Les effets de l'appauvrissement progressif des hautes fréquences sur la reconnaissance des phonèmes

Mémoire en vue de l'obtention du

DIPLÔME D'ETAT AUDIOPROTHESISTE

délivré par l'Université de Toulouse 3 – Paul Sabatier

2021-2022

Soutenu et présenté par Benjamin BUFFARD

Année universitaire 2021-2022

Supervision de Johann LAHAI

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude auprès de Monsieur LAHAI Johann, maître de mémoire, audioprothésiste D.E. diplômé de l'école de Fougères en 2013 et ayant suivi le master d'audiologie et troubles du langage à Montpellier en 2015.
Pour sa grande pédagogie, sa transmission de connaissances et les nombreux échanges permettant de mener à bien ce mémoire de fin d'études.

Je remercie également Monsieur CUDENNEC Ronan, maître de stage et diplômé de l'école de Paris en 2007.
Pour m'avoir porté vers le haut durant ces quatre mois de stage, de m'avoir permis d'effectuer des tests spécifiques à mon mémoire auprès de ses patients et d'une manière générale, pour sa bienveillance.

A monsieur LEFEVRE Franck, pour m'avoir transmis et autorisé à utiliser ses listes syllabiques dans le cadre de mon mémoire.

Et bien sûr, aux différents patients pour avoir accepté d'effectuer des tests dans le cadre de mon mémoire, toujours avec plaisir, sympathie et compréhension.

Engagement sur l'honneur de non-plagiat

Je soussignée **Benjamin BUFFARD**, N° étudiant: **21909147** inscrit à l'examen conduisant à la délivrance du diplôme d'Etat d'audioprothésiste, certifie sur l'honneur être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de supports, y compris électronique, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée (Articles L335-2 et L335-3 du Code le la propriété intellectuelle).

Je déclare être informée que dans le cas où un plagiat serait constaté dans un de mes travaux écrits, celui-ci conduirait à la nullité de l'examen et serait passible de sanctions pénales.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour produire et écrire ce document.

Fait à CRAON, le 03 Septembre 2022
Benjamin BUFFARD



Sommaire

Liste des illustrations **4**

abréviations **5**

Introduction **6**

1. La formation et la reconnaissance phonémique 6
2. Presbyacousie et pertes auditives en pente de ski : conséquences sur la perception des sons aigus 10
   - 2.1. La presbyacousie 10
   - 2.2. Les pertes auditives en pente de ski (PdS) 11
   - 2.3. Incidence sur la perception des phonèmes 12
3. La plasticité cérébrale 12
4. Objectifs 13

Matériels & méthodes **16**

1. Population 16
   - 1.1. Critères d'inclusion 16
   - 1.2. Critères d'exclusion 16
2. Matériel et méthode 17
   - 2.1. Méthode 17
   - 2.2. Analyse des données 19
     - 2.2.1. Vérification des biais d'échantillons 19
       - 2.2.1.1. Influence du côté testé 20
       - 2.2.1.2. Influence de l'âge 20
       - 2.2.1.3. Influence du sexe 20
     - 2.3.2. Comparaison de l'intelligibilité globale tous sujets confondus et entre les différents groupes 20
     - 2.3.3. Comparaison de la perte d'intelligibilité tous sujets confondus et entre les différents groupes (NE / ME / PdS) 21

Résultats **22**

1. Description générale de la population 22
2. Vérification des biais d'échantillonnage 22
   - 2.1. Influence du côté testé 22
   - 2.2. Influence de l'âge 22
   - 2.3. Influence du sexe 22
3. Comparaison de l'intelligibilité tous sujets confondus et entre chacun des groupes en fonction de la fréquence de coupure 23
   - 3.1. Comparaison de l'intelligibilité tous sujets confondus 23
   - 3.2. Comparaison de l'intelligibilité entre les différents groupes 24

4. Comparaison de la perte d'intelligibilité tous sujets confondus et entre les différents groupes (NE / ME / PdS)..... 25
4.1. Comparaison de la perte d'intelligibilité tous sujets confondus..... 25
4.2. Comparaison de la perte d'intelligibilité entre les différents groupes..... 26

Discussion..... 28
1. Vérification des biais d'échantillonnage..... 28
2. Comparaison de l'intelligibilité..... 28
3. Comparaison de la perte d'intelligibilité..... 29
4. Limites de l'étude:..... 31
4.1. Biais de mesure:..... 31
4.2. Biais d'échantillonnage:..... 31
4.3. Biais lié à la création des listes et leurs émissions:..... 31

Conclusion..... 32

Bibliographie..... 33

Annexe..... 36

Liste des illustrations

Figure 1 : Représentation de l'étalement fréquentiel des formants des voyelles et des consonnes dans la "banane vocale" (Klangpornkun et al., 2013).

Figure 2 : Représentation de la répartition fréquentielle de différentes voyelles orales (Meunier, 2008).

Figure 3 : L'audiogramme "à points" dans le calcul du SII (Killion et al., 2010)

Figure 4 : Audiogramme comportant les points non modifiés du SII

Figure 5 : Audiogramme comportant la nouvelle pondération hypothétique des points du SII, en fonction des capacités supra-normale d'un individu disposant d'une perte auditive de forme PdS

Figure 6 : Tableau des syllabes des listes de Franck Lefèvre

Figure 7 : Pourcentage d'intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure tous sujets confondus (N=60)

Figure 8 : Pourcentage d'intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure par groupe d'étude (N=60)

Figure 9 : Tableau des p-values entre les différents groupes et leur fréquence de coupure associée

Figure 10 : Pourcentage de perte d'intelligibilité tous groupes confondus en fonction de la fréquence de coupure (N=60)

Figure 11 : Pourcentage de perte d'intelligibilité de chacun des groupes en fonction de la fréquence de coupure (N=60)

Figure 12 : Tableau des p-values entre les différents groupes et leur fréquence de coupure associée

Abréviations

AI : Articulation Index
ANOVA : ANalysis Of Variance
B.I.A.P : Bureau International d'Audiophonologie
BF : Basse Fréquence
CCI : Cellule Ciliée Interne
dB HL : déciBel Hearing Loss
dB SPL : déciBel Sound Pressure Level
EEG : ÉlectroEncéphalogramme
F0 : Fréquence fondamentale
F1 : Premier formant
F2 : Deuxième formant
F3 : Troisième formant
FC1000Hz : Fréquence de coupure de 1000 Hz
FC2000Hz : Fréquence de coupure de 2000 Hz
FC4000Hz : Fréquence de coupure de 4000 Hz
HF : Haute Fréquence
Hz : Hertz
ME : Malentendant
MIV : Mesure In Vivo
NE : Normo-Entendant
PdS : Perte en "Pente de Ski"
RMS : Root Mean Square
SII : Speech Intelligibility Index
T.S.I : Tri-Syllabe-Identique
ZIC : Zone Inerte Cochléaire

Introduction

Avant-propos

Malgré plusieurs décennies de recherches, de nombreux scientifiques s'interrogent toujours sur les mécanismes permettant le passage de la perception à la compréhension.
En effet, cette tâche complexe fait intervenir à la fois l'organe sensoriel qu'est l'oreille, ainsi que le traitement de l'information qu'est la voie auditive et le cortex. Pour synthétiser cette idée, il n'est pas rare d'entendre l'expression : "Nous entendons par les oreilles, mais nous comprenons par le cerveau".

Nous allons alors volontairement dégrader la parole afin d'en faire ressortir les subtilités fréquentielles et surtout l'interprétation des indices acoustiques par l'étude des plus petits éléments constitutifs de la parole, également appelés phonèmes. Nous allons ainsi étudier la disparité de reconnaissance phonémique auprès de normo-entendants (NE), de malentendants (ME) et de sujets souffrant d'une perte dite en "Pente de Ski" (PdS).

1. La formation et la reconnaissance phonémique

Les sujets normo-entendants ont par définition, l'ensemble du spectre fréquentiel humain disponible (20 Hz - 20000 Hz) afin de leur garantir une bonne compréhension de la parole. Ils se basent sur différents indices acoustiques et notamment dans les fréquences aigües. Les malentendants quant à eux, ne disposent plus d'autant d'indices acoustiques et ne peuvent donc pas reconnaître aussi facilement les différents phonèmes du français.

Afin de mieux appréhender la notion de phonème, nous allons donc refaire un point sur cette notion.

Le phonème est la plus petite unité discrète que l'on peut segmenter dans le langage parlé. Dans la langue française, il existe 36 phonèmes comportant chacun leur propre symbole. Il y a 16 voyelles, 17 consonnes et 3 semi-voyelles.
Ceux-ci ont la particularité de présenter un large panel fréquentiel, en effet, l'équipe de Vitela démontre par une expérience visant à couper les basses fréquences (BF) par un filtre passe-haut (au-delà du 5000Hz) que certains sujets parviennent toujours à déterminer avec précision des sous-ensembles de consonnes et voyelles. Ils en viennent à la conclusion que la reconnaissance des indices acoustiques des phonèmes s'étalent du 150 Hz au 8500 Hz, exprimant la grande variabilité spectrale des phonèmes (Vitela et al, 2014). Par ailleurs, il a également été admis que les indices acoustiques apportés par les phonèmes ne sont pas ciblés

sur une zone fréquentielle mais sont multiples et redondants, aidant par la répétition le récepteur à en comprendre le sens (Varnet, 2015).

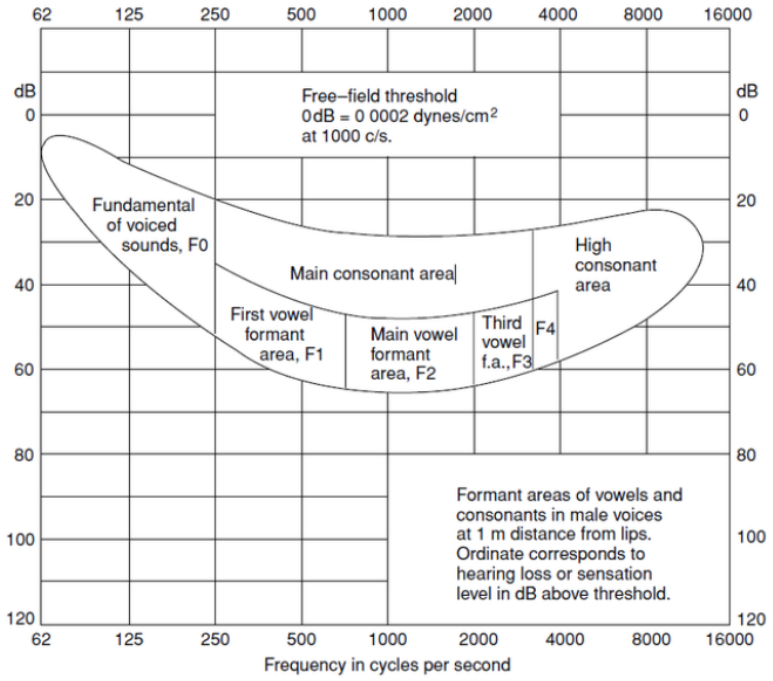


Figure 1: Représentation de l'étalement fréquentiel des formants des voyelles et des consonnes dans la "banane vocale" (Klangpornkun et al., 2013)

Parmi les phonèmes, on retrouve les voyelles qui sont composées des sons rassemblant le fondamental et les harmoniques, elles sont donc périodiques, c'est-à-dire qu'elles font appel au voisement de l'appareil locuteur, le voisement est alors la mise en vibration des cordes vocales.
Chaque voyelle comporte son timbre propre, à savoir, une répartition énergétique différente aux seins de ses trois formants (F1, F2 et F3).
La fréquence fondamentale (F0) sera définie par la fréquence de vibration des cordes vocales, quant aux formants, ils seront modulés par le passage de l'air au sein des différents résonateurs.
Le premier formant sera déterminé par le degré d'aperture de la mandibule, le deuxième formant quant à lui variera par le lieu d'articulation de la langue et enfin de troisième formant sera déterminé par la position arrondie ou étirée des lèvres (Meunier, 2008).
On distingue alors parmi les 16 voyelles de la langue française:

- 12 voyelles orales à savoir [ɑ] [a] [ɔ] [e] [ɛ] [ə] [ø] [i] [œ] [y] [u] [o] dont leurs fréquences fondamentales, l'amplitude et la durée sont identiques entre elles.
- 4 voyelles nasales à savoir [ɔ̃] [ɑ̃] [œ̃] [ɛ̃], leurs formations par le passage de l'air dans la fosse nasale et orale, donne lieu à un formant nasal supplémentaire aux alentours de

500 Hz à 700 Hz, ainsi qu'à des anti-formants (perte énergétique) par le couplage des cavités orale et nasale.

		F1	F2	F3
voy. fermées	i	308	2064	2976
	y	300	1750	2120
	u	315	764	2027
voy. mi-fermées	e	365	1961	2644
	ø	381	1417	2235
	o	383	793	2283
voy. mi-ouvertes	ɛ	530	1718	2558
	œ	517	1391	2379
	ɔ	531	998	2399
voy.ouv.	a	684	1256	2503

Figure 2: Représentation de la répartition fréquentielle de différentes voyelles orales (Meunier, 2008)

Dans les phonèmes, on retrouve également les consonnes dont le spectre acoustique est très hétérogène et la variation est rapide. Dans la langue française, il y a 17 consonnes qui peuvent être voisées (sonores) tel que [b] [d] [g] [m] [n] [ɲ] [v] [z] [ʒ] [l] [ʁ] ou non-voisées (sourdes) [p] [t] [k] [f] [s] [ʃ] et donc périodiques ou apériodiques. Elles peuvent être également occlusives, rendant la consonne explosive par le relâchement brutal du contact créant l'occlusion (lèvres, palais, …). Et enfin elles peuvent être fricatives, cet aspect s'approchant du spectre du "bruit" par la turbulence provoquée lors du resserrement de la bouche, du pharynx ou de la glotte (Meunier, 2007).

L'importance des consonnes dans l'intelligibilité de la langue est non négligeable. Dans un texte par exemple, si nous enlevons les voyelles, par déduction, le lecteur parviendra à reconstituer l'histoire. Chose impossible dans le cas de la suppression des consonnes dans ce même texte. Cette particularité proviendrait de l'incertitude statistique liée au nombre de voyelles graphiques (au nombre de 6 : a, e, i, o, u et y) en comparaison du nombre de consonnes graphiques (au nombre de 20 : b, c, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, v, w, x et z), les consonnes et voyelles graphiques peuvent s'associer entre elles afin de former un autre son. Par exemple, la voyelle phonétique [o] peut très bien être écrite avec les voyelles graphiques o[o], au[a][u] et eau[e][a][u]. L'analogie statistique entre une pièce à deux faces et un dé à six faces en démontre tout à fait ces effets, nous avons une chance sur six de tomber sur la bonne voyelle tandis que nous avons une chance sur vingt de trouver la bonne consonne (Stilp et Klender, 2010).
A l'oral, les règles se compliquent légèrement. On pourrait s'attendre à de tels résultats dans une phrase parlée. Cependant, bien que la proportion de vocoïde (son produit par l'énonciation des voyelles) et de contoïde (son produit par la formation des consonnes) soit relativement équitable (respectivement 16 et 18), il semblerait que les voyelles soient

porteuses de deux fois plus d'informations que les consonnes lorsque dans un texte parlé, les voyelles et consonnes ont été chacune leur tour remplacées par du bruit vocal (Cole et al., 1996 ; Kewley-Port et al., 2007).

Enfin, il existe des éléments intermédiaires nommés semi-voyelles et semi-consonnes, il est impossible de définir clairement la fin d'une consonne du début de la voyelle qui suit, elles sont imbriquées ensemble : (par exemple [ɥ] est formé à partir du son [y] mais il ne se prononce pas [y]). Dans la langue française, on retrouve 3 semi-voyelles telles que : [ɥ] [j] [w].

Comme vu dans la partie précédente, les constituants de la parole se différencient en partie grâce à des éléments fréquentiels, c'est pourquoi les chercheurs ont créé des outils permettant de pondérer l'importance des indices de parole en fonction de leur fréquence, c'est le cas du SII (Speech Intelligibility Index).

Les prémices du SII débutent en 1947 par l'invention de l'Articulation Index (AI) par French et Steinberg. A l'origine, l'Articulation Index avait pour but de pronostiquer la "quantité" de paroles perçue par un récepteur au travers d'une ligne téléphonique, en particulier lorsque l'environnement était défavorable à une bonne compréhension (bruit de fond par exemple) (Rhebergen et Versfeld, 2005). L'AI tout comme le SII se base sur des coefficients spécifiques donnés à chaque bande de fréquences en fonction de leurs apports en indice acoustique de la parole. Ces coefficients ont des valeurs comprises entre 0 et 1, 1 étant une bande de fréquences importante et 0 peu importante dans la compréhension. Ces coefficients dépendent de nombreux facteurs tels que le spectre vocal du locuteur, la langue et le contenu phonémique (Hurie, 2021).

Le SII correspond et fonctionne comme l'AI dont les coefficients furent corrigés en 1997 afin de devenir ce que nous connaissons actuellement à savoir le SII (ANSI S3.5-1997).
Ce SII corrigé peut-être calculé manuellement grâce à l'audiogramme "count the dot" (audiogramme à points) où il sera nécessaire de compter chacun des cent points représentant chacun un pourcent de SII.

A l'heure actuelle, le SII est utilisé dans le monde de l'audioprothèse durant la mesure in Vivo afin d'établir un pronostic sur la capacité du patient à repérer les indices de la parole en fonction de sa perte auditive.

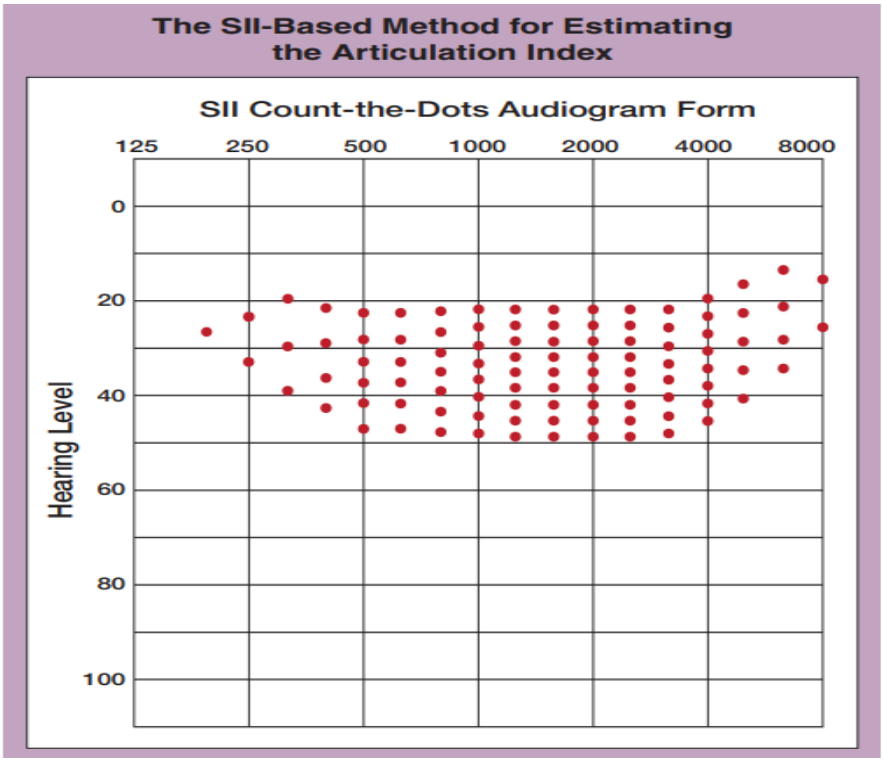


Figure 3: L'audiogramme "à points" dans le calcul du SII (Killion et al., 2010)

2. Presbyacousie et pertes auditives en pente de ski : conséquences sur la perception des sons aigus

2.1. La presbyacousie

La presbyacousie correspond à une perte auditive d'apparition lente et progressive liée à l'âge qui peut avoir plusieurs origines possibles, telles qu'une origine sensorielle représentée par la dégénérescence des cellules ciliées, une origine striale liée à la baisse de l'apport nutritif par la strie vasculaire et enfin une origine neurale dont la cause est la dégénérescence des voies et centres nerveux (Gates et Mills, 2005). La presbyacousie est également la perte auditive la plus répandue affectant les fréquences aigües. En effet, la prévalence de la presbyacousie est d'environ de 30% des plus de 65 ans (Gates et Mills, 2005) et la moitié des plus de 75 ans (Cruickshanks et al., 1998).

La presbyacousie entraîne un déséquilibre informatif en sortie de la cochlée, en particulier sur les fréquences aiguës, induisant un remaniement cortical. Celle-ci impacte fortement la compréhension et la stratégie mise en place par le cerveau pour repérer les indices acoustiques (Eggermont, 2016).

En gardant à l'esprit cette spécificité, Turner et Cummings (1999) ont découvert qu'à partir de listes de logatomes pour une perte de plus de 55 dB HL sur les fréquences supérieures à 3000 Hz, il n'y a plus d'amélioration de l'intelligibilité de la parole lorsque le niveau de présentation augmente.

De plus, dans une étude cas-témoin publiée par l'équipe de Canneyt, il est mis en avant un maintien des performances en audiométrie vocale malgré une altération des seuils en tonales. En effet, après l'étude de la réponse corticale des fréquences fondamentales de la voix (F0) par Électroencéphalogramme (EEG) celle-ci tend à diminuer avec l'âge, mais à augmenter avec la perte auditive. Ils en ont déduit qu'il s'agissait de contributions corticales supplémentaires (Canneyt et al., 2021).

2.2. Les pertes auditives en pente de ski (PdS)

Une forme particulière de perte auditive fût décrite, celle de la "pente de ski" (PdS), son origine peut-être traumatique comme pathologique, celle-ci représente une perte auditive de plus de 50 dB/octave à partir du 1000Hz. Cette description provient de la croissance en sonie plus lente lorsque la perte auditive dépasse ce seuil de pente. En effet, McDermott et son équipe vont en ce sens après avoir constaté une modification de sonie chez un groupe comportant une perte allant de 31 dB/octave à 49 dB/octave non-présente chez les patients dépassant ce seuil. Ils ont alors supposé que la perte auditive abrupte est signe d'un tel dommage cochléaire, qu'elle limite l'afférence de l'excitation nerveuse (McDermott et al., 1998).

Il arrive parfois de retrouver des zones plus ou moins étendues dans la cochlée n'émettant plus aucune afférence nerveuse. Cette anomalie porte pour nom "Zone Inerte Cochléaire" (ZIC). Cette anomalie peut provenir de l'absence complète de cellules ciliées internes (CCI) et/ou de neurones le long de la membrane basilaire. Les CCI ont un rôle de transduction du mouvement basilaire en potentiel d'action à destination des neurones afin d'amener le message auditif dans les centres auditifs. L'absence ou le non-fonctionnement de l'un ou l'autre induit une absence complète d'afférence provenant de cette zone, c'est alors pour cela qu'elle a pour nom "zone inerte" (Moore et al., 2004).
Cette non-afférence du système périphérique peut alors être en faveur d'un remaniement tonotopique autour de la zone lésée (Dietrich et al., 2001; Vickers et al., 2001).

2.3. Incidence sur la perception des phonèmes

Les pertes auditives telles que la presbyacousie et la perte en pente de ski induisent irrémédiablement une élimination de certains traits acoustiques temporels ou fréquentiels de la parole.
Les traits temporels comprennent l'aspect voisée ou non voisée, continu ou interrompu et enfin sourd ou sonore de la parole. Les traits fréquentiels quant à eux comprennent le côté aigu ou grave, oral ou nasal et enfin compact ou diffus de la voix (Milivojevič, 1970).

Cependant, on constate régulièrement que la compréhension des sujets PdS ou presbyacousiques se maintient malgré la perte des sons aigus. Est-ce lié à la plasticité cérébrale qui permet au cerveau d'aller chercher des informations supplémentaires dans les basses fréquences (BF) en abandonnant les hautes fréquences (HF) ?

3. La plasticité cérébrale

La plasticité cérébrale a été théorisée au tout début du XXe siècle par Santiago Ramon y Cajal. Il a ouvert la voie à un nouveau concept fondamental dans la compréhension et dans la recherche scientifique.
La plasticité cérébrale est présente tout au long de la vie et correspond à la capacité du système nerveux à modifier sa structure et ses réponses en fonction de l'environnement de l'individu et des entrées sensitives (Rajan et Irvine, 1998).

Une forme particulière de plasticité cérébrale est la plasticité auditive. Elle correspond à la plasticité cérébrale spécifique liée aux régions auditives.
Le développement du système auditif débute par des structures primaires durant la phase embryonnaire auxquelles l'oreille interne, le tronc cérébral, les voies auditives et le cortex auditif se forment. Ce n'est que durant le début du second semestre de gestation que nous pouvons constater le développement rapide de ces structures primaires, à ce stade, la cochlée atteint sa pleine maturité.
Durant la période périnatale, c'est l'ensemble du système auditif qui parvient à sa configuration finale. Dès lors, l'étude de l'activité électrique du tronc cérébral démontre la réponse aux sons ainsi qu'à la reconnaissance phonétique (Moore et Linthicum, 2007).

Par la suite, les aires corticales de l'audition évoluent en permanence durant toute la vie de l'individu, des expériences ont par ailleurs pu rendre compte de l'état dynamique de la plasticité auditive. En effet, dans une étude de 1993, Rajan et al., étudient la restructuration corticale post-lésionnelle d'une section lésée d'une cochlée chez des chats. Ils constatent après plusieurs mois, grâce à des micro-électrodes d'enregistrement cortical, une

réorganisation de la carte tonotopique. Cette étude démontre que la représentation tonotopique corticale n'est pas fixée lorsqu'il y a une désafférentation du système périphérique.

Inversement, lorsqu'on stimule sur une fréquence précise, on découvre une sur-représentation corticale de cette fréquence, empiétant alors sur les zones des fréquences avoisinantes (Zhang et al., 2001).

Cependant, après la synthèse de nombreuses études, Rajan et Irvine (1998) définissent les conditions nécessaires à l'amorce de la plasticité auditive.

Ils en déduisent deux critères obligatoires:

- La première condition nécessite une perte d'origine cochléaire uniquement. En effet, une perte d'origine transmissionnelle seule n'est pas suffisamment prononcée pour bloquer l'ensemble des afférences provenant de différentes zones cochléaires.
- La seconde condition nécessite des dommages cochléaires suffisamment importants pour qu'aucune afférence neuronale ne provienne de la zone lésée.

Lorsque ces deux conditions sont réunies, on observe une réorganisation corticale (Dietrich et al., 2001). Ces effets sont attendus dans le cas d'une presbyacousie et notamment dans le cas d'une PdS.

4. Objectifs

Dans cette étude transversale, nous allons tenter de comparer les performances de reconnaissance phonémique en condition acoustique dégradée entre les malentendants (ME et PdS) et les normo-entendants (NE) aux travers de listes de LEFEVRE appauvries progressivement sur les fréquences aiguës.

Par cette étude nous souhaiterions mettre en évidence l'impact des fréquences aigües sur les performances en audiométrie vocale en fonction des différents profils audiométriques.

Cette étude se propose donc de répondre à la question suivante : **Quelle est la part d'importance des fréquences aigües sur les performances en audiométrie vocale en fonction des différents profils audiométriques?**

Pour ce faire, nous évaluerons l'intelligibilité et la reconnaissance phonémique des sujets en abaissant progressivement l'énergie sonore par les hautes fréquences.

L'hypothèse de l'étude est la suivante : nous nous attendons à ce que l'intelligibilité des sujets ME et PdS se maintienne plus longtemps face à la dégradation des indices acoustiques aigus du fait de la plasticité cérébrale.

Afin de mieux appréhender la portée de l'étude, nous pouvons faire le lien avec l'audiogramme à points dans le calcul du SII. En effet, celui-ci fut à l'origine établi, à partir de "l'articulation index" évaluant l'impact de la dégradation d'écoute, généré par une ligne téléphonique de plus ou moins bonne qualité. Cependant, l'aspect propre à l'auditeur fut ici omis (l'auditeur est un normo-entendant ou un malentendant). Le modèle du SII "count the dot" peut alors ne plus être tout à fait ajusté pour une personne présentant une perte en pente de ski de longue date, avec des points pouvant être plus rapprochés dans les basses fréquences par exemple.

Bien que scientifiquement inexacts, les graphiques suivants permettent de synthétiser cette idée.
Schématiquement, si on reprend l'audiogramme "Count the Dot" (Figure 4), on est en droit de se demander si la répartition des points pour un sujet ME ou PdS restera similaire à celle d'un NE (Figure 5 points bleus) ou bien si la plasticité cérébrale permettra une réorganisation corticale aboutissant à une redistribution des points vers des fréquences plus graves (Figure 5 points rouges).

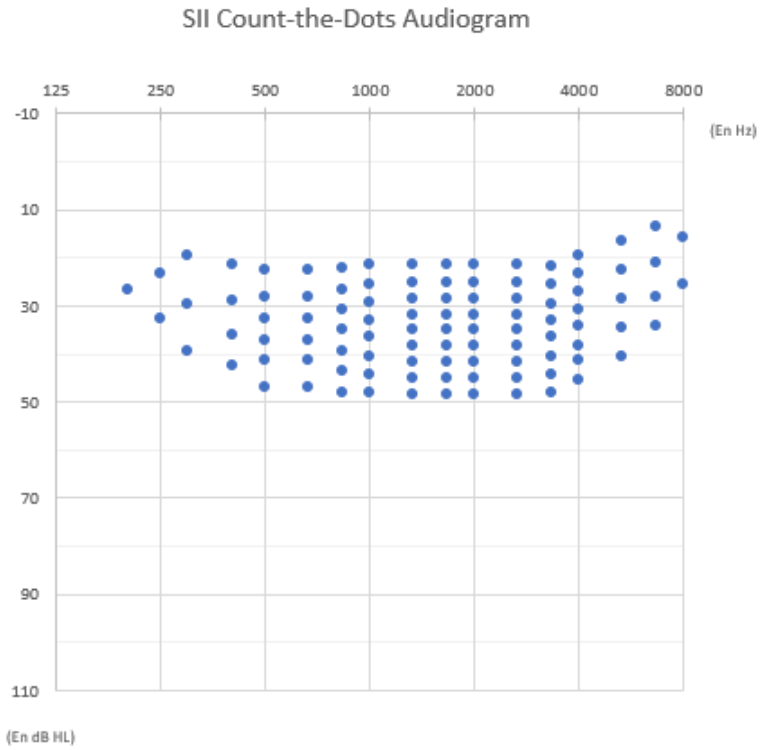


Figure 4: Audiogramme comportant les points non modifié du SII

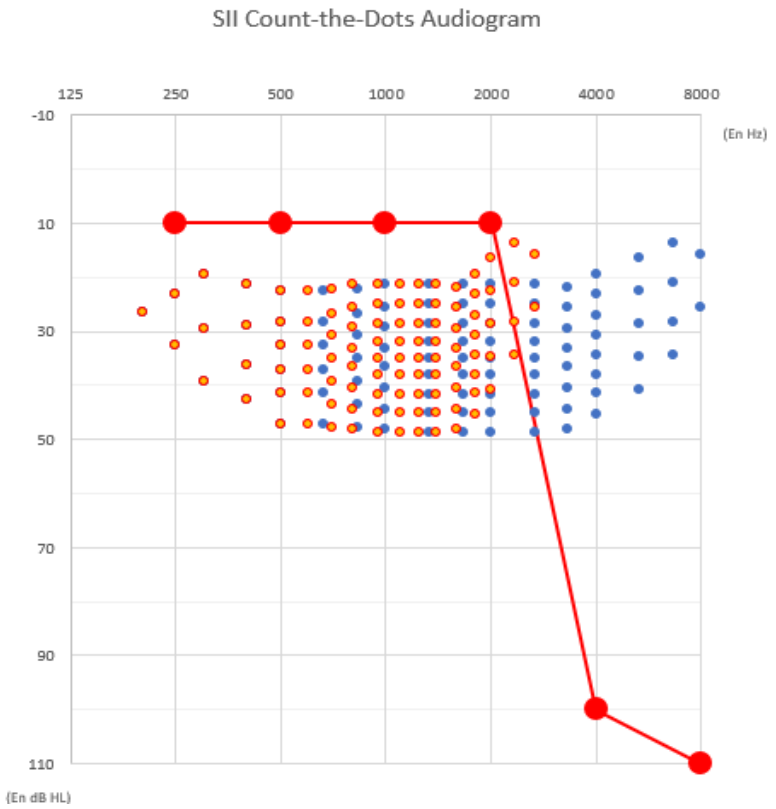


Figure 5: Audiogramme comportant la nouvelle pondération hypothétique des points du SII, en fonction des capacités supra-normale d'un individu disposant d'une perte auditive de forme PdS

Si notre hypothèse de resserrement des points par plasticité cérébrale est réaliste (ce que nous ne pourrons pas vérifier dans cette étude, faute d'outils adéquats), nous sommes en droit de penser que l'intelligibilité des ME et PdS va mieux se maintenir que celle des NE à mesure que nous appauvrirons les indices fréquentiels aigus.

Matériels & méthodes

1. Population

1.1. Critères d'inclusion

La présente étude va confronter trois groupes : deux groupes tests de sujets ME et PdS et un groupe contrôle de sujets NE.

Le groupe NE sera constitué de personnes comportant une perte auditive inférieure à 20 dB HL sur toutes les fréquences selon les critères du Bureau International d'Audiophonologie (B.I.A.P) (moyenne des seuils auditifs aux fréquences 500, 1000, 2000 et 4000 en dB HL). Par extension, pour éviter les sujets ayant une perte auditive de faible pente, nous exclurons de ce groupe les sujets ayant un seuil supérieur à 20 dB HL sur chacune de ces fréquences.

Les sujets appartenant au groupe ME devront présenter une perte auditive supérieure à 30 dB HL n'ayant pas de pente de plus de 50 dB/octave.
Nous intégrerons dans l'étude un groupe PdS comportant une perte auditive de plus de 30 dB HL et disposant d'une perte de type pente de ski (plus de 50 dB/octave) à partir de 1000 Hz (McDermott et al., 1998) afin de tenter d'observer un effet de plasticité auditive plus flagrant.

1.2. Critères d'exclusion

A été exclue de cette étude, toute personne ayant une otoscopie anormale (bouchon de cérumen, perforation tympanique, …), ainsi que toute personne présentant des troubles cognitifs connus.

2. Matériel et méthode

2.1. Méthode

Afin de rendre possible cette étude, il nous faudra utiliser des listes de mots interdisant toutes suppléances mentales, comportant la grande majorité des phonèmes du français, équilibrées et suffisamment robustes pour garantir une grande reproductibilité.

Notre choix s'est alors porté sur les listes de logatomes de Lefèvre. Les listes syllabiques de Lefèvre ont été émises par l'affinity 2.0 par le biais d'un casque TDH 39 à un niveau de 65 dB SPL représentant la voix moyenne. Elles sont composées de 20 syllabes ayant pour structure une consonne suivi d'une voyelle (CV) répéter 3 fois ; on a donc (CV CV CV). La répétition permet au patient une meilleure exploitation de l'enveloppe temporelle afin d'éviter les confusions (Le Gall, 2015).

Chaque liste comporte l'ensemble des consonnes et presque la totalité des voyelles de la langue française. La structure des syllabes (CV) permet d'écarter tous risques de suppléance mentale et d'atteindre une très bonne reproductibilité des résultats ainsi qu'une grande fiabilité.
La notation de ces listes se fait sur 40 de par la composition bi-phonème de chacune des syllabes. Chaque Tri-syllabe-Identique (T.S.I) ne peut comporter que deux erreurs, une sur la voyelle et une sur la consonne (Lefevre, 2009).

gé	jou	pa	cha	ché	ba	pé
chau	bé	té	bain	bou	chou	dau
ti	quin	si	qui	ni	fin	guon
fan	chi	zain	dou	tain	vi	fi
pain	mu	lon	van	zeu	pau	sau
vou	za	tou	mau	pan	neu	va
sa	peu	beu	nu	kau	ton	zé
deu	gau	fu	pon	son	sé	jain
bon	non	vau	gueu	vu	du	queu
lu	tan	mé	lé	fa	jan	la
mi	fau	quan	teu	mon	main	nau
cou	li	bi	sain	dan	lou	tu
zo	vé	dain	gi	gain	zi	dé
nain	su	chan	lan	jo	kon	chon
gué	don	ju	zu	leu	gu	bu
pu	nan	na	qué	zou	né	mou
gan	vain	gou	bau	chu	ga	fou
ceu	feu	cheu	fon	fé	tau	nan
von	pou	zon	nou	qua	san	veu
ma	da	lau	ja	ban	jeu	ta
Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés	Phonèmes /40 erronés
% P.R /100	% P.R /100	% P.R /100	% P.R /100	% P.R /100	% P.R /100	% P.R /100

TABLEAU 1 : TEST SYLLABIQUE (NOUVELLE VERSION) – FRANK LEFEVRE 2008 –

Figure 6 : Tableau des syllabes des listes de Franck Lefèvre

Nous avons dû modifier ces listes en y appliquant une fréquence de coupure de type passe-bas pour trois fréquences de coupure, à savoir 4000 Hz, 2000 Hz et 1000 Hz.
Pour cette démarche, nous avons utilisé le logiciel Audacity®. Celui-ci permet, grâce à un filtre de type butterworth d'ordre 8, de couper le signal à la fréquence de coupure choisie avec une coupure de -48dB/octave. Ce type de filtre est souvent employé afin de garantir un gain le plus constant possible sur la bande passante.
De plus, la suppression d'une partie du spectre entraîne irrémédiablement une diminution de la valeur efficace (RMS: Root Mean Square), induisant par la suite une diminution en décibel du signal émis. Afin de contrer ce biais, nous avons calqué cette valeur RMS, sur celle de chacune des listes ne comportant pas de fréquence de coupure, cette démarche a été effectuée également par le biais d'Audacity®.

Dans un premier temps, nous avons étalonné le signal de sortie de l'ordinateur en intensité afin d'émettre les listes coupées en fréquence de façon homogène à la calibration de la chaîne de mesure. Nous avons alors utilisé le vu-mètre de l'audiomètre couplé aux listes de calibrations droites/gauches (bruit blanc) des listes de Lefevre. Le niveau d'entrée dans l'audiomètre doit correspondre au seuil 0 dB affiché sur le vu-mètre.

La vérification de la calibration a été réalisée en faisant passer une audiométrie vocale à des NE par le biais de l'ordinateur et par le biais de la chaîne de mesure, les résultats devant être concordants.

Dans un second temps, nous sommes passés aux tests proprement dits. Les normo-entendants et malentendants ont suivi le même protocole et ont commencé le rendez-vous par une anamnèse afin de replacer le patient dans son contexte auditif, puis par une otoscopie

Après ces démarches préventives, nous avons effectué une audiométrie tonale liminaire, celle-ci devait être inférieure à 20 dB HL sur l'ensemble des fréquences pour les normo-entendants. Dans le cas des malentendants nous avons fait la distinction entre un patient comportant une perte dite “en pente de ski”, c’est à dire comporter une pente de plus de 50 dB HL par octave (Hellman, 1994), et les patients présentant une presbyacousie plus commune à savoir une perte principalement dans les aigües avec une perte moyenne de plus de 30 dB sur les fréquences 500, 1000, 2000 et 4000 dont la valeur se calcule par la somme individuelle de la perte sur ces 4 fréquences divisée par 4 selon la recommandation du 1er Mai 1997 du Bureau International d’Audio-Phonologie (BIAP).

Enfin, nous avons procédé à l'émission des listes de Lefèvre à 65 dB SPL au casque oreille par oreille, de façon aléatoire avec les différentes listes de coupures (4000 Hz, 2000 Hz et 1000 Hz). Chacune des 3 fréquences de coupures sera donc évaluée sur chacune des oreilles.

2.2. Analyse des données

Les données ont été recueillies et classées grâce au logiciel Microsoft Excel 2020 tandis que leurs analyses ont été faites par le biais du logiciel Jasp 0.16.2.
Dans cette étude, il est important de préciser que chaque oreille correspond à une entité bien distincte. Chaque oreille sera donc étudiée de façon indépendante.
De plus, pour cette analyse, on tolérera un risque alpha = 5%.

2.2.1. Vérification des biais d’échantillons

Nous nous efforcerons de réduire au minimum les risques de biais liés à la cohorte par l’intégration de tests statistiques supplémentaires évaluant l’influence du côté testé (oreille droite/oreille gauche), l’influence de l’âge sur les performances d’écoute et enfin l’influence du sexe.

2.2.1.1. Influence du côté testé

Nous allons évaluer l'intelligibilité de tous les groupes confondus et de toutes les fréquences de coupures en fonction de l'oreille testée.
Le facteur d'étude est de type qualitatif avec 2 échantillons appariés comprenant des variables quantitatives ne suivant pas une loi normale. Nous allons donc effectuer un test de Wilcoxon pour données appariées.

2.2.1.2. Influence de l'âge

La grande variabilité d'âge (de 17 ans à 92 ans), ainsi que la répartition entre les groupes NE, ME et PdS peut être un frein à l'étude. Nous allons évaluer son impact afin de limiter les biais.
Le facteur d'étude est de type qualitatif (tranche d'âge) comprenant des variables quantitatives ne suivant pas une loi normale.
Pour effectuer cette analyse, nous avons tout d'abord établit 6 tranches d'âges ([10-25]; [26-40-]; [41-55]; [56-70]; [71-85] et [86-100]) afin de pouvoir par la suite effectué une ANOVA ainsi qu'un test Post Hoc en cas de significativité avec une correction de Tukey.
Ce découpage par quinzaine d'année permet à la fois d'englober l'ensemble de la cohorte, tout en limitant le nombre de tranches d'âge à analyser.

2.2.1.3. Influence du sexe

La proportion d'homme et de femme entre les groupes n'est pas égale. Pour tenter de supprimer le biais de l'influence du sexe sur les mesures, nous allons étudier le seuil de significativité de l'impact du sexe sur l'intelligibilité, tous groupes confondus puis en intragroupe.
Le facteur d'étude est de type qualitatif avec 2 échantillons appariés comprenant des variables quantitatives ne suivant pas une loi normale. Nous allons donc effectuer un test de Wilcoxon pour données appariées.

2.2.2. Comparaison de l'intelligibilité globale tous sujets confondus et entre les différents groupes

La première analyse statistique sera faite sur un échantillon comprenant l'ensemble des sujets (NE, ME, PdS) afin d'évaluer la difficulté croissante due à la fréquence de coupure se rapprochant des basses fréquences.
Le score sera noté en pourcentage d'intelligibilité, établi sur la base des erreurs phonémique par la formule (pourcentage d'intelligibilité = (nombre de phonèmes dans une liste - nombre d'erreurs dans la liste)*100/nombre de phonèmes dans une liste).

On se retrouve face à un facteur d'étude de type qualitatif représenté par les 3 groupes indépendants (NE, ME et PdS) comprenant des variables quantitatives (pourcentage d'intelligibilité) suivant une distribution non normale.
L'ensemble des variables sera considéré comme apparié, car la variabilité concerne les mêmes individus.
Nous allons donc, en fonction de ces facteurs, effectuer une ANOVA pour données appariées complétée par un test de Friedman dans le cas où la répartition des échantillons ne suivrait pas une loi normale.

Dans un second temps, la même analyse sera faite en séparant chacun des groupes avec leur pourcentage d'intelligibilité propre. Ce test suit les mêmes facteurs et la même typologie de test.
En cas de significativité, ces tests seront succédé d'un test Post Hoc avec une correction de Tukey afin d'obtenir les p-values des comparaisons multiples.

2.2.3. Comparaison de la perte d'intelligibilité relative tous sujets confondus et entre les différents groupes (NE / ME / PdS)

La seconde analyse portera non pas sur l'intelligibilité mais sur la perte d'intelligibilité relative en fonction du maximum d'intelligibilité obtenu pour chaque sujet (soit les résultats obtenus avec la fréquence de coupure 4000 Hz (FC4000Hz).

Afin de calculer ces variables, nous utiliserons les formules suivantes :

- Pour la perte d'intelligibilité entre FC4000Hz et FC2000Hz :
    - (Intelligibilité FC4000Hz - Intelligibilité FC2000Hz) / Intelligibilité FC4000Hz.

- Pour la perte d'intelligibilité entre FC4000Hz et FC1000Hz :
    - (Intelligibilité FC4000Hz - Intelligibilité FC1000Hz) / Intelligibilité FC4000Hz.

Nous retrouvons ici, un facteur d'étude de type qualitatif composé de 3 groupes appariés avec des variables quantitatives Nous allons donc appliquer une ANOVA pour données appariées, complétée par un test non paramétrique de Wilcoxon pour 2 échantillons dans le but d'obtenir la p-value.
La comparaison intergroupe suit la même catégorisation de test, seule la détermination de la p-value sera différente. Elle devra s'effectuer par le biais d'un test Post Hoc avec une correction de Tukey.

Résultats

1. Description générale de la population

Cette étude a nécessité la présence de 60 sujets, correspondant à 60 oreilles (chaque oreille étant un sujet distinct).
Nous avons défini 3 groupes différents en fonction de la pertes auditives:

- Le groupe des normo-entendants est composé de 20 sujets comprenant 14 sujets femmes et 6 sujets hommes pour un âge moyen de 27 ans. La perte moyenne de ce groupe est de 7,85 dB HL.
- Le groupe des presbyacousiques est composé de 20 sujets comprenant 10 sujets femmes et 10 sujets hommes pour un âge moyen de 77 ans. La perte moyenne de ce groupe est de 51,5 dB HL.
- Le groupe des pertes en pente de ski est composé de 20 sujets comprenant 4 sujets femmes et 16 sujets hommes pour un âge moyen de 67 ans. La perte moyenne de ce groupe est de 46,8 dB HL.

2. Vérification des biais d'échantillonnage

2.1. Influence du côté testé

Après un test T de Student, la p-value indiquée est de 0,662, il n'y a donc pas de différence significative entre les résultats obtenus sur l'oreille droite et sur l'oreille gauche.

2.2. Influence de l'âge

Le tableau du test Post Hoc indique une différence significative uniquement pour la catégorie des [86->100] avec les groupes des [10->25], [26->40] et [56->70]. Nous retrouvons respectivement une p-value de 0,001, de 0,005 et enfin de 0,016.

2.3. Influence du sexe

La première mesure, tous groupes confondus, indique une p-value de 0,096 ne donnant pas une différence significative entre les hommes et les femmes quant à l'intelligibilité.
Les suivantes indiquent une p-value de 0,779 pour les NE, 0,546 pour les ME et enfin de 0,282 pour les PdS.

3. Comparaison de l'intelligibilité tous sujets confondus et entre chacun des groupes en fonction de la fréquence de coupure

3.1. Comparaison de l'intelligibilité tous sujets confondus

La première analyse porte sur le pourcentage d'intelligibilité tous sujets confondus de la performance d'écoute en fonction des différentes fréquences de coupures.

Nous avons émis les listes de différentes fréquences de coupures au travers d'un casque oreille par oreille à 65 dB SPL.

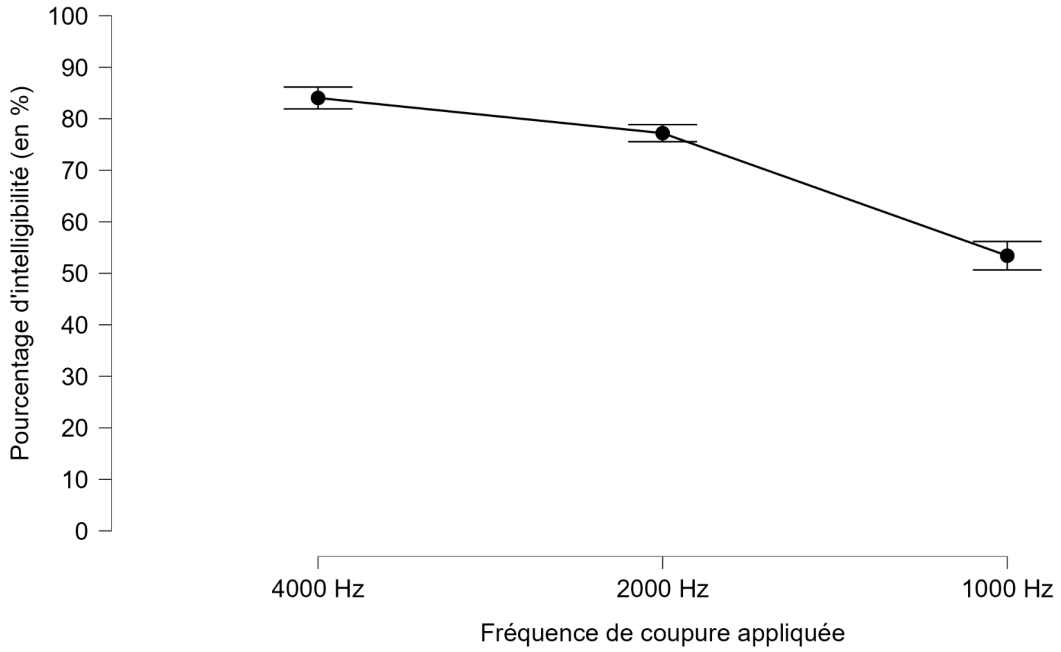


Figure 7 : Pourcentage d'intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure tous sujets confondus (N=60)

La Figure 7 montre des intelligibilités moyennes de 84%, 77% et 53% respectivement pour les fréquences de coupure 4000 Hz, 2000 Hz et 1000 Hz. Soit une perte d'intelligibilité de 7% en passant de FC4000Hz à FC2000Hz et de 24% en passant de FC2000Hz à FC1000Hz.

On observe une dispersion des valeurs autour de la valeur moyenne avec des écart-types de 15% pour FC4000Hz, 9% pour FC2000Hz et 13% pour FC1000Hz.

Tous groupes confondus, le test de Friedman révèle une différence significative ($p<0.001$).

3.2. Comparaison de l'intelligibilité entre les différents groupes

La seconde analyse porte sur le pourcentage d'intelligibilité entre les différents groupes.

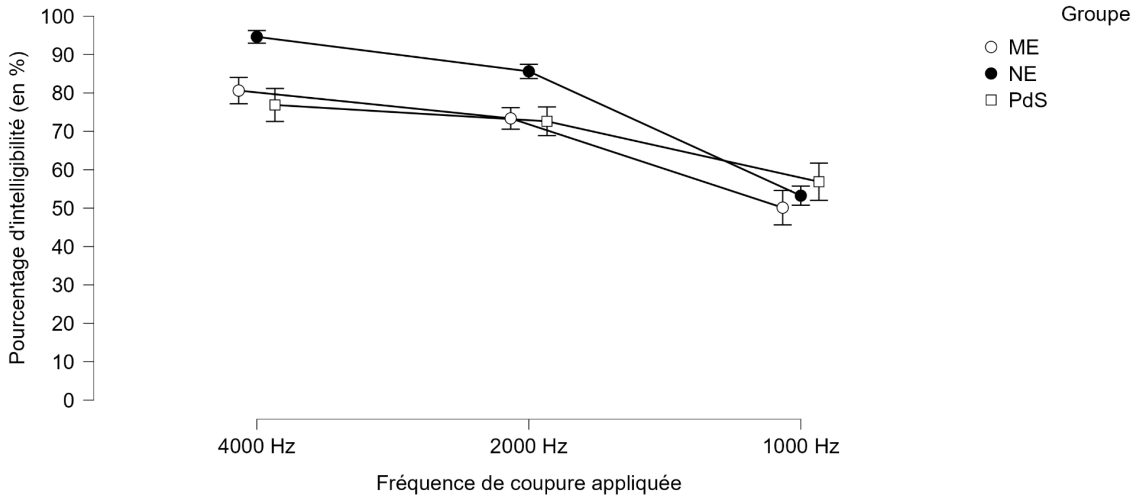


Figure 8 : Pourcentage d'intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure par groupe d'étude (N=60)

Pour ce qui est de l'analyse en fonction du groupe de perte auditive (NE, ME, PdS), on constate respectivement une intelligibilité de 95%, 81% et 77% avec FC4000Hz, 86%, 73% et 73% avec FC2000Hz et 53%, 50% et 57% avec FC1000Hz.

On observe une variabilité des données (écart-type) entre 5% et 18% au sein des différents groupes (NE, ME et PdS) avec pour la FC4000Hz respectivement 5%, 13% et 18%. Pour la FC2000Hz, on retrouve une variabilité des données respectivement de 5%, 13% et 15%. Enfin pour la FC1000Hz, nous retrouvons une variabilité respectivement de 8%, 9% et 11%.

L'ANOVA pour données appariées révèle des différences significatives (p=0,001) avec des différences entre les groupes de pertes auditives (p=0,001) et au sein même des groupes (p=0,004).
Le test post-hoc de Tukey permet de montrer que le groupe NE diffère des deux autres pour les conditions FC4000Hz et FC2000Hz mais qu'il n'y a aucune différence significative entre les trois groupes pour FC1000Hz (Figure 9).

Post Hoc Comparisons - Groupe ✻ fréquence de coupure

		95% CI for Mean Difference					
		Mean Difference	Lower	Upper	SE	t	p_{tukey}
ME, 4000 Hz	NE, 4000 Hz	-14.000	-26.111	-1.889	3.682	-3.802	0.007
	PdS, 4000 Hz	3.750	-8.361	15.861	3.682	1.018	0.983
NE, 4000 Hz	PdS, 4000 Hz	17.750	5.639	29.861	3.682	4.820	< .001
ME, 2000 Hz	NE, 2000 Hz	-12.250	-24.361	-0.139	3.682	-3.327	0.032
	PdS, 2000 Hz	0.750	-11.361	12.861	3.682	0.204	1.000
NE, 2000 Hz	PdS, 2000 Hz	13.000	0.889	25.111	3.682	3.530	0.017
ME, 1000 Hz	NE, 1000 Hz	-3.125	-15.236	8.986	3.682	-0.849	0.995
	PdS, 1000 Hz	-6.750	-18.861	5.361	3.682	-1.833	0.660
NE, 1000 Hz	PdS, 1000 Hz	-3.625	-15.736	8.486	3.682	-0.984	0.987

Figure 9 : Tableau des p-values entre les différents groupes et leurs fréquence de coupure associée

4. Comparaison de la perte d'intelligibilité tous sujets confondus et entre les différents groupes (NE / ME / PdS)

4.1. Comparaison de la perte d'intelligibilité tous sujets confondus

Nous allons maintenant évaluer le pourcentage de perte d'intelligibilité en utilisant comme référence la FC4000Hz représentant l'intelligibilité maximale recueillie auprès des sujets afin de vérifier si le taux de perte est similaire entre les 3 groupes.

Nous utilisons les données recueillies lors du passage des différentes listes avec un casque à un niveau de 65 dB SPL

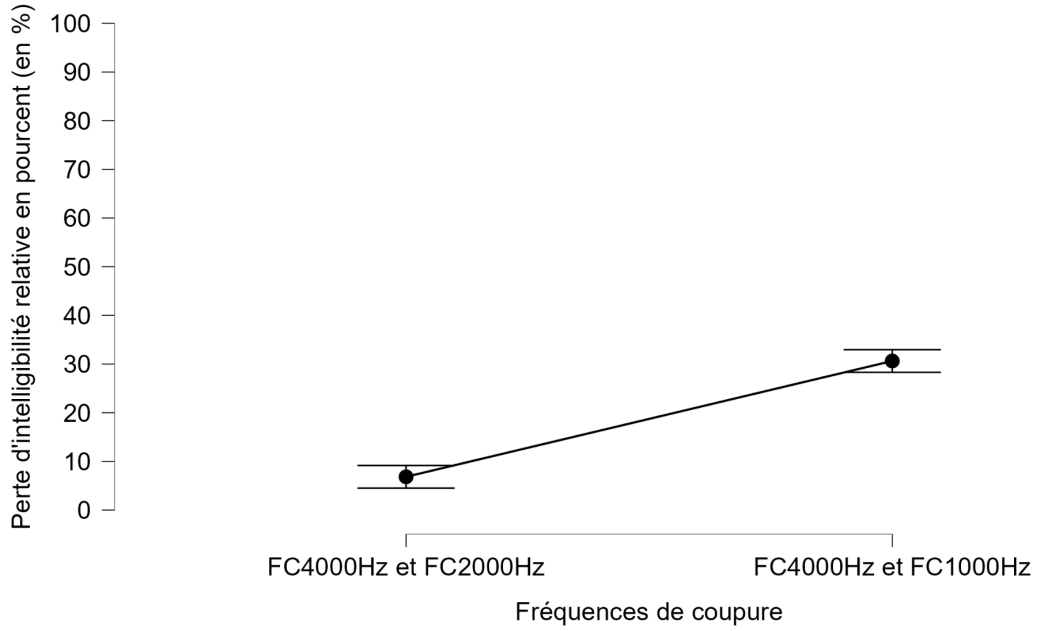


Figure 10 : Pourcentage de perte d'intelligibilité tous groupes confondus en fonction de la fréquence de coupure (N=60)

Tout d'abord, il est important d'apprécier le taux de perte tous sujets confondus.
Entre la FC4000Hz et FC2000Hz, le taux de perte moyen est de 6,8% et de 30,6% entre FC4000Hz et FC1000Hz.

On observe une dispersion des données (écart-type) tous groupes confondus de 8% entre la FC4000Hz et la FC2000Hz et de 15% entre la FC4000Hz et FC1000Hz.

Par ailleurs, la p-value est inférieure à 0,001 apportant une indication de la significativité de la mesure.

4.2. Comparaison de la perte d'intelligibilité entre les différents groupes

Nous évaluons à présent la perte d'intelligibilité entre les différents groupes en fonction de la fréquence de coupure de référence (FC4000Hz).

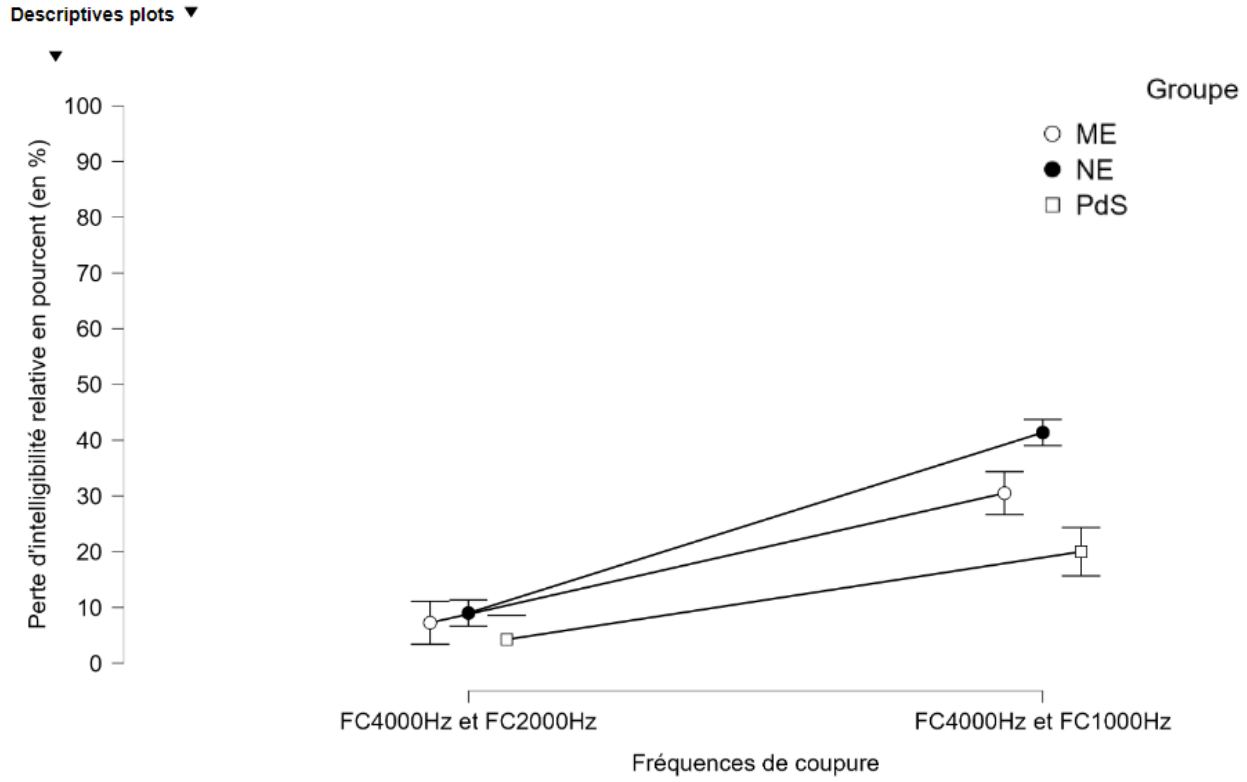


Figure 11 : Pourcentage de perte d'intelligibilité de chacun des groupes en fonction de la fréquence de coupure (N=60)

Si on analyse maintenant selon les groupes, on observe respectivement pour les NE, ME et PdS une perte d'intelligibilité de 9%, 7% et 4% entre FC4000Hz et FC2000Hz et une perte de 41%, 31% et 20% entre FC4000Hz et FC1000Hz.

On observe une variabilité des données (écart-type) entre les différents groupes (NE, ME et PdS) pour la comparaison FC4000Hz et FC2000Hz de respectivement 4%, 7% et 11%. Entre la FC4000Hz et FC1000Hz la variabilité des données est respectivement de 7%, 13% et 15%.

L'ANOVA pour données appariées révèle des différences significatives (p=0,001) avec des différences entre les groupes de pertes auditives (p=0,001) et au sein même des groupes (p=0,001).

Un test Post Hoc, permet de déterminer les p-value entre chacune des comparaisons de l'étude, la différence est ici non significative entre les groupes pour la perte d'intelligibilité entre les FC4000Hz et FC2000Hz (figure 12).
La différence est cependant significative entre les différents groupes pour la perte d'intelligibilité entre FC4000Hz et FC1000Hz (figure 12).

La figure suivante indique l'ensemble des valeurs de p-value intéressantes à l'étude avec en fluo les valeurs significatives.

Post Hoc Comparisons - Groupe ✻ Perte d'intelligibilité

			95% CI for Mean Difference				
		Mean Difference	Lower	Upper	SE	t	p_{tukey}
ME, FC4000Hz et FC2000Hz	NE, FC4000Hz et FC2000Hz	-1.750	-11.504	8.004	3.240	-0.540	0.994
	PdS, FC4000Hz et FC2000Hz	3.000	-6.754	12.754	3.240	0.926	0.939
NE, FC4000Hz et FC2000Hz	PdS, FC4000Hz et FC2000Hz	4.750	-5.004	14.504	3.240	1.466	0.687
ME, FC4000Hz et FC1000Hz	NE, FC4000Hz et FC1000Hz	-10.875	-20.629	-1.121	3.240	-3.356	0.014
	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	10.500	0.746	20.254	3.240	3.241	0.020
NE, FC4000Hz et FC1000Hz	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	21.375	11.621	31.129	3.240	6.597	< .001

Figure 12 : Tableau des p-values entre les différents groupes et leurs fréquence de coupure associées

Discussion

L'objectif principal de notre étude est de pouvoir évaluer les performances des différents groupes (NE, ME et PdS) en situation d'écoute dégradée (fréquence de coupure 4000 Hz, 2000 Hz et 1000 Hz).
Nous nous attendons à ce que l'intelligibilité des sujets ME et PdS se maintienne plus longtemps face à la dégradation des indices acoustiques aigus.

1. Vérification des biais d'échantillonnage

Afin de rendre l'étude scientifiquement viable, nous avons mis un point d'honneur à évaluer les possibles biais pouvant provenir de notre cohorte.

Une analyse des variables "sexe" et "côté testé" des sujets montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les trois groupes. Cela signifie que les différences éventuelles en termes d'intelligibilité ne peuvent pas être attribuées à ces variables confondantes. En ce qui concerne la variable "âge", il existe des différences significatives sur le groupe des [86->100] vis-à-vis des autres tranches d'âges, mais nous estimons que ce biais n'aura qu'un faible impact puisqu'il concerne 6 sujets sur 60 au total.

2. Comparaison de l'intelligibilité

Nous avons tout d'abord cherché à évaluer l'intelligibilité entre les listes des trois groupes confondus. Cela nous a permis de faire ressortir la chute d'intelligibilité liée à la fréquence de coupure qui est de plus en plus basse.

Les résultats montrent une perte d'intelligibilité plus importante entre la FC2000Hz et la FC1000Hz qu'entre la FC4000Hz et la FC2000Hz avec une intelligibilité passant respectivement de 77% à 53% et de 84% à 77%. Cela peut s'expliquer par la quantité d'indices acoustiques de la parole contenue dans cette bande de fréquence en comparaison à la seconde. Cet aperçu est en étroite concordance avec les informations recueillies par le SII et sa confection (ANSI S3.5-1997).

En effet, les coefficients donnés pour des fréquences allant de 2000 Hz à 4000 Hz sont moindres que ceux allant du 1000 Hz à 2000 Hz (Hurie, 2021). Il en est de même avec les informations retranscrites dans le SII "counts the dot audiogram" ou l'audiogramme "à

points", dont on comptabilise plus de points dans l'intervalle [1000 Hz - 2000 Hz] que dans l'intervalle [2000 Hz - 4000 Hz] (Killion et al., 2010).
Enfin, plus la plage de fréquence sera étroite, moins nous aurons de redondance d'indice acoustique (Varnet, 2015).

Nous allons désormais nous intéresser aux résultats d'intelligibilité entre les différents groupes.

Comme nous l'attendions, les NE ont une performance d'intelligibilité nettement supérieure aux ME et PdS sur les FC4000Hz et FC2000Hz, de façon significative (p-value inférieure à 0,05). Cependant, pour ce groupe, la chute d'intelligibilité pour la FC1000Hz est telle que la différence devient non significative en regard des ME et PdS (p-value égale à 0,987 entre NE et PdS et 0,995 entre NE et ME).

Bien que les ME et PdS ont une intelligibilité plus dégradée sur les fréquences de coupures 4000 Hz et 2000 Hz, les performances se dégradent moins vite ce qui fait que nous ne constatons plus de différence entre les groupes pour la fréquence de coupure 1000 Hz.

Nous supposons alors qu'il y a bien une certaine robustesse face à la perte d'indice acoustique chez les PdS, mais également chez les ME comme décrit par l'équipe de Canneyt (2021).

A l'image de notre proposition de réorganisation des "points" dans le SII à points, il serait intéressant d'étudier de façon plus précise la répartition des indices acoustiques par l'utilisation de technologie plus avancée telles que l'EEG par exemple, afin d'établir de nouveaux coefficients fréquentiels dans le SII qui seront liés au degré de perte auditive et son ancienneté. L'EEG permettrait également d'établir si ce maintien des performances supra-normales peut-être en lien avec une réorganisation tonotopique comme décrit par l'étude de Dietrich et son équipe (2001). Cette réorganisation peut être due à une désafférence du système périphérique présente chez les PdS et ME comme énoncé par l'équipe de Rajan (1993).

3. Comparaison de la perte d'intelligibilité

Après étude de l'intelligibilité, il nous semblait important d'évaluer la perte d'intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure de référence (FC4000Hz) représentant le maximum d'intelligibilité pour chacun des groupes. Pour ce faire, nous évaluons la perte de compréhension entre la FC4000Hz et FC2000Hz puis entre FC4000Hz et FC1000Hz.

En évaluant le taux de perte des trois groupes, la perte relative d'intelligibilité est bien plus importante en passant de la FC4000Hz à la FC1000Hz par rapport au passage de la FC4000Hz à la FC2000Hz avec respectivement 30,6% et 6,8%. Ces résultats montrent une difficulté de compréhension accrue lors du passage des listes avec une fréquence de coupure plus basse.

Entre chacun des groupes, la perte relative d'intelligibilité est similaire pour la comparaison de la FC4000Hz et FC2000Hz avec des différences non significatives entre les groupes (p-value supérieure à 0,05). Cependant, la perte relative d'intelligibilité entre la FC4000Hz et la FC1000Hz devient significativement moins importante chez les PdS par rapport aux ME qui quant à elle est significativement moins importante que chez les NE avec respectivement 20%, 31% et 41%.

Les résultats que nous avons obtenus confirment notre hypothèse : il y a un meilleur maintien de l'intelligibilité chez les PdS vis-à-vis des autres groupes. Ces résultats concordent avec l'étude de Canneyt et al. (2021) indiquant une conservation des performances en audiométrie vocale malgré une altération des seuils en tonale, ainsi que l'étude de Vickers et al. (2001) pour les pertes en pente de ski statuant sur des contributions corticales supplémentaires. Afin de préciser l'origine exacte d'une telle performance en audiométrie vocale, il serait intéressant d'évaluer la présence de zones inertes cochléaires à l'aide d'un ten test par exemple et de vérifier (en particulier pour le groupe des PdS) si la non-afférence du système périphérique peut effectivement induire une réorganisation corticale comme énoncée par l'équipe de Vickers (2001).

Cette étude se base sur des performances audiométriques dans le calme, ne représentant pas l'ensemble des situations sonores réelles. Il serait donc intéressant de développer notre approche dans des conditions acoustiques de bruits, les formants secondaires étant plus résistants aux perturbations (Varnet, 2015), nous pourrons alors évaluer le maintien ou non des performances en audiométrie vocale chez les ME et PdS.

4. Limites de l'étude:

4.1. Biais de mesure:

Il nous semblait judicieux d'implanter une mesure de contrôle avec des listes non coupées en fréquence afin de faire état de la performance maximale des différents auditeurs. Après recueil des témoignages auprès des normo-entendants et vérification des scores, bien que le test soit relativement court (entre 10 minutes et 15 minutes pour le passage des différentes listes sur l'oreille droite et l'oreille gauche) les performances diminuent à cause du relâchement de la concentration.

Par ailleurs, nous ne représentons pas tout à fait la réalité, nous sommes en condition de test avec un casque en cabine et nous ne testons qu'une oreille à la fois supprimant entre autre l'effet de sommation binauriculaire (+6 dB en sensation de sonie).

4.2. Biais d'échantillonnage:

Comme énoncé plus haut, une des cinq tranches d'âges dispose de quelques différences significatives vis-à-vis de 3 des 4 autres groupes.
De plus, nous avons considéré qu'une oreille est égale à un sujet distinct, ce qui n'est rigoureusement pas le cas, car nous testons qu'un seul système cortical pour les deux oreilles.
Conscient de ce biais, nous avons évalué l'impact du côté sur les performances, or nous n'avons pas de différence significative, permettant une certaine "maîtrise" de ce biais.

4.3. Biais lié à la création des listes et leurs émissions:

Bien qu'une grande vigilance soit apportée à la création des listes (équilibrage RMS, listes non compressées) et l'étalonnage de la chaîne de mesure au plus proche de la réalité, des différences peuvent tout de même subsister.

Par ailleurs, nous avons utilisé les listes de LEFEVRE dans le silence, bien que la majorité des phonèmes du Français y soit présente, nous n'avons évalué "que" 25 phonèmes sur les 36 de la langue Française.

Conclusion

L'objectif de ce mémoire est avant tout de répondre à la question suivante:

Quelle est la part d'importance des fréquences aigües sur les performances en audiométrie vocale en fonction des différents profils audiométriques?

L'hypothèse de départ de la présente étude a été validée, en adéquation avec la littérature : l'intelligibilité se dégrade moins rapidement chez les ME et les PdS à mesure qu'on supprime les informations sonores des fréquences aiguës par rapport aux NE.
Il semblerait même que, relativement à l'intelligibilité maximale des sujets, les PdS ont significativement moins de perte d'intelligibilité que les deux autres groupes.
Nous avons pu également mettre en lumière que la bande de fréquence entre le 1000 Hz et le 2000 Hz est porteuse de plus d'informations que celle entre le 2000 Hz et 4000 Hz. Pour l'audioprothésiste, cette information peut être cruciale face à un patient comportant une perte en PdS à partir du 1000 Hz subissant beaucoup plus de difficulté dans sa vie de tous les jours, comparé à un patient avec une PdS à partir du 2000 Hz- 3000 Hz ou 4000 Hz.

Par les résultats de cette étude, un maintien des performances en audiométrie vocale malgré une altération des seuils en tonale chez les ME et surtout chez les PdS, permet à l'audioprothésiste d'établir des stratégies d'adaptation. Celui-ci pourrait en effet pressentir l'effet potentiellement positif de l'utilisation d'un algorithme d'abaissement et/ou de compression fréquentielle afin d'apporter une part accrue d'indice acoustique dans les basses fréquences. Il pourrait également envisager une faible amplification des sons aigus si ceux-ci sont moins utilisés par les patients ayant ces profils audiométriques (ME et PdS).
Bien que cette étude ne puisse répondre à elle seule sur les méthodes d'appareillage à mettre en place face à cette typologie de patient, elle permet cependant d'ouvrir les portes sur des études plus poussées avec par exemple des techniques d'imagerie et/ou d'ÉlectroEncéphalographie (EEG), permettant ainsi de déterminer les facteurs de compensation corticale et son impact sur les indices acoustiques de la parole.

Bibliographie

- Audacity® software is copyright © 1999-2021 Audacity Team. The name Audacity® is a registered trademark

- ANSI S3.5-1997. "*American National Standard Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index*" American National Standards Institute, New York

- Le Gall, C. (2015). *Corrélation entre le Speech Intelligibility Index (SII) et le test syllabique de Frank LEFEVRE*. Médecine humaine et pathologie. ffhal-01825718f

- Meunier, C. (2007). *Phonétique acoustique* : Phonétique acoustique. Auzou P. Les dysarthries, Solal, pp.164-173, 7. hal-00250272f

- Cruickshanks KJ, Wiley TL, Tweed TS, Klein BE, Klein R, Mares-Perlman JA, Nondahl DM. (1998). *Prevalence of hearing loss in older adults in Beaver Dam, Wisconsin.* The Epidemiology of Hearing Loss Study. Am J Epidemiol. 1998 Nov 1;148(9):879-86. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a009713. PMID: 9801018.

- Dietrich V, Nieschalk M, Stoll W, Rajan R, Pantev C. (2001). *Cortical reorganization in patients with high frequency cochlear hearing loss*. Hear Res. 2001 Aug;158(1-2):95-101. doi: 10.1016/s0378-5955(01)00282-9. PMID: 11506941.

- Eggermont JJ. (2016). *Acquired hearing loss and brain plasticity.* Hear Res. 2017 Jan;343:176-190. doi: 10.1016/j.heares.2016.05.008. Epub 2016 May 24. PMID: 27233916.

- Gates GA, Mills JH. (2005). *Presbycusis.* Lancet. Sep 24-30;366(9491):1111-20. doi: 10.1016/S0140-6736(05)67423-5. PMID: 16182900

- Hurie AH. (2021). *School Choice, Exclusion, and Race Taming in Milwaukee: A Meta-ethnography.* Urban Rev. Mar 24:1-29. doi: 10.1007/s11256-021-00601-6. Epub ahead of print. PMID: 33782627; PMCID: PMC7989700.

- JASP Team (2022). JASP (Version 0.16.3)[Computer software]

- Kewley-Port D, Burkle TZ, Lee JH. (2007). *Contribution of consonant versus vowel information to sentence intelligibility for young normal-hearing and elderly hearing-impaired listeners.* J Acoust Soc Am. Oct;122(4):2365-75. doi: 10.1121/1.2773986. PMID: 17902871.

- Killion, Mead & Mueller, H. (2010). Twenty years later: A NEW Count-The-Dots method. The Hearing Journal., 63. 10,12-14,16. 10.1097/01.HJ.0000366911.63043.16.

- Klangpornkun, N., Onsuwan, C., Tantibundhit, C., & Pitathawatchai, P. (2013) *Predictions from"speech banana"and audiograms: Assessment of hearing deficits in Thai hearing loss patients.* Journal of the Acoustical Society of America., 134, 4132-4132.

- Lefevre, F. (2009). *A.T.E.C. : comparaison audiologique d'enveloppes temporelles pour l'analyse des confusions phonétiques*, Les Cahiers de l'Audition, N°5 septembre-octobre,

- Lefevre F. (1985) : *Une méthode d'analyse auditive des confusions phonétiques : La confrontation indiciaire* ; Thèse

- Varnet Léo. (2015). *Identification des indices acoustiques utilisés lors de la compréhension de la parole dégradée.* Neurosciences [q-bio.NC]. Université Claude Bernard - Lyon I, Français. ffNNT : 2015LYO10221ff. fftel-01266326f

- McDermott HJ, Lech M, Kornblum MS, Irvine DR. (1998). *Loudness perception and frequency discrimination in subjects with steeply sloping hearing loss: possible correlates of neural plasticity*. J Acoust Soc Am. 1998 Oct;104(4):2314-25. doi: 10.1121/1.423744. PMID: 10491696.

- Milivojevič, D. (1970). *Current Russian phonemic theory 1952–1962* || 2. Jakobson's Phonemic Theory , 10.1515/9783111354798(), 43–59. doi:10.1515/9783111354798-005

- Moore BC, Glasberg BR, Stone MA. (2004). *New version of the TEN test with calibrations in dB HL.* Ear Hear. Oct;25(5):478-87. doi: 10.1097/01.aud.0000145992.31135.89. PMID: 15599194.

- Moore JK, Linthicum FH Jr. (2007). *The human auditory system: a timeline of development*. Int J Audiol. Sep;46(9):460-78. doi: 10.1080/14992020701383019. PMID: 17828663.

- R. A. Cole, Yonghong Yan, B. Mak, M. Fanty and T. Bailey. (1996). "*The contribution of consonants versus vowels to word recognition in fluent speech*," 1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Conference Proceedings, pp. 853-856 vol. 2, doi: 10.1109/ICASSP.1996.543255.

- Rajan R, Irvine DR. (1998). *Neuronal responses across cortical field A1 in plasticity induced by peripheral auditory organ damage*. Audiol Neurootol.Mar-Jun;3(2-3):123-44. doi: 10.1159/000013786. PMID: 9575381.

- Rhebergen KS, Versfeld NJ. (2005). *A Speech Intelligibility Index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners*. J Acoust Soc Am. Apr;117(4 Pt 1):2181-92. doi: 10.1121/1.1861713. PMID: 15898659.

- Stilp CE, Kluender KR. (2010). *Cochlea-scaled entropy, not consonants, vowels, or time, best predicts speech intelligibility.* Proc Natl Acad Sci U S A. Jul 6;107(27):12387-92. doi: 10.1073/pnas.0913625107. Epub 2010 Jun 21. PMID: 20566842; PMCID: PMC2901476.

- Turner CW, Cummings KJ. (1999). *Speech audibility for listeners with high-frequency hearing loss.* Am J Audiol. Jun;8(1):47-56. doi: 10.1044/1059-0889(1999/002). PMID: 10499119.

- Van Canneyt J, Wouters J, Francart T. (2021). *Cortical compensation for hearing loss, but not age, in neural tracking of the fundamental frequency of the voice.* J Neurophysiol. Sep 1;126(3):791-802. doi: 10.1152/jn.00156.2021. Epub 2021 Jul 7. PMID: 34232756.

- Vickers DA, Moore BC, Baer T. (2001). *Effects of low-pass filtering on the intelligibility of speech in quiet for people with and without dead regions at high frequencies.* J Acoust Soc Am. Aug;110(2):1164-75. doi: 10.1121/1.1381534. PMID: 11519583.

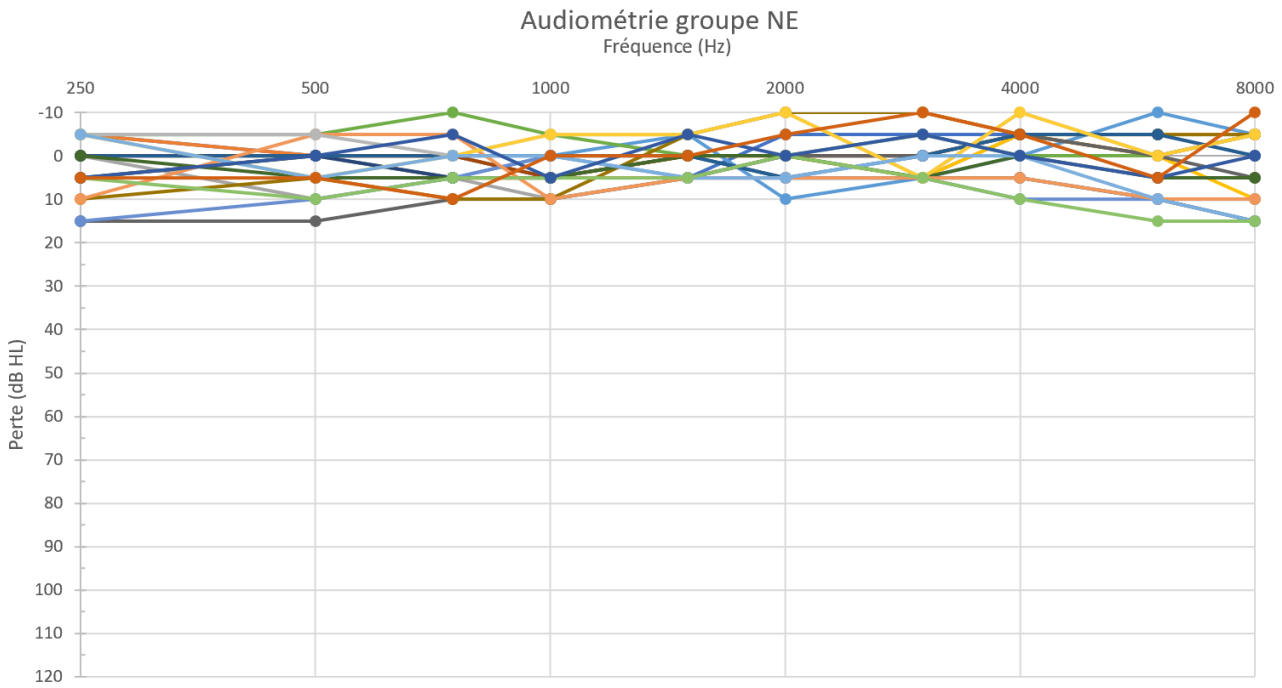
- Vitela AD, Monson BB, Lotto AJ. (2015). *Phoneme categorization relying solely on high-frequency energy*. J Acoust Soc Am. Jan;137(1):EL65-70. doi: 10.1121/1.4903917. PMID: 25618101; PMCID: PMC4272376.

- Zhang LI, Bao S, Merzenich MM. (2001). *Persistent and specific influences of early acoustic environments on primary auditory cortex.* Nat Neurosci. 2001 Nov;4(11):1123-30. doi: 10.1038/nn745. PMID: 11687817.

Annexe

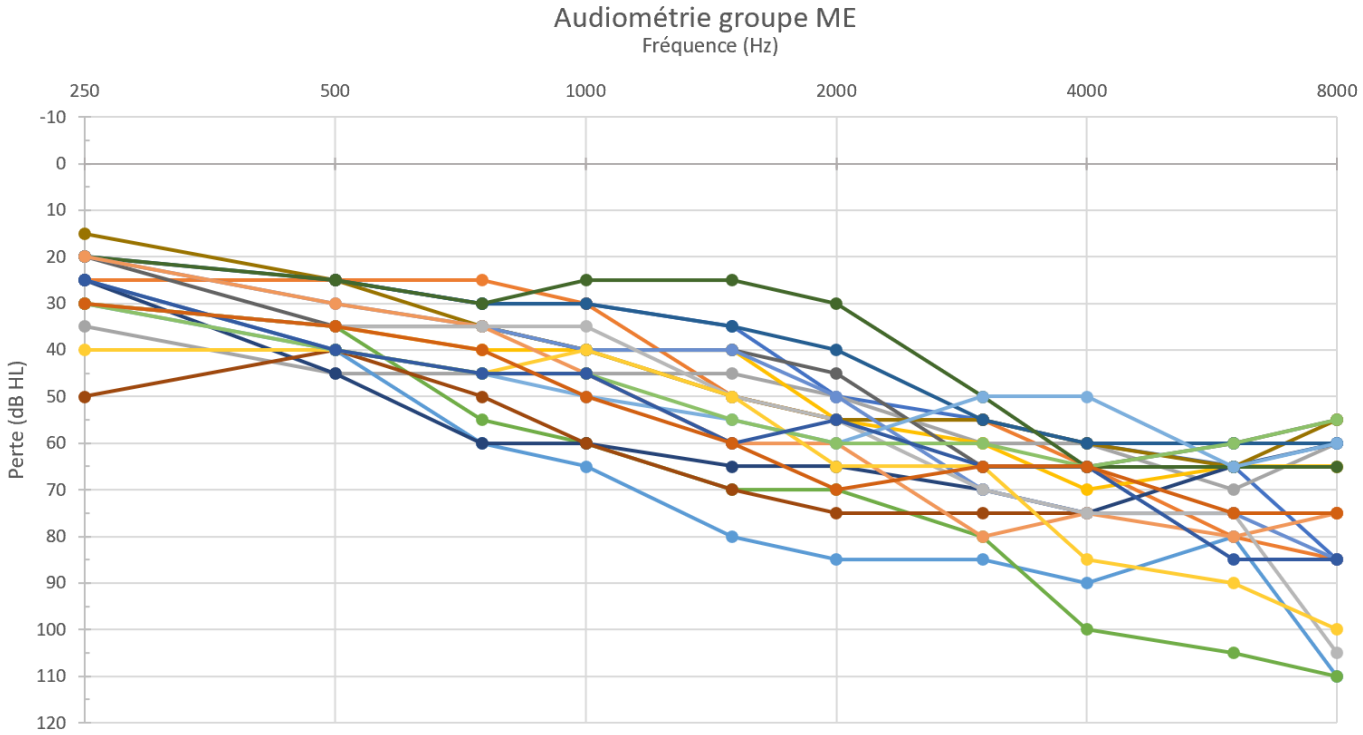
Annexe 1 :

Audiométrie de l'ensemble des sujets pour le groupe des Normo-entendants (NE).



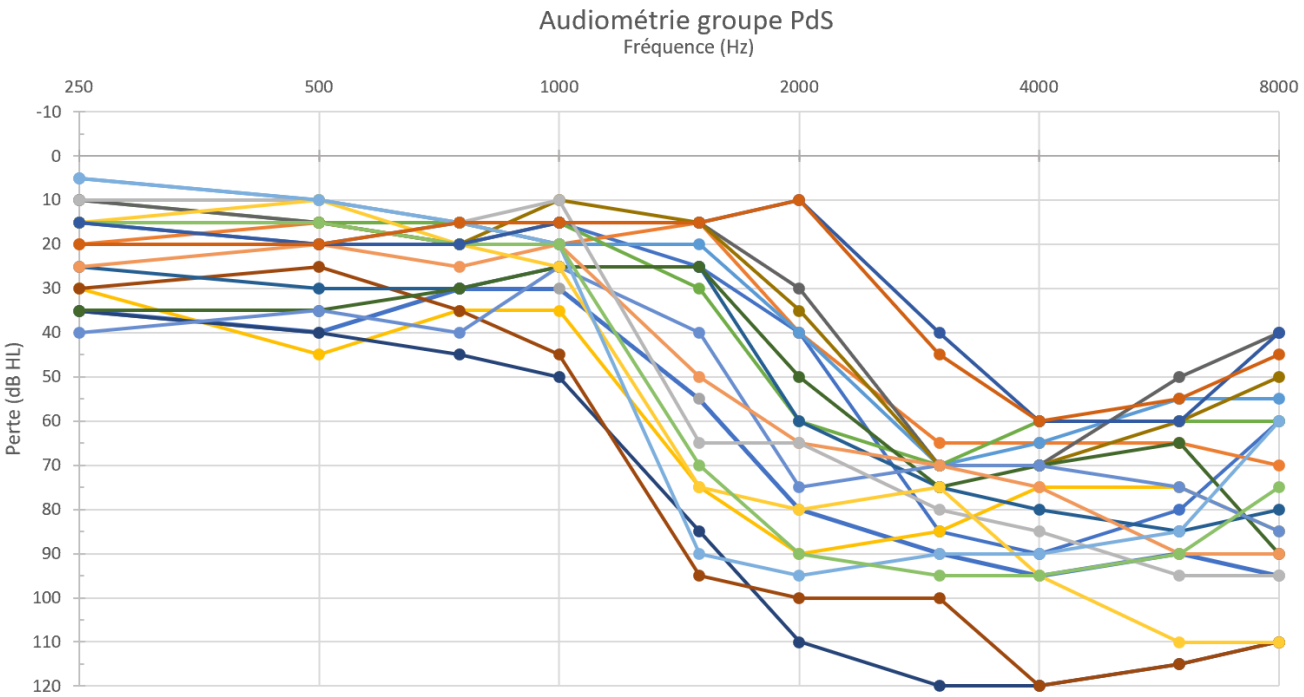
Annexe 2 :

Audiométrie de l'ensemble des sujets pour le groupe des Malentendants (ME).



Annexe 3 :

Audiométrie de l'ensemble des sujets pour le groupe des Pentes de Ski (PdS).



Annexe 4 :

Tableau de la cohorte d'étude avec leurs caractéristiques (Groupe, intelligibilité en fonction de la fréquence de coupure, PTA, SII, âge, degré de surdité, oreille testée et le sexe).

Groupe	FC4000Hz (en%)	FC2000Hz (en%)	FC1000Hz (en %)	PTA	SII	age	type surdite	Sujet	Oreille	sexe
PdS	52.5	62.5	55	54	38	54	Moyenne 1	Sujet 1	droite	H
PdS	77.5	62.5	50	55	40	54	Moyenne 1	Sujet 2	gauche	H
PdS	55	65	50	51	29	71	Moyenne 1	Sujet 3	droite	H
PdS	62.5	55	50	45	41	71	Moyenne 1	Sujet 4	gauche	H
PdS	95	85	60	41	56	69	Moyenne 1	Sujet 5	droite	H
PdS	95	87.5	52.5	35	58	69	Legere	Sujet 6	gauche	H
PdS	90	85	52.5	26	73	59	Legere	Sujet 7	droite	H
PdS	77.5	87.5	55	26	71	59	Legere	Sujet 8	gauche	H
PdS	100	92.5	72.5	49	43	47	Moyenne 1	Sujet 9	droite	F
PdS	100	87.5	72.5	45	39	47	Moyenne 1	Sujet 10	gauche	F
PdS	65	50	70	43	43	68	Moyenne 1	Sujet 11	droite	H
PdS	42.5	70	42.5	53	37	68	Moyenne 1	Sujet 12	gauche	H
PdS	95	95	82.5	33	61	61	Legere	Sujet 13	droite	H
PdS	92.5	90	65	33	60	61	Legere	Sujet 14	gauche	H
PdS	55	50	45	80	11	90	Severe 1	Sujet 15	droite	H
PdS	60	57.5	45	73	24	90	Severe 1	Sujet 16	gauche	H
PdS	95	80	55	34	57	65	Legere	Sujet 17	droite	H
PdS	92.5	75	55	38	50	65	Legere	Sujet 18	gauche	H
PdS	70	62.5	57.5	61	18	84	Moyenne 2	Sujet 19	droite	F
PdS	65	52.5	50	61	25	84	Moyenne 2	Sujet 20	gauche	F
ME	77.5	87.5	60	51	15	77	Moyenne 1	Sujet 21	droite	H
ME	90	67.5	60	55	16	77	Moyenne 1	Sujet 22	gauche	H
ME	87.5	72.5	37.5	41	39	70	Moyenne 1	Sujet 23	droite	H
ME	87.5	85	45	44	35	70	Moyenne 1	Sujet 24	gauche	H
ME	92.5	87.5	60	50	13	74	Moyenne 1	Sujet 25	droite	F
ME	95	80	50	50	24	74	Moyenne 1	Sujet 26	gauche	F
ME	90	85	45	46	29	72	Moyenne 1	Sujet 27	droite	H
ME	90	85	57.5	45	29	72	Moyenne 1	Sujet 28	gauche	H
ME	85	75	37.5	49	30	82	Moyenne 1	Sujet 29	droite	H
ME	70	67.5	57.5	53	24	82	Moyenne 1	Sujet 30	gauche	H
ME	70	62.5	45	50	12	77	Moyenne 1	Sujet 31	droite	F
ME	82.5	75	50	53	14	77	Moyenne 1	Sujet 32	gauche	F
ME	80	72.5	57.5	50	25	90	Moyenne 1	Sujet 33	droite	F
ME	77.5	72.5	60	58	15	90	Moyenne 2	Sujet 34	gauche	F
ME	100	87.5	55	39	44	65	Legere	Sujet 35	droite	F
ME	92.5	80	57.5	36	56	65	Legere	Sujet 36	gauche	F
ME	75	62.5	37.5	61	8	92	Moyenne 2	Sujet 37	droite	H
ME	50	35	37.5	63	7	92	Moyenne 2	Sujet 38	gauche	H
ME	57.5	60	50	70	10	74	Moyenne 2	Sujet 39	droite	F
ME	62.5	67.5	42.5	66	12	74	Moyenne 2	Sujet 40	gauche	F
NE	97.5	95	47.5	-1	98	21	normo-entendant	Sujet 41	droite	H
NE	95	85	40	0	100	21	normo-entendant	Sujet 42	gauche	H
NE	92.5	80	50	4	97	17	normo-entendant	Sujet 43	droite	F
NE	100	90	55	0	99	17	normo-entendant	Sujet 44	gauche	F
NE	95	92.5	55	3	98	26	normo-entendant	Sujet 45	droite	H
NE	95	90	52.5	-3	100	26	normo-entendant	Sujet 46	gauche	H
NE	97.5	85	55	4	98	30	normo-entendant	Sujet 47	droite	F
NE	92.5	77.5	47.5	0	97	30	normo-entendant	Sujet 48	gauche	F
NE	82.5	75	32.5	5	98	21	normo-entendant	Sujet 49	droite	F
NE	92.5	82.5	52.5	0	99	21	normo-entendant	Sujet 50	gauche	F
NE	97.5	82.5	57.5	0	100	21	normo-entendant	Sujet 51	droite	F
NE	100	85	62.5	3	99	21	normo-entendant	Sujet 52	gauche	F
NE	92.5	85	60	6	97	21	normo-entendant	Sujet 53	droite	F
NE	85	77.5	50	4	98	21	normo-entendant	Sujet 54	gauche	F
NE	100	92.5	60	-8	100	19	normo-entendant	Sujet 55	droite	F
NE	100	87.5	50	-5	98	19	normo-entendant	Sujet 56	gauche	F
NE	90	90	57.5	3	97	21	normo-entendant	Sujet 57	droite	H
NE	95	87.5	60	6	98	21	normo-entendant	Sujet 58	gauche	H
NE	100	87.5	57.5	1	100	28	normo-entendant	Sujet 59	droite	F
NE	92.5	85	62.5	-1	97	28	normo-entendant	Sujet 60	gauche	F

Annexe 5 :

Test Post Hoc de l'intelligibilité intergroupe en fonction de la fréquence de coupure

Post Hoc Comparisons - Groupe ✻ fréquence de coupure

		95% CI for Mean					
		Mean Difference	Lower	Upper	SE	t	p_{tukey}
ME, 4000 Hz	NE, 4000 Hz	-14.000	-26.111	-1.889	3.682	-3.802	0.007
	PdS, 4000 Hz	3.750	-8.361	15.861	3.682	1.018	0.983
	ME, 2000 Hz	7.250	-0.427	14.927	2.342	3.095	0.060
	NE, 2000 Hz	-5.000	-17.111	7.111	3.682	-1.358	0.911
	PdS, 2000 Hz	8.000	-4.111	20.111	3.682	2.172	0.432
	ME, 1000 Hz	30.500	22.823	38.177	2.342	13.021	< .001
	NE, 1000 Hz	27.375	15.264	39.486	3.682	7.434	< .001
	PdS, 1000 Hz	23.750	11.639	35.861	3.682	6.449	< .001
NE, 4000 Hz	PdS, 4000 Hz	17.750	5.639	29.861	3.682	4.820	< .001
	ME, 2000 Hz	21.250	9.139	33.361	3.682	5.771	< .001
	NE, 2000 Hz	9.000	1.323	16.677	2.342	3.842	0.006
	PdS, 2000 Hz	22.000	9.889	34.111	3.682	5.974	< .001
	ME, 1000 Hz	44.500	32.389	56.611	3.682	12.084	< .001
	NE, 1000 Hz	41.375	33.698	49.052	2.342	17.664	< .001
	PdS, 1000 Hz	37.750	25.639	49.861	3.682	10.251	< .001
PdS, 4000 Hz	ME, 2000 Hz	3.500	-8.611	15.611	3.682	0.950	0.989
	NE, 2000 Hz	-8.750	-20.861	3.361	3.682	-2.376	0.309
	PdS, 2000 Hz	4.250	-3.427	11.927	2.342	1.814	0.673
	ME, 1000 Hz	26.750	14.639	38.861	3.682	7.264	< .001
	NE, 1000 Hz	23.625	11.514	35.736	3.682	6.416	< .001
	PdS, 1000 Hz	20.000	12.323	27.677	2.342	8.538	< .001
ME, 2000 Hz	NE, 2000 Hz	-12.250	-24.361	-0.139	3.682	-3.327	0.032
	PdS, 2000 Hz	0.750	-11.361	12.861	3.682	0.204	1.000
	ME, 1000 Hz	23.250	15.573	30.927	2.342	9.926	< .001
	NE, 1000 Hz	20.125	8.014	32.236	3.682	5.465	< .001
	PdS, 1000 Hz	16.500	4.389	28.611	3.682	4.481	< .001
NE, 2000 Hz	PdS, 2000 Hz	13.000	0.889	25.111	3.682	3.530	0.017
	ME, 1000 Hz	35.500	23.389	47.611	3.682	9.640	< .001
	NE, 1000 Hz	32.375	24.698	40.052	2.342	13.822	< .001
	PdS, 1000 Hz	28.750	16.639	40.861	3.682	7.807	< .001
PdS, 2000 Hz	ME, 1000 Hz	22.500	10.389	34.611	3.682	6.110	< .001
	NE, 1000 Hz	19.375	7.264	31.486	3.682	5.261	< .001
	PdS, 1000 Hz	15.750	8.073	23.427	2.342	6.724	< .001
ME, 1000 Hz	NE, 1000 Hz	-3.125	-15.236	8.986	3.682	-0.849	0.995
	PdS, 1000 Hz	-6.750	-18.861	5.361	3.682	-1.833	0.660
NE, 1000 Hz	PdS, 1000 Hz	-3.625	-15.736	8.486	3.682	-0.984	0.987

Annexe 6 :

Test Post Hoc de la perte d'intelligibilité intergroupe en fonction de la fréquence de coupure

Post Hoc Comparisons - Groupe ✻ Perte d'intelligibilité

			95% CI for Mean				
		Mean Difference	Lower	Upper	SE	t	p_{tukey}
ME, FC4000Hz et FC2000Hz	NE, FC4000Hz et FC2000Hz	-1.750	-11.504	8.004	3.240	-0.540	0.994
	PdS, FC4000Hz et FC2000Hz	3.000	-6.754	12.754	3.240	0.926	0.939
	ME, FC4000Hz et FC1000Hz	-23.250	-30.731	-15.769	2.442	-9.522	< .001
	NE, FC4000Hz et FC1000Hz	-34.125	-43.879	-24.371	3.240	-10.532	< .001
	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	-12.750	-22.504	-2.996	3.240	-3.935	0.002
NE, FC4000Hz et FC2000Hz	PdS, FC4000Hz et FC2000Hz	4.750	-5.004	14.504	3.240	1.466	0.687
	ME, FC4000Hz et FC1000Hz	-21.500	-31.254	-11.746	3.240	-6.635	< .001
	NE, FC4000Hz et FC1000Hz	-32.375	-39.856	-24.894	2.442	-13.260	< .001
	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	-11.000	-20.754	-1.246	3.240	-3.395	0.012
PdS, FC4000Hz et FC2000Hz	ME, FC4000Hz et FC1000Hz	-26.250	-36.004	-16.496	3.240	-8.101	< .001
	NE, FC4000Hz et FC1000Hz	-37.125	-46.879	-27.371	3.240	-11.458	< .001
	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	-15.750	-23.231	-8.269	2.442	-6.451	< .001
ME, FC4000Hz et FC1000Hz	NE, FC4000Hz et FC1000Hz	-10.875	-20.629	-1.121	3.240	-3.356	0.014
	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	10.500	0.746	20.254	3.240	3.241	0.020
NE, FC4000Hz et FC1000Hz	PdS, FC4000Hz et FC1000Hz	21.375	11.621	31.129	3.240	6.597	< .001

Annexe 7 :

Répartition du nombre d'hommes et de femmes (par oreille) entre les différents groupes

Contingency Tables ▼

Contingency Tables ▼

	sexe		
Groupe	F	H	Total
ME	10	10	20
NE	14	6	20
PdS	4	16	20
Total	28	32	60