children with cochlear implants and children with traditional hearing aids. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 20(2-3), 219-229. <https://doi.org/10.1080/02699200400027031>
- Moreno-Torres, I., Madrid-Cánovas, S., & Blanco-Montañez, G. (2016). Sensitive periods and language in cochlear implant users. *Journal of Child Language*, 43(3), 479-504. <https://doi.org/10.1017/S0305000915000823>
- Parisse, C., & Le Normand, M.-T. (2000). Automatic disambiguation of morphosyntax in spoken language corpora. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 32(3), 468-481. <https://doi.org/10.3758/BF03200818>
- Parisse, C., & Maillart, C. (2008). Interplay between phonology and syntax in French-speaking children with specific language impairment. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 43(4), 448-472. <https://doi.org/10.1080/13682820701608209>
- Peng, Z. E., Hess, C., Saffran, J. R., Edwards, J. R., & Litovsky, R. Y. (2019). Assessing fine-grained speech discrimination in young children with bilateral cochlear implants. *Otology and Neurotology*, 40(3), e191-e197. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002115>
- Philippart De Foy, M., Delvaux, V., Huet, K., Monnier, M., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2018, juin 7). *Un protocole de recueil de productions orales chez l'enfant préscolaire : Une étude préliminaire auprès d'enfants bilingues*. Actes des 32es Journées d'étude de la Parole (p.639-647). Aix-en-Provence, France. <https://jep2018.sciencesconf.org/resource/page/id/19.html>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. [Logiciel]. <https://www.R-project.org/>
- 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 and Hearing*, 38(1), 42-56. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000349>
- Rinaldi, P., Baruffaldi, F., Burdo, S., & Caselli, M. C. (2013). Linguistic and pragmatic skills in toddlers with cochlear implant. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 48(6), 715-725. <https://doi.org/10.1111/1460-6984.12046>
- Shadle, C. H., Chen, W. R., Koenig, L. L., Preston, J. L. (2023). Refining and extending measures for fricative spectra, with special attention to the high-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154, 1932-1944. <https://doi.org/10.1121/10.0021075>
- Sharma, S. D., Cushing, S. L., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2020). Hearing and speech benefits of cochlear implantation in children: A review of the literature. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 133, 109984. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.109984>
- Todd, A. E., Edwards, J. R., & Litovsky, R. Y. (2011). Production of contrast between sibilant fricatives by children with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6), 3969-3979. <https://doi.org/10.1121/1.3652852>
- Uchanski, R. M., & Geers, A. E. (2003). Acoustic characteristics of the speech of young cochlear implant users: A comparison with normal-hearing age-mates. *Ear and Hearing*, 24(1), 90S-105S. <https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000051744.24290.C1>

- Van Bogaert, L., Machart, L., Gerber, S., Løevenbruck, H., Vilain, A., & Consortium EULALIES. (2023). Speech rehabilitation in children with cochlear implants using a multisensory (French Cued Speech) or a hearing-focused (Auditory Verbal Therapy) approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1152516. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1152516>
- Van der Straten Waillet, P., Crowe, K., Charlier, B., & Colin, C. (2025). Speech production skills of bilingual children using cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 30(2), 182-194. <https://doi.org/10.1093/jdsade/enae038Fagniat>
- Vukkadala, N., Perez, D., Cabala, S., Kapur, C., & Chan, D. K. (2018). Linguistic and behavioral performance of bilingual children with hearing loss. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 112, 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.06.020>
- Warner-Czyz, A. D., & Davis, B. L. (2008). The emergence of segmental accuracy in young cochlear implant recipients. *Cochlear Implants International*, 9(3), 143-166. <https://doi.org/10.1179/cim.2008.9.3.143>
- Yang, J., & Xu, L. (2023). Acoustic characteristics of sibilant fricatives and affricates in Mandarin-speaking children with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(6), 3501-3512. <https://doi.org/10.1121/10.0019803>