

Année 2025/2026

N°

Thèse

Pour le

DOCTORAT EN MEDECINE

Diplôme d'État
par

Lucrèce de Villars

Fusion binaurale chez les adultes atteints de surdité neurosensorielle unilatérale bénéficiant d'un implant cochléaire

Présentée et soutenue publiquement le **5 Décembre 2025** devant un jury composé de :

Président du Jury : Professeur Emmanuel LESCANNE, ORL, Faculté de Médecine – Tours.

Membres du Jury :

Professeur Sylvain MORINIÈRE, ORL Faculté de Médecine – Tours

Docteur Soizick PONDAVEN, ORL Faculté de Médecine, PH – Tours

Monsieur Mathieu ROBIER, Audioprothésiste, Audilab – Orléans, membre invité

Directeur de thèse : Professeur David BAKHOS, ORL, Faculté de Médecine – Tours

Résumé

Objectif : Les patients bénéficiant d'un implant cochléaire (IC) dans le cadre d'une surdité neurosensorielle unilatérale (SNU) présentent des difficultés de perception spatiale des sons, probablement dues à une limitation de la fusion des stimuli acoustiques et électriques. Dans cette étude, nous analysons la fusion binaurale chez ces patients.

Matériels et méthodes : Huit adultes IC-SNU ont participé à cette étude. La fusion binaurale a été mesurée par un test en trois parties. Tout d'abord, les patients indiquaient le nombre d'objet auditif perçu. Puis, ils indiquaient la diffusion de ces sons. Enfin, ils les localisaient dans l'espace. Une étude de similarité des sons a été réalisée grâce aux mêmes stimuli qu'utilisés lors du test de fusion. Un questionnaire de qualité de vie était présenté aux patients.

Résultats : La fusion binaurale et l'étude de similarité ont montré de fortes variations interindividuelles. Un seul objet auditif a été perçu dans $40,23 \pm 38,46\%$ des cas. La sensibilité au type de stimulus variait entre les patients de manière inconstante. La diffusion des sons était significativement plus importante pour les mots et les sons environnementaux que pour les phrases et les sons purs. Quand un seul objet auditif était perçu, le stimulus était généralement latéralisé en face du patient. Quand deux images auditives étaient perçues, la moyenne de latéralisation était de $57,11 \pm 56,67$ degrés (côté IC). L'étude de similarité était corrélée à la fusion seulement pour les mots.

Conclusion : La fusion binaurale était moins importante chez les IC-SNU que dans les études portant sur des patients implantés de manière bilatérale. Cette différence pourrait être due au décalage de fréquence interaural et aux différences entre les schémas de stimulation acoustique et électrique.

Mots clés : Fusion binaurale, implant cochléaire, surdité neurosensorielle unilatérale.

Binaural fusion in single-sided deaf cochlear implant users

Abstract

Objective: Single-sided deaf (SSD) cochlear implant (CI) patients often have difficulty with spatial perception, which may be partly due to limited fusion of acoustic and electric hearing. In the present study, we investigated binaural fusion in SSD CI patients.

Methods: Eight adult SSD CI patients participated in the study. Binaural fusion was measured using multiple speech and non-speech stimuli. A three-stage method was used for each test trial. First, listeners indicated whether they heard 1 or 2 auditory images. Second, listeners indicated how diffuse the sounds were in each ear. Third, listeners lateralized the sounds in a virtual space. Similarity ratings between the acoustic-hearing and CI ears were obtained for the same stimuli used to test fusion.

Results: Binaural fusion and similarity ratings were highly variable across participants. Across all participants and stimuli, a single auditory image was perceived only $40.23 \pm 38.46\%$ of the time. Sensitivity to stimulus types varied greatly across participants, but in no consistent manner. Diffuseness was significantly larger for words and environmental sounds than for sentences and tones. When one image was perceived, stimuli were generally lateralized towards the center. When two images were perceived, the mean lateralization was 57.11 ± 56.67 degrees. Similarity ratings were significantly correlated with fusion only for the word stimuli.

Conclusions: Binaural fusion in the present SSD CI users was much less than observed in previous studies with bilateral CI users, possibly due to differences in stimulation patterns between acoustic and electric hearing and interaural frequency mismatch.

Keywords: Cochlear implant, single sided deafness, binaural fusion.

UNIVERSITE DE TOURS
FACULTE DE MEDECINE DE TOURS

DOYEN

Pr Denis ANGOULVANT

VICE-DOYEN

Pr David BAKHOS

ASSESSEURS

Pr Philippe GATAULT, *Pédagogie*
Pr Alexandra AUDEMARD-VERGER, *Relations internationales*
Pr Clarisse DIBAO-DINA, *Médecine générale*
Pr Pierre-Henri DUCLUZEAU, *Formation Médicale Continue*
Pr Hélène BLASCO, *Recherche*
Pr Pauline SAINT-MARTIN, *Vie étudiante*

RESPONSABLE ADMINISTRATIVE

Mme Carole ACCOLAS

DOYENS HONORAIRES

Pr Emile ARON (†) – 1962-1966
Directeur de l'Ecole de Médecine - 1947-1962
Pr Georges DESBUQUOIS (†) – 1966-1972
Pr André GOUAZE (†) – 1972-1994
Pr Jean-Claude ROLLAND – 1994-2004
Pr Dominique PERROTIN – 2004-2014
Pr Patrice DIOT – 2014-2024

PROFESSEURS EMERITES

Pr Gilles BODY
Pr Philippe COLOMBAT
Pr Etienne DANQUECHIN-DORVAL
Pr Patrice DIOT
Pr Luc FAVARD
Pr Bernard FOUQUET
Pr Yves GRUEL
Pr Gilles PAINAUD
Pr Frédéric PATAT
Pr Loïc VAILLANT

PROFESSEURS HONORAIRES

D.ALISON – P. ANTHONIOZ – P. ARBEILLE – M. AUPART – A. AUTRET – D. BABUTY – C. BARTHELEMY – J.L. BAULIEU – C. BERGER – JC. BESNARD – P. BEUTTER – C. BONNARD – P. BONNET – P. BOUGNOUX – P. BURDIN – G. CALAIS – L. CASTELLANI – J. CHANDENIER – A. CHANTEPIE – B. CHARBONNIER – P. CHOUTET – T. CONSTANS – C. COUET – L. DE LA LANDE DE CALAN – P. DUMONT – J.P. FAUCHIER – F. FETISSOF – J. FUSCIARDI – P. GAILLARD – G. GINIES – D. GOGA – A. GOUDEAU – J.L. GUILMOT – O. HAILLOT – N. HUTEN – M. JAN – J.P. LAMAGNERE – F. LAMISSE – Y. LANSON – O. LE FLOCH – Y. LEBRANCHU – E. LECA – P. LECOMTE – AM. LEHR-DRYLEWICZ – E. LEMARIE – G. LEROY – G. LORETTE – M. MARCHAND – C. MAURAGE – C. MERCIER – J. MOLINE – C. MORAIN – J.P. MUH – J. MURAT – H. NIVET – D. PERROTIN – L. POURCELOT – R. QUENTIN – P. RAYNAUD – D. RICHARD-LENOBLE – A. ROBIER – J.C. ROLLAND – P. ROSSET – D. ROYERE – A. SAINDELLE – E. SALIBA – J.J. SANTINI – D. SAUVAGE – D. SIRINELLI – J. WEILL

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

AMELOT Aymeric.....	Neurochirurgie
ANDRES Christian.....	Biochimie et biologie moléculaire
ANGOULVANT Denis	Cardiologie
APETOH Lionel.....	Immunologie
AUDEMARD-VERGER Alexandra.....	Médecine interne
BACLE Guillaume.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BAKHOS David.....	Oto-rhino-laryngologie
BALLON Nicolas.....	Psychiatrie ; addictologie
BARILLOT Isabelle.....	Cancérologie ; radiothérapie
BARON Christophe.....	Immunologie
BEJAN-ANGOULVANT Théodora.....	Pharmacologie clinique
BERHOUE Julien.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BERNARD Anne	Cardiologie
BISSON Arnaud	Cardiologie
BLANCHARD-LAUMONNIER Emmanuelle	Biologie cellulaire
BLASCO Hélène.....	Biochimie et biologie moléculaire
BONNET-BRILHAULT Frédérique.....	Physiologie
BOULOUIS Grégoire	Radiologie et imagerie médicale
BOURGUIGNON Thierry	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BRUNAULT Paul	Psychiatrie d'adultes, addictologie
BRUNEREAU Laurent.....	Radiologie et imagerie médicale
BRUYERE Franck.....	Urologie
BUCHLER Matthias.....	Néphrologie
CAILLE Agnès	Biostat., informatique médical et technologies de communication
CAMUS Vincent.....	Psychiatrie d'adultes
CARVAJAL-ALLEGRIA Guillermo.....	Rhumatologie
CHAUMIER François.....	Médecine palliative
CORCIA Philippe.....	Neurologie
COTTIER Jean-Philippe.....	Radiologie et imagerie médicale
DE LUCA Arnaud.....	Nutrition
DEQUIN Pierre-François	Thérapeutique
DESMIDT Thomas.....	Psychiatrie
DESOUBEUX Guillaume	Parasitologie et mycologie
DESTRIEUX Christophe	Anatomie
DI GUISTO Caroline.....	Gynécologie obstétrique
DU BOUEXIC de PINIEUX Gonzague	Anatomie & cytologie pathologiques
DUCLUZEAU Pierre-Henri.....	Endocrinologie, diabétologie, et nutrition
EHRMANN Stephan	Médecine intensive – réanimation
EL HAGE Wissam.....	Psychiatrie adultes
ELKRIEF Laure	Hépatologie – gastroentérologie
ESPITALIER Fabien.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
FAUCHIER Laurent.....	Cardiologie
FOUGERE Bertrand	Gériatrie et biologie du vieillissement
FRANCOIS Patrick.....	Neurochirurgie
GATAULT Philippe	Néphrologie
GAUDY-GRAFFIN Catherine	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
GOUPILLE Philippe	Rhumatologie
GUERIF Fabrice.....	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
GUILLON Antoine	Médecine intensive – réanimation
GUILLON-GRAMMATICO Leslie	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GUYETANT Serge	Anatomie et cytologie pathologiques
GYAN Emmanuel	Hématologie, transfusion
HALIMI Jean-Michel.....	Thérapeutique
HERAULT Olivier	Hématologie, transfusion
HERBRETEAU Denis.....	Radiologie et imagerie médicale
HOURIOUX Christophe	Biologie cellulaire
IVANES Fabrice	Physiologie
JOUAN Youenn.....	Médecine intensive-réanimation
KERVAREC Thibault.....	Anatomie et cytologie pathologiques
LABARTHE François.....	Pédiatrie
LAFFON Marc	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LARDY Hubert	Chirurgie infantile
LARIBI Saïd.....	Médecine d'urgence
LARTIGUE Marie-Frédérique.....	Bactériologie-virologie

LAURE Boris.....	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
LE NAIL Louis-Romée	Cancérologie, radiothérapie
LECOMTE Thierry	Gastroentérologie, hépatologie
LEDUCQ Sophie	Dermatologie
LEFORT Bruno.....	Pédiatrie
LEGRAS Antoine	Chirurgie thoracique
LEMAIGNEN Adrien	Maladies infectieuses
LESCANNE Emmanuel	Oto-rhino-laryngologie
LEVESQUE Éric	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LINASSIER Claude	Cancérologie, radiothérapie
MACHET Laurent	Dermato-vénéréologie
MAILLOT François	Médecine interne
MARCHAND-ADAM Sylvain.....	Pneumologie
MARRET Henri.....	Gynécologie-obstétrique
MARUANI Annabel.....	Dermatologie-vénéréologie
MEREGHETTI Laurent.....	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
MITANCHEZ Delphine.....	Pédiatrie
MOREL Baptiste.....	Radiologie pédiatrique
MORINIERE Sylvain	Oto-rhino-laryngologie
MOUSSATA Driffa	Gastro-entérologie
MULLEMAN Denis.....	Rhumatologie
ODENT Thierry	Chirurgie infantile
OUAISSI Mehdi	Chirurgie digestive
OULDAMER Lobna.....	Gynécologie-obstétrique
PARE Arnaud	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
PASI Marco.....	Neurologie
PERROTIN Franck	Gynécologie-obstétrique
PISELLA Pierre-Jean.....	Ophtalmologie
PLANTIER Laurent.....	Physiologie
REMERAND Francis.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
ROINGEARD Philippe.....	Biologie cellulaire
RUSCH Emmanuel.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
SAINT-MARTIN Pauline	Médecine légale et droit de la santé
SALAME Ephrem.....	Chirurgie digestive
SAMIMI Mahtab	Dermatologie-vénéréologie
SANTIAGO-RIBEIRO Maria	Biophysique et médecine nucléaire
SAUTENET-BIGOT Bénédicte.....	Thérapeutique
THOMAS-CASTELNAU Pierre	Pédiatrie
VOURC'H Patrick.....	Biochimie et biologie moléculaire
WATIER Hervé	Immunologie
ZEMMOURA Ilyess	Neurochirurgie

PROFESSEUR DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

DIBAO-DINA Clarisse
LEBEAU Jean-Pierre
PAUTRAT Maxime

PROFESSEURS ASSOCIES

BARBEAU Ludivine Médecine Générale || LIMA MALDONADO Igor..... | Anatomie |
MALLET Donatien.....	Soins palliatifs
SAMKO Boris.....	Médecine générale
RUIZ Christophe	Médecine générale

PROFESSEUR CERTIFIE DU 2ND DEGRE

MC CARTHY Catherine.....Anglais

CHERCHEURS INSERM - CNRS - INRAE

BECKER Jérôme.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BLOCH Solal.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUAKAZ Ayache.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUTIN Hervé.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BRIARD Benoît.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
DE ROCQUIGNY Hugues.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
ESCOFFRE Jean-Michel.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GILLOT Philippe.....	Chargé de Recherche Inrae – UMR Inrae 1282
GOMOT Marie.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GOUILLEUX Fabrice.....	Directeur de Recherche CNRS – UMR Inserm 1100
GUEGUINOU Maxime.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
HAASE Georg.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
HENRI Sandrine.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
HEUZE-VOURCH Nathalie.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
KORKMAZ Brice.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
LABOUTE Thibaut.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LATINUS Marianne.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LAUMONNIER Frédéric.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LE MERRER Julie.....	Directrice de Recherche CNRS – UMR Inserm 1253
MAMMANO Fabrizio.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
PAGET Christophe.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
RAOUL William.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
SECHER Thomas.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SI TAHAR Mustapha.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SUREAU Camille.....	Directeur de Recherche émérite CNRS – UMR Inserm 1259
TANTI Arnaud.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
WARDAK Claire.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

Pour l'éthique médicale

BIRMELE Béatrice.....	Praticien Hospitalier
LEONARD Thomas.....	Praticien Hospitalier

Pour la médecine manuelle et l'ostéopathie médicale

LAMANDE Marc.....	Praticien Hospitalier
-------------------	-----------------------

Pour l'orthophonie

BATAILLE Magalie.....	Orthophoniste
CABANNE-Hardy Marie-Charlotte.....	Orthophoniste
CLOUTOUR Nathalie.....	Orthophoniste
CORBINEAU Mathilde.....	Orthophoniste
GLAIE Axelle.....	Orthophoniste
HARIVEL OUALLI Ingrid.....	Orthophoniste
IMBERT Mélanie.....	Orthophoniste
MORIN Eléonore.....	Orthophoniste
NAL Emmanuel.....	Praticien Hospitalier
PILLER Anne-Gaëlle.....	Orthophoniste
PUJOLE Dorine.....	Orthophoniste
ROUVRE Olivier.....	Orthophoniste
SIZARET Eva.....	Orthophoniste
TAMIATTO Zinaïda.....	Orthophoniste

Pour l'orthoptie

BOULNOIS Sandrine.....	Orthoptiste
SALAME Najwa.....	Orthoptiste

Pour la santé au travail

MONMOUSSEAU Fanny.....	Praticien Hospitalier
NGUYEN Duc Qui.....	Dirigeant d'entreprise

Pour la Médecine Générale

LOISON Clotilde.....	Médecin Généraliste
----------------------	---------------------

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

CANCEL Mathilde	Cancérologie, radiothérapie
CHESNAY Adélaïde	Parasitologie et mycologie
DE FREMINVILLE Jean-Baptiste	Cardiologie
DOMELIER Anne-Sophie	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
DUFOUR Diane	Biophysique et médecine nucléaire
EYMIEUX Sébastien	Biologie cellulaire
FOUQUET-BERGEMER Anne-Marie	Anatomie et cytologie pathologiques
GARGOT Thomas	Pédopsychiatrie
GOUILLEUX Valérie	Immunologie
HOARAU Cyrille	Immunologie
KHANNA Raoul Kanav	Ophtalmologie
LE GUELLEC Chantal	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
LE TILLY Olivier	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
LEJEUNE Julien	Hématologie, transfusion
LEROY Victoire	Médecine interne
MORICE Anne	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
MOUMNEH Thomas	Médecine d'urgence
PASTUSZKA Adeline	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
PIVER Éric	Biochimie et biologie moléculaire
RAVALET Noémie	Hématologie, transfusion
ROUMY Jérôme	Biophysique et médecine nucléaire
STANDLEY-MIQUELESTORENA Elodie	Anatomie et cytologie pathologiques
STEFIC Karl	Bactériologie
TERNANT David	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
VALLET Nicolas	Hématologie, transfusion
VAYNE Caroline	Hématologie, transfusion
VUILLAUME-WINTER Marie-Laure	Génétique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

AGUILLON-HERNANDEZ Nadia	Neurosciences
AUBRY Jean-Denis	Sciences infirmières
BLANC Romuald	Orthophonie
EL AKIKI Carole	Orthophonie
NICOGLOU Antonine	Philosophie – histoire des sciences et des techniques
PATIENT Romuald	Biologie cellulaire
RENOUX-JACQUET Cécile	Médecine Générale

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

AUMARECHAL Alain	Médecine Générale
BALAND Thierry	Médecine Générale
CHALEIX Lysiane	Médecine Générale
CHAMANT Christelle	Médecine Générale
DUMAS Adrien	Médecine Générale
ETTORI Isabelle	Médecine Générale
MOLINA Valérie	Médecine Générale
PHILIPPE Laurence	Médecine Générale

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des enseignants et enseignantes
de cette Faculté,
de mes chers condisciples
et selon la tradition d'Hippocrate,
je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur
et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins gratuits aux indigents,
et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis(e) dans l'intérieur des maisons, mes yeux
ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira
les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas
à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Respectueux(euse) et reconnaissant(e) envers mes Maîtres,
je rendrai à leurs enfants
l'instruction que j'ai reçue de leurs parents.

Que les hommes et les femmes m'accordent leur estime
si je suis fidèle à mes promesses.
Que je sois couvert(e) d'opprobre
et méprisé(e) de mes confrères et consœurs
si j'y manque.

Remerciements

À mon maître et président du Jury, Monsieur le Professeur Lescanne,

Merci de me faire l'honneur de présider ce jury et de juger ce travail. Vos compétences chirurgicales et votre expertise en otologie, que vous transmettez au quotidien avec rigueur et bienveillance, demeurent pour nous des références et des objectifs d'excellence à atteindre. Recevez ici le témoignage de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À mon maître et juge, Madame le Docteur Pondaven,

Merci d'avoir accepté de juger ce travail. Vos enseignements sur les acouphènes m'ont beaucoup apporté et ont enrichi ma pratique quotidien. Votre pédagogie, votre humanité et votre bienveillance font de vous un véritable modèle à suivre. Je suis impatiente de rejoindre votre service pour apprendre de votre expertise auprès des tout-petits. Recevez ici le témoignage de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À mon maître et juge, Monsieur le Professeur Morinière,

Merci d'avoir accepté de juger ce travail. Je vous remercie pour votre pédagogie et la qualité de votre encadrement au cours de mon cursus. Votre maîtrise technique et votre sérénité au bloc ont été une véritable source d'inspiration. Votre dextérité chirurgicale et votre tact envers votre équipe sont un exemple pour moi. Recevez ici le témoignage de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À Monsieur Robier,

Merci d'avoir accepté de juger ce travail. Votre aide précieuse lors des tests effectués auprès de nos patients a été essentielle et a largement contribué à la réussite de ce projet. Votre implication a également joué un rôle déterminant dans l'aboutissement de cette étude. Recevez ici le témoignage de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À mon maître et juge, Monsieur le Professeur Bakhos,

Merci d'avoir accepté de diriger, encadrer et juger ce travail. Merci de m'avoir accompagnée tout le long de mon internat : le M1, le M2, le voyage à Los Angeles et maintenant la thèse. Il ne reste plus que le mémoire. Votre investissement envers nous, vos patients, le service, ainsi que votre rigueur chirurgicale et universitaire sont un modèle pour moi. Merci de m'avoir fait découvrir d'autres modes d'exercices ainsi que la Vendée, une région agréable. Votre disponibilité et votre bienveillance m'ont profondément touchée, et je suis reconnaissante du temps que vous m'avez accordé surtout les mardis avec John. Recevez ici le témoignage de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

Table des matières

I.	Introduction	13
1.	Surdité neurosensorielle	13
2.	Fusion binaurale.....	15
3.	Surdité neurosensorielle unilatérale et fusion binaurale.....	16
II.	Matériels et méthodes	20
1.	Sujets	20
2.	Dispositif d'envoi des stimuli	21
3.	Calibration.....	22
4.	Tests.....	23
a.	Stimuli	23
b.	Test de fusion binaurale	23
c.	Test de similarité	25
d.	Score de qualité de vie.....	26
5.	Analyses statistiques	26
III.	Résultats	28
1.	Fonction binaurale	28
2.	Latéralisation et diffusion	29
3.	�tude de similarité	32
4.	Score de qualité de la vie SSQ16.....	33
5.	Corrélations	33
IV.	Discussion	34
V.	Conclusion.....	37
VI.	Références	38
VII.	Annexes	44
1.	Annexe 1 : l'Indice de Handicap lié aux Acouphènes : THI	44
2.	Annexe 2 : Mini Mental State Examination	45
3.	Annexe 3 : Questionnaire SSQ16.....	46
VIII.	Article publié	51

ABREVIATIONS

AA : Appareillage auditif.

CROS : Contralateral Routing Of Signal.

DAI : Direct Audio Input : Entrée audio directe.

dB HL : decibels Hearing Level.

IC: Implant Cochléaire.

IC-SNU : Patient bénéficiant d'un implant cochléaire pour une surdité neurosensorielle unilatérale.

ILD : Interaural Level Difference : différence de niveau interaural.

ITD : Interaural Time Difference : différence de temps interaural.

MAI : Microphone Audio Input : Entrée audio du microphone.

MMSE : Mini Mental State Examination.

NE : Normoentendant(e).

PTA : Pure Tone Average : seuil moyen en audiométrie tonale.

SNU : Surdité Neurosensorielle Unilatérale.

SSQ : Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale : Échelle de la compréhension de la parole, de la perception spatiale et de la qualité des sons.

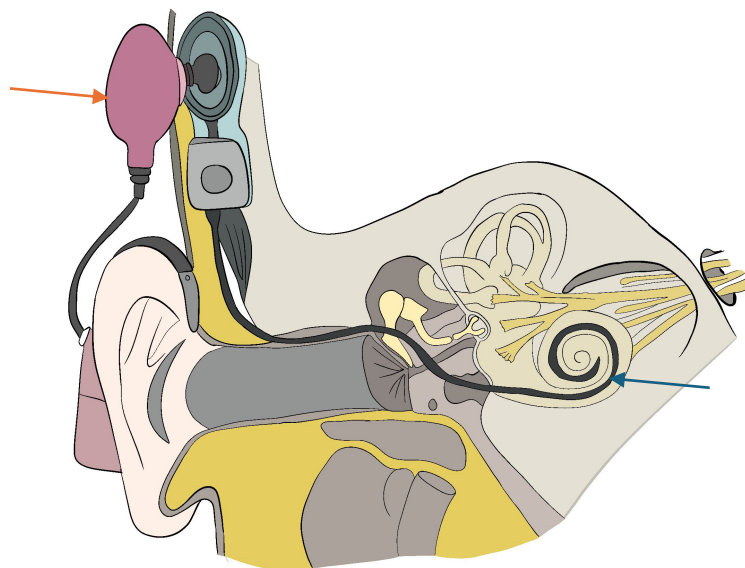
SUB : Surdité Unilatérale Brusque.

THI : Tinnitus Handicap Inventory : Indice de Handicap lié aux Acouphènes.

I. Introduction

1. Surdité neurosensorielle

La surdité neurosensorielle est le déficit sensoriel le plus fréquent touchant plus de 5% de la population mondiale [1]. Les causes peuvent être génétiques, dues à des infections, des traumatismes ou à l'âge [1]. Une perte auditive non corrigée peut entraîner une altération de la communication, du langage, des fonctions cognitives, un isolement social avec un impact néfaste sur la qualité de vie [1]. Les traitements de ces surdités sont un enjeu majeur de santé publique [1]. L'implant cochléaire (IC), crée au milieu du XXe siècle, a permis la réhabilitation auditive de nombreux patients. L'IC a été posé chez plus de 400 000 patients dans le monde avec une augmentation du nombre de la pose d'IC de 9% par an. L'IC a amélioré la prise en charge des surdités neurosensorielles autant chez l'adulte que chez l'enfant. La procédure chirurgicale est standardisée et codifiée dans les centres agr e s pour l'IC et se réalise régulièrement en ambulatoire [2]. C'est un dispositif médical qui convertit un son acoustique en un signal électrique transmis directement au nerf auditif (*Figure 1*).



*Figure 1 : Schéma d'un IC avec une partie interne (flèche bleue) mis en place chirurgicalement et une partie externe qui va capter les sons (flèche orange)
(V. Champlong, logiciel Procreate).*

L'IC est constitué de deux parties : une partie interne implantée chirurgicalement dans la cochlée et une partie externe avec le processeur (*Figure 1*). Les deux parties sont en contact l'une avec l'autre grâce à un aimant [2]. L'information est transmise entre les 2 parties par radiofréquence. La partie interne est constituée d'un boîtier récepteur biocompatible contenant un aimant en rétro-auriculaire sous le muscle temporal qui maintient la partie externe en regard et qui reçoit les stimuli transmis par la partie externe [2, 3, 4]. Le porte électrode inséré dans la cochlée au niveau de la rampe tympanique (afin d'être au plus près des fibres nerveuses du nerf auditif) est constitué de 12 à 22 électrodes intra cochléaires sur un tour et demi de spire dans la cochlée qui transmettent les informations au nerf auditif. Les électrodes suivent la tonotopie cochléaire avec les électrodes basales codant pour les fréquences aiguës et les électrodes apicales, pour les fréquences graves. Le processeur externe permet de transformer le signal acoustique en un signal électrique qui sera transmis à la partie interne [2].

L'implantation cochléaire est indiquée chez l'adulte, selon la Haute Autorité de Santé (https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/fiche_bon_usage_implants_cochleaires.pdf), en cas de surdité neurosensorielle bilatérale sévère à profonde avec une insuffisance d'appareillage auditif (AA) en conduction aérienne. Le patient doit avoir un seuil d'intelligibilité inférieur ou égal à 50% en audiométrie vocale en champ libre à 60 dB HL avec son AA. L'implantation cochléaire est tout d'abord unilatérale puis peut être bilatérale selon les bénéfices du premier IC et de l'AA controlatéral [2]. Elle peut être d'emblée bilatérale en cas de risque d'ossification cochléaire lors de méningites bactériennes, de fractures du rocher ou de labyrinthites [2]. Les surdités neurosensorielles bilatérales avec fluctuations auditives sont aussi une autre indication d'implantation cochléaire unilatérale. Elles sont caractérisées par une surdité neurosensorielle bilatérale asymétrique sévère à profonde d'un côté et fluctuante de l'autre côté [2]. Depuis 2021, l'implantation cochléaire est également indiquée chez les patients souffrant de surdité neurosensorielle unilatérale (SNU) sévère à profonde présentant des

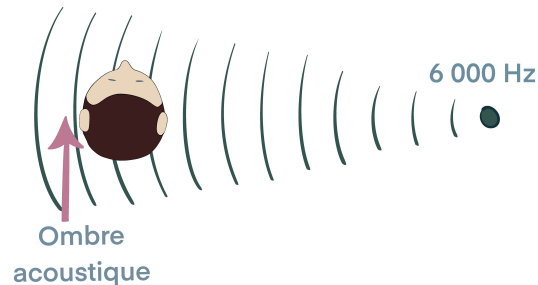
acouphènes invalidants après échec ou inefficacité des systèmes CROS (Contralateral Routing Of Signal) ou à ancrage osseux (https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/fiche_bon_usage_implants_cochleaires.pdf). Nous nous sommes intéressés à la fusion binaurale dans cette nouvelle indication d'implantation chez les patients adultes.

2. Fusion binaurale

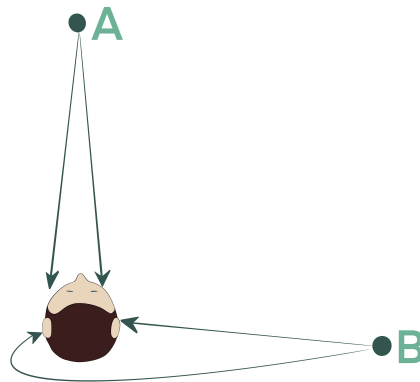
Chez les personnes normoentendantes (NE), la fusion binaurale est un phénomène auditif complexe. Le cerveau intègre les informations perçues par les deux oreilles dans le but de former un seul et unique son. Ce processus est essentiel pour localiser les sons dans l'espace, pour comprendre une conversation dans un environnement bruyant, pour la perception spatiale globale des sons et pour la qualité de vie [5, 6, 7, 8]. Celle-ci est altérée en cas de surdité neurosensorielle. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés aux capacités de fusion chez les adultes implantés dans le cadre d'une SNU post-linguale afin de mieux comprendre la réorganisation de cette fonction.

A ce jour, il n'existe pas d'outil pour explorer la fusion binaurale en pratique clinique. La fusion binaurale dépend de deux indices clés : la différence d'intensité interaurale (ILD : Interaural Level Difference) et la différence de temps interaurale (ITD : Interaural Time Difference) [9]. L'ILD (*Figure 2*) correspond à la différence d'intensité sonore perçue entre les deux oreilles. Quand le son provient d'un côté, il est ressenti plus fort dans l'oreille la plus proche de la source sonore en raison de l'ombre acoustique de la tête (effet fantôme ou shadow). Cette différence de niveau sonore permet aux voies auditives centrales d'assurer une fonction de localisation sonore. L'ITD (*Figure 3*) correspond à la différence de temps que met le son à atteindre chaque oreille. Si un son provient de la droite, il atteint l'oreille droite plus tôt que l'oreille gauche. Cette différence de temps est utilisée pour définir la direction du son. Une

surdité qu'elle soit unilatérale ou bilatérale, va impacter ces indices de fusion binaurale, même après réhabilitation auditive.



*Figure 2 : Schéma expliquant l'ILD
Le niveau sonore arrivant à l'oreille droite est plus fort que celui arrivant à l'oreille gauche
(V. Champlong, logiciel Procreate).*



*Figure 3 : Schéma expliquant l'ITD
A : Les sons arrivent en même temps aux deux oreilles.
B : Le son arrive plus rapidement à l'oreille droite qu'à l'oreille gauche
(V. Champlong, logiciel Procreate).*

3. Surdité neurosensorielle unilatérale et fusion binaurale

Les patients atteints de SNU présentent une asymétrie auditive caractérisée par une audition normale dans une oreille (perte moyenne tonale < 30db HL (décibels Hearing Level)) appelée oreille NE, associée à une perte auditive sévère à profonde dans l'oreille controlatérale (perte moyenne tonale > 70db HL) [10]. Les étiologies des SNU sont diverses, telles que les infections, la surdité brusque (SUB), la maladie de Ménière, les fractures du rocher ou encore l'ototoxicité [10, 11].

Les patients présentant une SNU ont une perte de cette fonction binaurale [10]. Ils présentent des difficultés de localisation sonore et de compréhension de la parole dans le bruit. La perception binaurale est essentielle pour ces fonctions. À la suite de la perte de cette fonction binaurale, la qualité de vie de ces patients est significativement altérée [5 - 7, 12, 13].

La réhabilitation de la fonction binaurale des patients atteints de SNU était, jusqu'en 2021, limitée à des systèmes de transfert de l'audition (par voie aérienne pour les systèmes CROS ou par voie osseuse pour les systèmes à ancrage osseux) [5, 7]. Le système CROS repose sur l'utilisation d'un AA bilatéral qui envoie le son reçu par le côté atteint de surdité vers l'oreille NE (Figure 4). Le système à ancrage osseux réalise le même procédé par voie osseuse (Figure 5) [6, 14]. Ces systèmes de transfert permettent d'avoir une pseudo-localisation sonore mais ne restaurent pas la fonction binaurale [6, 7].



Figure 4: Schéma du système CROS, transfert par voie aérienne (V. Champlong, logiciel Procreate).

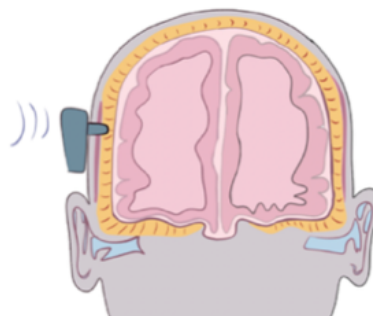


Figure 5 : Schéma du système à ancrage osseux, transfert par voie osseuse (V. Champlong, logiciel Procreate).

Depuis 2021, l'implantation cochléaire est indiquée en cas de SNU sévère à profonde avec acouphènes invalidants [5, 15]. Les acouphènes invalidants sont caractérisés par un score à l'Indice de Handicap lié aux Acouphènes (THI) > 50 (*Annexe 1*) ou un score sur l'échelle visuelle analogique $\geq 6/10$ [1, 10]. (https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/fiche_bon_usage_implants_cochleaires.pdf). Contrairement aux systèmes CROS et à ancrage osseux, les IC restaurent la fonction binaurale chez les patients atteints de SNU bénéficiant d'un IC du côté atteint (IC-SNU). L'IC permet également d'améliorer de manière significative l'intensité des acouphènes, la localisation sonore, la compréhension de la parole dans le bruit et la qualité de vie des patients [5, 7, 8, 12 - 14, 16 - 21].

Cependant, il a été observé une variabilité inter-individuelle au sein des IC-SNU concernant leurs performances auditives et leur qualité de vie [12, 13, 20]. Cette variabilité peut être due au degré de décalage interaural des fréquences entre l'oreille NE et l'IC. La même fréquence d'entrée stimule différentes régions de la cochlée de l'oreille NE et de celle de l'IC. Il a été démontré que ce décalage interaural limite la fusion binaurale et qu'il peut varier en fonction de la profondeur d'insertion de l'IC dans la cochlée et de la réorganisation des voies auditives centrales [22 - 25]. De plus, en combinant une stimulation acoustique et électrique de manière simultanée, une différence de qualité sonore entre les deux stimulations peut impacter cette fusion [26 - 32].

À notre connaissance, la fusion binaurale a été peu étudiée chez ces patients IC-SNU. La fusion est pourtant un facteur clé pour les patients au quotidien, afin de localiser les sons dans l'espace, comprendre une conversation dans un environnement bruyant, pour la perception spatiale globale des sons et pour la qualité de vie [5, 6, 7, 8]. Nous avons créé des tests de psychoacoustique pour étudier la fusion binaurale. Ces tests ont été créés en s'inspirant de la littérature et ajoutés au logiciel French Angel Sound® dans l'optique de les utiliser au quotidien. Pour valider nos tests créés, nous avons recruté des adultes atteints de SNU bénéficiant d'un IC

du côté atteint. Le but de cette étude était de valider nos tests chez ces patients IC-SNU afin de pouvoir les utiliser en pratique clinique courante. Elle visait également à mieux caractériser les capacités d'écoute binaurale de ces patients dont les données disponibles dans la littérature restent limitées. L'un des objectifs de l'IC pour ces patients était la restauration de la fonction binaurale.

II. Matériels et méthodes

Nous avons mené une étude de psychoacoustique, monocentrique et interventionnelle, au sein du CHRU de Tours. Le comité d'éthique local a approuvé le protocole (N°ID RCB No 2015-A01249-40), et un consentement éclairé écrit a été obtenu de la part de tous les participants.

1. Sujets

Huit adultes IC-SNU, atteints de surdité neurosensorielle acquise post-linguale, ont participé à l'étude (4 femmes, 4 hommes). Leur langue maternelle était le français. Les critères d'inclusion exigeaient d'être âgé de 18 ans ou plus, d'utiliser leur IC quotidiennement et d'avoir une audition controlatérale normale. Ils devaient avoir au moins 6 mois d'expérience avec leur IC. Aucun participant ne présentait de pathologie rétrocochléaire après une IRM des méats acoustiques internes ou de troubles cognitifs après avoir répondu au Mini Mental State Examination (MMSE) (*Annexe 2*).

En audiométrie tonale, la moyenne des seuils auditifs sur les fréquences 500, 1000, 2000 et 4000 Hz appelé PTA étaient de $25,4 \pm 9,9$ dB HL dans l'oreille NE. Du côté de l'oreille implantée, le PTA moyen était de $35,8 \pm 7,5$ dB HL. L'âge moyen au moment du test était de $62,9 \pm 9,5$ ans. La durée moyenne de la surdité, avant implantation, était de $2,0 \pm 1,6$ ans et l'expérience moyenne avec l'implant était de $4,4 \pm 2,6$ ans. Tous les participants avaient des IC de type Cochlear®, à l'exception du patient SNU-3, qui avait un implant Advanced Bionics®. La *Table 1* présente les informations démographiques des huit participants.

Table 1 : Caractéristiques démographiques des participants.

Participant	Sexe	Âge test (an)	Étiologie	Durée (an)	Age IC (an)	IC côté	IC exp (an)	NE PTA (dB HL)	IC PTA (dB HL)	SI 60 dB IC (%)	SSQ total
SNU-1	H	54	Méningite	0	51	G	2.67	24	43	30	4.5
SNU-2	H	59	Non connu	2	52	G	6.58	42	25	100	7.8
SNU-3	H	49	Ischémique	3	48	G	1.00	23	45	70	3.5
SNU-4	F	65	SUB	2	59	D	6.42	23	30	90	4.3
SNU-5	F	71	SUB	5	65	G	6.75	12	38	60	7.2
SNU-6	H	78	SUB	2	77	G	0.75	38	43	50	6.2
SNU-7	F	59	SUB	2	52	D	6.08	18	31	80	8.0
SNU-8	F	68	Méningite	0	62	D	5.25	23	31	60	8.7

Légendes : Durée = Durée de la surdité avant implantation cochléaire, Âge IC = Âge lors de l'implantation cochléaire, IC = Implant cochléaire, IC exp = Expérience après activation de l'IC, NE : Oreille normoentendante, PTA = Pure-Tone Average = Seuil moyen tonal sur les fréquences 500, 1000, 2000, and 4000 Hz, SI = Seuil d'intelligibilité, SSQ = Speech, Spatial, and Quality of sound questionnaire = Questionnaire de qualité de vie SSQ, H = Homme, F = Femme, SUB= Surdité unilatérale brusque, G = Gauche, D= Droit.

Avant de commencer les tests, les réglages des IC étaient vérifiés et ajustés au cours d'une visite clinique. Une audiométrie tonale et vocale était réalisée dans un premier temps. Les patients remplissaient également le questionnaire de qualité de vie SSQ16 [33].

2. Dispositif d'envoi des stimuli

Les stimuli étaient envoyés à l'aide d'un ordinateur portable relié à une interface de traitement du signal audio (Focusrite Scarlett 212). La carte son était reliée à une table de mixage (Mackie 402 VLZ) pour ajuster le signal entre l'oreille NE et l'IC séparément. Le son était envoyé à l'oreille NE via un insert auditif (Etymotics Research ER2) et directement à l'IC par Bluetooth via un streamer audio Mini-mic (ou Direct Audio Input : DAI) en cas d'implant de type Cochlear ou via un ComPilot (DAI) pour l'implant Advanced Bionics  . On pouvait envoyer un son acoustique à l'oreille NE et un son électrique à l'IC de manière simultanée ou alternée (Figure 6).

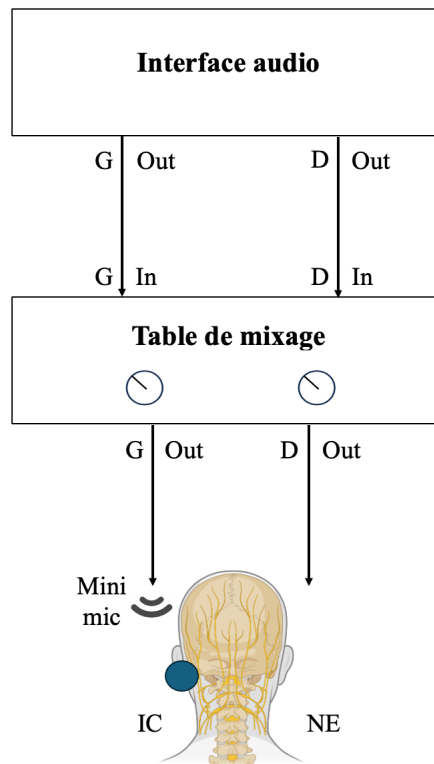


Figure 6 : Dispositif d'envoi des stimuli
Légendes : G : Gauche, D : Droit, IC : Implant cochléaire,
NE : Oreille normoentendante, Rond bleu : IC.

3. Calibration

Avant de débiter les tests, une calibration de l'intensité sonore entre les deux oreilles était réalisée. L'objectif était d'équilibrer l'intensité sonore entre les deux oreilles. On commençait par l'oreille NE. Le mot « had », répété de manière indéfinie, était envoyé dans cette oreille avec une intensité croissante. Le but était de définir une intensité considérée comme modérément forte par le patient. La même procédure était réalisée du côté de l'IC. Puis, pour ajuster le niveau sonore de manière bilatérale, le mot « had » était présenté alternativement entre les deux oreilles. Enfin, le mot « had » était envoyé simultanément des deux côtés pour vérifier que le niveau sonore était bien équilibré. La calibration variait selon les patients en fonction du réglage de leur IC. Le niveau sonore n'était plus modifié après cette étape.

4. Tests

a. Stimuli

Nous avons utilisé 20 stimuli sonores différents. Parmi eux on trouvait, des sons environnementaux (coup de feu, bruit, alarme, vent), des phrases (2 phrases dites par une femme et 2 par un homme), des sons purs (500, 1000, 2000 et 4000 Hz) et des mots monosyllabiques (4 prononcés par une femme et 4 par un homme). Nous avons utilisé le logiciel French Angel Sound® [34] afin d'envoyer des stimuli contrôlés en durée et en intensité.

b. Test de fusion binaurale

Les stimuli étaient envoyés simultanément aux deux oreilles. Les patients devaient répondre à 3 questions en cliquant sur les items appropriés affichés sur le logiciel.

- Fonction binaurale

Les patients cliquaient sur la case correspondant à ce qu'ils entendaient : « Un son » ou « Deux sons » (*Figure 7*). Si le son était perçu de manière différente entre les deux côtés, et ce, même si la différence était minime, ils devaient sélectionner « Deux sons » comme dans la méthode utilisée par Oh and Reiss [26]. Une tendance à choisir la case « Un son » était possible en raison de la façon dont notre cerveau regroupe les sons qui commencent et se terminent au même moment.



*Figure 7 : Première étape du test de fusion binaurale : J'entends un ou deux sons ?
(Copie d'écran du logiciel French Angel Sound®)*

- Diffusion

Ensuite, les patients devaient évaluer la netteté du ou des sons entendus. La méthode employée était conforme à celles décrites dans la littérature [22, 23, 35]. Les participants devaient choisir entre trois possibilités via le logiciel (*Figure 8*).

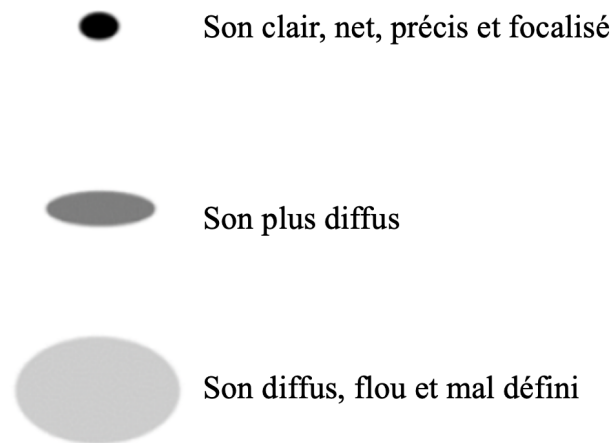
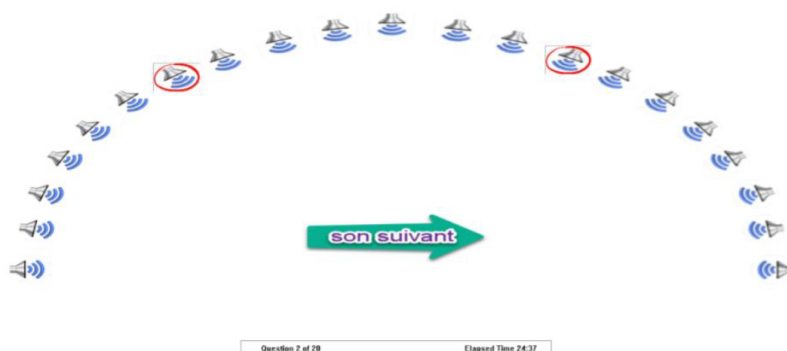


Figure 8 : Test de diffusion : Le son entendu est-il diffus ? (Copie d'écran du logiciel French Angel Sound®)

Si les patients entendaient un seul son, ils devaient décrire celui-ci. S'ils entendaient deux sons, chaque son était décrit.

- Latéralisation

La troisième partie de ce test ciblait les capacités de latéralisation des participants. Pour chaque son entendu, ils devaient indiquer l'origine de ce son. Vingt et un haut-parleurs virtuels étaient présentés devant eux sur le logiciel (*Figure 9*). Ils étaient placés en arc de cercle face et autour d'eux ($8,57^\circ$ entre chaque haut-parleur). Cette méthode est conforme à celles précédemment décrites dans la littérature [24, 25, 36]. Si les patients avaient cliqué sur la case « Un son », ils ne pouvaient choisir qu'un seul haut-parleur. S'ils avaient cliqué sur la case « Deux sons », ils devaient sélectionner deux haut-parleurs, un parmi les dix haut-parleurs du côté de l'IC et un parmi les dix haut-parleurs du côté de l'oreille NE.



*Figure 9 : Test de localisation : D'où provient le ou les sons entendu(s) ?
Ici, le patient a entendu 2 sons et a donc choisi 2 haut-parleurs.
(Copie d'écran du logiciel French Angel Sound®)*

Les stimuli étaient envoyés dans un ordre aléatoire. Les patients pouvaient faire répéter le même son au maximum 4 fois d'affilée en appuyant sur la barre espace. Chaque partie du test était réalisée deux fois. Les réponses ont été moyennées pour chaque stimulus et pour chaque critère de fusion.

c. Test de similarité

Une fois le test de fusion réalisé, nous avons comparé la qualité des sons entendus entre l'oreille NE et l'IC. Nous avons utilisé les mêmes 20 stimuli que décrits précédemment. Les stimuli étaient envoyés séparément aux deux oreilles afin de pouvoir les comparer. Le son était envoyé en premier à l'oreille NE puis à l'IC. Les patients devaient cliquer sur le chiffre correspondant à la ressemblance perçue entre ces deux sons. Ils pouvaient cliquer sur un chiffre compris entre 0 et 10. Zéro exprimait deux sons les plus différents possible et 10, des sons parfaitement similaires. Les stimuli étaient joués dans un ordre aléatoire. Ils pouvaient répéter chaque son 4 fois en appuyant sur la barre espace. Ce test était réalisé deux fois. Les scores de similarité ont été moyennés pour chaque stimulus afin de réduire la variabilité interindividuelle.

d. Score de qualité de vie

Les patients ont ensuite répondu à un questionnaire de qualité de vie Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale 16 (SSQ16) [33] (*Annexe 3*). Ce questionnaire comprend 49 questions qui évaluent subjectivement leur audition selon trois axes : l'audition de la parole (14 questions), l'audition spatiale (17 questions) et la qualité de l'audition (18 questions). Pour chaque question, les participants devaient répondre sur une échelle graduée de 0 à 10 où 0 équivaut à une incapacité totale et 10 une capacité parfaite, selon leur quotidien actuel. Les moyennes globales et par catégorie étaient calculées pour chaque patient.

5. Analyses statistiques

Les tests statistiques sont résumés dans le tableau 2

Tableau 2 : Analyses statistiques

Étude	Modèles	Variable dépendante	Variable fixe	Effets aléatoires
Effet du type de stimulus / nombre d'image auditive + diffusion	Mixte logistique	Nombre d'image auditive et diffusion	Type de stimulus	Variabilité interindividuelle
Effet du type de stimulus / latéralisation si 2 images auditives	Mixte linéaire	Latéralisation de 2 images auditives	Type de stimulus	Variabilité interindividuelle
Effet du type de stimulus / test de similarité	ANOVA RM	Similarité	Type de stimulus	Variabilité interindividuelle

Des corrélations de Spearman ont été utilisées pour comparer le test de similarité aux mesures de fusion binaurale et pour comparer les données démographiques aux résultats obtenus. Un ajustement de Bonferroni a été effectué afin de contrôler le risque d'erreur de type I lié aux comparaisons multiples. Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel SPSS (version 22, Armonk NY). Pour toutes les analyses, le seuil de significativité alpha était fixé à 0,05. Pour les modèles mixtes logistiques, les modèles mixtes linéaires, et l'ANOVA à mesures

répétées, une correction de Bonferroni a été appliquée pour contrôler les comparaisons multiples par paires.

III. Résultats

1. Fonction binaurale

La Figure 10 présente, pour chaque participant, le pourcentage de stimuli perçu comme un seul objet auditif. Parmi tous les participants et tous les stimuli, $40,23 \pm 38,46$ % des stimuli ont été perçus comme un seul son et $59,77 \pm 38,46$ % des stimuli ont été perçus comme deux objets auditifs distincts. La perception des images auditives a montré une forte variabilité interindividuelle selon les catégories de stimuli, soulignant l'hétérogénéité des réponses entre les participants.

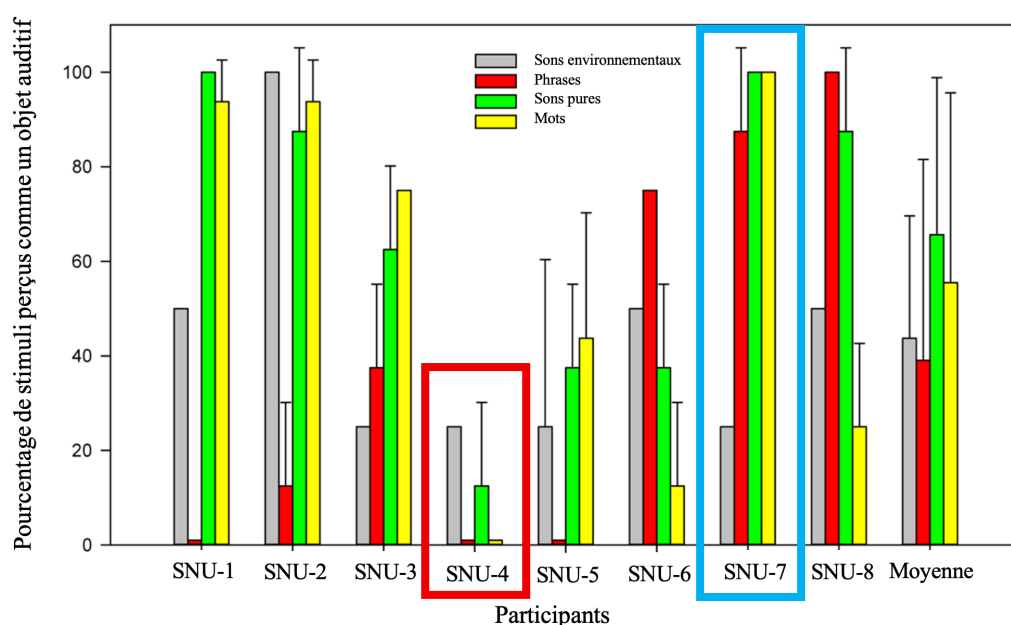


Figure 10 : Résultats du test de fusion binaurale.

En abscisse, les patients inclus sont présentés. En ordonnée, le pourcentage moyen de stimuli perçus comme un seul objet auditif est présenté. La barre présente l'écart type pour chaque type de stimulus.

Par exemple, le patient SNU-7 (rectangle bleu) percevait 68,9 % des sons comme un seul objet auditif alors que le patient SNU-4 (rectangle rouge) en percevait seulement 6,3%. En moyenne, $43,75 \pm 25,88\%$ des sons environnementaux ; $39,06 \pm 42,48\%$ des phrases ; $65,62 \pm 33,24\%$ des sons purs et $55,47 \pm 40,15\%$ des mots étaient perçus comme un seul objet auditif.

Une analyse par modèle logistique mixte binomial a été réalisée. Les résultats ont montré un effet significatif du type de stimulus sur le nombre d'images auditives perçues [$\chi^2(3, 320) = 10.9$, $p = 0.012$]. Les comparaisons post-hoc par paires corrigées, selon Bonferroni, ont montré

que la perception d'une seule image auditive était significativement plus importante pour les sons purs que pour les phrases ($p = 0.011$), sans autre différence significative entre les autres types de stimuli.

2. Latéralisation et diffusion

La *Figure 11* montre le degré de latéralisation et de diffusion des sons lorsque les participants entendaient un seul objet auditif. Un point situé à $+90^\circ$ indiquait une latéralisation complète du son du côté de l'IC. Un point à -90° indiquait un son latéralisé complètement du côté de l'oreille NE. Le point 0° indiquait un son parfaitement centré entre les deux oreilles. Une légère tendance à la latéralisation en direction de l'oreille NE a été observée, quand un seul objet auditif était perçu (moyenne = $-6,26 \pm 15,28$ degrés).

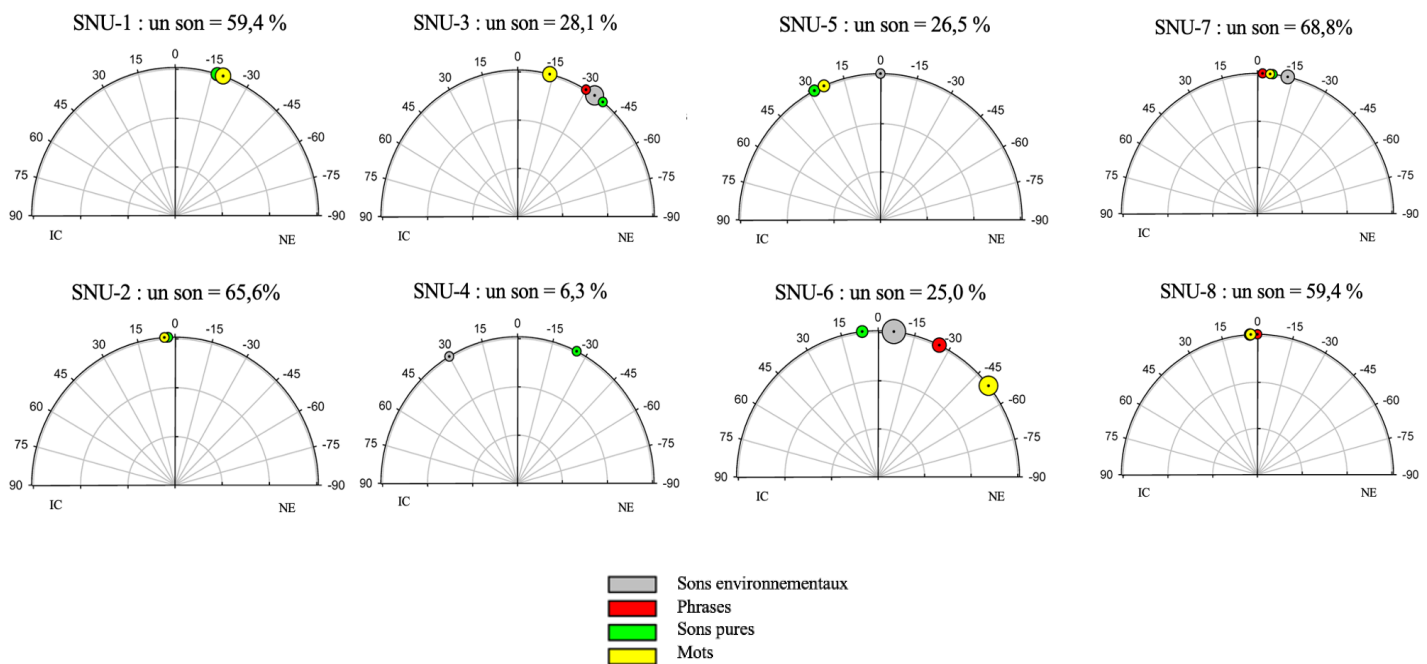


Figure 11 : Résultats des tests de latéralisation et diffusion des stimuli entendus comme un seul objet auditif. Le pourcentage de stimuli entendu comme un seul objet auditif est présenté pour chaque participant. La position des cercles indique le degré moyen de latéralisation pour chaque type de stimulus entendu. La taille du cercle indique le degré moyen de diffusion pour chaque type de stimulus entendu. Légendes : IC : Implant Cochléaire, NE : Oreille normoentendante.

La Figure 12 montre le degré de latéralisation et de diffusion des sons lorsque les participants entendaient deux images auditives distinctes. Certains participants ont latéralisé les sons au milieu (SNU-2, SNU-7, SNU-8). D'autres ont montré une latéralisation nettement plus étendue (SNU-3, SNU-4, SNU-5, SNU-6). On peut observer également une variabilité selon le type de stimulus. Par exemple, certains latéralisaient de manière plus importante les sons environnementaux (SNU-3, SNU-6) et d'autres latéralisaient, tous les sons quels qu'ils soient, sans différence (SNU-1, SNU-2, SNU-7).

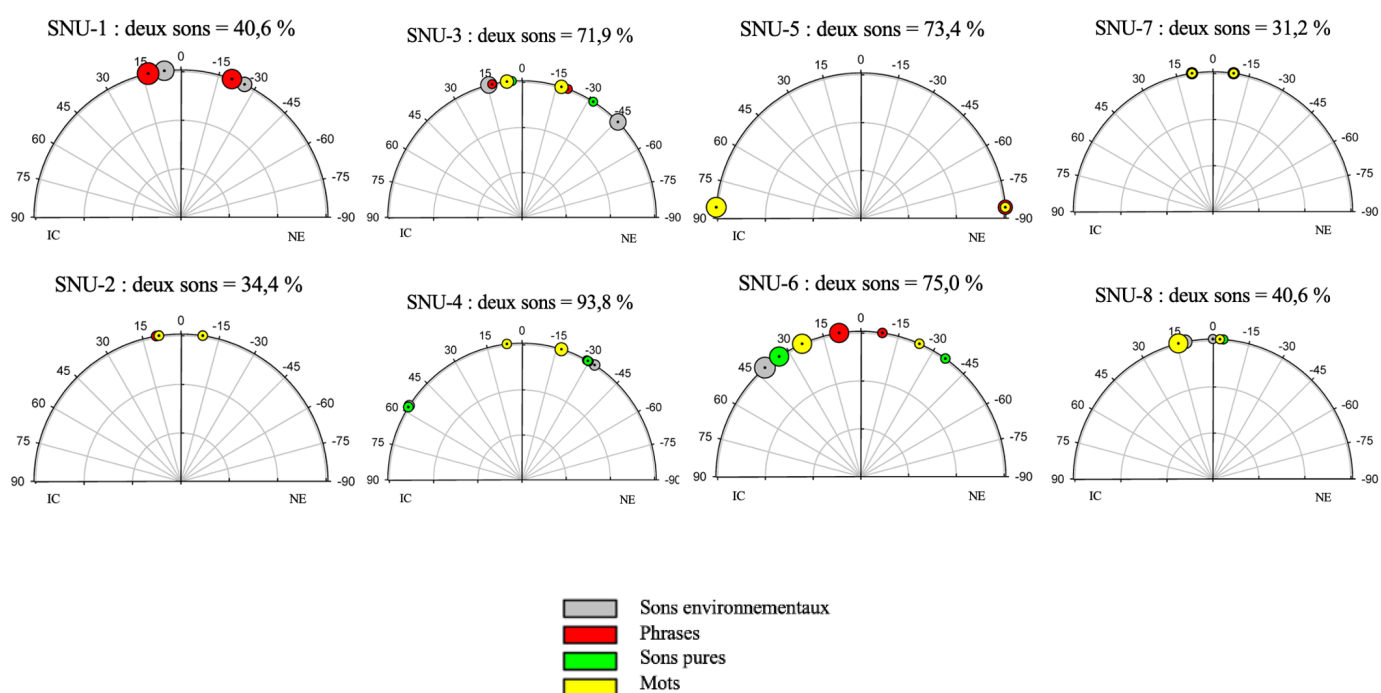


Figure 12 : Résultats des tests de latéralisation et diffusion des stimuli entendus comme 2 objets auditifs. Le pourcentage de stimuli entendu comme 2 objets auditifs est présenté pour chaque participant. La position des cercles indique le degré moyen de latéralisation pour chaque type de stimulus entendu. La taille du cercle indique le degré moyen de diffusion pour chaque type de stimulus entendu. Légende : IC : Implant Cochléaire, NE : Oreille normoentendante.

Quand deux objets auditifs étaient perçus, le degré de latéralisation a été calculé pour chaque stimulus comme la différence absolue entre les valeurs de latéralisation mesurées pour la quantifier indépendamment de sa direction vers l'IC ou l'oreille NE. Pour SNU-5, les deux stimuli entendus étaient complètement latéralisés aux extrêmes suggérant une absence de fusion de ces stimuli. Pour SNU-2, SNU-7 et SNU-8, les stimuli étaient latéralisés proche du centre,

ce qui suggère l'existence d'un certain niveau de fusion. Parmi tous les stimuli et tous les participants, la latéralisation moyenne était de $57,11 \pm 56,67$ degrés donc vers l'IC. La moyenne de latéralisation était de $60 \pm 55,31$ degrés pour les sons environnementaux, $53,82 \pm 57,70$ degrés pour les phrases, $66,66 \pm 58,73$ degrés pour les sons purs et $54,49 \pm 57,64$ degrés pour les mots. Un modèle linéaire mixte n'a pas montré d'effet significatif du type de stimulus sur la latéralisation [$F(3, 16) = 1,49$; $p = 0,254$].

Les patients indiquaient la netteté du ou des sons entendus en cliquant sur l'icône correspondante. Les résultats de ce test sont représentés dans la *Figure 13*. Un son clair (rond noir) avait une valeur nominale de 0. Un son légèrement diffus (ovale gris) avait une valeur nominale de 0,5. Un son flou (ovale gris clair) avait une valeur nominale de 1.

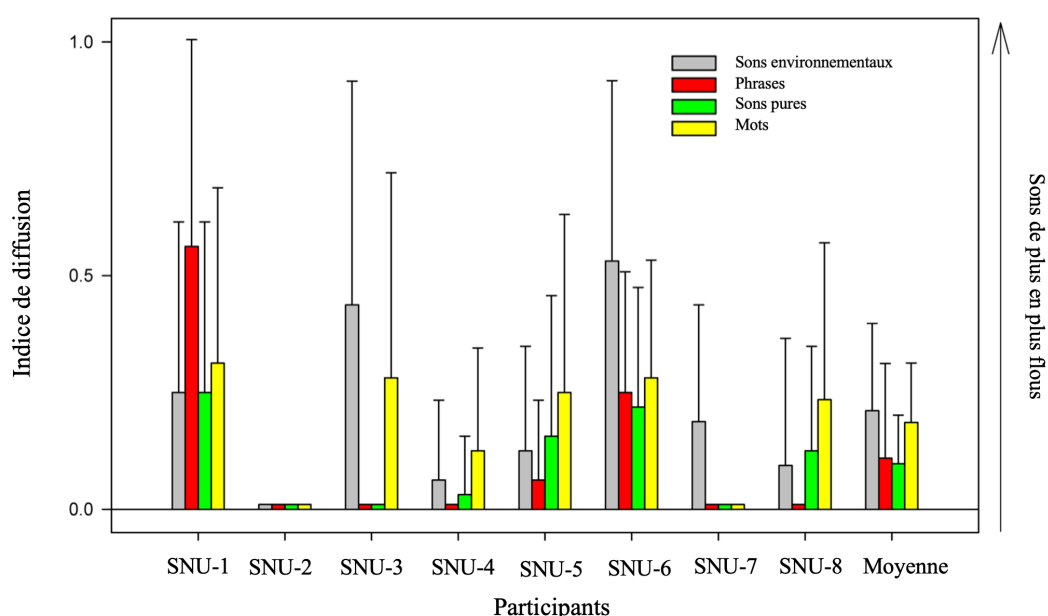


Figure 13 : Résultats du test de diffusion pour chaque participant et pour chaque type de stimulus. Le graphique regroupe les données perçues comme un objet et deux objets auditifs. En abscisse, les patients inclus sont présentés et en ordonnée, l'indice moyen de diffusion est présenté. Plus l'indice est bas, plus le son est clair. La barre présente l'écart type pour chaque type de stimulus.

On trouvait une grande variabilité de la diffusion entre les patients et entre le type de stimulus. Quand un seul objet auditif était perçu, l'index de diffusion moyen était de $0,13 \pm 0,27$, indiquant un objet auditif plutôt clair, net et précis. Quand deux objets auditifs étaient perçus, l'index moyen de diffusion était de $0,22 \pm 0,32$ pour les sons latéralisés du côté de l'IC

et $0,16 \pm 0,31$ pour les sons latéralisés du côté NE. La moyenne de la diffusion pour tous les patients et pour tous types de stimuli était de $0,17 \pm 0,31$, suggérant une diffusion du son faible à modéré. Cependant, les données étaient très variables entre les participants. Par exemple, les stimuli les plus diffus étaient les sons environnementaux pour SNU-4 et SNU-6 et les mots pour SNU-1, SNU-5 et SNU-8. Une analyse logistique multinomiale a montré que le type de stimulus avait un effet significatif sur l'index de diffusion [$\chi^2(3, 640) = 15,2, p = 0,002$]. Les comparaisons par paires corrigées, selon Bonferroni, ont montré que la diffusion était significativement plus grande pour les sons environnementaux et les mots que pour les phrases ($p = 0,009$) et les sons purs ($p = 0,011$), sans différence significative entre les autres types de stimuli.

3. Étude de similarité

Le stimulus était envoyé en premier dans l'oreille NE puis dans l'IC. Les patients devaient évaluer la similarité du son entendu entre 0 (différence maximale) et 10 (sons parfaitement identiques). La Figure 14 illustre ces résultats.

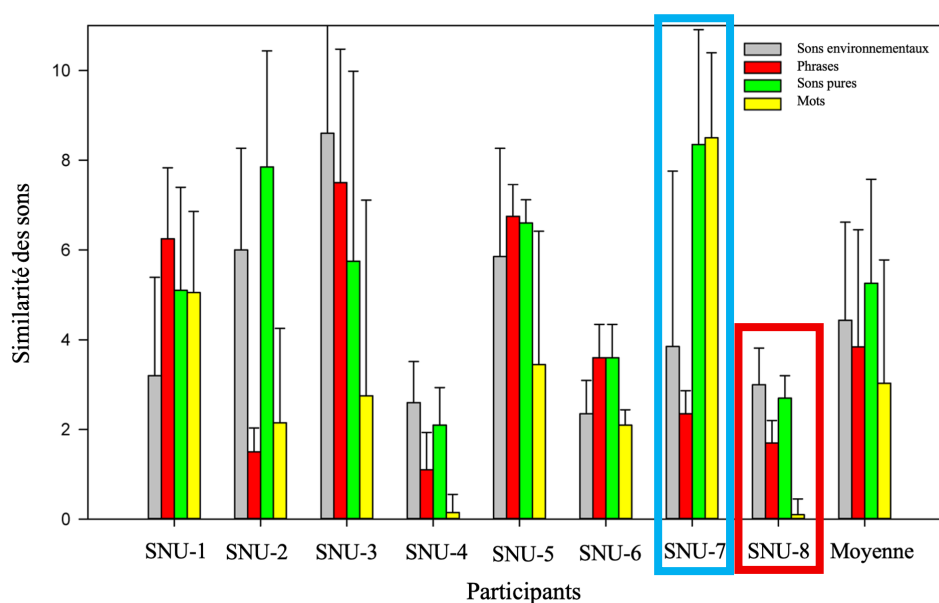


Figure 14 : Résultats de l'étude de similarité entre l'oreille NE et l'IC pour chaque participant et pour chaque type de stimulus. En abscisse, les patients inclus sont présentés et en ordonnée, la moyenne du score de similarité des sons est présentée. La barre présente l'écart type pour chaque type de stimulus.

On trouvait une grande variabilité interindividuelle, tant au niveau des évaluations globales de la qualité sonore qu'entre les différents types de stimuli. Par exemple, les mots étaient perçus comme le type le plus similaire entre les deux oreilles pour le patient SNU-7 (rectangle bleu) et le plus éloigné pour le patient SNU-8 (rectangle rouge). Les moyennes étaient de $4,45 \pm 2,86$ pour les sons environnementaux, $3,86 \pm 2,58$ pour les phrases, $5,28 \pm 2,71$ pour les sons purs, et $3,05 \pm 2,86$ pour les mots. Une étude ANOVA à mesures répétées n'a pas montré de différence significative de similarité entre les différents types de stimuli [$F(3, 21) = 1,93, p = 0,156$].

4. Score de qualité de la vie SSQ16

La moyenne du score total était de $6,28 \pm 1,95$. La moyenne des scores pour chaque catégorie (audition de la parole, audition spatiale, qualité de l'audition) était respectivement de $5,86 \pm 2,40$; $5,42 \pm 2,03$ et $7,43 \pm 2,06$.

5. Corrélations

Nous avons évalué l'effet de l'âge, de l'expérience avec l'IC et de la qualité de vie sur les données de fusion, les données de similarité et les données démographiques par des analyses de corrélation de Spearman. Une seule corrélation significative entre la fusion et la similarité des sons a été observée pour les « mots » ($\rho = 0,80, p = 0,010$). La perception d'une seule image auditive n'était pas corrélée significativement à l'âge au moment du test ($\rho = -0,48 ; p = 0,207$), ni à l'expérience avec l'IC ($\rho = -0,07 ; p = 0,839$), ni au score de qualité de vie SSQ16 ($\rho = 0,29 ; p = 0,460$).

IV. Discussion

Notre étude montre une grande variabilité interindividuelle autant dans l'étude de la fusion que celle dans celle de la similarité des sons. Le type de stimulus affecte significativement la perception d'un seul objet auditif, la diffusion des sons et la similarité des « mots ». Le type de stimulus n'influe pas de manière significative sur la latéralisation des sons, ni sur la similarité des bruits environnementaux, des sons purs et des phrases.

Chez nos patients, parmi tous les types de stimuli, un seul objet auditif était perçu dans seulement $40,23 \pm 38,46\%$ du temps. La fusion était donc moins importante chez nos patients IC-SNU que chez les patients implantés bilatéraux, étudiés précédemment dans la littérature [22, 23] où la perception d'une seule image auditive atteignait 73 à 77 % des cas. Ces différences de fusion pourraient être dues, en partie, à un plus grand décalage de fréquence interaural chez les IC-SNU que chez les patients implantés bilatéraux, ainsi qu'à une plus grande similarité des sons perçus par les patients implantés bilatéraux que par les patients IC-SNU.

La méthode de stimulation peut également influencer sur les résultats. Dans notre étude, le microphone a été contourné pour contrôler les stimuli grâce au DAI. Cela peut amplifier les différences entre les stimulations électriques et acoustiques et diminuer la fusion (*Table 3*). Les études montrent une meilleure fusion chez les patients implantés bilatéraux où on passait par le microphone des IC [22, 23].

Table 3 : Différence entre MAI et DAI

	Passage par le microphone	Stimulation précise des électrodes	Risque de parasites (bruit)
Microphone audio input (MAI)	Oui	Oui Modulée par traitement du son réel	Oui
Entrée directe audio (DAI)	Non	Oui Signal contrôlé et propre	Non

Les patients étudiés dans notre étude, ont montré une certaine sensibilité au type de stimulus pour les tests de fusion et de similarité. Cependant, ces résultats étaient inconstants (*Figure 11*

et 14). La perception d'une seule image auditive était significativement plus importante avec les sons purs et les mots qu'avec les sons environnementaux et les phrases. Il est possible que la durée relativement plus courte des sons purs et des mots, facilite la fusion par rapport aux phrases et aux sons environnementaux. Chez les patients NE, la fusion binaurale peut se dégrader avec l'augmentation de la durée du stimulus [37]. Il est difficile de tirer des conclusions de nos données, excepté, qu'utiliser un seul type de stimulus (habituellement des sons purs) pour mesurer la fusion, ne serait pas représentatif de la fusion binaurale globale. Intuitivement, nous nous attendions à ce que les stimuli se ressemblant le plus lors du test de similarité montreraient plus de fusion. Or, une seule relation significative, entre la fusion et la similarité, a été observée, et ce, pour les « mots ». La différence de présentation du stimulus (simultanée pour le test de fusion et alternée pour l'étude de similarité) a pu contribuer au profil des résultats obtenus.

- Limitations de l'étude

Les données de cette étude étaient très variables entre nos patients IC-SNU, rendant difficile l'établissement de conclusions solides. Seulement 8 patients ont été inclus en raison d'un effectif local restreint de patients. En inclure plus, pourrait ne pas diminuer la variabilité interindividuelle des résultats. Une autre limitation de l'étude serait la méthode de présentation du stimulus (insert et DAI). Elle était nécessaire pour isoler et contrôler les sons, mais ne reflète pas l'environnement sonore réel d'un patient IC-SNU. En condition d'écoute habituelle, les IC-SNU utilisent le microphone intégré à l'IC. Ces conditions amélioreraient la fusion. Reproduire l'environnement sonore en contexte clinique est incertain.

Enfin, il est probable que les patients IC-SNU rencontrent un décalage interaural des fréquences. Il n'a pas été estimé dans notre étude. La correspondance tonale entre les signaux acoustiques et électriques a été utilisée pour estimer ce décalage interaural chez des patients bimodaux (IC d'un côté et AA en controlatéral) et IC-SNU [26, 28, 29, 38 - 40]. Mais cette

technique peut entraîner des différences importantes entre les stimuli acoustiques et électriques, provoquer une perception sonore différente entre les deux côtés et altérer la fusion binaurale.

V. Conclusion

À notre connaissance, c'est la première étude qui mesure la fusion binaurale chez des patients IC-SNU. Nous avons montré que la fusion était limitée et moins importante chez les patients IC-SNU que chez les patients implantés bilatéraux. On retrouvait une grande variabilité interindividuelle de fusion binaurale et de similarité entre l'oreille NE et l'IC. Il n'y avait pas d'effet constant du type de stimulus (vocaux ou non vocaux) sur la fusion, même si quelques participants ont montré une sensibilité plus accrue à certains types de stimuli. La fusion était significativement corrélée au test de similarité uniquement pour les mots. La diffusion des stimuli était significativement plus large pour les sons environnementaux et les mots que pour les phrases et les sons purs.

La fusion limitée des patients IC-SNU pourrait s'expliquer en partie par des différences entre les schémas de stimulation acoustique et électrique, ainsi que par le décalage fréquentiel interaural.

VI. Références

1. WHO | Estimates. WHO <http://www.who.int/deafness/estimates/en/>.
2. Lahlou, Ghizlene & Daoudi, H. & Ambert-Dahan, Emmanuèle & Flament, J. & Carillo, Chester & Borel, Stephanie & Isabelle, Mosnier. (2024). Implantation cochléaire chez l'adulte. EMC - Oto-rhino-laryngologie. 39. 1-12. 10.1016/S0246-0351(24)46943-2.
3. Mudry, A., & Mills, M. (2013). The early history of the cochlear implant: a retrospective. JAMA otolaryngology-- head & neck surgery, 139(5), 446–453. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2013.293>
4. Rubinstein J. T. (2004). How cochlear implants encode speech. Current opinion in otolaryngology & head and neck surgery, 12(5), 444–448. <https://doi.org/10.1097/01.moo.0000134452.24819.c0>
5. Marx, M., Mosnier, I., Venail, F., Mondain, M., Uziel, A., Bakhos, D., Lescanne, E., N'Guyen, Y., Bernardeschi, D., Sterkers, O., Deguine, O., Lepage, B., Godey, B., Schmerber, S., Bonne, N. X., Vincent, C., & Fraysse, B. (2021). Cochlear implantation and other treatments in single-sided deafness and asymmetric hearing loss: Results of a national multicenter study including a randomized controlled trial. *Audiology and Neurotology*, 26(6), 414-424. <https://doi.org/10.1159/000514085>
6. Arndt, S., Aschendorff, A., Laszig, R., Beck, R., Schild, C., Kroeger, S., Ihorst, G., & Wesarg, T. (2011). Comparison of pseudobinaural hearing to real binaural hearing rehabilitation after cochlear implantation in patients with unilateral deafness and tinnitus. *Otology and Neurotology* 32(1), 39–47. <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181fcf271>
7. Cabral Junior, F., Pinna, M. H., Alves, R. D., Malerbi, A. F., & Bento, R. F. (2016). Cochlear implantation and single-sided deafness: A systematic review of the literature. *International Archives of Otorhinolaryngology*, 20(1), 69–75. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1559586>

8. Legris, E., Galvin, J., Roux, S., Gomot, M., Aoustin, J. M., Marx, M., He, S., & Bakhos, D. (2018). Cortical reorganization after cochlear implantation for adults with single-sided deafness. *PloS one*, 13(9), e0204402. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204402>
9. Stenfelt, S., Zeitooni, M., & Mäki-Torkko, E. (2024). Evaluating binaural hearing capabilities in individuals with sensorineural hearing loss through bilateral bone conduction stimulation. *Scientific reports*, 14(1), 28847. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80379-1>
10. Giardina, C. K., Formeister, E.J., & Adunka, O.F. (2014). Cochlear Implants in Single-Sided Deafness. *Current Surgical Reports*, 2(12), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40137-014-0075-9>
11. Ross, D. S., Visser, S. N., Holstrum, W. J., Qin, T., & Kenneson, A. (2010). Highly variable population-based prevalence rates of unilateral hearing loss after the application of common case definitions. *Ear and hearing*, 31(1), 126–133. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181bb69db>
12. Dillon, M. T., Buss, E., Anderson, M. L., King, E. R., Deres, E. J., Buchman, C. A., Brown, K. D., & Pillsbury, H. C. (2017a). Cochlear implantation in cases of unilateral hearing loss: initial localization abilities. *Ear and Hearing*, 38(5), 611–619. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000430>
13. Galvin, J. J., 3rd, Fu, Q. J., Wilkinson, E. P., Mills, D., Hagan, S. C., Lupo, J. E., Padilla, M., & Shannon, R. V. (2019). Benefits of Cochlear implantation for single-sided deafness: Data from the House Clinic-University of Southern California-University of California, Los Angeles Clinical trial. *Ear and Hearing*, 40(4), 766–781. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000671>
14. Dorbeau, C., Galvin, J., Fu, Q. J., Legris, E., Marx, M., & Bakhos, D. (2018). Binaural Perception in single-sided deaf cochlear implant users with unrestricted or restricted

- acoustic hearing in the non-implanted ear. *Audiology and Neuro-otology*, 23(3), 187–197.
<https://doi.org/10.1159/000490879>
15. Finke, M., Strauß-Schier, A., Kludt, E., Büchner, A., & Illg, A. (2017). Speech intelligibility and subjective benefit in single-sided deaf adults after cochlear implantation. *Hearing Research*, 348, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.03.002>
16. Mertens, G., Kleine Punte, A., De Bodt, M., & Van de Heyning, P. (2015). Binaural auditory outcomes in patients with postlingual profound unilateral hearing loss: 3 years after cochlear implantation. *Audiology and Neuro-otology*, 20 Suppl 1, 67–72.
<https://doi.org/10.1159/000380751>
17. Mertens, G., De Bodt, M., & Van de Heyning, P. (2017). Evaluation of long-term cochlear implant use in subjects with acquired unilateral profound hearing loss: Focus on binaural auditory outcomes. *Ear and Hearing*, 38(1), 117–125.
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000359>
18. Távora-Vieira, D., Marino, R., Acharya, A., & Rajan, G. P. (2015). The impact of cochlear implantation on speech understanding, subjective hearing performance, and tinnitus perception in patients with unilateral severe to profound hearing loss. *Otology and Neurotology*, 36(3), 430–436. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000707>
19. Grossmann, W., Brill, S., Moeltner, A., Mlynski, R., Hagen, R., & Radloff, A. (2016). Cochlear implantation improves spatial release from masking and restores localization abilities in single-sided deaf patients. *Otology and Neurotology*, 37(6), 658–664.
<https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000001043>
20. Dillon, M. T., Buss, E., Rooth, M. A., King, E. R., Deres, E. J., Buchman, C. A., Pillsbury, H. C., & Brown, K. D. (2017b). Effect of cochlear implantation on quality of life in adults with unilateral hearing loss. *Audiology and Neuro-otology*, 22(4-5), 259–271.
<https://doi.org/10.1159/000484079>

21. García, J. M., Urquijo, D. P., Puerta, M., Mosquera, C. A., Hernández, L. M., Aparicio, M. L., Barón, C., Otoyá Tono, A. M., & Peñaranda, A. (2020). Cochlear implant in patients with single sided deafness: hearing results and communicative benefits. *Cochlear Implants International*, 21(3), 136–144. <https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1691321>
22. Goupell, M. J., Stoelb, C., Kan, A., & Litovsky, R. Y. (2013). Effect of mismatched place-of-stimulation on the salience of binaural cues in conditions that simulate bilateral cochlear-implant listening. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 2272–2287. <https://doi.org/10.1121/1.4792936>
23. Fitzgerald, M. B., Kan, A., & Goupell, M. J. (2015). Bilateral loudness balancing and distorted spatial perception in recipients of bilateral cochlear implants. *Ear and Hearing*, 36(5), e225–e236. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000174>
24. Kan, A., Litovsky, R. Y., & Goupell, M. J. (2015). Effects of interaural pitch matching and auditory image centering on binaural sensitivity in cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 36(3), e62–e68. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000135>
25. Kan, A., Goupell, M. J., & Litovsky, R. Y. (2019). Effect of channel separation and interaural mismatch on fusion and lateralization in normal-hearing and cochlear-implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(2), 1448. <https://doi.org/10.1121/1.5123464>
26. Oh, Y., & Reiss, L. A. J. (2020). Binaural pitch fusion: Binaural pitch averaging in cochlear implant users with broad binaural fusion. *Ear and Hearing*, 41(6), 1450–1460. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000866>
27. Zhang, H., Zhou, Y., & Reiss, L. (2023). Editorial: Listening with two ears - new insights and perspectives in binaural research. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1323330. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1323330>

28. Reiss, L. A., Ito, R. A., Eggleston, J. L., & Wozny, D. R. (2014). Abnormal binaural spectral integration in cochlear implant users. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology : JARO*, 15(2), 235–248. <https://doi.org/10.1007/s10162-013-0434-8>
29. Reiss, L. A., Eggleston, J. L., Walker, E. P., & Oh, Y. (2016). Two Ears Are Not Always Better than One: Mandatory Vowel Fusion Across Spectrally Mismatched Ears in Hearing-Impaired Listeners. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology : JARO*, 17(4), 341–356. <https://doi.org/10.1007/s10162-016-0570-z>
30. Oh, Y., & Reiss, L. A. J. (2017). Binaural pitch fusion: Pitch averaging and dominance in hearing-impaired listeners with broad fusion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(2), 780. <https://doi.org/10.1121/1.4997190>
31. Steel, M. M., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2015). Binaural fusion and listening effort in children who use bilateral cochlear implants: a psychoacoustic and pupillometric study. *PloS one*, 10(2), e0117611. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117611>
32. Francart, T., Wiebe, K., & Wesarg, T. (2018). Interaural time difference perception with a cochlear implant and a normal ear. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 19(6), 703–715. <https://doi.org/10.1007/s10162-018-00697-w>
33. Moulin, A., Pauzie, A., & Richard, C. (2015). Validation of a French translation of the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ) and comparison with other language versions. *International journal of audiology*, 54(12), 889–898. <https://doi.org/10.3109/14992027.2015.1054040>
34. Kerneis, S., Galvin, J. J., 3rd, Borel, S., Baqué, J., Fu, Q. J., & Bakhos, D. (2023). Preliminary evaluation of computer-assisted home training for French cochlear implant recipients. *PloS one*, 18(4), e0285154. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285154>
35. Suneel, D., Staisloff, H., Shayman, C. S., Stelmach, J., & Aronoff, J. M. (2017). Localization performance correlates with binaural fusion for interaurally mismatched

- vocoded speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3), EL276.
<https://doi.org/10.1121/1.5001903>
36. Kan, A., Stoelb, C., Litovsky, R. Y., & Goupell, M. J. (2013). Effect of mismatched place-of-stimulation on binaural fusion and lateralization in bilateral cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 2923–2936.
<https://doi.org/10.1121/1.4820889>
37. Perrott, D. R., Briggs, R., & Perrott, S. (1970). Binaural fusion: its limits as defined by signal duration and signal onset. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(2), 565–568. <https://doi.org/10.1121/1.1911929>
38. Reiss, L. A., Shayman, C. S., Walker, E. P., Bennett, K. O., Fowler, J. R., Hartling, C. L., Glickman, B., Lasarev, M. R., & Oh, Y. (2017). Binaural pitch fusion: Comparison of normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 1909. <https://doi.org/10.1121/1.4978009>
39. Baumann, U., Rader, T., Helbig, S., & Bahmer, A. (2011). Pitch matching psychometrics in electric acoustic stimulation. *Ear and Hearing*, 32(5), 656–662.
<https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e31821a4800>
40. Schatzer, R., Vermeire, K., Visser, D., Krenmayr, A., Kals, M., Voormolen, M., Van de Heyning, P., & Zierhofer, C. (2014). Electric-acoustic pitch comparisons in single-sided-deaf cochlear implant users: frequency-place functions and rate pitch. *Hearing Research*, 309, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.11.003>

VII. Annexes

1. Annexe 1 : l'Indice de Handicap lié aux Acouphènes : THI

Tinnitus Handicap Inventory (THI)

Instructions:

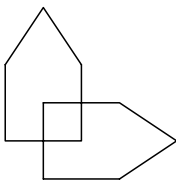
The purpose of this questionnaire is to identify difficulties that you may be experiencing because of your tinnitus.

		Yes	Sometimes	No
1	Because of your tinnitus, is it difficult for you to concentrate?	4	2	0
2	Does the loudness of your tinnitus make it difficult for you to hear people?	4	2	0
3	Does your tinnitus make you angry?	4	2	0
4	Does your tinnitus make you feel confused?	4	2	0
5	Because of your tinnitus, do you feel desperate?	4	2	0
6	Do you complain a great deal about your tinnitus?	4	2	0
7	Because of your tinnitus, do you have trouble falling to sleep at night?	4	2	0
8	Do you feel as though you cannot escape your tinnitus?	4	2	0
9	Does your tinnitus interfere with your ability to enjoy your social activities (such as going out to dinner, to the movies)?	4	2	0
10	Because of your tinnitus, do you feel frustrated?	4	2	0
11	Because of your tinnitus, do you feel that you have a terrible disease?	4	2	0
12	Does your tinnitus make it difficult for you to enjoy life?	4	2	0
13	Does your tinnitus interfere with your job or household responsibilities?	4	2	0
14	Because of your tinnitus, do you find that you are often irritable?	4	2	0
15	Because of your tinnitus, is it difficult for you to read?	4	2	0
16	Does your tinnitus make you upset?	4	2	0
		Yes	Sometimes	No
17	Do you feel that your tinnitus problem has placed stress on your relationships with members of your family and friends?	4	2	0
18	Do you find it difficult to focus your attention away from your tinnitus and on other things?	4	2	0
19	Do you feel that you have no control over your tinnitus?	4	2	0
20	Because of your tinnitus, do you often feel tired?	4	2	0
21	Because of your tinnitus, do you feel depressed?	4	2	0
22	Does your tinnitus make you feel anxious?	4	2	0
23	Do you feel that you can no longer cope with your tinnitus?	4	2	0
24	Does your tinnitus get worse when you are under stress?	4	2	0
25	Does your tinnitus make you feel insecure?	4	2	0

De 0 à 16	Handicap léger (uniquement perceptible dans un environnement calme)	NIVEAU 1
De 18 à 36	Handicap modéré (facilement couvert par des sons provenant de l'environnement et facilement oublié lors d'activités)	NIVEAU 2
De 38 à 56	Handicap moyen (perçu en présence d'un bruit de fond : les activités quotidiennes peuvent malgré tout être effectuées)	NIVEAU 3
De 58 À 76	Handicap lourd (presque toujours perceptible, il conduit au dérèglement des structures du sommeil et est susceptible de porter atteinte aux activités quotidiennes)	NIVEAU 4
De 76 à 100	Handicap invalidant (constamment perceptible, structures du sommeil dérégulées, difficultés rencontrées pour toute activité)	NIVEAU 5

2. Annexe 2 : Mini Mental State Examination

MINI-MENTAL TEST DE FOLSTEIN

Score maximal	Score	
5		ORIENTATION (1 point par réponse juste) - En quelle année sommes-nous ? - Quelle saison ? - Quel mois ? - Quelle est la date ? - Quel est le jour ?
5		- Dans quelle pays sommes-nous ? - Quelle ville ? - Quel département ? - Quel est le nom de l'hôpital ? (ou adresse du médecin) - Quelle salle ? (ou endroit, cabinet, etc,...)
3		APPRENTISSAGE Donner 3 noms d'objets au rythme de un par seconde (ex : cigare, fleur, porte) ; à la répétition immédiate compter 1 par réponses correctes. Répéter jusqu'à ce que les 3 mots soient appris. Compter le nombre d'essais (ne pas coter).
5		ATTENTION ET CALCUL Compter à partir de 100 en retirant 7 à chaque fois. Arrêter après 5 soustractions. Noter le nombre de réponses correctes.
3		RAPPEL Demander les 3 noms d'objets présentés auparavant (1 point par mot correct)
9		LANGAGE - Dénommer un stylo, une montre (2 points) - Répéter : "Il n'y a pas de mais, ni de si, ni de et" (1 point) - Exécuter un ordre triple : "Prenez un papier dans la main droite, pliez le en deux et jetez le sur le plancher" (1 point par item correct) - Copier le dessin suivant (1 point) : Tous les angles doivent être présents  - Ecrire une phrase spontanée (au moins 1 sujet et 1 verbe, sémantiquement correcte, mais la grammaire et l'orthographe son indifférentes (1 point)
TOTAL (30)		
Apprécier le niveau de vigilance sur un continuum : Vigile Obnubilé Stupeur Coma		

Détérioration intellectuelle légère entre 21 et 15 points ; modérée entre 5 et 15 ; sévère au-dessous de 5

3. Annexe 3 : Questionnaire SSQ16



Speech Spatial and Qualities of Hearing scale (SSQ) version 5.6. Version Française AM02.

Questionnaire d'habiletés auditives

Conseils pour répondre aux questions

Les questions suivantes concernent vos capacités et votre expérience en matière d'audition et d'écoute dans le cadre de situations diverses.

Pour chacune des questions, vous devez mettre la réponse sur l'échelle située à droite, à l'aide d'une croix, à l'endroit choisi entre 0 et 10. Une croix sur la valeur 10 signifie que vous êtes parfaitement capable de faire ce qui est décrit dans la question correspondante. Une croix sur la valeur 0 indique que vous ne pouvez pas faire ce qui est décrit.

Exemple :

0. Vous pouvez suivre une conversation avec une personne en face de vous, dans le calme.	Non, pas du tout	Oui, parfaitement
	++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++	
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	☐
Non applicable		

La question 0 se rapporte à votre capacité de suivre une conversation. Si vous êtes tout à fait capable de le faire, placez une croix sur l'extrémité droite de l'échelle, sur le nombre 10. Si vous êtes capable de suivre environ la moitié de la conversation dans une telle situation, placez la marque vers le milieu de l'échelle (le 5) et ainsi de suite. Si vous n'arrivez pas du tout à suivre une conversation, placez la croix sur le 0, à gauche de l'échelle.

Nous espérons que toutes les questions sont pertinentes au regard de votre vie quotidienne. Si ce n'est pas le cas pour certaines questions, veuillez cocher la case « non applicable ». Merci de bien vouloir expliquer en quelques mots à côté de la question la raison pour laquelle elle n'est pas pertinente dans votre cas.

Date: _____



Speech Spatial and Qualities of Hearing scale (SSQ), version 5.6. Version Française AM.02. Partie 1/3

1ère partie : Audition de la parole

1. Vous discutez avec une autre personne dans une pièce dans laquelle un téléviseur est allumé. Pouvez-vous suivre les propos de votre interlocuteur sans baisser le son du téléviseur ?	Non, pas du tout ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
2. Vous discutez avec quelqu'un dans un salon calme et dont le sol est recouvert de moquette. Pouvez-vous suivre ce que dit cette personne ?	Non, pas du tout ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
3. Vous êtes assis autour d'une table avec un groupe de cinq personnes environ. L'endroit est calme. Vous pouvez voir toutes les personnes du groupe. Pouvez-vous suivre la conversation ?	Non, pas du tout ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
4. Vous êtes assis autour d'une table avec un groupe de cinq personnes environ, dans un restaurant animé. Vous pouvez voir toutes les personnes du groupe. Pouvez-vous suivre la conversation ?	Non, pas du tout ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
5. Vous discutez avec une autre personne. Il y a un bruit de fond continu (ventilateur ou eau qui coule par exemple). Pouvez-vous suivre ce que dit l'autre personne ?	Non, pas du tout ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ ++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable

6. Vous êtes assis autour d'une table avec un groupe de cinq personnes environ, dans un restaurant animé. Vous NE pouvez PAS voir toutes les personnes du groupe. Pouvez-vous suivre la conversation ?	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>
7. Vous discutez avec quelqu'un dans un endroit dans lequel l'écho est important, comme une église ou un hall de gare. Pouvez-vous suivre ce que dit cette personne ?	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>
8. Pouvez-vous avoir une conversation avec quelqu'un, lorsqu'une autre personne parle avec une voix de même hauteur (aussi grave ou aussi aiguë) que celle de votre interlocuteur ?	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>
9. Pouvez-vous discuter avec quelqu'un si une autre personne parle simultanément avec une voix de hauteur différente ? (voix plus grave ou plus aiguë)	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>
10. Vous écoutez la personne qui vous parle tout en essayant simultanément de suivre les informations à la télévision. Pouvez-vous suivre ce que disent les deux personnes ?	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>
11. Vous discutez avec quelqu'un dans une pièce dans laquelle beaucoup d'autres personnes parlent. Pouvez-vous suivre ce que vous dit votre interlocuteur ?	<i>Non, pas du tout</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Oui, parfaitement</i> <i>Non applicable</i>

12. Vous vous trouvez dans un groupe de personnes qui prennent la parole les unes après les autres. Pouvez-vous suivre facilement la conversation sans rater le début de ce que dit chaque personne ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i>  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
13. Pouvez-vous facilement avoir une conversation au téléphone ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i>  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
14. Vous êtes au téléphone avec quelqu'un et une autre personne, près de vous, commence à parler. Pouvez-vous suivre ce que disent les deux personnes ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i>  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>

2ème partie : Audition spatiale

1. Vous vous trouvez à l'extérieur, dans un endroit qui ne vous est pas familier. Vous entendez le bruit d'une tondeuse à gazon. Vous ne pouvez voir ni la tondeuse à gazon ni la personne qui l'utilise. Pouvez-vous indiquer tout de suite d'où vient le bruit ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
2. Vous êtes assis autour d'une table ou participez à une réunion avec plusieurs personnes. Vous ne pouvez pas voir toutes les personnes. Pouvez-vous dire où est chaque personne dès qu'elle prend la parole ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
3. Vous êtes assis entre deux personnes. L'une d'elles commence à parler. Pouvez-vous dire immédiatement, sans regarder, s'il s'agit de la personne assise à votre gauche ou à votre droite ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
4. Vous vous trouvez dans une maison inconnue. Tout est calme. Vous entendez une porte claquer. Pouvez-vous indiquer immédiatement d'où vient le bruit ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
5. Vous vous tenez dans la cage d'escalier d'un bâtiment, il y a des étages au-dessus et en dessous de vous. Vous entendez du bruit à un autre étage. Pouvez-vous indiquer facilement d'où vient le bruit ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>

6. Vous êtes à l'extérieur. Un chien aboie bruyamment. Pouvez-vous indiquer immédiatement où il se trouve, sans regarder ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
7. Vous êtes sur le trottoir d'une rue animée. Pouvez-vous entendre immédiatement de quelle direction un bus ou un camion arrive avant de l'avoir vu ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
8. Dans la rue, pouvez-vous dire à quelle distance se trouve une personne uniquement au son de sa voix ou de ses pas ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
9. Pouvez-vous indiquer à quelle distance se trouve un bus ou un camion, juste en entendant le bruit qu'il fait ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
10. Pouvez-vous dire, à partir du bruit fait par un bus ou un camion, dans quel sens il se déplace, par exemple de votre gauche à votre droite ou inversement ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
11. Pouvez-vous indiquer dans quelle direction une personne se déplace, uniquement au son de sa voix ou de ses pas, par exemple de votre gauche à votre droite ou inversement ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>

12. Pouvez-vous dire si une personne s'éloigne ou se rapproche de vous, uniquement à partir de sa voix ou du bruit de ses pas ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
13. Pouvez-vous dire si un bus ou un camion s'éloigne ou se rapproche de vous, uniquement à partir du bruit qu'il fait ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
14. Avez-vous l'impression que les bruits et sons que vous entendez se trouvent plutôt à l'intérieur de votre tête ou plutôt dans le monde extérieur ?	<i>A l'intérieur de ma tête</i> <i>Dans le monde extérieur</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
15. Les choses ou les personnes que vous entendez et que vous ne pouvez pas voir dans un premier temps sont-elles généralement <u>plus près de vous</u> que vous ne l'aviez imaginé avant de les voir ?	<i>Oui, beaucoup plus près</i> <i>Non, pas plus près</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
16. Les choses ou les personnes que vous entendez et que vous ne pouvez pas voir dans un premier temps sont-elles <u>plus éloignées</u> que vous ne l'aviez imaginé avant de les voir ?	<i>Oui, beaucoup plus loin</i> <i>Non, pas plus loin</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
17. Pouvez-vous évaluer correctement l'endroit d'où les sons proviennent ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>

Moulin, Pautz, Richard, (2015) International Journal of Audiology, 54(12):889-98. SSQ 7 / 10

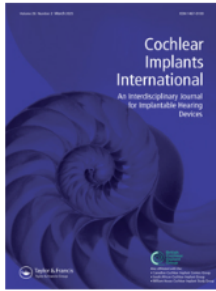
3ème partie : Qualité d'audition

1. Imaginez que vous entendez deux choses en même temps, par exemple de l'eau qui coule dans un lavabo et la radio. Avez-vous l'impression que ces deux bruits sont parfaitement distincts l'un de l'autre ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
2. Lorsque vous entendez plusieurs sons à la fois, pouvez-vous les distinguer clairement les uns des autres ou avez-vous l'impression qu'il s'agit d'un seul bruit confus ?	<i>Un bruit confus</i> <i>Sons distincts</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
3. Vous vous tenez dans une pièce et vous entendez de la musique à la radio. Une autre personne parle dans la pièce. Entendez-vous la voix de la personne comme clairement séparée de la musique ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
4. Pouvez-vous reconnaître facilement les différentes personnes que vous connaissez, au son de leur voix ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
5. Pouvez-vous reconnaître facilement les différents morceaux de musique que vous connaissez ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>
6. Pouvez-vous différencier certains bruits, par exemple une voiture par rapport à un bus ou de l'eau qui bout par rapport à la nourriture qui frit dans une poêle ?	<i>Non, pas du tout</i> <i>Oui, parfaitement</i> +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ <i>Non applicable</i>

7. Lorsque vous écoutez de la musique, pouvez-vous discerner les différents instruments ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
8. Lorsque vous écoutez de la musique, est-ce qu'elle vous semble claire et naturelle ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
9. Les bruits quotidiens que vous entendez facilement, vous semblent-ils clairs et distincts (non brouillés, non mélangés) ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
10. Les voix des autres personnes vous semblent-elles claires et naturelles ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
11. Les bruits quotidiens que vous entendez vous paraissent-ils naturels ou artificiels ?	Artificiels Naturels +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
12. Votre propre voix vous semble t'elle naturelle ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable

13. Pouvez-vous facilement juger de l'humeur d'une personne au son de sa voix ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
14. Devez-vous vous concentrer intensément lorsque vous écoutez quelqu'un ou quelque chose ?	Oui, concentration intense Non, pas du tout +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
15. Devez-vous faire beaucoup d'efforts pour comprendre ce qui se dit au cours d'une conversation avec d'autres personnes ?	Oui, beaucoup d'efforts Non, aucun effort +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
16. Lorsque vous conduisez une voiture, pouvez-vous facilement entendre ce que dit la personne assise à côté de vous ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
17. Lorsque vous êtes passager d'une voiture, pouvez-vous facilement entendre ce que dit le conducteur assis à côté de vous ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable
18. Pouvez-vous ignorer facilement les autres bruits, lorsque vous essayez d'écouter quelque chose ?	Non, pas du tout Oui, parfaitement +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ +++++ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☐ Non applicable

VIII. Article publié



Cochlear Implants International

An Interdisciplinary Journal for Implantable Hearing Devices

ISSN: 1467-0100 (Print) 1754-7628 (Online) Journal homepage: www.tandfonline.com/journals/ycii20

Binaural fusion in single-sided deaf cochlear implant users

Lucrèce de Villars, John J. Galvin, Qian-jie Fu, Faustine Legrand, Mathieu Robier & David Bakhos

To cite this article: Lucrèce de Villars, John J. Galvin, Qian-jie Fu, Faustine Legrand, Mathieu Robier & David Bakhos (25 Jul 2025): Binaural fusion in single-sided deaf cochlear implant users, Cochlear Implants International, DOI: [10.1080/14670100.2025.2535851](https://doi.org/10.1080/14670100.2025.2535851)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/14670100.2025.2535851>



Published online: 25 Jul 2025.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 42



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ycii20>

Binaural fusion in single-sided deaf cochlear implant users

Lucrèce de Villars¹, John J. Galvin^{2,3}, Qian-jie Fu^{3,4}, Faustine Legrand⁵,
Mathieu Robier⁵, David Bakhos^{1,2,3}

¹CHRU de Tours, service ORL et Chirurgie Cervico-Faciale, 2 boulevard Tonnellé, Tours 37044, France, ²INSERM U1253, iBrain, Université de Tours, 10 boulevard Tonnellé, Tours 37000, France, ³House Institute Foundation, Los Angeles, CA 90017, USA, ⁴Department of Head and Neck Surgery, David Geffen School of Medicine, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA, ⁵Audilab, 16 rue Bannier, Orléans 45000, France

Objective: Single-sided deaf (SSD) cochlear implant (CI) patients often have difficulty with spatial perception, which may be partly due to limited fusion of acoustic and electric hearing. In the present study, we investigated binaural fusion in SSD CI patients.

Methods: Eight adult SSD CI patients participated in the study. Binaural fusion was measured using speech and non-speech stimuli. Listeners indicated whether they heard 1 or 2 auditory images, the diffuseness of the sound, and lateralization of sounds in a virtual space.

Results: Binaural fusion and similarity ratings were highly variable across participants. Across all participants and stimuli, a single auditory image was perceived only $40.23 \pm 38.46\%$ of the time. Sensitivity to stimulus types varied greatly across participants, but in no consistent manner. Diffuseness was significantly larger for words and environmental sounds than for sentences and tones. When one image was perceived, stimuli were generally lateralized towards the center. When two images were perceived, the mean lateralization was 57.11 ± 56.67 degrees.

Conclusions: Binaural fusion in the present SSD CI users was much less than observed in previous studies with bilateral CI users, possibly due to differences in stimulation patterns between acoustic and electric hearing and interaural frequency mismatch.

Introduction

For individuals with normal hearing, binaural fusion is a complex auditory phenomenon in which the brain integrates sounds received by both ears to form a single auditory image. This process is critical for sound localization, speech understanding in noisy environments, and spatial perception. Binaural perception is unavailable for persons with single sided deafness (SSD), who have normal hearing in one ear and severe to profound hearing loss in the other (Giardina et al., 2014). SSD disrupts the brain's access to binaural hearing, leading to difficulties in localizing sounds and understanding speech in noisy environments. Binaural perception is essential for these functions, and its absence due to SSD reduces the quality of life of affected individuals (Arndt et al., 2011; Cabral Junior et al., 2016; Dillon et al., 2017a; Galvin et al., 2019; Marx et al., 2021).

SSD rehabilitation sometimes involves contralateral routing of the signal (CROS) or bone-anchored

hearing system (BAHS) approaches (Cabral Junior et al., 2016; Marx et al., 2021). Unilateral cochlear implantation has been recommended for SSD patients with moderate to severe tinnitus after trial failure with CROS or BAHS (Marx et al., 2021). Cochlear implantation is allowed in case of severe to profound SSD with validated tinnitus (tinnitus handicap inventory questionnaire score >50 or visual analog scale score >6) after trying a CROS or BAHS (Finke et al., 2017). Different from CROS or BAHS, cochlear implants (CIs) stimulate the deaf cochlea and therefore may offer some restoration of binaural perception in SSD patients. Previous studies have shown that CIs can significantly reduce tinnitus and improve sound source localization, masked speech understanding, and quality of life in SSD patients (Cabral Junior et al., 2016; Dillon et al., 2017a, 2017b; Dorbeau et al., 2018; Finke et al., 2017; Firszt et al., 2012; Galvin et al., 2019; García et al., 2020; Grossmann et al., 2016; Legris et al., 2018; Marx et al., 2021; Mertens et al., 2015, 2017; Távora-Vieira et al., 2015). Nonetheless, SSD CI users generally experience poorer spatial perception, speech perception, and

*Correspondence to: Lucrèce de Villars, CHRU de Tours, service ORL et Chirurgie Cervico-Faciale, 2 boulevard Tonnellé, Tours 37044, France. Email: lucrecedevillars@gmail.com

quality of life, compared to individuals with normal hearing (NH). However, there is great inter-subject variability in terms of localization and speech perception among SSD CI users (Dillon et al., 2017a, 2017b; Galvin et al., 2019). This variability may be partly due to the degree of interaural frequency mismatch, where the same input frequency stimulates different regions of the cochlea in the acoustic hearing (AH) ear and the CI ear. Interaural mismatch has been shown to limit binaural fusion (Fitzgerald et al., 2015; Goupell et al., 2013; Kan et al., 2015, 2019), and the degree of mismatch may differ according to CI insertion depth and the pattern of neural health in the implanted ear.

Binaural fusion has been investigated in bilateral CI and bimodal CI users in previous studies. Two aspects of fusion have been investigated: binaural spatial fusion, where stimuli across ears are fused as a single auditory object, and binaural pitch fusion, where the pitch of stimuli are fused across ears (Reiss & Goupell, 2024). These two aspects of fusion likely involve different underlying mechanisms, with perception of binaural cues such as interaural time differences (ITDs) and interaural level differences (ILDs) driving spatial fusion and averaging of spatial excitation across ears driving pitch fusion. Aronoff and colleagues investigated the effects of bilateral spectral alignment using bilateral CI simulations in NH listeners (Aronoff et al., 2015; Staisloff et al., 2016). They found that interaural mismatch in terms of frequency compression (different input frequency ranges assigned to the same cochlear extent), temporal compression (different amplitude mapping across ears), or frequency mismatch (the same input frequency range assigned to different electrode locations across ears) all limited binaural fusion. Reiss and colleagues (Hartling et al., 2020; Oh et al., 2023; Oh & Reiss, 2017, 2018, 2020; Reiss et al., 2014, 2016, 2017, 2018; Zhang et al., 2023) conducted extensive studies of binaural pitch fusion in hearing aid, bilateral CI, and bimodal CI users. They found that binaural pitch fusion was abnormally broad in bimodal and bilateral CI users, where fusion was observed across wide ranges of frequencies across ears, rather than the punctate, tonotopically matched frequency regions observed in NH listeners. Kan and colleagues (Fitzgerald et al., 2015; Goupell et al., 2013; Kan et al., 2015, 2019) measured various aspects of binaural spatial fusion in bilateral CI users and bilateral CI simulations. They found greater binaural fusion and lateralization when interaural electrodes were pitch-matched, and greater effects of interaural frequency mismatch on perception of ITDs than for ILDs.

Previous CI studies have used different methods and stimuli to measure binaural fusion. Many

studies have used direct stimulation via research interfaces to precisely control stimulation parameters such as electrode, stimulation rate, simultaneous vs. sequential stimulation across ears, etc. (Fitzgerald et al., 2015; Hartling et al., 2020; Kan et al., 2013, 2015, 2019; Oh et al., 2023; Reiss et al., 2014, 2016, 2018; Steel et al., 2015). In some ways, this is the gold standard, especially when estimating interaural frequency mismatch or sensitivity to ITDs or ILDs, as direct stimulation can target single electrodes, which is generally not possible when presenting acoustic stimuli via clinical CI speech processors. However, in everyday listening, CI users experience broad stimulation patterns due to current spread, even in response to pure-tone acoustic stimuli. It is possible that the limited fusion observed with direct stimulation of the CI may overestimate fusion via clinical processors, where channel interaction among electrodes may further degrade spatial selectivity.

As noted above, interaural mismatch can greatly limit binaural fusion (Fitzgerald et al., 2015; Goupell et al., 2013; Kan et al., 2015, 2019). In bimodal and SSD CI users, there is also a sound quality difference between acoustic and electric stimulation that may also affect fusion. Acoustic-electric pitch-matching and/or binaural fusion in bimodal CI users has often been performed using pure tones to the AH ear and direct stimulation in the CI ear (Hartling et al., 2020; Oh & Reiss, 2017, 2020; Reiss et al., 2014, 2016), though some studies have used click trains presented to the AH ear (Francart et al., 2018; Steel et al., 2015). For bimodal CI users, the extent of AH is limited, and therefore pitch-matching and/or fusion measures are largely centered on apical electrodes. In SSD CI users, hearing is normal or near-normal in the non-implanted ear, allowing for fusion to be measured across a larger input frequency range in the AH ear and across more electrodes in the CI ear. The issue of interaural mismatch persists in SSD CI users, and may occur over a wider frequency range than can be measured in bimodal CI users. To date, binaural fusion has not been explicitly measured in SSD CI users.

Given the wider frequency range available in the AH ear with SSD CI users, the stimuli used to measure fusion may be of interest. For example, speech and environmental sounds are more broadband than are pure tones. Speech stimuli may also involve more top-down processes than non-speech stimuli. With speech stimuli, sentences have longer duration than monosyllable words. It is unclear how the acoustic and linguistic properties of stimuli may influence binaural fusion in SSD CI users.

In the present study, binaural spatial fusion was measured in SSD CI users using 20 different speech

and non-speech stimuli. Similarity ratings between the AH and CI ears were also obtained for these stimuli. Quality of life was assessed using a questionnaire. We hypothesized that listeners would exhibit stronger fusion for speech stimuli than for non-speech stimuli due to stronger pattern recognition in the AH ear, which in turn might be more strongly grouped with the CI stimulation pattern. We also hypothesized fusion would be greater for stimuli that sounded more similar between the AH and CI ears.

Methods

This was a single-center study conducted in the local cochlear implant center. The aims of the study were discussed with all participants prior to enrollment. The local ethics Committee approved the protocol (N°ID RCB No 2015-A01249-40), and written informed consent was obtained from all participants.

Participants

Eight French adult CI users with acquired unilateral deafness were enrolled in the study (four women, four men); all were native speakers of French. Inclusion criteria required participants to be ≥ 18 years old, to use a CI every day in one ear and have normal or near-normal AH in the non-implanted ear (as confirmed by pure-tone audiometry), and to have ≥ 6 months of experience with their CI. No participants had retrocochlear pathology according to an MRI. All participants scored $\geq 24/30$ on the French version of the mini mental state exam, indicating no cognitive impairment (Gagnon et al., 1990). The mean pure-tone average (PTA) thresholds across 500, 1000, 2000, and 4000 Hz was 25.4 ± 9.9 dB HL in the AH ear; the mean aided PTA in the CI ear was 35.8 ± 7.5 dB HL. The mean age at testing was 62.9 ± 9.5 years. The mean duration of deafness was 2.0 ± 1.6 years, and the mean device experience was 4.4 ± 2.6 years. All participants used Cochlear CI devices, except for SSD-3, who used an Advanced Bionics device. Table 1 shows demographic information for the participants.

Before testing was begun, the CI was checked as in a standard clinical visit, and adjustments were made to the CI mapping as needed. Pure-tone audiometry and speech testing was also conducted, and participants completed the Speech, Spatial, and Qualities (SSQ) of hearing questionnaire (version 5.6, in French; Gatehouse & Noble, 2004).

Stimuli

Stimuli consisted of environmental sounds (gunshot, noise, alarm, wind), sentences (two produced by a female talker, two produced by a male talker), pure tones (500, 1000, 2000, 4000 Hz), and monosyllable words (four produced by a female talker and four

produced by a male talker). Stimuli were drawn from the French Angel Sound software (Kerneys et al., 2023). In total, there were 20 items in the stimulus set. All stimuli were normalized to have the same long-term root-mean-square (RMS) digital amplitude (-25 dB re: 0 dB FS) before the subsequent amplification.

Hardware setup

Audio signals were delivered from a computer to an audio interface (Focusrite Scarlett 212) to a mixer (Mackie 402 VLZ) then to an insert earphone (Etymotics Research ER2) to the AH ear, and to a Mini-Mic audio streamer for Cochlear device users or to a ComPilot for the Advance Bionics device user, which then streamed the signal directly to the CI ear via Bluetooth. The output levels of the streaming device were set to near maximum level.

Before formal testing, loudness was carefully calibrated between the CI and AH ears. First, a moderately loud level was obtained in the AH ear by slowly increasing the intensity of a repeated stimulus (the word 'had') until reaching 7 out of 10 loudness. The same procedure was used in the CI ear. Note that the loudness adjustment varied somewhat for individual participants, depending on their clinical maps, device, etc. Once these levels were set, stimuli were alternately presented to each ear in a ping-pong fashion and further adjustments were made to balance the loudness across ears. Finally, stimuli were simultaneously presented to the CI and AH ears, and further adjustments were made as necessary to ensure that the sounds were similarly loud across ears.

Testing procedures

Binaural fusion

For fusion testing, stimuli were presented simultaneously to each ear and participants were asked to respond to three questions:

- (1) Were one or two auditory images perceived? Participants were asked to click on one of two response buttons labeled 'Un son' (one sound) or 'Deux sons' (Two sounds). Subjects were repeatedly and explicitly instructed that if the sound was perceived as different in any way across the CI and AH ears, they had to select 'Deux sons' (two sounds), similar to methods by Oh and Reiss (2020). This instruction was important because most participants would want to select 'Un son' (one sound) due to the strong auditory grouping associated with the same onset and offset across ears.
- (2) How diffuse were the sounds in each ear? Participants were next asked to click on one of three response buttons which ranged from a small circle (black) to a medium-sized oval (gray) to a large oval (light gray); the response buttons were available for both the CI and the AH ear. This

Table 1 Demographic information for the participants

Participant	Sex	Age test (yrs)	Etiology	Dur deaf (yrs)	Age CI (yrs)	CI ear	CI exp (yrs)	AH PTA (dB HL)	Aided CI PTA (dB HL)	WRS 60 dB CI (%)	SSQ total
SSD-1	M	54	Meningitis	0	51	L	2.67	24	43	30	4.5
SSD-2	M	59	Unknown	2	52	L	6.58	42	25	100	7.8
SSD-3	M	49	Ischemic	3	48	L	1.00	23	45	70	3.5
SSD-4	F	65	Sudden deafness	2	59	R	6.42	23	30	90	4.3
SSD-5	F	71	Sudden deafness	5	65	L	6.75	12	38	60	7.2
SSD-6	M	78	Sudden deafness	2	77	L	0.75	38	43	50	6.2
SSD-7	F	59	Sudden deafness	2	52	R	6.08	18	31	80	8.0
SSD-8	F	68	Meningitis	0	62	R	5.25	23	31	60	8.7

Legend: Dur deaf = duration of deafness before cochlear implantation; Age CI = age at cochlear implantation; CI = cochlear implant; CI exp = device experience after activation; PTA = pure-tone average thresholds across 500, 1000, 2000, and 4000 Hz; AH = acoustic hearing; WRS = word recognition score; SSQ = Speech, Spatial, and Quality of sound questionnaire, M = male, F = female.

method was generally consistent with previous studies by Fitzgerald et al. (2015), Goupell et al. (2013) and Suneel et al. (2017). Participants were instructed that if the sound was unclear or unfocused to pick the large oval and if the sound was clear and focused, to pick the small oval. If the participant had picked 'Un son' (one sound) in the first part, then only one set of the response buttons was available.

- (3) Where did the sound originate? Participants were next asked to lateralize the sounds by clicking on 1 of 21 virtual loudspeakers arranged in a semicircle (8.57° spacing between loudspeakers). Methods were generally similar to previous lateralization studies by Kan et al. (2013, 2015, 2019). If the participant had selected 'Un son' (one auditory image) in the first part, they could only pick one of the 21 loudspeakers. If the participant had selected 'Deux sons' (two auditory image) in the first part, they could pick of 1 of 10 loudspeakers on the CI side and 1 of 10 loudspeakers on the AH side; the middle loudspeaker (number 11) could not be selected if the participant indicated they had heard two sounds.

Stimuli were played in random order. Participants were allowed to repeat the stimulus presentation up to four times by pressing on the space bar. Two test runs were conducted, and fusion ratings were averaged across runs for each stimulus and for each fusion metric.

Similarity rating

After completing the fusion measures, the quality of sound was compared between the AH and CI ears for each of the 20 stimuli used for fusion testing. Stimuli were always presented first to AH ear and then to the CI ear. After presenting a stimulus, participants were asked to rank the similarity of the stimuli across ears by clicking on one of the response boxes, labeled from 0 (the sound was as different as could

be imagined across ears) to 10 (the sound was exactly the same across ears). Stimuli were played in random order. Participants were allowed to repeat the stimulus presentation up to four times by pressing on the space bar. Two test runs were conducted, and similarity ratings were averaged across runs for each stimulus.

SSQ questionnaire

Participants were asked to complete the French version of the SSQ (Gatehouse & Noble, 2004). The SSQ consists of 49 questions that subjectively evaluate hearing function hearing for three areas: speech understanding under different listening conditions (14 questions), spatial hearing (17 questions), and speech quality (18 questions). For each question, participants provided a rating between 0 (total incapacity) and 10 (perfect capacity) according to their everyday listening experiences.

Statistical analysis

Logistic mixed models were used to analyze the effect stimulus type on auditory image perception and diffuseness perception. A linear mixed model was used to analyze the effect of stimulus type on the degree of lateralization when two auditory images were perceived. A repeated measures analysis of variance (RM ANOVA) was used to analyze the effect of stimulus type on similarity ratings. Spearman correlations were used to compare similarity ratings to binaural fusion metrics for each stimulus type and across stimulus types. Spearman correlations were also used to compare demographic data to outcome measurements. Bonferroni adjustment was applied to correct for multiple comparisons.

All analyses were performed using SPSS (version 22, Armonk NY). For all analyses, the alpha level for significance = 0.05. For the logistic mixed

models, linear mixed models, and RM ANOVAs, Bonferroni correction was applied to control for multiple pairwise comparisons.

Results

Binaural fusion

In the binaural fusion task, a stimulus was presented simultaneously to both the CI and AH ears, and listeners were asked to first indicate whether they heard one or two auditory images, and then indicate the degree of lateralization and diffuseness of the stimulus.

Perception of one vs. two auditory images

Figure 1 shows the percentage that a stimulus type was perceived as one auditory image, for individual participants. Across all participants and stimulus types, $40.23 \pm 38.46\%$ of stimuli were perceived as one image and $59.77 \pm 38.46\%$ of stimuli were perceived as two images. There was great inter-subject variability in terms of image perception with the different stimulus types. For example, SSD-07 perceived 68.9% of stimulus types as one image, while SSD-04 perceived only 6.3% of stimulus types as one image. On average, $43.75 \pm 25.88\%$ of environmental sounds, $39.06 \pm 42.48\%$ of sentences, $65.62 \pm 33.24\%$ of tones, and $55.47 \pm 40.15\%$ of words were perceived as one image. A logistic binomial mixed model analysis was performed on the auditory image data, with perception of one or two images as the dependent variable and stimulus type (environmental, sentences, tones, words) as the predictor. Results showed a significant effect of stimulus type [$\chi^2(3, 320) = 10.9$, $p = 0.012$] on auditory image perception. Bonferroni-corrected post-hoc pairwise comparisons showed that single auditory image perception was significantly larger with the tone than with the sentence stimulus type ($p = 0.011$), with no significant difference among the remaining stimulus types. Because image perception for the different stimulus categories was highly variable across participants, subsequent logistic analysis was performed on image perception data within each participant using all stimuli within each type. Results are shown in Table 2. All participants except for SSD-004 exhibited significant differences among stimulus types, although the specific advantages for stimulus types varied greatly among participants.

Lateralization and diffuseness of auditory images

Figure 2 shows the degree of lateralization and diffuseness when one auditory image was perceived, for individual participants. For lateralization, $+90^\circ$ indicates complete lateralization to the CI ear, -90° indicates complete lateralization to the AH ear, and 0° indicates that the sound was perfectly centered

between ears. While some participants lateralized sounds to the center (SSD-2, SSD-8), others lateralized sounds more toward the CI ear (SSD-5) or to the AH ear (SSD-1, SSD-3). Across all stimuli and participants, stimuli were slightly lateralized to the AH ear (mean = -6.26 ± 15.28 degrees).

Figure 3 shows the degree of lateralization and diffuseness when two auditory images were perceived, for individual participants. While some participants lateralized sounds to the center (SSD-2, SSD-7, SSD-8), others exhibited much wider lateralization (SSD-3, SSD-4, SSD-5, SSD-6). Individual participants also lateralized the stimuli differently, with some participants more strongly lateralizing environmental sounds (SSD-3, SSD-6) and others lateralizing all sound similarly (SSD-1, SSD-2, SSD-7).

When two auditory images were perceived, the degree of lateralization between the CI and AH ears was calculated for each stimulus as the absolute difference between the lateralization values. For SSD-5, stimuli were maximally lateralized, suggesting little fusion. For SSD-2, SSD-7, and SSD-8, stimuli were lateralized closer to center, suggesting some degree of fusion. Across all stimulus types and participants, the mean lateralization was 57.11 ± 56.67 degrees. The mean lateralization was 65.60 ± 55.31 degrees for environmental sounds, 53.82 ± 57.70 degrees for sentences, 66.66 ± 58.73 degrees for tones, and 54.49 ± 57.64 degrees for words. A linear mixed model was used to analyze the degree of lateralization data, with stimulus type as the fixed factor and participant as the random factor. Results showed no significant effect of stimulus type on lateralization [$F(3, 16) = 1.49$, $p = 0.254$].

During testing, participants also indicated the diffuseness of the auditory image for each stimulus, with the small oval indicating a clear image (nominal value = 0), a medium-sized oval indicating a somewhat clear image (nominal value = 0.5), and a large oval indicating a blurry image (nominal value = 1). Auditory images were clear for some participants and blurry for others, depending on the stimulus. Across all stimuli and participants, when one image was perceived, the mean diffuseness index was 0.13 ± 0.27 , indicating a generally clear auditory image. When two images were perceived, the mean diffuseness index was 0.22 ± 0.32 for sounds lateralized to the CI side and 0.16 ± 0.31 for sounds lateralized to the AH side. Figure 4 shows diffuseness data for different stimuli and individual participants. The mean diffuseness index across all participants and stimuli was 0.17 ± 0.31 , suggesting small-to-moderate diffuseness. However, data were highly variable across participants. For example, the most diffuse stimuli were environmental sounds for SSD-4 and SSD-6 and words for SSD-1, SSD-5, and SSD-8. A logistic

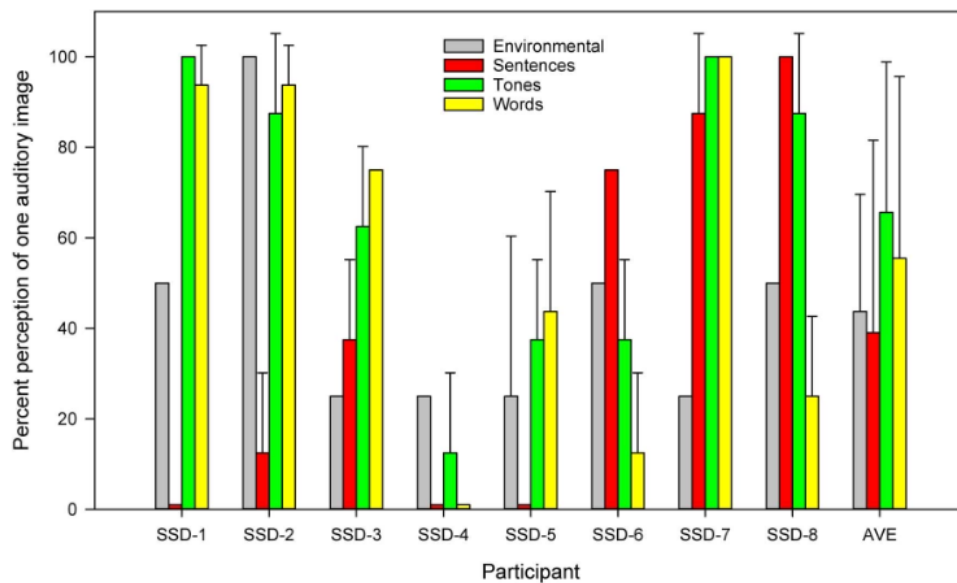


Figure 1 Mean percent (across trials) that environmental sounds, sentences, tones, or words were perceived as one auditory image. The error bars show the standard deviation.

multinomial analysis was performed on the diffuseness data, with diffuseness rating (0, 0.5, 1) as the dependent variable and stimulus type as the predictor. Results showed that stimulus type had a significant effect on diffuseness [$\chi^2(3, 640) = 15.2, p = 0.002$]. Bonferroni-corrected pairwise comparisons showed that diffuseness was significantly larger for environmental sounds and words than for sentences ($p = 0.009$) or tones ($p = 0.011$), with no significant differences among the remaining stimulus types.

Similarity ratings across acoustic and electric hearing

In the similarity rating task, a stimulus was played first to the AH ear and then to the CI ear, and participants were asked to rate the perceptual similarity of

the stimulus, with 0 = as different as could be imagined and 10 = exactly the same. Figure 5 shows similarity ratings between the AH and CI ears for individual participants and for the different stimulus types. There was great inter-subject variability in terms of overall ratings and in terms of relative ratings among stimulus types. Ratings for the different stimulus types varied greatly across participants. For example, words were ranked most similar between the AH and CI ears for SSD-7 and least similar for SSD-8. Across subjects, mean ratings were 4.45 ± 2.86 for environmental sounds, 3.86 ± 2.58 for sentences, 5.28 ± 2.71 for tones, and 3.05 ± 2.86 for words. An RM ANOVA was performed on the mean similarity rating data (averaged across stimuli within each category for each participant), with stimulus type (environmental sounds, sentences, tones, and words) as the factor. Results showed no significant difference in ratings among stimulus types [$F(3, 21) = 1.93, p = 0.156$]. Because ratings were highly variable across participants, subsequent analysis was performed on similarity ratings within each participant using all stimuli within each category. ANOVAs on ranked data showed significant differences among stimulus types for SSD-2 ($p = 0.002$), SSD-3 ($p = 0.011$), SSD-4 ($p < 0.001$), SSD-5 ($p = 0.015$), SSD-6 ($p = 0.002$), SSD-7 ($p = 0.024$), and SSD-8 ($p < 0.001$).

Quality of life

The total mean score of the SSQ was 6.28 ± 1.95 . The mean scores of speech, spatial, and quality categories

Table 2 Results of logistic mixed analysis on the effect of stimulus type on perception of one auditory object for individual data

Participant	dF	N	χ^2	p	Post-hoc Bonferroni corrected ($p < 0.05$)
SSD-001	3	40	65.01	<0.001	T, W>E>S
SSD-002	3	40	58.2	<0.001	E, T, W>S
SSD-003	3	40	8.49	0.037	W>E
SSD-004	3	40	3.81	0.283	
SSD-005	3	40	17.07	0.001	W>S
SSD-006	3	40	14.57	0.002	S>W
SSD-007	3	40	25.14	<0.001	S, T, W>E
SSD-008	3	40	57.14	<0.001	S, T>E, W
All	3	320	11.9	0.008	T>S

Note: Significant differences for Bonferroni-corrected post-hoc pairwise comparisons are shown at right.

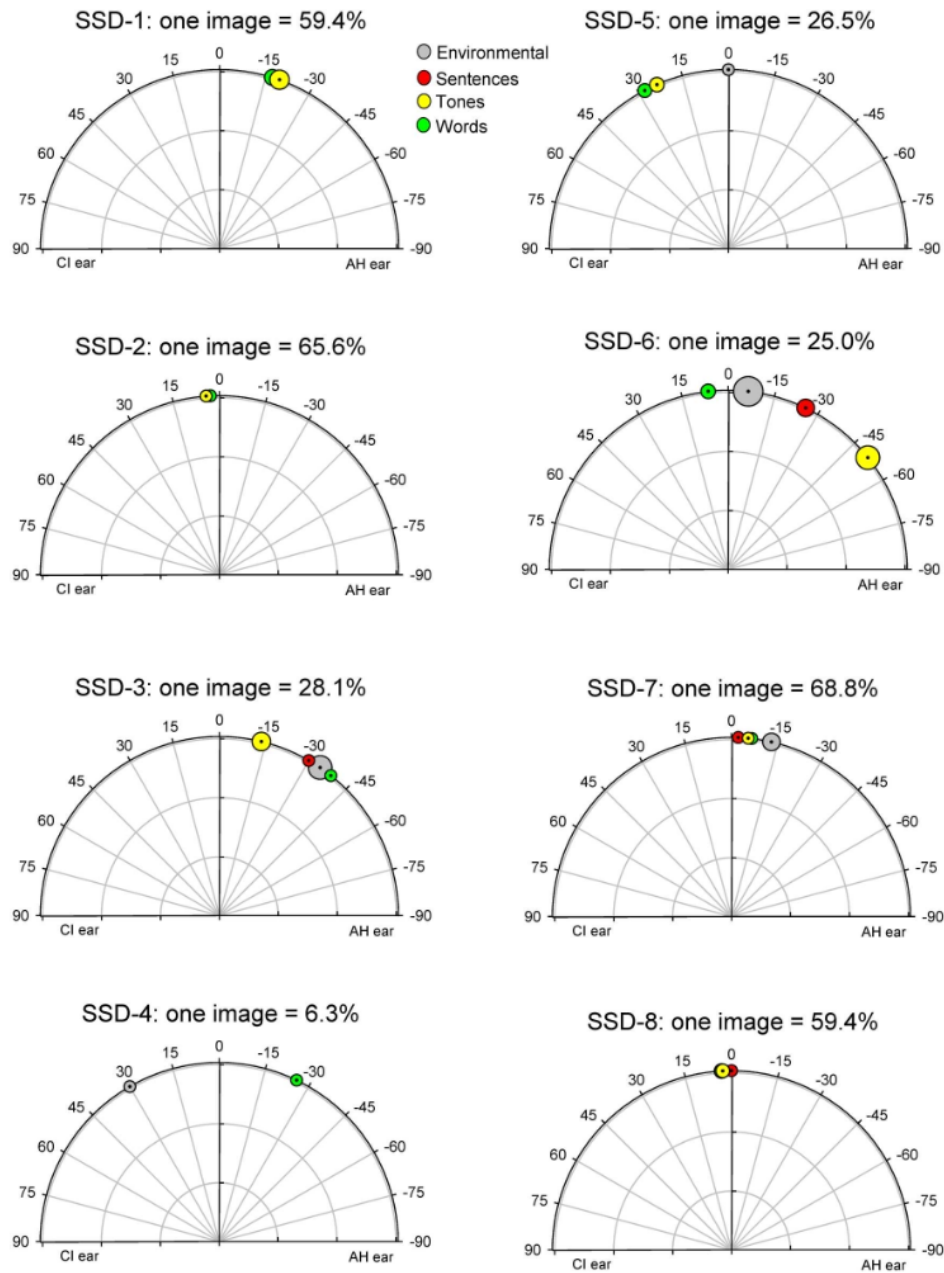


Figure 2 Lateralization and diffuseness for different stimuli and individual participants when one auditory image was perceived. The position of the circle indicates the degree of lateralization, and the size of the circle indicates the degree of diffuseness. The percentage of stimuli perceived as one auditory image is shown for each participant.

were 5.86 ± 2.40 , 5.42 ± 2.03 , and 7.43 ± 2.06 , respectively.

Correlations among similarity ratings, measures of fusion, and demographics

To further explore the effects of age, CI experience, and subjective ratings of hearing quality, Spearman

correlational analyses were conducted among select similarity, fusion, and demographic data. Across stimulus types, there was no significant correlation between similarity ratings and the percent perception of one auditory image ($\rho = 0.34$, $p = 0.387$); within stimulus types, a significant correlation was observed only for the word stimuli ($\rho = 0.80$, $p = 0.010$). No significant

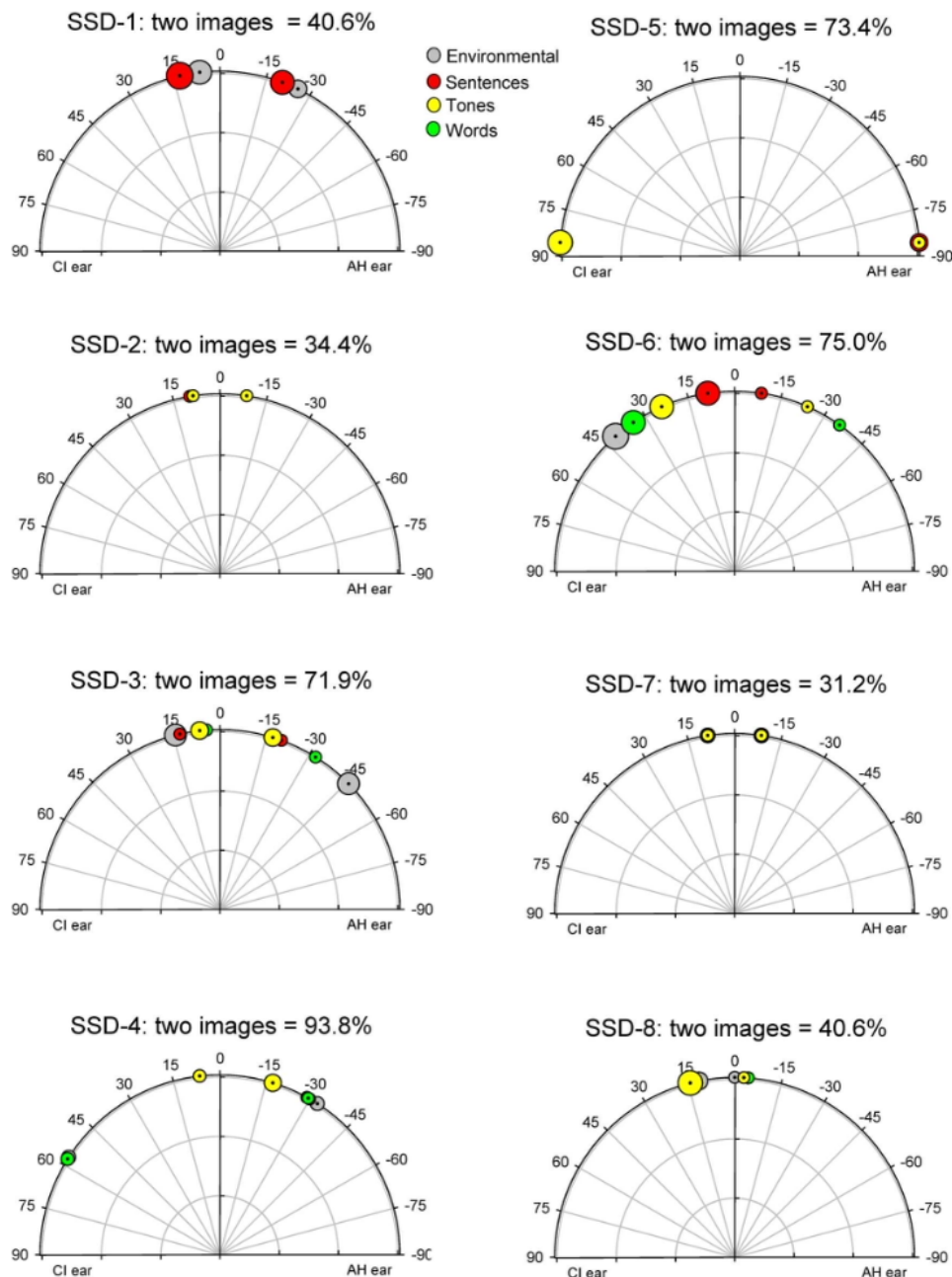


Figure 3 Lateralization and diffuseness for different stimuli and individual participants when two auditory images were perceived. The position of the circle indicates the degree of lateralization, and the size of the circle indicates the degree of diffuseness. The percentage of stimuli perceived as two auditory images is shown for each participant.

correlations were observed between the percent perception of one auditory image and age at testing ($\rho = -0.48$, $p = 0.207$), CI experience, ($\rho = -0.07$, $p = 0.839$), or SSQ score ($\rho = 0.29$, $p = 0.460$).

Discussion

The results showed great inter-subject variability in terms of overall fusion, sensitivity to stimulus type,

and similarity ratings. Partly consistent with our hypothesis, a significant effect of stimulus type was observed for auditory image perception, diffuseness, and similarity ratings (for word stimuli), but not for the degree of lateralization. However, when individual data were considered, many participants exhibited sensitivity to stimulus type for fusion, albeit with different sensitivity across participants.

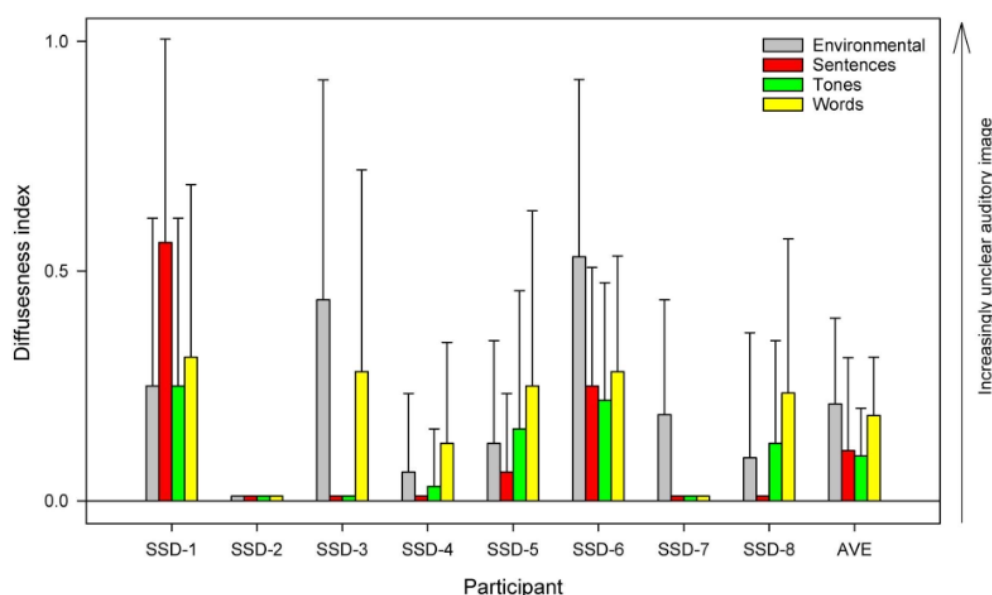


Figure 4 Mean diffuseness ratings (across trials) for different stimuli and for individual participants. Diffuseness data when one or two auditory images were perceived were combined. The error bars show the standard deviation. Note that lower values indicate clearer and more focused auditory images.

Across all stimulus types, one auditory image was perceived only $40.23 \pm 38.46\%$ of the time. This is much less fusion than observed in bilateral CI users in Goupell et al. (2013), where listeners perceived one image 73% of the time, or in Fitzgerald et al. (2015), where listeners perceived one image 77% of the time. The difference in outcomes may be partly

due to potentially greater interaural frequency mismatch in SSD CI users than in bilateral CI users, and greater similarity in sound quality between two CIs in the bilateral CI case than with acoustic and electrical stimulation in the SSD CI case. Also, Goupell et al. (2013) and Fitzgerald et al. (2015) directly stimulated electrodes via research interface,

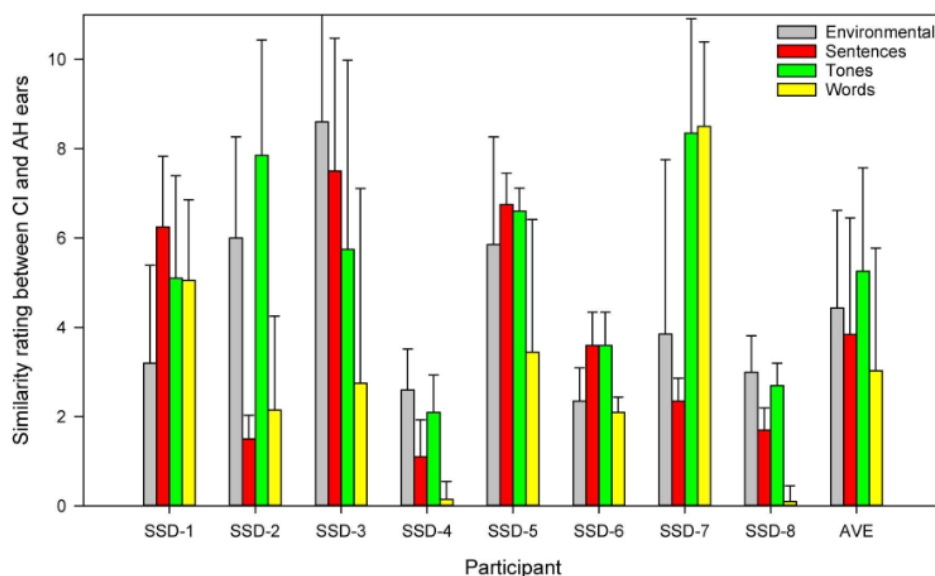


Figure 5 Mean similarity ratings (across trials) for individual participants between the AH and CI ear for environmental sounds, sentences, tones, and words. The error bars show the standard deviation.

allowing for precise control of stimuli. In the present study, acoustic stimuli were delivered to the AH ear via insert earphone and to the CI ear via DAI, where the clinical speech processor settings would affect the electrical stimulation patterns. The present data suggest limited fusion between multi-channel electrical and acoustic stimulation patterns. This is somewhat inconsistent with anecdotal reports by SSD CI users, who often comment that they hear a single image similar to acoustic hearing. In the present study, the CI microphone was bypassed via DAI connection to the speech processor. Directly delivering loudness-balanced stimuli to the AH and CI ears may have heightened differences between acoustic and electric stimulation, causing perception of two images most of the time.

Many participants exhibited some sensitivity to stimulus type for fusion and similarity ratings, albeit in inconsistent ways (Figs. 1 and 5). Across all participants, perception of one auditory image was significantly higher with tones and words than with environmental sounds and sentences. It is possible that the relatively shorter duration of the tone and word stimuli facilitated fusion than did the longer environmental sounds and sentences. In NH listeners, binaural fusion can degrade with increasing stimulus duration (Perrott et al., 1970). It is difficult to draw any conclusions from the present data set, except for the observation that using only one type of stimulus (e.g. pure tones) to measure fusion may not be representative of overall binaural fusion.

Intuitively, one would expect that stimuli that sounded most similar across acoustic and electric hearing would also exhibit stronger fusion. However, a significant relationship between similarity ratings and fusion was observed only for the word stimuli. It is unclear why no significant relationships were observed for the other stimuli. The difference in stimulus presentation (simultaneously to both ears for fusion, sequentially across ears for similarity ratings) may have contributed to the pattern of results. As noted above, the delay in stimulus presentation across ears for the fusion measurements may have contributed to the limited fusion. This may have been especially true for longer stimuli such as sentences or some environmental sounds. However, many participants were able to successfully fuse stimuli into a single auditory object (Figs. 1 and 2), with no significant effect of stimulus type on fusion.

Limitations to the study

The present data set was highly variable across SSD CI users, making it difficult to draw many strong conclusions. Only 8 SSD CI users were able to participate

in the study (due to the limited local patient population); including more SSD CI participants may not diminish the inter-subject variability in terms of fusion and sensitivity to stimulus type.

Another limitation was the stimulus presentation via insert earphone to the AH ear and DAI to the CI ear. This method was necessary to isolate the sounds in the AH and CI ears, which would not be possible in sound field. In everyday listening conditions, SSD CI users typically listen in sound field, using the microphone on the CI processor. Such listening may enhance fusion and may contribute to anecdotal reports of hearing a single image by SSD CI users. However, the accuracy of loudness balancing in a clinical setting is uncertain, as SSD CI users are often simply questioned if the loudness sounds similar across the AH and CI ears, typically using the live voice of the clinician. The present loudness balance method was limited by using insert earphone to the AH ear and DAI to the CI ear, which offered control but does not necessarily reflect acoustic and electric loudness similarity in everyday listening. Another limitation to the stimulus presentation was that there was no compensation for any delay between stimuli presented to the AH and CI ears, due to signal processing in the CI ear, which has been shown to limit sound localization in SSD CI users (Seebacher et al., 2019).

Finally, it is likely that the present SSD CI users experience some degree of interaural frequency mismatch; the variability in interaural mismatch may explain some of the variability in fusion. However, the degree of interaural mismatch was not estimated in the present study. Acoustic-electric pitch-matching has been used to estimate interaural mismatch in bimodal and SSD CI users (Baumann et al., 2011; Oh & Reiss, 2020; Reiss et al., 2014, 2016, 2017; Schatzer et al., 2014). One issue with such pitch matching can be the very different sound qualities associated with acoustic and electric stimulation, which may result in some uncertainty regarding pitch matches. Radiographic imaging data can also be used to estimate intracochlear electrode position (Landsberger et al., 2015). However, such imaging data does not account for adaptation to tonotopic mismatch in the CI ear. This may be less of an issue for SSD CI users, who may experience limited adaptation to tonotopic mismatch in the CI ear due to the dominance of the AH ear (Bernstein et al., 2021). Still, estimating interaural mismatch may help to optimize CI signal processing may benefit binaural fusion in SSD CI users.

Conclusion

To our knowledge, this is the first study to measure binaural fusion in SSD CI users. Results showed that fusion in SSD CI users was limited, and less

than that observed with bilateral CI users in previous studies. Fusion was measured for different speech and non-speech stimuli; there was no consistent effect of stimulus type on fusion metrics, although many participants exhibited sensitivity to stimulus type. There was great inter-subject variability in binaural fusion and similarity ratings; fusion was significantly correlated with similarity ratings only for the word stimuli. Diffuseness was significantly larger for environmental sounds and words than for sentences and tones. Differences between acoustic and electric stimulation patterns and interaural frequency mismatch may partly explain the somewhat poor fusion observed in SSD CI users.

Acknowledgements

This research is supported by Fondation Pour l'Audition (FPA RD-2019-02).

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

The author(s) reported there is no funding associated with the work featured in this article.

References

- Arndt, S., Aschendorff, A., Laszig, R., Beck, R., Schild, C., Kroeger, S., Ihorst, G., & Wesarg, T. (2011). Comparison of pseudobinaural hearing to real binaural hearing rehabilitation after cochlear implantation in patients with unilateral deafness and tinnitus. *Otology and Neurotology*, 32(1), 39–47. <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181fct271>
- Aronoff, J. M., Shayman, C., Prasad, A., Suneel, D., & Stelmach, J. (2015). Unilateral spectral and temporal compression reduces binaural fusion for normal hearing listeners with cochlear implant simulations. *Hearing Research*, 320, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.12.005>
- Baumann, U., Rader, T., Helbig, S., & Bahmer, A. (2011). Pitch matching psychometrics in electric acoustic stimulation. *Ear and Hearing*, 32(5), 656–662. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e31821a4800>
- Bernstein, J. G. W., Jensen, K. K., Stakhovskaya, O. A., Noble, J. H., Hoa, M., Kim, H. J., Shih, R., Kolberg, E., Cleary, M., & Goupell, M. J. (2021). Interaural place-of-stimulation mismatch estimates using CT scans and binaural perception, but not pitch, are consistent in cochlear-implant users. *The Journal of Neuroscience*, 41(49), 10161–10178. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0359-21.2021>
- Cabral Junior, F., Pinna, M. H., Alves, R. D., Malerbi, A. F., & Bento, R. F. (2016). Cochlear implantation and single-sided deafness: A systematic review of the literature. *International Archives of Otorhinolaryngology*, 20(1), 69–75. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1559586>
- Dillon, M. T., Buss, E., Anderson, M. L., King, E. R., Deres, E. J., Buchman, C. A., Brown, K. D., & Pillsbury, H. C. (2017a). Cochlear implantation in cases of unilateral hearing loss: Initial localization abilities. *Ear and Hearing*, 38(5), 611–619. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000430>
- Dillon, M. T., Buss, E., Rooth, M. A., King, E. R., Deres, E. J., Buchman, C. A., Pillsbury, H. C., & Brown, K. D. (2017b). Effect of cochlear implantation on quality of life in adults with unilateral hearing loss. *Audiology and Neuro-Otology*, 22(4-5), 259–271. <https://doi.org/10.1159/000484079>
- Dorbeau, C., Galvin, J., Fu, Q. J., Legris, E., Marx, M., & Bakhos, D. (2018). Binaural perception in single-sided deaf cochlear implant users with unrestricted or restricted acoustic hearing in the non-implanted ear. *Audiology and Neuro-Otology*, 23(3), 187–197. <https://doi.org/10.1159/000490879>
- Finke, M., Strauß-Schier, A., Kludt, E., Büchner, A., & Illg, A. (2017). Speech intelligibility and subjective benefit in single-sided deaf adults after cochlear implantation. *Hearing Research*, 348, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.03.002>
- Firszt, J. B., Holden, L. K., Reeder, R. M., Waltzman, S. B., & Arndt, S. (2012). Auditory abilities after cochlear implantation in adults with unilateral deafness: A pilot study. *Otology and Neurotology*, 33(8), 1339–1346. <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e318268d52d>
- Fitzgerald, M. B., Kan, A., & Goupell, M. J. (2015). Bilateral loudness balancing and distorted spatial perception in recipients of bilateral cochlear implants. *Ear and Hearing*, 36(5), e225–e236. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000174>
- Francart, T., Wiebe, K., & Wesarg, T. (2018). Interaural time difference perception with a cochlear implant and a normal ear. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 19(6), 703–715. <https://doi.org/10.1007/s10162-018-00697-w>
- Gagnon, M., Letenneur, L., Dartigues, J. F., Commenges, D., Orgogozo, J. M., Barberger-Gateau, P., Alpérovitch, A., Décamps, A., & Salamon, R. (1990). Validity of the minimal state examination as a screening instrument for cognitive impairment and dementia in French elderly community residents. *Neuroepidemiology*, 9(3), 143–150. <https://doi.org/10.1159/000110764>
- Galvin 3rd, J. J., Fu, Q. J., Wilkinson, E. P., Mills, D., Hagan, S. C., Lupo, J. E., Padilla, M., & Shannon, R. V. (2019). Benefits of cochlear implantation for single-sided deafness: Data from the house clinic-university of southern California-university of California, Los Angeles clinical trial. *Ear and Hearing*, 40(4), 766–781. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000671>
- García, J. M., Urquijo, D. P., Puerta, M., Mosquera, C. A., Hernández, L. M., Aparicio, M. L., Barón, C., Otoyá Tono, A. M., & Peñaranda, A. (2020). Cochlear implant in patients with single sided deafness: Hearing results and communicative benefits. *Cochlear Implants International*, 21(3), 136–144. <https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1691321>
- Gatehouse, S., & Noble, W. (2004). The speech, spatial and qualities of hearing scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 43(2), 85–99. <https://doi.org/10.1080/14992020400050014>
- Giardina, C. K., Formeister, E. J., & Adunka, O. F. (2014). Cochlear implants in single-sided deafness. *Current Surgery Reports*, 2(12), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40137-014-0075-9>
- Goupell, M. J., Stoelb, C., Kan, A., & Litovsky, R. Y. (2013). Effect of mismatched place-of-stimulation on the salience of binaural cues in conditions that simulate bilateral cochlear-implant listening. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 2272–2287. <https://doi.org/10.1121/1.4792936>
- Grossmann, W., Brill, S., Moeltner, A., Mlynski, R., Hagen, R., & Radeloff, A. (2016). Cochlear implantation improves spatial release from masking and restores localization abilities in single-sided deaf patients. *Otology and Neurotology*, 37(6), 658–664. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000001043>
- Hartling, C. L., Fowler, J. R., Stark, G. N., Glickman, B., Eddolls, M., Oh, Y., Ramsey, K., & Reiss, L. A. J. (2020). Binaural pitch fusion in children with normal hearing, hearing aids, and cochlear implants. *Ear and Hearing*, 41(6), 1545–1559. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000874>
- Kan, A., Goupell, M. J., & Litovsky, R. Y. (2019). Effect of channel separation and interaural mismatch on fusion and lateralization in normal-hearing and cochlear-implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(2), 1448–1463. <https://doi.org/10.1121/1.5123464>
- Kan, A., Litovsky, R. Y., & Goupell, M. J. (2015). Effects of interaural pitch matching and auditory image centering on binaural sensitivity in cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 36(3), e62–e68. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000135>
- Kan, A., Stoelb, C., Litovsky, R. Y., & Goupell, M. J. (2013). Effect of mismatched place-of-stimulation on binaural fusion and lateralization in bilateral cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 2923–2936. <https://doi.org/10.1121/1.4820889>
- Kerneis, S., Galvin 3rd, J. J., Borel, S., Baqué, J., Fu, Q. J., & Bakhos, D. (2023). Preliminary evaluation of computer-assisted home training for French cochlear implant recipients. *PLoS One*, 18(4), e0285154. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285154>

- Landsberger, D. M., Svrakic, M., Roland Jr. T., & Svirsky, M. (2015). The relationship between insertion angles, default frequency allocations, and spiral ganglion place pitch in cochlear implants. *Ear and Hearing*, 36(5), e207–e213. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000163>
- Legris, E., Galvin, J., Roux, S., Gomot, M., Aoustin, J. M., Marx, M., He, S., & Bakhos, D. (2018). Cortical reorganization after cochlear implantation for adults with single-sided deafness. *PLoS One*, 13(9), e0204402. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204402>
- Marx, M., Mosnier, I., Venail, F., Mondain, M., Uziel, A., Bakhos, D., Lescanne, E., N'Guyen, Y., Bernardeschi, D., Sterkers, O., Deguine, O., Lepage, B., Godey, B., Schmerber, S., Bonne, N. X., Vincent, C., & Frayssé, B. (2021). Cochlear implantation and other treatments in single-sided deafness and asymmetric hearing loss: Results of a national multicenter study including a randomized controlled trial. *Audiology and Neurotology*, 26(6), 414–424. <https://doi.org/10.1159/000514085>
- Mertens, G., De Bodt, M., & Van de Heyning, P. (2017). Evaluation of long-term cochlear implant use in subjects with acquired unilateral profound hearing loss: Focus on binaural auditory outcomes. *Ear and Hearing*, 38(1), 117–125. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000359>
- Mertens, G., Kleine Punte, A., De Bodt, M., & Van de Heyning, P. (2015). Binaural auditory outcomes in patients with postlingual profound unilateral hearing loss: 3 years after cochlear implantation. *Audiology and Neurotology*, 20(Suppl 1), 67–72. <https://doi.org/10.1159/000380751>
- Oh, Y., & Reiss, L. A. J. (2017). Binaural pitch fusion: Pitch averaging and dominance in hearing-impaired listeners with broad fusion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(2), 780–791. <https://doi.org/10.1121/1.4997190>
- Oh, Y., & Reiss, L. A. J. (2018). Binaural pitch fusion: Effects of amplitude modulation. *Trends in Hearing*, 22, 2331216518788972. <https://doi.org/10.1177/2331216518788972>
- Oh, Y., & Reiss, L. A. J. (2020). Binaural pitch fusion: Binaural pitch averaging in cochlear implant users with broad binaural fusion. *Ear and Hearing*, 41(6), 1450–1460. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000866>
- Oh, Y., Srinivasan, N. K., Hartling, C. L., Gallun, F. J., & Reiss, L. A. J. (2023). Differential effects of binaural pitch fusion range on the benefits of voice gender differences in a “cocktail party” environment for bimodal and bilateral cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 44(2), 318–329. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001283>
- Perrott, D. R., Briggs, R., & Perrott, S. (1970). Binaural fusion: Its limits as defined by signal duration and signal onset. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(2), 565–568. <https://doi.org/10.1121/1.1911929>
- Reiss, L. A., Eggleston, J. L., Walker, E. P., & Oh, Y. (2016). Two ears are not always better than one: Mandatory vowel fusion across spectrally mismatched ears in hearing-impaired listeners. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology: JARO*, 17(4), 341–356. <https://doi.org/10.1007/s10162-016-0570-z>
- Reiss, L. A. J., Fowler, J. R., Hartling, C. L., & Oh, Y. (2018). Binaural pitch fusion in bilateral cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 39(2), 390–397. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000497>
- Reiss, L. A. J., & Goupell, M. J. (2024). Binaural fusion: Complexities in definition and measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 156(4), 2395–2408. <https://doi.org/10.1121/10.0030476>
- Reiss, L. A., Ito, R. A., Eggleston, J. L., & Wozny, D. R. (2014). Abnormal binaural spectral integration in cochlear implant users. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology: JARO*, 15(2), 235–248. <https://doi.org/10.1007/s10162-013-0434-8>
- Reiss, L. A., Shayman, C. S., Walker, E. P., Bennett, K. O., Fowler, J. R., Hartling, C. L., Glickman, B., Lasarev, M. R., & Oh, Y. (2017). Binaural pitch fusion: Comparison of normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 1909–1920. <https://doi.org/10.1121/1.4978009>
- Schatzer, R., Vermeire, K., Visser, D., Krenmayr, A., Kals, M., Voormolen, M., Van de Heyning, P., & Zierhofer, C. (2014). Electric-acoustic pitch comparisons in single-sided-deaf cochlear implant users: Frequency-place functions and rate pitch. *Hearing Research*, 309, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.11.003>
- Seebacher, J., Franke-Triege, A., Weichbold, V., Zorowka, P., & Stephan, K. (2019). Improved interaural timing of acoustic nerve stimulation affects sound localization in single-sided deaf cochlear implant users. *Hearing Research*, 371, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.10.015>
- Staisloff, H. E., Lee, D. H., & Aronoff, J. M. (2016). Perceptually aligning apical frequency regions leads to more binaural fusion of speech in a cochlear implant simulation. *Hearing Research*, 337, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.05.002>
- Steel, M. M., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2015). Binaural fusion and listening effort in children who use bilateral cochlear implants: A psychoacoustic and pupillometric study. *PLoS One*, 10(2), e0117611. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117611>
- Suneel, D., Staisloff, H., Shayman, C. S., Stelmach, J., & Aronoff, J. M. (2017). Localization performance correlates with binaural fusion for interaurally mismatched vocoded speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3), EL276–EL280. <https://doi.org/10.1121/1.5001903>
- Távora-Vieira, D., Marino, R., Acharya, A., & Rajan, G. P. (2015). The impact of cochlear implantation on speech understanding, subjective hearing performance, and tinnitus perception in patients with unilateral severe to profound hearing loss. *Otology and Neurotology*, 36(3), 430–436. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000707>
- Zhang, H., Zhou, Y., & Reiss, L. (2023). Editorial: Listening with two ears – new insights and perspectives in binaural research. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1323330. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1323330>

Vu, le Directeur de Thèse



Vu, le Doyen
De la Faculté de Médecine de Tours
Tours, le

Lucrèce de Villars

65 pages – 3 tableaux – 14 figures – 3 annexes

Résumé :

Objectif : Les patients bénéficiant d'un implant cochléaire (IC) dans le cadre d'une surdité neurosensorielle unilatérale (SNU) présentent des difficultés de perception spatiale des sons probablement dues à une limitation de la fusion des stimuli acoustiques et électriques. Dans cette étude, nous analysons la fusion binaurale chez ces patients.

Matériels et méthodes : Huit adultes IC-SNU ont participé à cette étude. La fusion binaurale a été mesurée par un test en trois parties. Tout d'abord, les patients indiquaient le nombre d'objet auditif perçu. Puis, ils indiquaient la diffusion de ces sons. Enfin, ils les localisaient dans l'espace. Une étude de similarité des sons a été réalisée grâce aux mêmes stimuli qu'utilisés lors du test de fusion. Un questionnaire de qualité de vie était présenté aux patients.

Résultats : La fusion binaurale et l'étude de similarité ont montré de fortes variations interindividuelles. Un seul objet auditif a été perçu dans $40,23 \pm 38,46\%$ des cas. La sensibilité au type de stimulus variait entre les patients de manière inconstante. La diffusion des sons était significativement plus importante pour les mots et les sons environnementaux que pour les phrases et les sons purs. Quand un seul objet auditif était perçu, le stimulus était généralement latéralisé en face du patient. Quand deux images auditives étaient perçues, la moyenne de latéralisation était de $57,11 \pm 56,67$ degrés (côté IC). L'étude de similarité était corrélée à la fusion seulement pour les mots.

Conclusion : La fusion binaurale était moins importante chez les IC-SNU que dans les études portant sur des patients implantés de manière bilatérale. Cette différence pourrait être due au décalage de fréquence interaural et aux différences entre les schémas de stimulation acoustique et électrique.

Mots clés : Fusion binaurale, implant cochléaire, surdité neurosensorielle unilatérale.

Jury :

Président du Jury : Professeur Emmanuel LESCANNE

Directeur de thèse : Professeur David BAKHOS

Membres du Jury : Professeur Sylvain MORINIÈRE

Docteur Soizick PONDAVEN

Mr Mathieu ROBIER

Date de soutenance : 5 Décembre 2025