



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



Université
de Toulouse



École
d'Audioprothèse
de Cahors

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
ÉCOLE D'AUDIOPROTHESE DE CAHORS

Promotion 2018 - 2021

**ETUDE DE LA DISCRIMINATION DU TIMBRE
CHEZ LE SUJET PRESBYACOUSIQUE
ET ROLE DE L'APPAREILLAGE AUDITIF**

ELABORATION D'UN TEST DE TIMBRE COMME CRITERE
D'EVALUATION DE LA PERCEPTION DE LA QUALITE SONORE

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
DIPLOME D'ETAT D'AUDIOPROTHESISTE

Par Quentin LACLEF

Maître de mémoire : Mr Bernard HUGON



A ma grand-mère, Marguerite

REMERCIEMENTS

Je remercie mon maître de mémoire, Mr Bernard HUGON, de m'avoir permis d'aborder une thématique qui me tient à cœur. Mr et Mme MOREL, Mr AIZIN, merci à vous pour votre confiance et votre accueil bienveillant. Mr WEBER et Mme MARTIN, de m'avoir aidé à avancer en chemin. Mr HANS, de m'avoir ouvert la voie.

Je remercie Mr le Professeur MARX, Mr REMBAUD, mais aussi les membres du jury, Mr POTIER, Mme WECKEL et Mr VANNSON, pour l'attention accordée à mon mémoire de fin d'études. Mr RUIZ et Mr LE PADELLEC, merci de m'avoir aidé à clarifier mes idées. Merci également aux intervenants pour leurs riches enseignements. Je n'oublie pas Mme MACHABERT, pour son accompagnement au sein de cette belle école de Cahors.

Je remercie tous mes collègues de l'école d'audioprothèse de Cahors, et plus particulièrement mes proches amis. Mlle Jeanne LEGOFF, pour cette si belle symbiose entre nous, au travail comme ailleurs. Mlle Mathilde MONGAUDON, pour toutes ces bonnes ondes échangées en sa compagnie. Mlle Mathilde MAZET, pour son attention et toute sa gentillesse. Mlle Laura PRUGENT, de m'avoir accueilli à plusieurs reprises avec beaucoup de bienveillance. Mr Charles BLAUDEZ, pour sa bonne humeur et notre amitié de longue date. Mlle Aurore DUCHAMPS, de m'avoir fait tourner élégamment sur les pistes de danse.

Je remercie mes parents, pour leur soutien indéfectible et d'avoir fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Merci à ma famille, d'avoir toujours cru en moi. Lise, sans qui je ne serais pas où j'en suis aujourd'hui, un immense merci.

Margot, tu as plus que ta place entre ces lignes. Merci infiniment pour ton soutien sans faille, pour tout ce qu'on a vécu ensemble et tout ce qu'il reste à construire.

Je remercie Mr Jean-Marc LARCHE, pour tout ce qu'il m'a fait accomplir au saxophone, l'une de mes plus grandes fiertés. Mme Pauline LUDWIG, de m'avoir enseigné ce si bel instrument. Mr Frédéric JALMAIN, pour ma formation musicale et ces grands moments d'orchestre mémorables. Le sujet de mon mémoire me vient tout droit de vos enseignements.

Je remercie tous les patients qui ont bien voulu participer à mon étude.

Sans oublier toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail sans le savoir, et que je n'ai pas mentionnés directement. Amis, collègues et connaissances. Merci.

ENGAGEMENT SUR L'HONNEUR DE NON-PLAGIAT

Je soussigné **Quentin LACLEF**, N°**21812434** 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).

Je déclare être informé 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 Cahors, le 17/10/2020

Quentin LACLEF



SOMMAIRE

I. INTRODUCTION.....	1
➤ Prévalence et physiopathologie de la surdité	1
➤ Correction auditive	1
➤ Concept de timbre	2
➤ Mesures de la perception du timbre	4
➤ Orientation de l'étude.....	5
II. MATERIEL ET METHODE	6
A. Population.....	6
1. Normo-entendants.....	6
➤ Critères d'inclusion de la population NE	6
2. Presbyacousiques	6
➤ Critères d'inclusion de la population P	6
➤ Caractéristiques de l'appareillage de la population.....	7
B. Matériel.....	8
1. Matériel général	8
2. Matériau sonore	8
a) Paramètres généraux	8
➤ Création des stimuli.....	8
➤ Génération des stimuli.....	9
➤ Création des pistes de test	9
➤ Mesure du centre de gravité spectral	10
b) Valeurs retenues.....	11
➤ Fréquences des sons purs	11
➤ Intensités des sons purs	11
➤ Représentations spectrale et temporelle	11
➤ Centres de gravité spectraux.....	13
3. Questionnaire musical.....	14
C. Méthode.....	15
➤ Préliminaires.....	15
➤ Procédure de test	15
➤ Conditions de passation.....	16

III. RESULTATS	17
A. Données audiométriques	17
B. Normo-entendants	18
➤ Seuils de discrimination de brillance.....	18
➤ Niveau d'expérience musicale.....	18
➤ Influence du niveau d'expérience musicale	19
C. Presbycousiques.....	20
➤ Niveau d'expérience musicale.....	20
1. Oreilles nues	20
➤ Seuils de discrimination de brillance et perte auditive.....	20
➤ Influence de l'expérience musicale	20
2. Oreilles appareillées.....	22
a) Méthodologie de pré réglage NAL-NL2.....	22
➤ Amélioration du seuil de discrimination de brillance	22
b) Méthodologie de pré réglage CAM2	23
➤ Amélioration du seuil de discrimination de brillance	23
c) Comparaison des deux méthodologies.....	25
➤ Gains d'insertion	25
➤ Différences de gain d'insertion	26
➤ Comparaison des seuils de discrimination de brillance	26
IV. DISCUSSION	28
➤ Normo-entendants	28
➤ Presbycousiques non appareillés	29
➤ Presbycousiques appareillés	29
➤ Pratique audioprothétique	30
➤ Biais et limites	31
➤ Ouvertures	33
CONCLUSION	34
BIBLIOGRAPHIE	35
RESUME.....	38
ANNEXES	39

GLOSSAIRE

AMP : Adaptative Music Perception
ASD : Amélioration du Seuil de Discrimination
BF : Basses Fréquences
BIAP : Bureau International d'Audiophonologie
CGS : Centre de Gravité Spectral
CNA : Collège National d'Audioprothèse
dB : décibel
DC : Données Cumulées
DJP : Différence Juste Perceptible
EM : Expérience Musicale
HF : Hautes Fréquences
HL : Hearing Level
HP : Haut-parleur
Hz : Hertz
M : Musicien
ME : Malentendant
MF : Moyennes Fréquences
mf : mezzo forte
NE : Normo-entendant
NM : Non-Musicien
OA : Oreilles appareillées
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ON : Oreilles Nues
P : Presbycusique
PTL : Perte Tonale Locale
PTM : Perte Tonale Moyenne
R : stimulus de référence
S : stimulus de test
SD : Seuil de Discrimination
SDI : Seuil de Discrimination Initial
SII : Speech Intelligibility Index
SL : Sensation Level
SPL : Sound Pressure Level

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Equations

- Équation 1 : Formule de génération des stimuli du test de discrimination de timbre..... 9
- Équation 2 : Formule de calcul relative du Centre de Gravité Spectral (CGS) 10
- Équation 3 : Formule de calcul de l'intervalle de brillance (Δ CGS) 10

Figures

- Figure 1 : Répartition des appareils auditifs de la population presbyacousique selon l'âge et la marque ($n = 28$) 7
- Figure 2 : Répartition par ancienneté de mise en place du premier appareillage auditif de la population presbyacousique ($n = 28$) 7
- Figure 3 : Exemple d'élaboration de quelques pistes de test en configuration RSR à l'aide d'Audacity 10
- Figure 4 : Représentation spectrale simplifiée du fondamental et des harmoniques de quelques stimuli 12
- Figure 5 : Représentation temporelle du stimulus 32, de la référence et du son pur correspondants ainsi que de leurs différences à 440 Hz 12
- Figure 6 : Représentation spectrale de la différence entre la référence et le stimulus 32 13
- Figure 7 : Intervalle de brillance en fonction du numéro de la piste de test 13
- Figure 8 : Courbes audiométriques moyennes superposées des populations normo-entendante et presbyacousique ($n_{NE} = n_P = 31$) 17
- Figure 9 : Seuils de discrimination de brillance de la population normo-entendante aux trois conditions fréquentielles et norme associée ($n = 31$) 18
- Figure 10 : Répartition de la population normo-entendante selon l'expérience musicale ($n = 31$) 19
- Figure 11 : Seuils de discrimination de brillance de la population normo-entendante aux trois conditions fréquentielles en fonction de l'expérience musicale ($n = 31$) 19
- Figure 12 : Répartition de la population presbyacousique selon l'expérience musicale ($n = 31$) 20
- Figure 13 : Seuils de discrimination de brillance de la population presbyacousique aux trois conditions fréquentielles en fonction de la perte tonale locale ($n = 31$) 21
- Figure 14 : Amélioration du seuil de discrimination de brillance de la population presbyacousique par l'appareillage auditif en méthodologie NAL-NL2 aux trois conditions fréquentielles par rapport au seuil initial oreilles nues ($n = 28$) 23

Figure 15 : Amélioration du seuil de discrimination de brillance de la population presbycusique par l'appareillage auditif en méthodologie CAM2 aux trois conditions fréquentielles par rapport au seuil initial oreilles nues ($n = 17$)	24
Figure 16 : Courbes moyennes de gain d'insertion des méthodologies CAM2 et NAL-NL2 pour des niveaux d'entrée de 50, 65 et 80 dB SPL ($n = 17$).....	25
Figure 17 : Courbes moyennes des différences de gain d'insertion entre les méthodologies CAM2 et NAL-NL2 pour des niveaux d'entrée de 50, 65 et 80 dB SPL ($n = 17$)	26
Figure 18 : Comparaison des seuils de discrimination de brillance de la population presbycusique avec appareillage auditif en méthodologie NAL-NL2 et CAM2 aux trois conditions fréquentielles ($n = 17$)	27
Figure 19 : Exemple de représentation des résultats individuels oreilles nues et appareillées du test de discrimination de timbre en regard de l'audiométrie tonale (sujet P n°13).....	31

Tableaux

Tableau 1 : Qualification du timbre par bande de fréquences de Letowski & Miskiewicz (1995)	3
Tableau 2 : Descripteurs audios de Peeters et al. (2011) permettant de paramétrer le timbre	3
Tableau 3 : Listes des stimuli aux trois conditions fréquentielles	8
Tableau 4 : Liste des pistes de test aux trois configurations de présentation des stimuli et aux trois conditions fréquentielles.....	10
Tableau 5 : Fréquences du fondamental et des harmoniques des stimuli aux trois conditions fréquentielles (en Hz)	11
Tableau 6 : Intervalles de brillance de quelques pistes de test (Δ CGS)	13
Tableau 7 : Questionnaire musical et attribution des points respectifs pour déterminer une mesure objective de l'expérience musicale pour chaque participant	14

I. INTRODUCTION

➤ **Prévalence et physiopathologie de la surdité**

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2020), 466 millions de personnes dans le monde souffrent d'une perte auditive invalidante. Selon les estimations, ce nombre pourrait s'élever à 900 millions d'ici 2050, soit 10% de la population mondiale.

En France, le nombre de Malentendants (ME) fait consensus et est estimé à 6 millions, soit environ 9% de la population (CNA & al., 2017). Les personnes de plus de 65 ans représentent plus de la moitié des ME recensés (Frachet, 2015) alors qu'elles n'étaient que de 30% en 1990 (Gates & Mills, 2005). Cela s'explique essentiellement par le vieillissement de la population (Robert-Bobée, 2006).

La majorité des surdités s'explique communément par la dégénérescence des cellules ciliées externes liée à l'âge, prédominante sur les fréquences aiguës, que l'on appelle la presbyacousie (Gates & Mills, 2005). Couplées aux cellules ciliées internes, les cellules ciliées externes permettent, grâce à leur capacité active d'amplification du signal sonore, une extension de la gamme des intensités audibles. Leur détérioration conduit à une réduction de la dynamique sonore due à la perte de la compression cochléaire. Néanmoins, de nouvelles études mettent en lumière le caractère complexe de la presbyacousie qui semble être causée par un nombre plus important de facteurs fonctionnels périphériques et centraux (Bowl & Dawson, 2019). Ces phénomènes peuvent apparaître dès 50 ans et concernent 90% des ME (Leusie, 2015). Il n'y a aucune raison de croire que la presbyacousie soit liée à une quelconque pathologie externe à l'oreille interne (Kelley, 1939), il s'agit essentiellement d'un vieillissement normal de l'organe de l'audition.

➤ **Correction auditive**

L'appareillage auditif peut compenser les effets de la presbyacousie grâce à une correction acoustique personnalisée. Pourtant, seulement un tiers des personnes appareillables sont équipées (Haeusler & al., 2014). L'arrivée de la réforme « 100% santé » (J.O., 2018), permet désormais l'acquisition sans reste à charge d'une gamme d'appareils auditifs de premier prix. Bon nombre de ME, auparavant freinés par l'aspect financier de l'appareillage, sont maintenant amenés à pousser les portes des centres d'audioprothèse. La correction de la presbyacousie semble avoir un bel avenir devant elle.

Les méthodes de pré réglage couramment utilisées aujourd'hui sont faites pour maximiser l'intelligibilité de la parole en favorisant l'amplification des fréquences conversationnelles (Fitz & McKinney, 2010). La méthodologie NAL-NL2 utilise un modèle de sonie basé sur le Speech Intelligibility Index (SII) (Keidser & al., 2011). Il s'agit d'un indicateur qui priorise l'intelligibilité de la parole en pondérant l'importance de différentes bandes de fréquences (Hornsby, 2004). Cependant, l'écoute de la musique nécessite une égale représentation fréquentielle (Moore & Tan, 2003) jusque dans les hautes fréquences (Ricketts & al., 2008) afin d'améliorer au maximum la qualité des sons musicaux et de leur timbre. La méthodologie CAM2 utilise un modèle de sonie différent et propose des gains pour des fréquences allant jusqu'à 10 kHz (Moore & al., 2010), bien qu'ils soient jugés trop importants pour le confort d'écoute (Arbogast & al., 2018). Elle s'appuie sur un modèle de sonie spécifique

constant qui amplifie le spectre de parole de manière égale en tenant compte des bandes critiques cochléaires (Moore & Glasberg, 1998). Expérimentalement, CAM2 est globalement préférée à NAL-NL2 pour sa qualité sonore et sa clarté de la parole dans le bruit (Moore & Sek, 2012).

➤ Concept de timbre

Définitions

La musique fait partie intégrante de la culture humaine et de la vie de chacun, qu'il soit Normo-Entendant (NE) ou Presbyacousique (P). Une enquête de 2018 (revopéra, 2019) révèle que le public de la musique classique représente plus de 9 millions de personnes en France, dont 47% ont 60 ans ou plus. La presbyacousie impacte la perception de la richesse spectrale d'un son, et discriminer deux sons devient parfois impossible lorsque leurs différences se situent dans le domaine aigu du spectre, contrairement aux NE qui ont cette capacité (Kelley, 1939). Il en découle une perception altérée du timbre chez les ME presbyacousiques, pourtant essentiel à la qualité et au plaisir d'écoute de la musique. De plus, sa richesse s'applique également aux stimulations sonores du quotidien, en particulier à la parole.

Pour caractériser un son, on utilise son volume (l'intensité), sa hauteur (la fréquence) et sa durée (le temps). En musique, cela correspond respectivement à la nuance, la hauteur et le rythme desquels découlent la mélodie et l'harmonie. Tout ce qui ne fait pas partie de ces trois paramètres élémentaires ou qui fait appel à des concepts multidimensionnels constitue le timbre, d'où son incompréhension fondamentale qui traverse toute la littérature (Cadoz, 1987 ; Donnadiou, 2007 ; Smalley, 1994). Le timbre est défini de la manière suivante : « Timbre is that attribute of auditory sensation in terms of which a listener can judge that two sounds similarly presented and having the same loudness and pitch are dissimilar » (ANSI, 1973). Autrement dit, il permet de distinguer deux instruments de musique entre eux lorsqu'ils jouent la même note à la même intensité (Donnadiou, 2007). L'art de manier les timbres peut s'apparenter à l'orchestration où le compositeur distribue consciemment sa musique aux instruments d'après le résultat sonore qu'il souhaite obtenir. Malgré tout, il est possible de faire varier les timbres d'un même instrument en modifiant l'expressivité et le mode de jeu (Barthet & al., 2010b). Cette variété prend par exemple tout son sens dans la musique jazz du XX^{ème} siècle où les musiciens n'ont cessé de faire évoluer le timbre de leurs instruments dans leur recherche stylistique. Malheureusement, cette définition du timbre n'est pas très utile en pratique puisqu'elle indique uniquement ce qu'il n'est pas. Par extension, le timbre est une caractéristique perceptuelle du son permettant son stockage et sa comparaison à travers ses propriétés uniques relatives à la source sonore (Scharine & al., 2009). Il s'agit d'une succession d'informations temporelles et spectrales mémorisées sous forme d'images auditives.

Qualifications et propriétés

Cependant, le timbre ne peut pas être uniquement décrit par une évaluation globale. Dans le langage courant, il est qualifié par différents termes tels que la qualité d'attaque, la luminosité ou encore la clarté. On parle de son brillant ou terne, compact ou étalé, creux ou dense (Smalley, 1994). On aborde également le timbre de façon métaphorique en le considérant comme la matière ou la couleur d'un son, mais tous ces qualificatifs ne sont pas suffisants pour décrire toute sa complexité. Ainsi, de nombreuses études ont tenté d'établir un ensemble

d'échelles descriptives basées sur des adjectifs permettant une description quantitative des changements de timbre. Letowski & Miskiewicz (1995) proposent une approche intéressante en attribuant au timbre une qualification par bande de fréquences dominante ainsi qu'une correspondance aux sons de voyelles (Tableau 1). Ce mémoire suggère une traduction française à titre indicatif. Plus récemment, les caractéristiques physiques du timbre ont été paramétrisées sous forme d'une multitude de « descripteurs audios » (Peeters & al., 2011). Le Tableau 2 rassemble ces descripteurs issus de quatre représentations : le signal audio, l'enveloppe temporelle, l'enveloppe spectrale et la composition harmonique. Toutefois, il ne s'agit que d'une myriade de termes redondants qui se chevauchent tentant d'appréhender le caractère multidimensionnel du timbre.

Centre fréquentiel de la bande d'octave (en Hz)	Voyelle	Dimension du timbre	
63		Thunder-like	Sourd
125		Rumbling	Grondant
250	/u/	Powerful	Puissant
500	/o/	Hollow	Creux
1000	/a/	Nasal	Nasal
2000	/ε/	Present	Présent
4000	/i/	Sharp	Fin
8000		Brilliant	Brillant
16000		Rustling	Bruissement

Tableau 1 : Qualification du timbre par bande de fréquences de Letowski & Miskiewicz (1995)

Signal audio	Enveloppe temporelle	Enveloppe spectrale	Composition harmonique
Autocorrélation spectrale Taux de passage à 0	Temps d'attaque Temps de baisse Temps de relâchement Log (temps d'attaque) Pente d'attaque Pente de diminution Barycentre temporel Durée effective Fréquence & Amplitude de modulation Energie RMS	Barycentre spectral Propagation spectrale Asymétrie spectrale Aplatissement spectral Pente, diminution & atténuation spectrale Flux spectral Energie de trame Planéité spectrale Crête spectrale	Energie harmonique Energie du bruit Caractère bruyant Fréquence fondamentale Inharmonicité Tristimulus Déviation harmonique Rapport pair/impair

Tableau 2 : Descripteurs audios de Peeters et al. (2011) permettant de paramétriser le timbre

Perception

En ce qui concerne le domaine de la psychoacoustique, il a été démontré que les neurones ont la capacité de coder les données spectrales et temporelles du timbre (Patil & al., 2012). Certains descripteurs audios sont prédominants dans sa perception, notamment le temps d'attaque, le barycentre spectral (aussi appelé centre de gravité) et le rapport d'harmoniques pairs/impairs (Barthet & al., 2010a ; Caclin & al., 2015 ; Siedenburg & al., 2015). Ces deux derniers paramètres définissent respectivement la brillance et l'irrégularité spectrale.

➤ Mesures de la perception du timbre

Contrairement à l'intensité et à la fréquence, il n'existe aucune mesure dans la pratique de l'audioprothésiste qui permette de quantifier l'altération de la perception du timbre pourtant essentiel à l'écoute de la musique. Dans un souci de reproductibilité et d'universalité, la création d'un tel test doit limiter au maximum le recours à la reconnaissance d'un objet sonore, liée à l'expérience individuelle (Agus & al., 2010). Par exemple, un musicien expérimenté est capable d'identifier plus facilement un instrument de musique qu'un non-musicien.

Une solution à ce problème pourrait être la mesure de Seuils de Discrimination de timbre (SD). Il s'agit de la plus petite quantité discernable entre deux sons proches. Ces seuils ont l'avantage de ne pas faire intervenir la reconnaissance d'objets sonores, bien qu'il soit admis que les musiciens soient plus performants dans la tâche de discrimination du timbre en dehors de toute connaissance préalable. Cette voie a déjà été explorée dans la littérature, notamment avec l'Adaptative Music Perception test (AMP) (Kirchberger & Russo, 2015) qui propose une évaluation de la perception de la musique sous plusieurs aspects (meter, harmony, melody, timbre). L'un d'entre eux porte sur le timbre avec la brillance, le temps d'attaque et l'irrégularité spectrale. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un stimulus synthétique de 220 Hz composé de 40 harmoniques atténués successivement de 2 dB. La pente d'atténuation spectrale, la durée du fondu linéaire de l'attaque et l'atténuation des harmoniques pairs sont respectivement les trois paramètres permettant d'obtenir une mesure des SD à travers leur déclinaison. La procédure de test présente trois sons successifs. Les participants doivent associer un stimulus X à un son A ou B dans une tâche de discrimination à difficulté adaptative (forme ABX). Les tests ont révélé des SD significativement différents entre les NE et les ME pour la brillance et l'irrégularité spectrale, mais pas pour l'attaque.

Dans une autre étude, Emiroglu (2007) propose de préserver les attributs naturels du timbre dans la mesure de ses Différences Juste Perceptibles (DJP). Ainsi, il crée des stimuli à partir d'une combinaison de deux instruments de musique : le trombone et le cor pour le barycentre spectral, et le saxophone et le violoncelle pour le flux spectral (qui n'est autre que la variation temporelle du barycentre spectral). Les paires ont été choisies de telle sorte que le paramètre considéré soit radicalement différent d'un instrument à l'autre. La tâche de discrimination est alors réalisée à l'aide d'un test adaptatif à deux intervalles et trois alternatives où la composition instrumentale de chaque stimulus est rendue variable par interpolation linéaire de paramètres spectraux. Le sujet testé doit alors déterminer à choix forcé quel son lui paraît différent parmi les deux autres. L'expérience met en évidence la prééminence du barycentre spectral dans la perception du timbre, tandis que le flux spectral est moins saillant. Cependant, rien ne prouve que d'autres paramètres n'interfèrent pas dans la mesure des SD, d'où l'intérêt d'utiliser des sons synthétiques au détriment de l'aspect écologique. En effet, la synthèse permet de lisser le flux spectral et l'enveloppe temporelle d'un son, tout en réduisant l'impact de l'expérience par identification d'un timbre (Siedenburg & McAdams, 2016).

En somme, l'étude de la brillance dans la création d'un test de timbre semble à privilégier. En effet, contrairement au barycentre spectral, tout spectre harmonique ne présente pas d'irrégularité. Quant à l'attaque, elle ne représente qu'une petite partie de l'émission d'un son, en plus d'être à la fois excessivement complexe et assez simple à discriminer, aussi bien pour le NE que pour le ME.

➤ Orientation de l'étude

A ce jour, l'audioprothésiste ne dispose d'aucun test permettant de mettre en lumière les difficultés de discrimination du timbre chez le patient presbycousique. La place de l'appareillage quant à la perception du timbre est mal connue dans le cadre de la qualité et du plaisir d'écoute de la musique.

L'appareillage auditif de la presbycousie permet-il une amélioration de la discrimination du timbre ?

Dans un premier temps, l'objectif est d'étudier la corrélation entre la presbycousie et l'altération de la discrimination du timbre. Dans un second temps, il s'agit de déterminer si l'appareillage de la presbycousie apporte une amélioration de la discrimination du timbre.

La création et la passation d'un test de discrimination de timbre axé sur la perception de la brillance permettent de répondre à ces objectifs. Un questionnaire musical analyse le lien entre l'expérience individuelle et les résultats de ce test.

Nous supposons qu'il existe une corrélation entre la presbycousie et la capacité à discriminer des timbres. Meilleur est le niveau d'audition et mieux les timbres sont discriminés. La discrimination du timbre s'améliore avec le port d'un appareillage auditif.

II. MATERIEL ET METHODE

La présente étude est transversale dans la détermination d'une norme NE et dans la récolte des données ME, et enfin interventionnelle par la mesure de l'apport de l'appareillage chez les patients ME (étude contrôlée non randomisée).

A. *Population*

1. Normo-entendants

Le premier groupe de cette étude est une population contrôle de personnes Normo-Entendants (NE). Le nombre de participants est de 31. Aucun participant n'a été exclu de l'étude. L'âge moyen des participants est de 35 ans. Ils ont pour écart-type 12 et pour extremums 20 et 63 ans.

➤ Critères d'inclusion de la population NE

- Être majeur ;
- Ne présenter aucune pathologie ORL ;
- Posséder une Perte Tonale Moyenne (PTM) normale, entre 0 et 20 dB HL selon le calcul du Bureau International d'Audiophonologie (BIAP), soit la moyenne des pertes à 500, 1000, 2000 et 4000 Hz.

Aucune qualification musicale particulière n'est requise.

2. Presbyacousiques

Le deuxième groupe de cette étude est une population de personnes Presbyacousiques (P). On distingue les conditions P0, P1 et P2 où les ME sont respectivement Oreilles Nues (ON), Oreilles Appareillées en méthodologie NAL-NL2 et Oreilles Appareillées en méthodologie CAM2 (OA). Le nombre de participants testés en condition P0 est de 31. Parmi eux, 28 ont été testés en condition P1 et 17 ont accepté de réaliser la totalité des tests. 5 participants ont été exclus de l'étude pour cause de fatigabilité, manque de concentration ou non-respect des critères d'inclusion au moment de l'expérimentation. Ces derniers sont écartés de la statistique. L'âge moyen des participants est de 77 ans. Ils ont pour écart-type 10 et pour extremums 56 et 93 ans.

➤ Critères d'inclusion de la population P

- Être majeur ;
- Ne présenter aucune pathologie ORL ;
- Posséder une PTM légère à modérée selon la classification audiométrique des déficiences auditives du BIAP, c'est-à-dire comprise entre 20 et 70 dB HL ;
- Posséder une surdité de type presbyacousie, c'est-à-dire une surdité de perception prédominante sur les hautes fréquences telle que l'augmentation moyenne bilatérale du seuil auditif soit d'au moins 5 dB par octave de 250 à 4000 Hz ;

- Posséder une surdité bilatérale et symétrique de telle sorte que l'écart des PTM entre les deux oreilles n'excède pas 15 dB ;
- En condition P1 et P2, posséder un appareillage bilatéral fonctionnel de moins de 4 ans.

Aucune qualification musicale particulière n'est requise.

➤ Caractéristiques de l'appareillage de la population

Les appareils auditifs des participants ont un âge relativement bas, ce qui garantit une certaine fiabilité de la réponse acoustique. 79% d'entre eux ont moins de 2 ans et les trois quarts sont haut de gamme. Quant à leurs marques, Oticon est la plus représentée aux côtés de Widex, Phonak, Bernafon et Starkey.

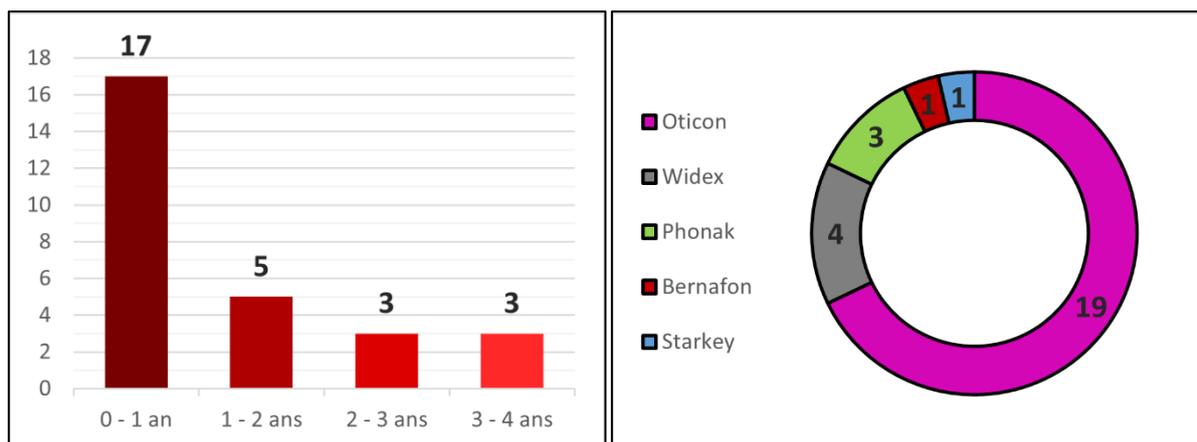


Figure 1 : Répartition des appareils auditifs de la population presbycousique selon l'âge et la marque (n = 28)

La date de mise en place du premier appareillage auditif est relativement ancienne. 71% des sujets concernés sont appareillés depuis plus de 6 ans. Les primo-porteurs sont minoritaires.

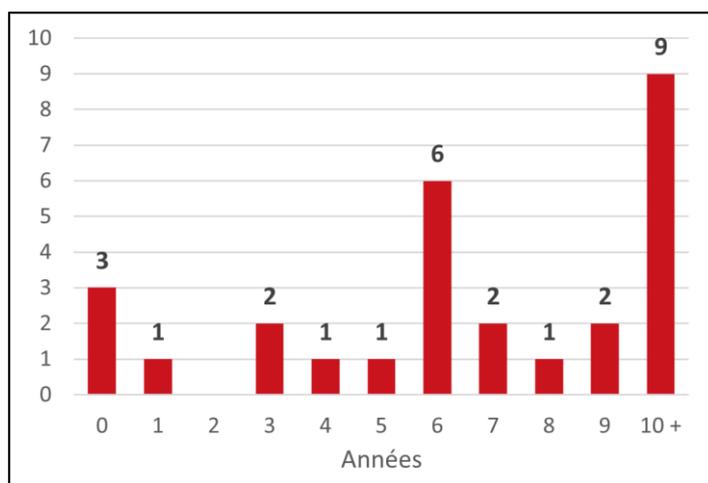


Figure 2 : Répartition par ancienneté de mise en place du premier appareillage auditif de la population presbycousique (n = 28)

B. Matériel

1. Matériel général

- Une cabine audiométrique insonorisée aux normes ;
- Un otoscope ;
- Un ordinateur ;
- Un audiomètre avec son logiciel d'audiométrie ;
- Un casque calibré ;
- La plateforme Noah 4 avec les logiciels de réglage des fabricants d'aides auditives ;
- Le logiciel de pré-réglage CAM2B_v2
- Un Haut-Parleur (HP) ;
- Un sonomètre.

2. Matériau sonore

a) Paramètres généraux

➤ Création des stimuli

Mesurer précisément l'impact de la presbycousie sur la valeur du Seuil de Discrimination (SD) du barycentre spectral implique l'utilisation de sons test aux plages fréquentielles variées. Les Basses Fréquences (BF), Moyennes Fréquences (MF) et Hautes Fréquences (HF) sont les trois conditions retenues. Chaque condition présente une liste de stimuli harmoniques distincts (Tableau 3) caractérisés par la valeur de leurs barycentres spectraux. Cette valeur est liée à la pente spectrale par le biais de l'atténuation harmonique (Peeters & al., 2011 ; Emiroglu, 2007). Chaque liste possède un stimulus de référence duquel découle tous les autres. Plus on descend dans la liste, plus le stimulus rencontré est différent de la référence par augmentation de l'atténuation harmonique. Il en découle un abaissement progressif du barycentre spectral. Quant à l'intensité de stimulation, elle est fixée à 65 dB SPL. Cela correspond approximativement à la nuance mezzo forte (*mf*). De plus, il s'agit de l'intensité centrale de réglage des aides auditives.

Condition	Basses Fréquences	Moyennes Fréquences	Hautes Fréquences
Liste	Référence	Référence	Référence
	Stimulus 1	Stimulus 1	Stimulus 1
	Stimulus 2	Stimulus 2	Stimulus 2
	[...]	[...]	[...]
	Stimulus n	Stimulus n	Stimulus n

Tableau 3 : Listes des stimuli aux trois conditions fréquentielles

➤ Génération des stimuli

La création des stimuli sonores nécessite l'élaboration d'une formule mathématique (Équation 1). Elle permet de générer un son harmonique grâce à la sommation de sons purs sinusoïdaux. L'atténuation harmonique appliquée à chaque son pur enrichit le calcul de leur amplitude.

$$S_{test}(t) = \sum_{x=1}^X S_{pur}(t, x) = \sum_{x=1}^X P_0 10^{\frac{N_1 - (x-1)(8+k)}{20}} \sin(x2\pi f_1 t)$$

Équation 1 : Formule de génération des stimuli du test de discrimination de timbre

Les étapes intermédiaires de démonstration sont présentées ci-après.

$$S_{pur}(t, x) = A_x \sin(\omega_x t + \phi)$$
$$A_x = P_0 10^{\frac{N_x}{20}} ; \omega_x = 2\pi f_x ; \phi = 0$$
$$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} ; N_x = N_1 - (x - 1)(8 + k) ; f_x = x f_1$$

Les variables sont les suivantes :

- A : amplitude
- f : fréquence (Hz)
- k : valeur d'incrément de l'atténuation harmonique (dB)
- N : intensité (dB SPL)
- ω : pulsation
- ϕ : phase
- P_0 : pression acoustique de référence (Pa)
- S_{pur} : son pur
- S_{test} : son test
- t : temps (s)
- X : nombre de sons purs
- x : rang du son pur

Le logiciel Matlab est un calculateur numérique capable de générer des sons complexes. Les lignes de code présentées en Annexe I sont issues de la formule et injectées dans Matlab. Les stimuli résultants sont enregistrés au format wave à une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz et avec 16 bits de codage.

➤ Création des pistes de test

Des pistes de test de trois stimuli sont composées à l'aide du logiciel de montage sonore Audacity (Figure 3). Pour une condition donnée, chaque stimulus est accompagné par la référence répétée deux fois. Chaque liste comporte donc trois configurations liées à la position des stimuli de référence R par rapport au stimulus de test S (Tableau 4). Les trois formes possibles sont SRR, RSR, RRS. Le stimulus de test est respectivement placé en position 1, 2, 3.

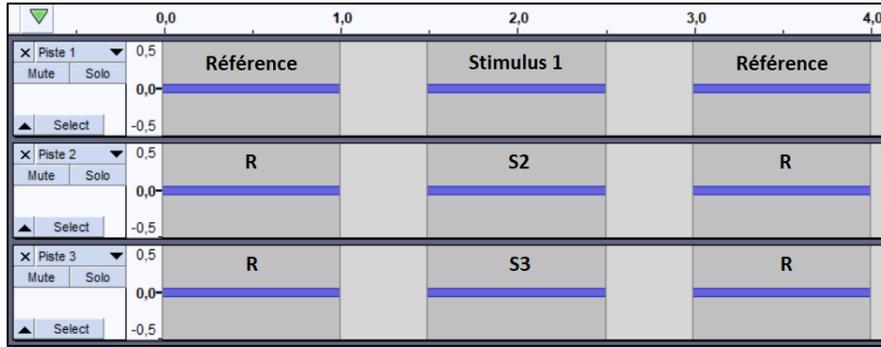


Figure 3 : Exemple d'élaboration de quelques pistes de test en configuration RSR à l'aide d'Audacity

Condition	Basses Fréquences			Moyennes Fréquences			Hautes Fréquences		
	SRR	RSR	RRS	SRR	RSR	RRS	SRR	RSR	RRS
Liste	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1	Piste 1
	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2	Piste 2
	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n	Piste n

Tableau 4 : Liste des pistes de test aux trois configurations de présentation des stimuli et aux trois conditions fréquentielles

➤ Mesure du centre de gravité spectral

Pour chaque stimulus est calculée la valeur de son Centre de Gravité Spectral (CGS) relatif à la fréquence fondamentale considérée (Équation 2). Il est obtenu à partir des moyennes des amplitudes A pondérées par le rang i des harmoniques (Krimphoff & al., 1994). Il est d'autant plus petit que le numéro d'un stimulus est grand.

$$CGS = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

Équation 2 : Formule de calcul relative du Centre de Gravité Spectral (CGS)

Chaque piste possède deux valeurs de CGS différentes qui sont celles du stimulus de test S et de la référence R . Le calcul de la différence entre ces deux valeurs permet d'attribuer à chaque piste un intervalle de brillance relatif entre les stimuli présentés (Équation 3). Cet intervalle est d'autant plus important que le numéro d'une piste est grand.

$$\Delta CGS = CGS_R - CGS_S$$

Équation 3 : Formule de calcul de l'intervalle de brillance (ΔCGS)

b) Valeurs retenues

➤ **Fréquences des sons purs**

Chaque stimulus est composé d'un fondamental et de quatre harmoniques. La valeur de la fréquence fondamentale en condition BF est de 220 Hz (La_2), celle de la condition MF est de 440 Hz (La_3) et celle de la condition HF de 880 Hz (La_4). Les fréquences de leurs harmoniques sont répertoriées dans le tableau suivant (Tableau 5).

	Basses Fréquences	Moyennes Fréquences	Hautes Fréquences
Fondamental	220	440	880
Harmonique 1	440	880	1760
Harmonique 2	660	1320	2640
Harmonique 3	880	1760	3520
Harmonique 4	1100	2200	4400

Tableau 5 : Fréquences du fondamental et des harmoniques des stimuli aux trois conditions fréquentielles (en Hz)

➤ **Intensités des sons purs**

Stimuli de référence

Pour chaque stimulus, l'amplitude attribuée au fondamental équivaut à un niveau sonore de 65 dB SPL. Quant à l'atténuation harmonique, elle est fixée à 8 dB SPL pour les stimuli de référence. Cette valeur permet de négliger les harmoniques dans la mesure du niveau d'intensité global. En effet, la différence qu'ils engendrent est bien inférieure à 1 dB et n'est donc pas audible. Trois sons de calibration d'une durée de 10 secondes sont créés afin de contrôler l'intensité reçue aux oreilles du patient pour chaque condition fréquentielle. Ils possèdent les caractéristiques harmoniques des sons de référence. Ces mesures au sonomètre permettent de prendre en compte la bande passante imparfaite du HP, la distance entre le patient et la source sonore ainsi que les effets liés à l'acoustique de la cabine audiométrique utilisée.

Stimuli de test

Des listes de 32 stimuli sont créées en incrémentant successivement l'atténuation harmonique des sons de référence d'un pas de 0,25 dB. Le stimulus numéro 32 possède ainsi une atténuation harmonique de 16 dB, valeur maximale permettant de conserver l'intégrité du spectre. Il en découle une plage d'atténuation harmonique de 8 dB par rapport à la référence. En d'autres termes, chaque stimulus est différent d'un autre d'un pas de 1 dB au niveau de son dernier harmonique, seuil théorique moyen de discrimination d'intensité.

➤ **Représentations spectrale et temporelle**

Les niveaux sonores du fondamental F et des harmoniques H de quelques stimuli sont présentés à travers la représentation spectrale simplifiée de la Figure 4. Le détail est à retrouver en Annexe II.

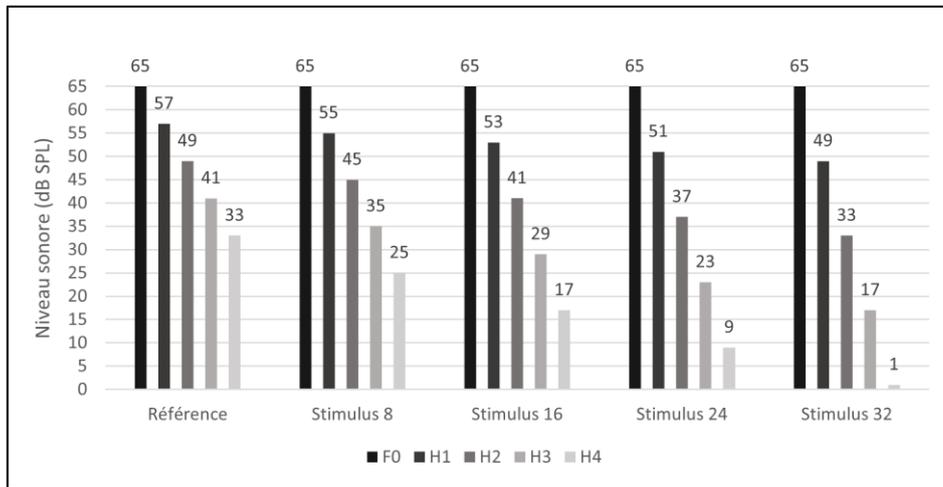
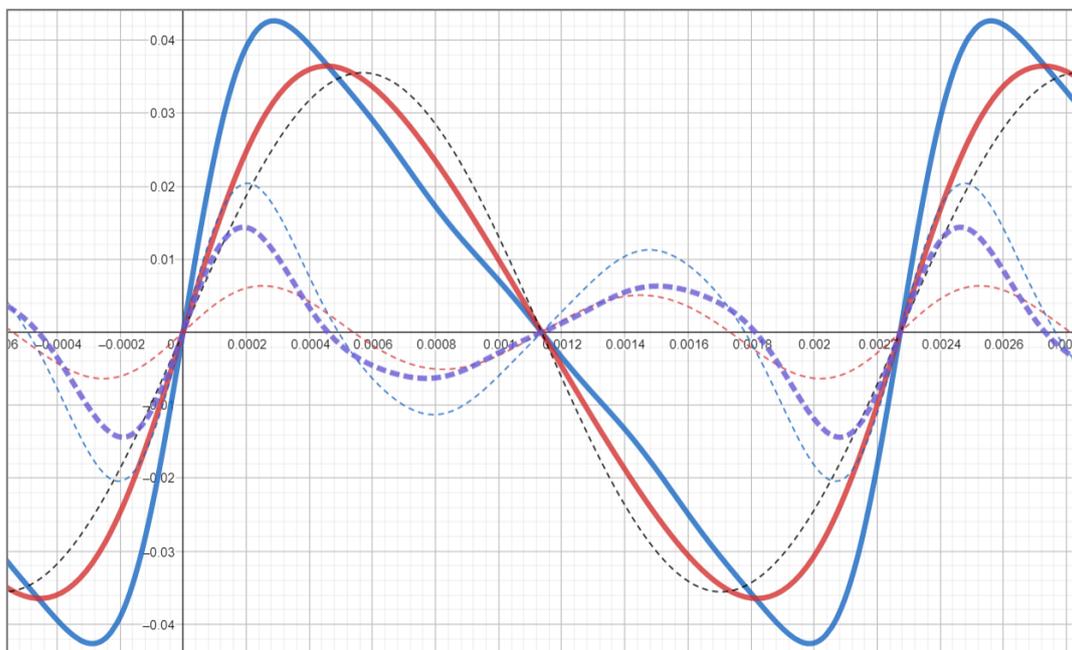


Figure 4 : Représentation spectrale simplifiée du fondamental et des harmoniques de quelques stimuli

Une représentation temporelle des stimuli permet d’apprécier la forme de leurs courbes complexes. La Figure 5 met en regard le stimulus 32, la référence et le son pur correspondants. Les signaux sont soustraits entre eux pour visualiser leurs différences. Soustraire le stimulus de test à la référence permet d’isoler l’intervalle de brillance qui sépare les deux timbres. Il en découle une représentation spectrale (Figure 6).



-----	Son pur
—————	Stimulus de référence
—————	Stimulus de test numéro 32
- - - - -	Différence entre la référence et le stimulus 32
- - - - -	Différence entre la référence et le son pur
- - - - -	Différence entre le stimulus 32 et le son pur

Figure 5 : Représentation temporelle du stimulus 32, de la référence et du son pur correspondants ainsi que de leurs différences à 440 Hz

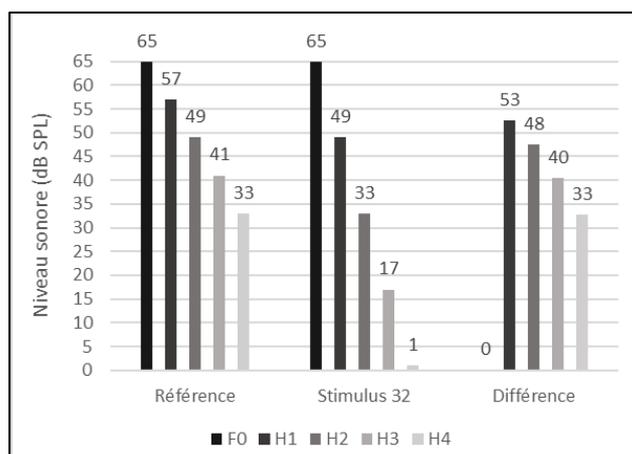


Figure 6 : Représentation spectrale de la différence entre la référence et le stimulus 32

➤ Centres de gravité spectraux

Tous les stimuli ont une durée de 1 seconde. Ils sont espacés entre eux de 0,5 secondes au sein d'une piste. Les valeurs absolues de Centre de Gravité Spectral (CGS) des trois stimuli de référence sont 354, 709 et 1418 Hz. Les intervalles de brillance sont présentés dans le Tableau 6 pour quelques pistes. L'Annexe III expose la totalité des valeurs.

	Piste 8	Piste 16	Piste 24	Piste 32
CGS_R	1,611			
CGS_S	1,447	1,330	1,248	1,188
ΔCGS	0,164	0,280	0,363	0,423

Tableau 6 : Intervalles de brillance de quelques pistes de test (ΔCGS)

La méthode de construction des stimuli induit une division plus fine de l'intervalle de brillance lorsque le numéro de la piste augmente (Figure 7). Cela s'explique par la non-linéarité de la corrélation entre l'incrément de l'atténuation harmonique et le barycentre spectral.

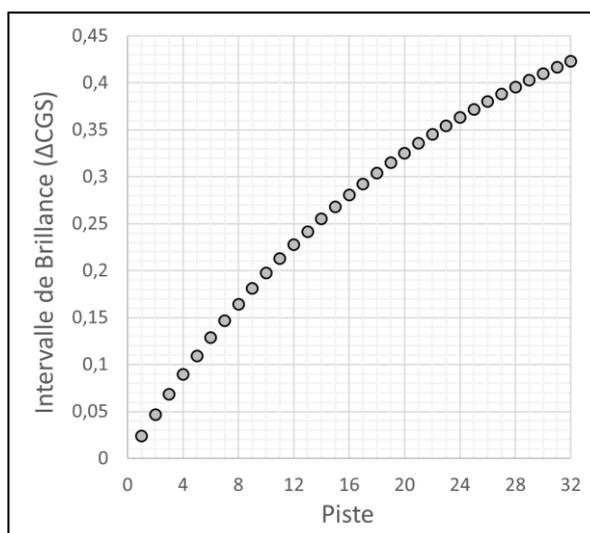


Figure 7 : Intervalle de brillance en fonction du numéro de la piste de test

3. Questionnaire musical

Un questionnaire est utilisé afin de mesurer objectivement l'expérience musicale de chaque participant (Tableau 7). Il s'agit de cinq questions tirées de l'AMP test (Kirchberger & Russo, 2015). Il est traduit en français et les données recueillies ne sont pas anonymes. Il comprend la formation et la pratique musicale, mais aussi les habitudes d'écoute ainsi qu'une auto-évaluation de la musicalité. Des points sont attribués en fonction du poids de chaque réponse. Le total de ces points permet une mesure globale de l'Expérience Musicale (EM). La plage théorique est de [-5 ; 6]. Un sujet est dit « Musicien » (M) s'il obtient un score positif ou nul. Dans le cas contraire, il est « Non-Musicien » (NM).

Question	Réponse	Points attribués
Combien d'années de formation musicale avez-vous reçues ?	< 1 an	-4
<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentale / vocale • Théorie ou écoute musicale 	1-3 ans	-2
	3-10 ans	0
Combien d'années avez-vous appris à jouer d'un instrument par vous-même ?	> 10 ans	2
Cumuler les réponses	Musicien professionnel	4
Avez-vous été musicalement actif au cours de cette dernière année ?	Non	0
	Oui	1
Possédez-vous le sens de la musicalité ?	Non	-0,5
	Un peu	0
	Oui	0.5
En moyenne, combien d'heures par jour écoutez-vous de la musique ?	<1 heure	-0,5
	1-3 heures	0
	> 3 heures	0.5

Tableau 7 : Questionnaire musical et attribution des points respectifs pour déterminer une mesure objective de l'expérience musicale pour chaque participant

C. Méthode

➤ Préliminaires

Pour mener à bien cette étude, une prise de rendez-vous est nécessaire. Cette étape permet de sélectionner les participants vraisemblablement aptes à participer à l'étude, en adéquation avec les critères d'inclusion pour chaque population. Le jour convenu, cette démarche est complétée en cabine insonorisée par une anamnèse, une otoscopie et une audiométrie tonale au casque dans le silence. Les seuils sont recherchés par méthode ascendante avec une double vérification. Les fréquences mesurées par octave vont de 125 à 8000 Hz. Chez les Malentendants (ME), les fréquences intermédiaires viennent compléter l'audiométrie. Ensuite, le participant répond au questionnaire d'expérience musicale. Le testeur pose les questions et attribue les points en fonction des réponses recueillies. Le sujet ne prend pas connaissance des réponses et des points attribués (Tableau 7).

➤ Procédure de test

L'expérimentation a lieu en champ libre. Un HP est placé face au sujet et à une distance d'un mètre. Une calibration au sonomètre permet de générer des sons à une intensité fixe de 65 dB SPL. Cette intensité est contrôlée à chaque changement de condition fréquentielle. Les consignes, précisées en Annexe IV, sont énoncées au patient. Il doit signaler, parmi une sélection de trois stimuli répartis sur une même piste de test, lequel d'entre eux est différent des deux autres. La réponse attendue est la position du stimulus discriminé (1, 2 ou 3). Cette configuration est déterminée à l'aide d'une variable aléatoire. Si la différence n'est pas discernable, le patient doit l'indiquer au testeur. A la suite de ce conditionnement commence une phase d'entraînement qui n'est pas prise en compte dans les résultats de l'étude. Il s'agit d'une sélection de dix pistes à la difficulté aléatoire en condition MF. Plus le numéro de la piste est petit, plus l'intervalle de brillance entre les stimuli est faible et plus la difficulté est élevée. Lorsque le patient donne une réponse, une rétroaction orale lui indique s'il a répondu correctement ou non. Cette information n'est plus communiquée au moment du test. Une deuxième présentation peut être accordée si le patient en formule spontanément la demande. Afin de mesurer le pouvoir de discrimination de timbre du sujet, un Seuil de Discrimination (SD) équivalent à un intervalle de brillance est recherché aux trois conditions fréquentielles. Cette recherche se fait en condition MF, puis BF et enfin HF. Chaque seuil est mesuré à l'aide d'une procédure adaptative qui sélectionne les pistes en tenant compte des réponses du sujet (Treutwein, 1995). A chaque bonne réponse, la piste suivante augmente en difficulté. A l'inverse, lorsque la réponse est mauvaise, la difficulté est diminuée, de même lorsqu'aucune différence n'est perçue. Le test démarre systématiquement par la dernière piste. Si aucune différence n'est perçue, le testeur passe à la condition suivante. Dans le cas contraire, le test se poursuit. La procédure adaptative se modifie au fil des renversements. Il s'agit du moment où la réponse passe de correct à incorrect et inversement. Jusqu'au deuxième renversement, la règle de sélection est de 16 pistes vers le bas pour 8 vers le haut. Ces valeurs sont divisées par deux entre le deuxième et le quatrième renversement, puis entre le quatrième et le sixième, et enfin après le sixième renversement. Le ratio 2 pour 1 est systématiquement respecté (Levitt, 1971). Le test s'arrête au dixième renversement. Le SD recherché est obtenu par le moyennage

des valeurs des pistes des quatre derniers renversements. Le seuil est arrondi à la valeur d'une des 32 pistes de la liste considérée. Cette procédure est répétée pour chaque condition fréquentielle. Le test entier dure environ 15 minutes.

➤ Conditions de passation

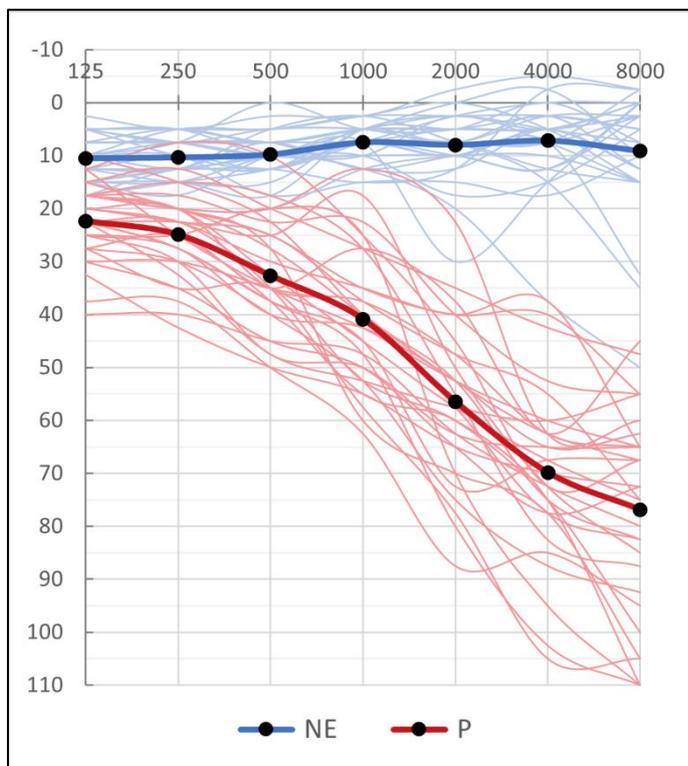
Une fois le test réalisé, la population Normo-Entendante (NE) est remerciée. Quant à la population Presbycusique (P), une partie est testée en condition P0, une autre en condition P0 et P1 et une dernière dans toutes les conditions. La condition Oreilles Nues (ON) est systématiquement testée en premier. L'ordre de passage de conditions P1 et P2 est randomisé. L'énoncé des consignes et la phase d'entraînement ne sont mis en place qu'une seule fois tandis que la recherche des SD est intégralement renouvelée. Les conditions P1 et P2 nécessitent une connexion des appareils auditifs au logiciel fabricant afin de préréglager les appareils en méthodologie NAL-NL2 et CAM2 sans ajustement fin. Le préréglage se base sur la mesure des seuils de l'audiométrie tonale. L'antilarsen ainsi que tous les traitements de signaux sont désactivés (réducteur de bruit impulsionnel, réducteur de bruit de vent, débruiteur). La directivité microphonique est omnidirectionnelle.

Le logiciel CAM2B_v2 permet de déterminer les gains de la méthodologie CAM2 à appliquer dans les appareils auditifs. L'audiométrie (aérienne et osseuse), le type d'aides auditives (contour d'oreille ou intra-auriculaire) et la position des microphones (sur le pavillon ou derrière le tragus) doivent être renseignés. Les seuils d'enclenchement de la compression proposés sur 16 bandes sont laissés en l'état. La valeur maximale de compression est de 3. En sortie, les valeurs de gain sont présentées à 50, 65 et 80 dB SPL sur 11 fréquences de réglage. Des images du logiciel sont à retrouver en Annexe V.

III. RESULTATS

A. *Données audiométriques*

Les audiométries des populations Normo-Entendante (NE) et Presbyacousique (P) sont compilées dans le graphique de la Figure 8. Chaque participant est représenté par une courbe d'audition moyennée sur les deux oreilles. Les données brutes sont à retrouver en Annexes VI et VII. Une courbe moyenne est tracée pour chaque population. Elles mettent en évidence les caractéristiques audiométriques des sujets, soit une perte plate pour les NE et une courbe en pente de ski pour les P. Les Pertes Tonales Moyennes (PTM) sont respectivement de 8 et 50 dB HL. Une Perte Tonale dite « Locale » (PTL) est calculée suivant les conditions Basses Fréquences (BF), Moyennes Fréquences (MF) et Hautes Fréquences (HF). Leur calcul se fait sur 3 fréquences, respectivement de 250 à 1000 Hz, de 500 à 2000 Hz et de 1000 à 4000 Hz. Cette perte est logiquement croissante pour la population P, à savoir de 33, 43 et 56 dB HL. L'écart-type est faible chez les NE tandis qu'il croit avec la fréquence chez les P.



NE	Moyenne	Ecart-type
PTM	8	4

P	Moyenne	Ecart-type
BF	33	9
MF	43	11
HF	56	13
PTM	50	11

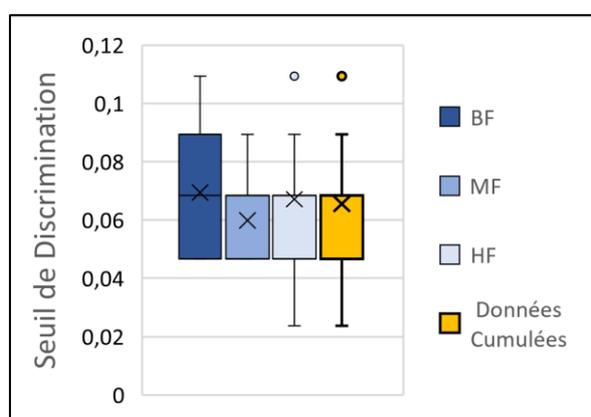
Figure 8 : Courbes audiométriques moyennées superposées des populations normo-entendante et presbyacousique ($n_{NE} = n_P = 31$)

B. Normo-entendants

➤ Seuils de discrimination de brillance

Les Seuils de Discrimination (SD) des NE, correspondants à un intervalle de brillance, sont répertoriés dans le diagramme en boîtes de la Figure 9 aux trois conditions fréquentielles. Les données individuelles de chaque participant sont en Annexe VI. Les résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk indiquent que les différentes mesures ne suivent pas une distribution gaussienne. Un test de Wilcoxon apparié est donc utilisé afin de comparer les seuils des trois conditions fréquentielles. Les données ne sont pas statistiquement différentes, sauf entre les conditions BF et MF où une p-value inférieure au seuil de significativité de 0,05 est relevée. La mise sous forme de Données Cumulées (DC) est malgré tout suggérée.

Une norme est établie à partir de ces données recueillies auprès de 31 personnes NE. Elle rapporte les moyennes et écart-types des SD de brillance aux trois conditions fréquentielles. Une correspondance avec les pistes de test est proposée, arrondie à la piste la plus proche. La moyenne retenue est un intervalle de brillance global de 0,066 correspondant approximativement à la piste numéro 3 du test de discrimination de timbre.



Shapiro-Wilk	W	p-value
BF	0,85	6e-4
MF	0,75	7e-6
HF	0,85	6e-4

Wilcoxon	p-value
BF - MF	0,04
MF - HF	0,10
BF - HF	0,53

Norme	Moyenne	Ecart-type	Pistes
BF	0,069	0,018	2 - 4
MF	0,060	0,013	2 - 3
HF	0,067	0,023	2 - 4
Cumul	0,066	0,019	2 - 4

Figure 9 : Seuils de discrimination de brillance de la population normo-entendante aux trois conditions fréquentielles et norme associée (n = 31)

➤ Niveau d'expérience musicale

La répartition de la population NE selon les résultats au questionnaire musical est assez variée (Figure 10). 9 participants sont considérés comme Musiciens (M) contre 22 Non-Musiciens (NM). Le nombre de participants est d'autant plus faible que l'Expérience Musicale (EM) augmente. Cette proportion est relativement représentative de la population puisqu'elle intervient dans un processus de sélection aléatoire.

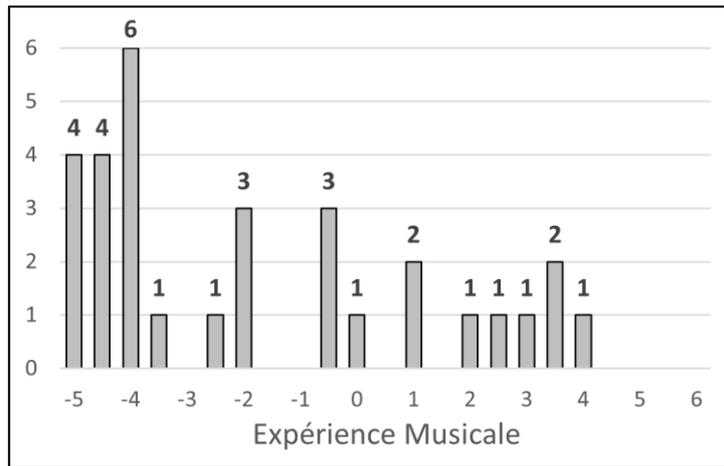


Figure 10 : Répartition de la population normo-entendante selon l'expérience musicale (n = 31)

➤ Influence du niveau d'expérience musicale

Le classement des SD de brillance selon l'EM permet de révéler s'il existe ou non une corrélation entre ces deux variables (Figure 11). Le test de Pearson indique des corrélations significatives aux BF et HF. Leurs forces sont respectivement modérée et faible. Plus l'EM est importante, plus le SD de brillance a tendance à légèrement diminuer. Quant aux seuils en condition MF, ils ne semblent pas varier avec l'EM. Lorsque les valeurs sont prises dans leur ensemble, la corrélation est existante mais faible.

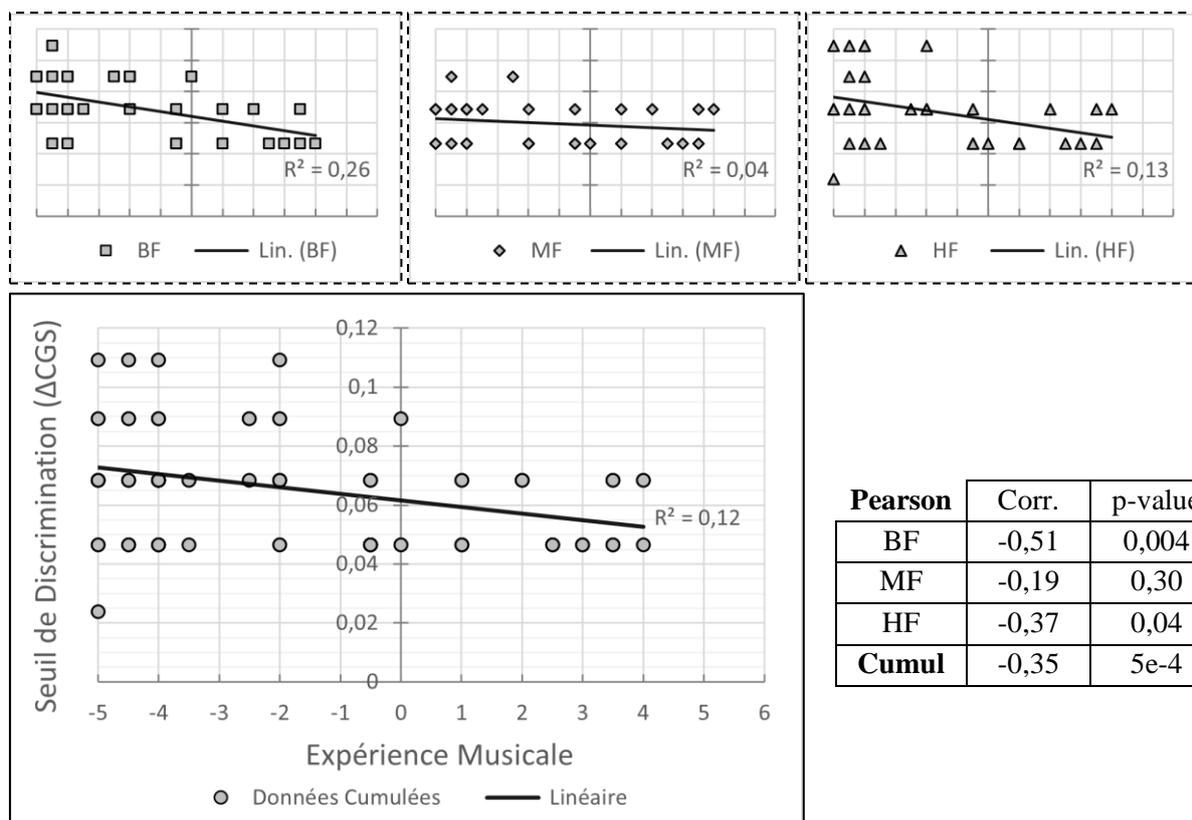


Figure 11 : Seuils de discrimination de brillance de la population normo-entendante aux trois conditions fréquentielles en fonction de l'expérience musicale (n = 31)

C. Presbyacousiques

➤ Niveau d'expérience musicale

La répartition de la population P selon les résultats au questionnaire musical est assez variée (Figure 12). 10 participants sont considérés comme Musiciens (M) contre 21 Non-Musiciens (NM). 4 participants sont musiciens professionnels.

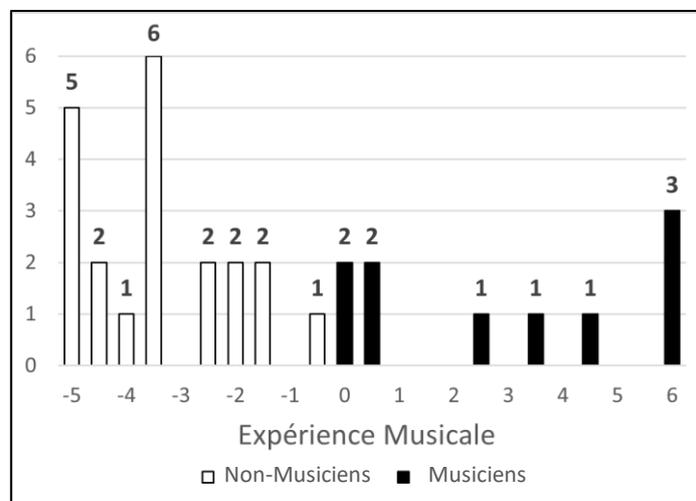


Figure 12 : Répartition de la population presbyacousique selon l'expérience musicale (n = 31)

1. Oreilles nues

➤ Seuils de discrimination de brillance et perte auditive

La Figure 13 met en évidence l'accroissement des Seuils de Discrimination (SD) de Brillance de la population P en fonction de la Perte Tonale Locale (PTL) moyennée sur les deux oreilles. Les données individuelles de chaque participant sont en Annexe VII. Deux seuils aberrants excentrés du nuage de points ont été retirés à BF. Quelle que soit la bande de fréquences concernée, l'évolution semble être la même. La mise sous forme de Données Cumulées (DC) semble cohérente. Une courbe de tendance polynomiale se rapproche au mieux des mesures obtenues. Le test de corrélation de Spearman est approprié puisqu'il s'applique à la non-linéarité de la répartition des données. Il indique une corrélation significative pour chacune des 3 conditions. Les corrélations sont d'autant plus fortes que la fréquence est élevée. Elles sont respectivement faible, moyenne et forte aux BF, MF et HF. La corrélation globale obtenue à l'aide des DC est de force moyenne.

➤ Influence de l'expérience musicale

Représentés en noir, les sujets M semblent obtenir des SD globalement plus faibles que les NM, comme le laissent penser les courbes de tendance respectives. Un test de Wilcoxon non apparié permet de comparer ces deux groupes entre eux. Les PTL ne sont pas statistiquement différentes sauf pour les DC où le seuil de significativité est tout juste atteint. Cette absence quasi-parfaite de différence entre les PTL des deux groupes permet de comparer les SD

sereinement. Aux BF, le seuil de significativité n'est pas atteint et les données des deux groupes ne peuvent pas être considérées comme étant différentes. En revanche, le seuil de significativité est largement dépassé au niveau des MF, HF et des DC. Cela signifie que sur ces bandes fréquentielles et au global, la constatation de la plus faible valeur des SD du groupe de sujets M est fondée.

73% des SD de la population P sont en dehors de la norme normo-entendante. 68% de ces seuils appartiennent à des sujets NM.

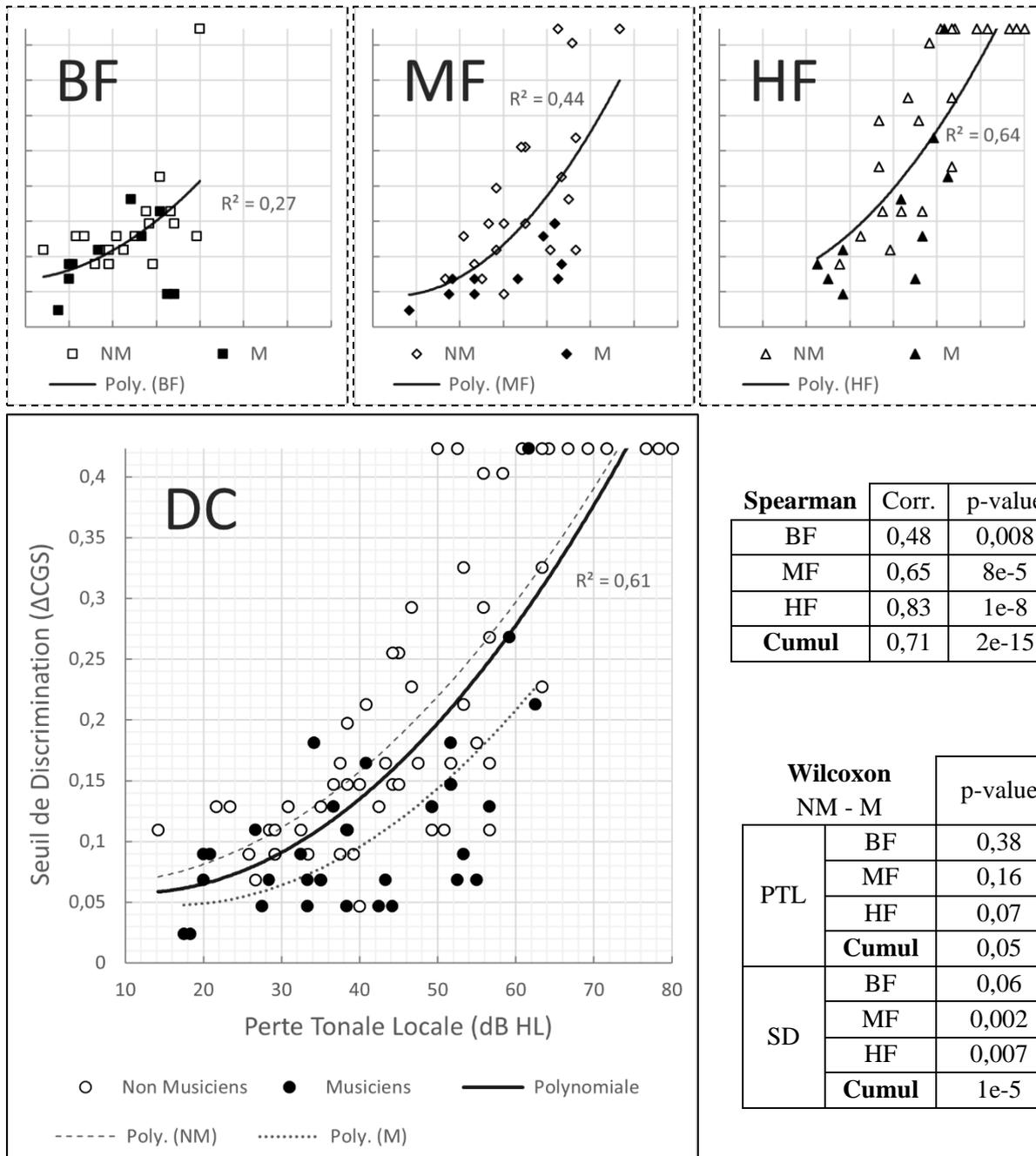


Figure 13 : Seuils de discrimination de brillance de la population presbycousique aux trois conditions fréquentielles en fonction de la perte tonale locale (n = 31)

2. Oreilles appareillées

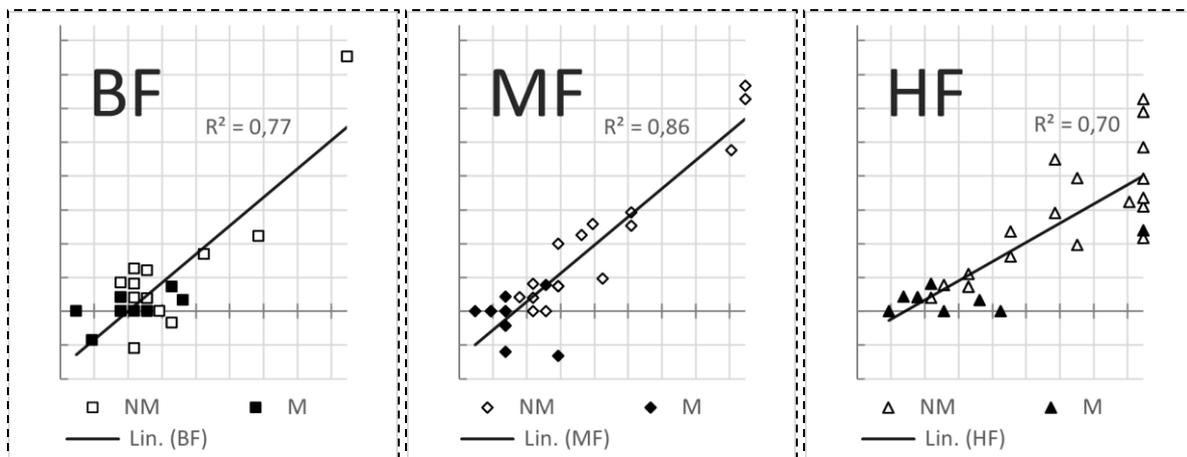
a) *Méthodologie de préréglage NAL-NL2*

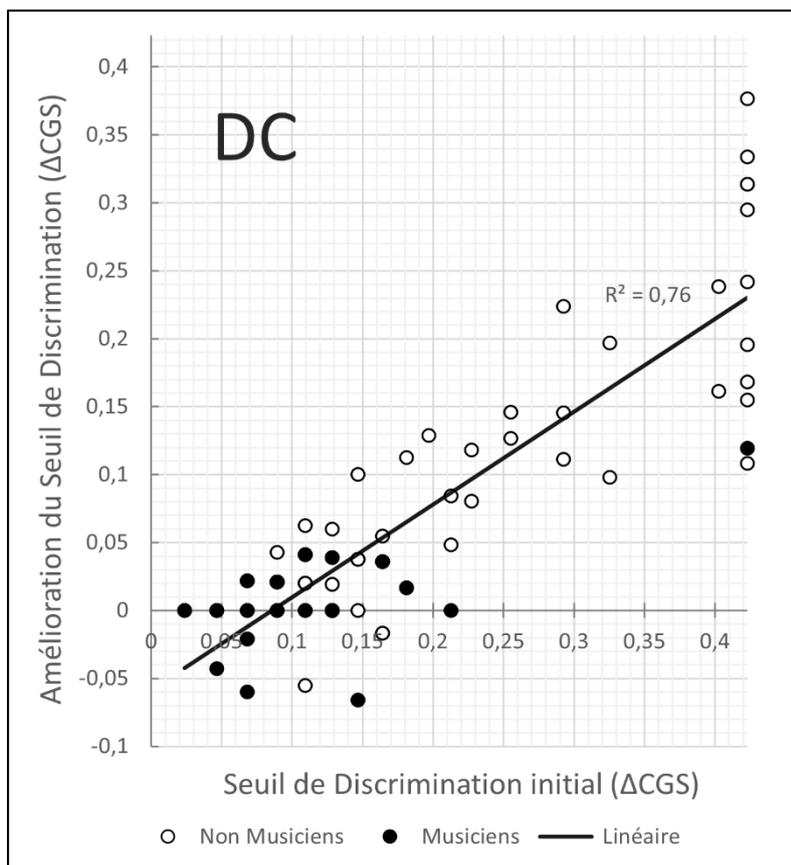
➤ Amélioration du seuil de discrimination de brillance

L'Amélioration du Seuil de Discrimination de brillance (ASD) est définie comme étant la différence de la valeur de seuil Oreilles Appareillées (OA) à celle Oreilles Nues (ON). Il en découle la représentation graphique de la Figure 14 mettant en regard cette amélioration au Seuil de Discrimination Initial oreilles nues (SDI). L'appareillage est réalisé en méthodologie NAL-NL2. Le test de Pearson confirme la corrélation linéaire constatée à un haut degré de significativité. L'ASD est d'autant plus grande que le SDI est élevé. Toutes les corrélations sont fortes quelle que soit la bande fréquentielle considérée. Certaines valeurs d'ASD sont négatives lorsque le SDI est proche de la moyenne Normo-Entendante (NE). Aux HF, la pente de la tendance linéaire semble moins importante que pour les deux autres conditions.

Une comparaison entre les groupes Musicien (M) et Non-Musicien (NM) n'est pas envisagée compte tenu de l'apparente différence de distribution des données sur l'axe des SDI.

Parmi les participants testés en condition P0 et P1, 13% sont revenus dans la norme à l'aide de l'appareillage auditif en méthodologie NAL-NL2.





Pearson	Corr.	p-value
BF	0,88	8e-10
MF	0,93	2e-12
HF	0,84	3e-8
Cumul	0,87	3e-27

Figure 14 : Amélioration du seuil de discrimination de brillance de la population presbycusique par l'appareillage auditif en méthodologie NAL-NL2 aux trois conditions fréquentielles par rapport au seuil initial oreilles nues ($n = 28$)

b) Méthodologie de préréglage CAM2

➤ Amélioration du seuil de discrimination de brillance

La Figure 15 montre l'ASD relative à la mise en place d'un appareillage en méthodologie CAM2 en fonction du SDI. Le test de Pearson révèle une nouvelle fois une corrélation linéaire positive hautement significative à toutes les bandes fréquentielles. Toutes les corrélations sont fortes bien que réalisées sur un panel de patients moins élevé ($n = 17$).

Une comparaison entre les groupes M et NM n'est pas envisagée compte tenu des différences de distribution des données sur l'axe des SDI.

Parmi les participants testés en condition P0 et P2, 20% sont revenus dans la norme à l'aide de l'appareillage auditif en méthodologie CAM2.

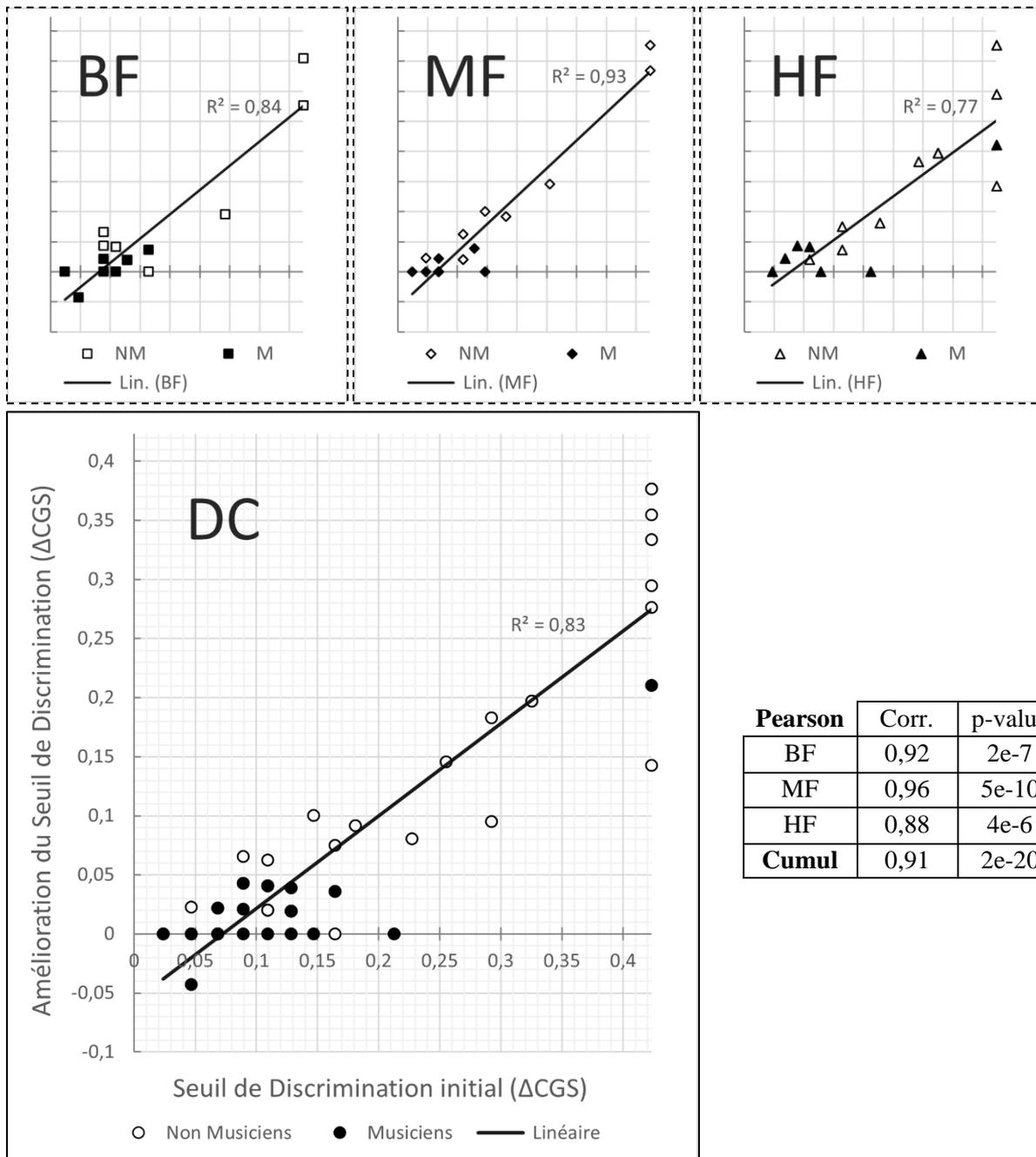


Figure 15 : Amélioration du seuil de discrimination de brillance de la population presbycousique par l'appareillage auditif en méthodologie CAM2 aux trois conditions fréquentielles par rapport au seuil initial oreilles nues (n = 17)

c) Comparaison des deux méthodologies

➤ Gains d'insertion

Les méthodologies de pré réglage NAL-NL2 et CAM2 appliquent des gains personnalisés sur la base des seuils liminaires de l'audiométrie tonale. La Figure 16 rapporte la moyenne des gains d'insertion des participants P aux deux méthodologies pour des sons purs aux niveaux d'entrée faible, moyen et fort. Cela correspond respectivement à des intensités de 50, 65 et 80 dB SPL. Les valeurs individuelles de gain d'insertion se trouvent en Annexe VIII. La compression du signal implique la diminution du gain par bande de fréquences lorsque le niveau d'entrée augmente. Les allures de courbe de gain des deux méthodologies sont différentes. CAM2 ne donne pratiquement pas de gain en dessous de 500 Hz alors que NAL-NL2 conserve une amplification des sons faibles. La prise en compte du gain étymotique, basée sur la statistique et entraînant une baisse de gain d'insertion linéaire, est plus importante sur la fréquence 3000 Hz pour CAM2 que pour NAL-NL2. Les fréquences aiguës supérieures à 3000 Hz ont une amplification fortement croissante chez CAM2 tandis qu'elle tend à rester constante voire à diminuer chez NAL-NL2 malgré l'augmentation de la perte auditive.

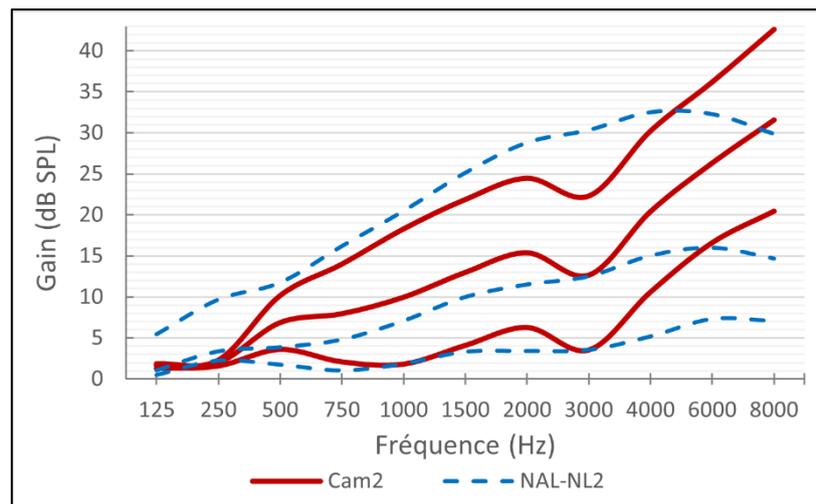


Figure 16 : Courbes moyennes de gain d'insertion des méthodologies CAM2 et NAL-NL2 pour des niveaux d'entrée de 50, 65 et 80 dB SPL (n = 17)

➤ Différences de gain d'insertion

La Figure 17 reprend la représentation fréquentielle du gain d'insertion en soustrayant aux gains CAM2 ceux de NAL-NL2. Les courbes résultantes aux trois niveaux d'entrée permettent de comparer plus précisément les deux méthodologies. En moyenne, les gains d'insertion sont approximativement les mêmes jusqu'à 3000 Hz. La différence notable se fait au-delà de cette fréquence où les gains CAM2 s'envolent jusqu'à 14 dB de plus que NAL-NL2 à 8000 Hz. CAM2 donne moins de gain aux sons faibles jusqu'à 5000 Hz tandis qu'elle amplifie davantage les sons moyens sur la quasi-totalité de la gamme fréquentielle. Les gains des sons forts sont à peu près identiques sauf à 2000 Hz et au-delà de 3000 Hz où CAM2 en donne davantage.

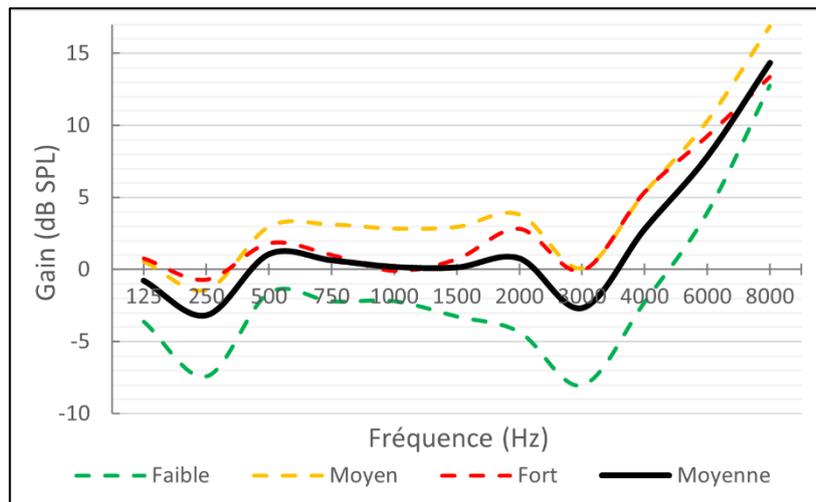


Figure 17 : Courbes moyennes des différences de gain d'insertion entre les méthodologies CAM2 et NAL-NL2 pour des niveaux d'entrée de 50, 65 et 80 dB SPL (n = 17)

➤ Comparaison des seuils de discrimination de brillance

La Figure 18 permet de présenter les Seuils de Discrimination (SD) du test de timbre mesurés en méthodologie NAL-NL2 et CAM2 aux trois conditions fréquentielles. La diagonale du graphique matérialise la zone où les SD sont identiques quelle que soit la méthodologie de pré-réglage utilisée. Visuellement, les points s'éloignent assez peu de cette droite si ce n'est sur les HF où certains SD semblent plus faibles en méthodologie CAM2. Le test de Wilcoxon apparié, qui compare les mesures aux deux méthodologies, révèle des différences significatives aux MF, HF et au global. Les SD sont donc plus faibles en méthodologie CAM2 par rapport à la méthodologie NAL-NL2 sur ces bandes de fréquences. En revanche, la statistique ne relève aucune différence en condition BF.

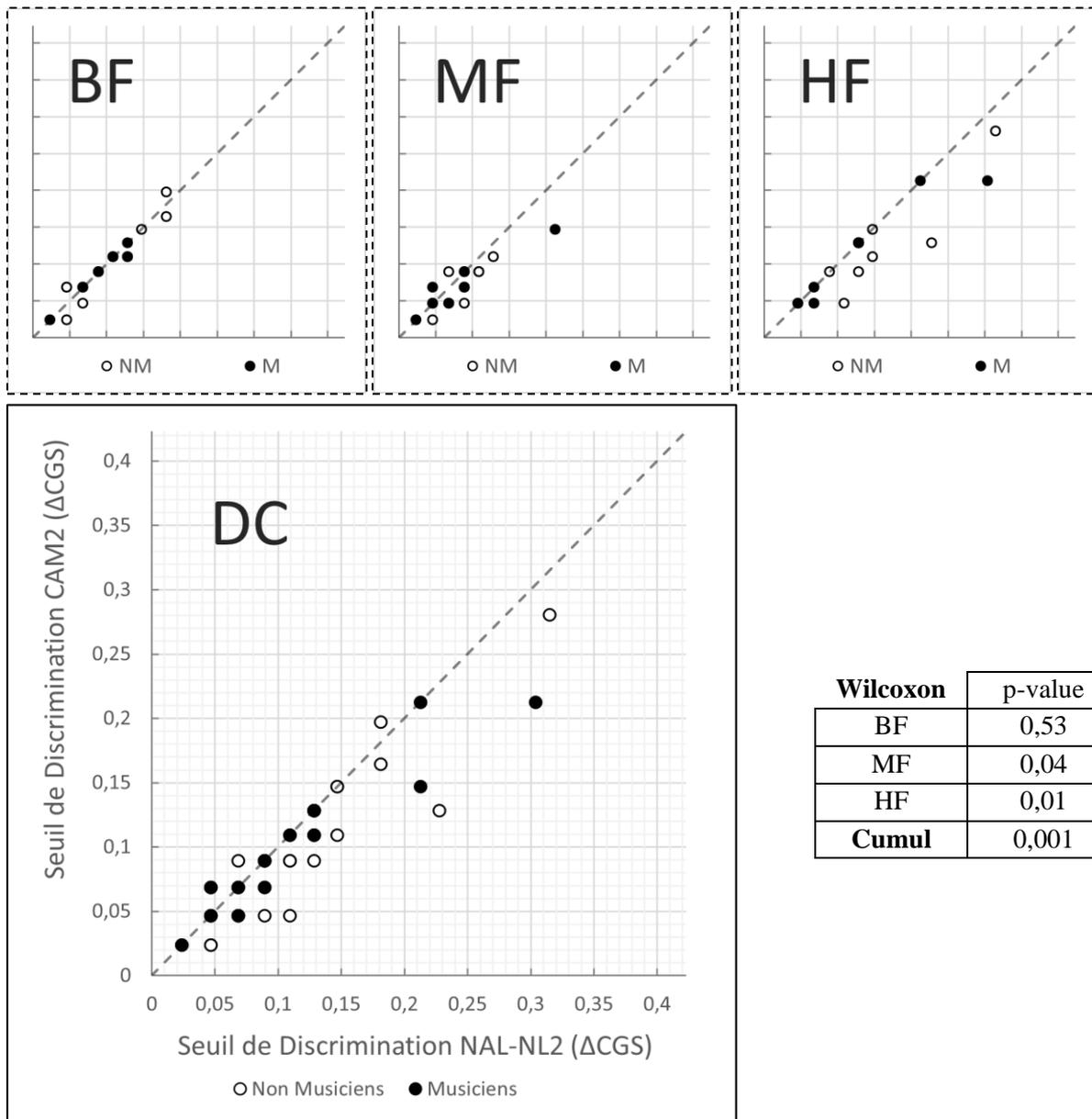


Figure 18 : Comparaison des seuils de discrimination de brillance de la population presbycousique avec appareillage auditif en méthodologie NAL-NL2 et CAM2 aux trois conditions fréquentielles (n = 17)

IV. DISCUSSION

➤ Normo-entendants

Les Seuils de Discrimination (SD) de brillance des Normo-Entendants (NE) sont assez semblables quelle que soit la condition fréquentielle considérée (Figure 9). Malgré tout, les stimuli MF sont significativement mieux discriminés que les stimuli BF, leur seuil moyen étant moins élevé. Or, ces résultats peuvent s'expliquer autrement que par une cause fonctionnelle de l'audition. En effet, les stimuli BF aux barycentres spectraux graves sont moins présents dans notre culture sonore. A titre indicatif, un trombone doit jouer un Do₂ (131 Hz) afin de posséder un Centre de Gravité Spectral (CGS) moyen environ égal à celui du stimulus de référence de la condition BF (354 Hz), note faisant partie du grave de sa tessiture (Krimphoff & al., 1994). Pendant l'expérimentation, certains participants ont spontanément évoqué le caractère très grave de ces stimuli. Les moins bons scores pourraient donc s'expliquer par un manque d'entraînement dans la vie courante sur la discrimination de ces timbres. Cette hypothèse semble plausible compte tenu de la corrélation négative entre l'Expérience Musicale (EM) et les scores de discrimination à BF (Figure 11). L'absence de corrélation significative à MF va également en ce sens. Quant à la faible corrélation relevée à HF, elle s'inscrit probablement dans un processus similaire mais moindre. Quoi qu'il en soit, la corrélation reste faible et négligeable au global. Bien que calibrées au sonomètre, il est également possible que les pistes BF n'aient pas été restituées par le HP de manière optimale. Malgré tout, bon nombre de sujets sont parvenus à discriminer de façon uniforme les stimuli BF et MF, ce qui remet en cause cette dernière hypothèse.

Les résultats du test de discrimination de timbre permettent d'établir une norme basée sur une cohorte de 31 sujets NE (Figure 9). Elle peut être utilisée pour mettre en perspective les scores de sujets Malentendants (ME), qu'ils soient presbyacousiques ou non. La valeur moyenne de SD observée est de 0,066. Kirchberger & Russo (2015) ont également mesuré un SD moyen sur la base d'un stimulus à 220 Hz et 40 harmoniques, atténuées successivement de 2 dB. Ce signal est généré à une intensité de 40 dB SL. La valeur minimale d'incrémentations de la pente spectrale nécessaire afin de faire varier la sensation de brillance est ici de 0.15 dB. A l'aide des Équation 2 et en tenant compte du signal théoriquement audible, on en déduit une équivalence à un intervalle de CGS de 0,263. Ce résultat semble moins optimiste que les mesures de ce mémoire. Cette différence peut être due directement ou indirectement à bon nombre de paramètres. Il s'agirait entre autres de la composition harmonique et de la pente d'atténuation, de la position fréquentielle du barycentre spectral ou encore de l'intensité de présentation. En effet, il est probable que la perception de la brillance à travers son SD ne soit pas absolue, à l'image de l'intensité avec la sonie et de la hauteur avec la tonie. La voie est ouverte à de nouvelles études sur le sujet.

➤ Presbyacousiques non appareillés

Les résultats de la population ME quant à la capacité de discrimination de la brillance semblent dégradés par rapport aux NE. Cette observation se retrouve dans la littérature (Kirchberger & Russo, 2015). Cependant, Emiroglu (2007) stipule que cette différence n'est significative que lorsque la perte auditive des ME a une pente importante. Cela peut s'expliquer par le manque de sélectivité en fréquence des tests de brillance de ces deux études, mais aussi par l'adaptation non écologique de l'intensité de présentation des stimuli de test (intensité SL). Par ailleurs, Fitz & McKinney (2010) constatent une altération de la perception de la brillance à l'aide d'une modélisation écologique sur mannequin KEMAR recevant un extrait musical. Les résultats de ce mémoire confirment que l'augmentation de la perte auditive va de pair avec l'augmentation du SD de brillance (Figure 13). La performance d'un sujet Presbyacousique (P) est d'autant plus dégradée que son SD est important. Alors qu'on pouvait s'attendre à une corrélation globale plus franche, la force n'est que moyenne. Cette variabilité des données, prédominante aux alentours de 50 dB de Perte Tonale Locale (PTL), peut s'expliquer par le niveau d'Expérience Musicale (EM). En effet, les Musiciens (M) de cette étude sont globalement plus performants dans la tâche de discrimination de brillance que les Non-Musiciens (NM). Emiroglu (2007) a également constaté cette différence et indique que les résultats des NM restent identiques même s'ils ont suivi des séances d'entraînement. Malgré tout, la variabilité s'amointrit au-dessus et en-deçà d'une bande allant de 40 à 60 dB de PTL. Dans le premier cas, l'EM ne suffit plus à compenser la perte auditive et le SD s'envole. Dans le second cas, les seuils auditifs sont suffisamment préservés pour assurer une discrimination correcte à l'image de la population NE où l'EM n'a qu'un effet très modéré. Ceci explique l'absence de différence significative entre les performances des groupes M et NM à BF. En somme, la variabilité des SD engendrée par le niveau d'EM semble bien plus importante pour les sujets P que pour les sujets NE. L'EM est vraisemblablement d'une aide précieuse dans la tâche de discrimination de la brillance lorsqu'une personne est mise en difficulté par son niveau d'audition. Cependant, elle ne semble pas suffisante pour expliquer la totalité de cette variabilité, comme le montre la répartition discrète des points M et NM les uns par rapport aux autres. La durée de déprivation sensorielle, la pente audiométrique, l'asymétrie des seuils auditifs sont autant de paramètres qui peuvent potentiellement faire varier la discrimination de la brillance à PTL égales. L'état cognitif, le niveau de concentration et la fatigabilité peuvent également être mis en cause au vu de l'âge moyen de la population P (Tacconnat et Lemaire, 2014).

➤ Presbyacousiques appareillés

Le port d'un appareillage auditif bilatéral avec le préréglage NAL-NL2 ou CAM2 permet une amélioration de la discrimination de la brillance d'autant plus importante que la performance initiale Oreilles Nues (ON) est dégradée (Figure 14). Fitz & McKinney (2010) ont prédit cette amélioration dans le cadre d'une restauration adéquate de l'intensité sonore et de l'audibilité. En méthodologie NAL-NL2, les données de la condition HF semblent davantage dispersées et l'amélioration moins importante. En effet, l'appareillage ne suffit pas toujours à contrebalancer la déficience auditive sur ces fréquences. Cela fait écho à la stratégie de gain d'insertion constant voire dégressif de la méthodologie NAL-NL2 aux HF pour des pertes

importantes (Figure 16 ; Keidser & al., 2011). CAM2 adopte la stratégie inverse en amplifiant les HF de façon croissante et soutenue (Moore & al., 2010). Il est difficile d'en dire plus concernant les résultats en méthodologie CAM2 du fait de la taille et de la répartition de l'échantillon ($n = 17$). De la même façon, les sujets M et NM appareillés n'ont pas pu être comparés. Cependant, il est probable que l'écart entre ces deux groupes se soit amoindri par rapport aux résultats ON grâce à la restauration de l'audition par l'appareillage auditif. Par ailleurs, il semble que l'appareillage auditif puisse dégrader la perception de la brillance lorsque les seuils initiaux sont proches de la norme. L'ouverture de l'évent ou la modification des réglages pourraient permettre d'éviter cette dégradation de la qualité sonore.

Dans la majorité des cas, les méthodologies NAL-NL2 et CAM2 donnent des résultats plutôt semblables lorsqu'il s'agit de discriminer la brillance (Figure 18). Toutefois, CAM2 améliore la performance de certains sujets, en particulier aux HF et de façon moins évidente aux MF. Les seuils de discrimination NAL-NL2 et CAM2 sont ainsi significativement dissemblables sur ces bandes de fréquences et au global. Seuls les gains d'insertion et la compression peuvent être mis en cause dans cette différence. CAM2 amplifie davantage les sons moyens et diminue les sons faibles comparé à NAL-NL2 (Figure 16). La perception globale d'intensité des sons test est donc plus importante. Cependant, il est étonnant de constater que la discrimination est meilleure lorsque l'intensité des harmoniques, porteurs de l'information différentielle, est moins importante. Cela pourrait s'expliquer par la diminution intrinsèque de la compression du signal, redéfinissant le contraste entre le fondamental et les harmoniques des stimuli par rapport à NAL-NL2. En effet, bon nombre de fabricants d'appareils auditifs prennent le parti de diminuer la compression de leur programme musique (Fitz & McKinney, 2010). Malgré tout, ces explications doivent être interprétées avec recul puisqu'elles ne concernent que certains sujets, essentiellement à HF. Mettre en cause l'amplification importante de la méthodologie CAM2 aux HF ne semble pas approprié. En effet, pour les harmoniques de faible intensité, elle n'intervient qu'à partir de 6000 Hz. Or, ces fréquences ne sont pas couvertes par la condition de test HF qui s'arrête à 4400 Hz.

➤ Pratique audioprothétique

Ce test de discrimination de timbre peut être utilisé par l'audioprothésiste dans le cadre de la réhabilitation prothétique des ME. Il permet de mettre en évidence une déficience quant à la perception de la brillance et de quantifier son amélioration par le port d'une aide auditive. La Figure 19 propose une représentation des résultats individuels Oreilles Nues (ON) et Oreilles Appareillées (OA), à comparer à la norme NE pour chaque bande de fréquences. Elle peut également permettre de comparer différents réglages. Il s'agit à titre d'exemple des seuils du sujet P n°13, à retrouver en Annexe VII. Ils ont été déterminés grâce au tableau de l'Annexe III à partir des pistes de test correspondantes. Le praticien est libre de tester les conditions fréquentielles qui lui semblent les plus pertinentes. Les résultats sont mis en regard de l'audiométrie. Un gain prothétique tonal peut également y être représenté.

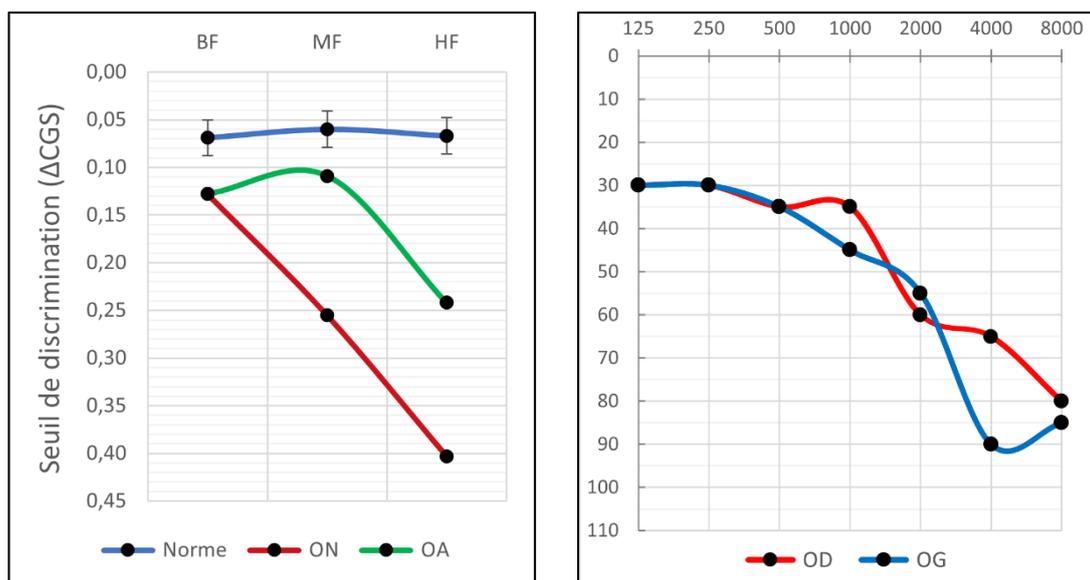


Figure 19 : Exemple de représentation des résultats individuels oreilles nues et appareillées du test de discrimination de timbre en regard de l'audiométrie tonale (sujet P n°13)

➤ Biais et limites

Participants

Certains participants manquent de concentration, en particulier la population P pour laquelle le test est souvent répété plusieurs fois. Leur motivation n'est pas toujours au rendez-vous, bien que les explications et les enjeux soient rendus les plus attrayants possibles. Cela a probablement un impact sur la capacité de discrimination, tout comme la fatigabilité croissante au fur et à mesure de l'expérimentation. Les réponses sont typiquement plus fluctuantes et moins précises. Sans oublier l'état cognitif qui influence probablement tous ces paramètres (Taconnat et Lemaire, 2014). En pratique, il est donc recommandé de raccourcir le test en ne réalisant que les mesures pertinentes. Rappelons que l'enjeu n'est pas une simple comparaison instantanée. La méthode sélectionnée nécessite la détection d'une différence faisant intervenir la comparaison de trois stimuli et donc leur intégration à court-terme. L'expérimentation fait appel à la mémoire de travail. Les deux populations de cette étude doivent être comparées avec prudence puisque leurs moyennes d'âge sont différentes.

Matériel

Le questionnaire d'expérience musicale de Kirchberger & Russo (2015) n'est pas suffisamment fiable (Tableau 7). Il donne des résultats plutôt cohérents pour les musiciens instrumentistes au détriment des mélomanes qui, sans formation musicale, ne peuvent pas dépasser la note de 1. De plus, rien n'indique que le nombre d'années de formation soit fortement corrélé à l'Expérience Musicale (EM), tout comme le nombre d'heures d'écoute musicale journalière. Ce questionnaire doit être interprété comme un indicateur partiellement représentatif de la réalité.

Les stimuli du test de timbre comportent eux aussi des biais. Premièrement, ils engendrent des effets stationnaires lorsqu'ils sont émis en champ libre, créant des ventres et des nœuds dans l'amplitude du signal malgré leur caractère complexe. Cela s'explique par leur

apparente similitude avec le son pur correspondant (Figure 5). La calibration systématique au sonomètre permet d'éliminer partiellement ce biais. Malgré tout, il serait judicieux de mesurer directement l'intensité émise au tympan dans les deux oreilles à l'aide de la mesure *in vivo*. Cependant, l'alternative de simplification maximale de la procédure est retenue afin d'éliminer au maximum les biais relatifs aux participants. Dans le cadre de la mesure ON, la procédure pourrait être envisagée au casque. Malheureusement, cela rendrait toute comparaison impossible avec les mesures appareillées de champ libre. Des stimuli à la pente d'atténuation moins importante pourraient être créés afin de les éloigner davantage du son pur. De plus, cela permettrait d'agrandir la plage des SD mesurables et repousserait par la même occasion l'effet plafond constaté avec certains sujets. Toutefois, la procédure nécessiterait une étape d'égalisation de sonie entre la référence et les stimuli de test (Emiroglu, 2007). Cette piste est à développer dans une prochaine étude. Deuxièmement, les stimuli génèrent un léger claquement du HP à l'émission et à l'arrêt du son. Un fondu linéaire très court, inférieur à 5 ms, permettrait d'atténuer sensiblement ce phénomène sans dénaturer les timbres. Troisièmement, les stimuli ne tiennent ni compte de la pondération HL, ni des courbes isosoniques de Fletcher & Munson (1933). La création sonore se veut volontairement écologique au détriment du filtre de perception de l'oreille humaine. Quatrièmement, la méthode de création sonore entraîne une non-linéarité entre les stimuli de test et le barycentre spectral. Bien que pris en compte dans la représentation des résultats, cela induit une mesure plus précise de l'intervalle de brillance lorsque le numéro de la piste augmente (Figure 7). Or, rien ne justifie cette caractéristique. Elle pourrait être évitée en utilisant une intensité linéaire (l'amplitude) et non pas logarithmique (le décibel) dans la détermination de la valeur d'incrément de l'atténuation harmonique. En effet, Peeters & al. (2011) soulignent que le barycentre spectral est linéaire à l'amplitude de la pente spectrale.

La position du son à discriminer au sein d'une piste ajoute au test une latitude supplémentaire. En effet, la configuration RSR semble plus favorisée, tandis que la configuration SRR semble plus difficile à appréhender. Lorsque S est en position 2, deux points de comparaison sont possibles avec R, tandis que pour les deux autres configurations, seule une comparaison est directement possible. Lorsque S est en position 1, la tâche semble plus complexe car les sujets ont parfois tendance à prendre le premier son en référence. La procédure à configuration aléatoire et à difficulté adaptative permet de contrecarrer une partie de ce biais, tout comme l'entraînement qui précède le test.

La mise en œuvre des méthodologies de prééglage engendre une multitude de biais. Concernant la méthodologie NAL-NL2, les différents logiciels fabricants ne préconisent pas exactement les mêmes gains d'insertion à paramètres égaux. Moore & al. (2016) proposent de modifier certains gains NAL-NL2 pour l'écoute de la musique afin d'améliorer son intensité et sa qualité sonore. Elle applique plus de gain en-dessous de 500 Hz et moins de gain au-dessus de 4000 Hz, de l'ordre de quelques dB. Cette préconisation n'est pas utilisée puisqu'elle ne met pas les deux méthodologies sur le même pied d'égalité. Concernant la méthodologie CAM2, elle est initialement limitée par le logiciel à une compression de 3. Les gains CAM2 sont parfois contraints par les logiciels fabricant, en particulier sur les fréquences aiguës qui ne supportent pas toujours l'amplification prévue. Heureusement, cette sous-corrrection intervient généralement sur des fréquences allant au-delà de la condition HF.

Méthode

L'effet « test-retest » n'a pas été mesuré quelles que soient la population et la condition de passation considérées. Toutefois, les précédentes études de discrimination de brillance n'ont pas révélé d'amélioration significative relative à cet effet (Emiroglu, 2007 ; Kirchberger & Russo, 2015).

Les deux étapes de passation appareillées sont randomisées contrairement au test ON qui est systématiquement réalisé en premier. Cela s'explique par la volonté de faire entendre en première intention les stimuli de façon écologique, sans déformation par l'aide auditive. Cette procédure n'est pas justifiée davantage. De la même façon, les conditions fréquentielles sont testées dans un ordre particulier afin de commencer par celles qui sont vraisemblablement plus simples à appréhender.

Enfin, l'un des biais des plus notables est certainement la non-vérification en mesure in vivo des gains préconisés au tympan. Les caractéristiques acoustiques du couplage (embout et évent) sont estimées par le logiciel fabricant sur des bases statistiques non individualisées. Malgré tout, ce biais n'intervient pas dans la comparaison des résultats appareillés intra-sujet.

➤ Ouvertures

Différentes possibilités d'ouvertures sont suggérées afin de poursuivre les recherches sur les thématiques abordées dans cette étude, outre les correctifs et évolutions déjà mentionnés.

La capacité de discrimination de brillance du NE est semblable quelle que soit la condition fréquentielle mise en œuvre (BF, MF et HF), bien qu'elle exige parfois un certain niveau d'expérience musicale. Il serait intéressant de mesurer l'évolution de ce seuil à faible et forte intensité (50 et 80 dB SPL) afin de compléter l'étude de la dynamique du NE relative à la perception de la brillance. Par ailleurs, la présentation des stimuli au niveau de confort dans le cadre de la comparaison NE – ME permettrait d'isoler l'effet des distorsions de l'oreille interne sur la performance de discrimination. Il s'agirait de mettre en évidence le recrutement d'intensité, l'abaissement de la sélectivité fréquentielle et de la résolution temporelle du ME (Oxenham & Bacon, 2003). Emiroglu (2007) avance que le recrutement serait favorisant tandis que la dégradation des filtres auditifs devrait nuire (Leek & Summers, 1993). De la même manière, une présentation au niveau de confort appareillé et non appareillé mettrait au premier plan l'effet de l'amplification non linéaire de l'appareillage auditif.

La mise en place d'un entraînement auditif sur plusieurs séances permettrait d'observer l'évolution de la performance de discrimination dans le temps, aussi bien chez les NE que chez les ME. Cette étude serait d'autant plus intéressante chez les ME où la variabilité des résultats est la plus importante.

Avec le fondamental laryngé et l'indice de spatialité, le timbre fait partie des paramètres permettant de discriminer des voix en dehors de toute contextualisation linguistique. Cette capacité pourrait favoriser la compréhension dans le bruit lorsque plusieurs personnes parlent en même temps. De la même façon, la discrimination des timbres d'instruments de musique en milieu bruyant serait également un aspect intéressant à étudier. Cette notion prend tout son sens lorsqu'il s'agit de distinguer un instrument au sein d'un orchestre ou d'une formation musicale de toute sorte (quatuor à cordes, chant en duo...). Des tests dans le bruit devraient être créés pour analyser l'impact de la discrimination du timbre dans ces situations vocales et musicales de la vie courante.

CONCLUSION

Désormais, l'audioprothésiste dispose d'un test normé pour évaluer les capacités de perception du timbre de ses patients malentendants, avec et sans appareils auditifs.

Les normo-entendants obtiennent des seuils de discrimination de brillance centrés et constants quelle que soit l'expérience musicale et la bande fréquentielle considérée. Les malentendants presbyacousiques possèdent une altération de la discrimination de la brillance modérément corrélée à la perte d'audition. La variabilité des données à perte auditive égale est vraisemblablement liée au niveau d'expérience musicale parmi d'autres facteurs. En effet, les musiciens déficients auditifs obtiennent de meilleurs résultats que les non-musiciens. L'appareillage permet une nette amélioration de la performance de discrimination aussi bien à l'aide de la méthodologie NAL-NL2 que CAM2. Cette amélioration est d'autant plus importante que la performance oreilles nues est dégradée. Malgré tout, la méthode de pré réglage CAM2 donne parfois de meilleurs résultats, notamment à hautes fréquences où la perte auditive des sujets testés est la plus importante.

Ce test de timbre axé sur la perception de la brillance prend tout son sens dans la réalisation du bilan et de l'adaptation prothétique du malentendant musicien, mélomane ou simple amateur de musique désireux d'améliorer sa qualité d'écoute.

BIBLIOGRAPHIE

- Agus, T. R., Thorpe, S. J., & Pressnitzer, D. (2010). Rapid Formation of Robust Auditory Memories : Insights from Noise. *Neuron*, 66(4), 610-618.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.04.014>
- American National Standards Institute. (1960). *USA Standard Acoustical Terminology*.
- Arbogast, T. L., Moore, B. C. J., Puria, S., Dundas, D., Brimacombe, J., Edwards, B., & Carr Levy, S. (2019). Achieved Gain and Subjective Outcomes for a Wide-Bandwidth Contact Hearing Aid Fitted Using CAM2. *Ear & Hearing*, 40(3), 741-756.
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000661>
- Barthet, M., Depalle, P., Kronland-Martinet, R., & Ystad, S. (2010b). Acoustical Correlates of Timbre and Expressiveness in Clarinet Performance. *Music Perception*, 28(2), 135-154.
<https://doi.org/10.1525/mp.2010.28.2.135>
- Barthet, M., Guillemain, P., Kronland-Martinet, R., & Ystad, S. (2010a). From Clarinet Control to Timbre Perception. *Acta Acustica United with Acustica*, 96(4), 678-689.
<https://doi.org/10.3813/AAA.918322>
- Bowl, M. R., & Dawson, S. J. (2019). Age-Related Hearing Loss. *Cold Spring Harbor Perspect Med.*, 26. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a033217>
- Caclin, A., McAdams, S., Smith, B. K., & Winsberg, S. (2005). Acoustic correlates of timbre space dimensions : A confirmatory study using synthetic tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(1), 471-482. <https://doi.org/10.1121/1.1929229>
- Cadoz, C. (1987). *Timbre et causalité* (p. 32). ACROE-LIFIA / INPG. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01022947>
- CNA, SYNAM, SYNEA, & UNSAF. (2017). *Déficits auditifs en France*.
http://www.unsaf.org/doc/Deficits_auditifs_en_France_-_Livre_blan_c_-_Mars_2017.pdf
- Donnadieu, S. (2007). Mental Representation of the Timbre of Complex Sounds. In J. W. Beauchamp (Éd.), *Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds* (p. 272-319). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32576-7_8
- Emiroglu, S. S. (2007). *Timbre perception and object separation with normal and impaired hearing*. 158.
- Fitz, K., & McKinney, M. (2010). *Music through hearing aids : Perception and modeling*. 050003-050003. <https://doi.org/10.1121/1.3436580>
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. *The Bell System Technical Journal*, 12(4), 377-430. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1933.tb00403.x>
- Frachet, B. (2015, avril 10). *Résultats EuroTrak France 2015* [Conférence de presse]. 37ème Congrès des audioprothésistes, CNIT - Paris La Défense.
http://www.unsaf.org/doc/Resultats_France_de_l_enquete_EuroTrak_2015_10-avril-2015.pdf
- Gates, G. A., & Mills, J. H. (2005). Presbycusis. *Lancet*, 366, 1111-1120.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)67423-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)67423-5)

- Haeusler, L., De Laval, T., & Millot, C. (2014). Étude quantitative sur le handicap auditif à partir de l'enquête « Handicap-santé ». *Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques*, 131, 156.
- Hornsby, B. W. Y. (2004). *The Speech Intelligibility Index : What is it and what's it good for?* 57(10), 10-17.
- Journal Officiel. (2018). Arrêté du 14 novembre 2018 portant modification des modalités de prise en charge des aides auditives et prestations associées au chapitre 3 du titre II de la liste des produits et prestations prévue à l'article L. 165-1 du code de la sécurité sociale. *Journal Officiel de la République Française*, 7, 9.
- Keidser, G., Dillon, H. R., Flax, M., Ching, T., & Brewer, S. (2011). The NAL-NL2 prescription procedure. *Audiology Research*, 1(24), 88-90. <https://doi.org/10.4081/audiore.2011.e24>
- Kelley, N. H. (1939). A study in presbycusis : Auditory loss with increasing age and its effect on the perception of music and speech. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 29(3), 506-513. <https://doi.org/10.1001/archotol.1939.00650050540010>
- Kirchberger, M. J., & Russo, F. A. (2015). Development of the Adaptive Music Perception Test: *Ear and Hearing*, 36(2), 217-228. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000112>
- Krimphoff, J., McADAMS, S., & Winsberg, S. (1994). Caractérisation du timbre des sons complexes.II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique. *Le Journal de Physique IV*, 04(C5), C5-625-C5-628. <https://doi.org/10.1051/jp4:19945134>
- Leek, M. R., & Summers, V. (1993). *Auditory filter shapes of normal-hearing and hearing-impaired listeners in continuous broadband noise*. 94(6), 3127-3137. <https://doi.org/10.1121/1.407218>
- Letowski, T., & Miskiewicz, A. (1995). Development of technical listening skills for sound quality assesment. *Inter-Noise*, 917-920.
- Leusie, S. (2015). *Privation sensorielle auditive et réhabilitation chez le sujet âgé : Conséquences sur le fonctionnement cognitif* [Thèse de doctorat en Neurosciences et Cognition, Université Claude Bernard - Lyon I]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01148565>
- Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477. <https://doi.org/10.1121/1.1912375>
- Moore, B. C. J., Baer, T., Ives, D. T., Marriage, J., & Salorio-Corbetto, M. (2016). Effects of Modified Hearing Aid Fittings on Loudness and Tone Quality for Different Acoustic Scenes. *Ear & Hearing*, 37(4), 483-491. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000285>
- Moore, B. C. J., & Glasberg, B. R. (1998). Use of a Loudness Model for Hearing-Aid Fitting. I. Linear Hearing Aids. *British Journal of Audiology*, 32(5), 317-335. <https://doi.org/10.3109/03005364000000083>
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R., & Stone, M. A. (2010). Development of a new method for deriving initial fittings for hearing aids with multi-channel compression : CAMEQ2-HF. *International Journal of Audiology*, 49(3), 216-227. <https://doi.org/10.3109/14992020903296746>

- Moore, B. C. J., & Sek, A. (2012). Comparison of the CAM2 and NAL-NL2 Hearing Aid Fitting Methods. *Ear and Hearing*, 34(1), 83-95. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3182650adf>
- Moore, B. C. J., & Tan, C.-T. (2003). Perceived naturalness of spectrally distorted speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(1), 408-419. <https://doi.org/10.1121/1.1577552>
- Organisation Mondiale de la Santé. (2020, mars 1). *Deafness and hearing loss*. World Health Organization. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
- Oxenham, A. J., & Bacon, S. P. (2003). Cochlear Compression : Perceptual Measures and Implications for Normal and Impaired Hearing: *Ear and Hearing*, 24(5), 352-366. <https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000090470.73934.78>
- Patil, K., Pressnitzer, D., Shamma, S., & Elhilali, M. (2012). Music in Our Ears : The Biological Bases of Musical Timbre Perception. *PLOS Computational Biology*, 8(11), e1002759. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002759>
- Peeters, G., Giordano, B. L., Susini, P., Misdariis, N., & McAdams, S. (2011). The Timbre Toolbox : Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 2902-2916. <https://doi.org/10.1121/1.3642604>
- revopéra. (2019, août 24). *Des occasionnels aux aficionados : 9 millions de personnes aiment la musique classique en France*. revopéra. <https://revopera.com/enquete-revopera-public-musique-classique-opera/>
- Ricketts, T. A., Dittberner, A. B., & Johnson, E. E. (2008). High-Frequency Amplification and Sound Quality in Listeners With Normal Through Moderate Hearing Loss. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1), 160-172. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008\)012](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008)012)
- Robert-Bobée, I. (2006). Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050. *Insee Première*, 1089, 4.
- Scharine, A. A., Cave, K. D., & Letowski, T. R. (2009). *Auditory perception and cognitive performance : (614362011-012)* [Data set]. American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/e614362011-012>
- Siedenburg, K., Fujinaga, I., & McAdams, S. (2015). A Comparison of Approaches to Timbre Descriptors in Music Information Retrieval and Music Psychology. *Journal of New Music Research*, 15. <https://doi.org/10.1080/09298215.2015.1132737>
- Siedenburg, K., & McAdams, S. (2016). The role of long-term familiarity and attentional maintenance in short-term memory for timbre. *Memory*, 25(4), 550-564. <https://doi.org/10.1080/09658211.2016.1197945>
- Smalley, D. (1994). Defining timbre—Refining timbre. *Contemporary Music Review*, 10(2), 35-48. <https://doi.org/10.1080/07494469400640281>
- Taconnat, L., & Lemaire, P. (2014). Fonctions exécutives, vieillissement cognitif et variations stratégiques. *Psychologie Française*, 59(1), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2013.03.007>
- Treutwein, B. (1995). Adaptive Psychophysical Procedures. *Vision Res.*, 35(17), 2503-2522. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00016-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00016-X)

RESUME

Mots clés : *Timbre, Seuil de discrimination, Presbyacousie, Appareillage auditif, Musicien*

L'étude s'inscrit dans un contexte de réhabilitation auditive afin d'aider au bilan et à l'adaptation prothétique du sujet musicien, mélomane ou amateur de musique, soucieux d'améliorer sa qualité d'écoute. Un test de perception du timbre axé sur la performance de discrimination de la brillance a été créé. Des seuils de discrimination sont mesurés à basses, moyennes et hautes fréquences avec une intensité test de 65 dB SPL. Il s'agit d'un test adaptatif à choix forcé comprenant 2 intervalles et 3 alternatives. Le sujet doit indiquer la position du son discriminé comparativement à deux autres stimuli identiques. La différence s'amointrit en cas de bonne réponse, et inversement en cas de mauvaise réponse. Un seuil de discrimination est déterminé sur la base des dernières réponses moyennées. Une norme de sujets normo-entendants a été établie. Des malentendants presbyacousiques ont montré une altération croissante de la discrimination de la brillance en fonction de la perte auditive. Il a été observé une variabilité des résultats à perte auditive égale qui semble s'expliquer en partie par le niveau d'expérience musicale des sujets. Lorsqu'ils sont mis en difficulté du fait de l'altération de leur audition, les musiciens sont plus performants que les non-musiciens. L'appareillage auditif, qu'il soit réalisé en méthodologie NAL-NL2 ou CAM2, améliore d'autant plus la discrimination de la brillance que la performance oreilles nues est dégradée. Chez certains sujets, CAM2 donne de meilleurs résultats à hautes fréquences où l'audition est la moins bonne.

ANNEXES

Annexe I : Lignes de code nécessaires à la génération des stimuli injectées dans Matlab

```

1 - fe=44100 % fréquence d'échantillonnage (Hz)
2 - te=1/fe % période d'échantillonnage (s)
3 - t=0:te:1 % durée
4 - P=2.*10.^-5 % pression acoustique de référence (Pa)
5 - N=65 % niveau de pression acoustique (dB SPL)
6 - f=440 % fréquence fondamentale (220,440 ou 880 Hz)
7 - k=0 % incrémentation de l'atténuation harmonique (0 à 8 dB par pas de 0.25)
8 - a=P.*10.^(N./20).*sin(2.*pi.*f.*t) % son pur fondamental
9 - b=P.*10.^((N-(8+k))./20).*sin(4.*pi.*f.*t) % son pur harmonique 1
10 - c=P.*10.^((N-2.*(8+k))./20).*sin(6.*pi.*f.*t) % son pur harmonique 2
11 - d=P.*10.^((N-3.*(8+k))./20).*sin(8.*pi.*f.*t) % son pur harmonique 3
12 - e=P.*10.^((N-4.*(8+k))./20).*sin(10.*pi.*f.*t) % son pur harmonique 4
13 - y=a+b+c+d+e % son complexe test
14 - save sontest y t
15 - load sontest.mat
16 - filename = 'sontest.wav' % nom du fichier wave
17 - audiowrite(filename,y,fe) % création du fichier wave

```

Annexe II : Niveaux sonores du fondamental et des harmoniques des stimuli

F0	65										
Stimulus	Ref	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H1	57	56,75	56,5	56,25	56	55,75	55,5	55,25	55	54,75	54,5
H2	49	48,5	48	47,5	47	46,5	46	45,5	45	44,5	44
H3	41	40,25	39,5	38,75	38	37,25	36,5	35,75	35	34,25	33,5
H4	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23
Stimulus	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
H1	54,25	54	53,75	53,5	53,25	53	52,75	52,5	52,25	52	51,75
H2	43,5	43	42,5	42	41,5	41	40,5	40	39,5	39	38,5
H3	32,75	32	31,25	30,5	29,75	29	28,25	27,5	26,75	26	25,25
H4	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
Stimulus	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
H1	51,5	51,25	51	50,75	50,5	50,25	50	49,75	49,5	49,25	49
H2	38	37,5	37	36,5	36	35,5	35	34,5	34	33,5	33
H3	24,5	23,75	23	22,25	21,5	20,75	20	19,25	18,5	17,75	17
H4	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Annexe III : Intervalles de brillance des pistes de test

CGS _R	1,611							
Piste	1	2	3	4	5	6	7	8
CGS _S	1,587	1,564	1,543	1,522	1,502	1,483	1,464	1,447
Δ CGS	0,024	0,047	0,068	0,089	0,109	0,128	0,147	0,164
Piste	9	10	11	12	13	14	15	16
CGS _S	1,430	1,414	1,398	1,384	1,369	1,356	1,343	1,330
Δ CGS	0,181	0,197	0,213	0,227	0,242	0,255	0,268	0,280
Piste	17	18	19	20	21	22	23	24
CGS _S	1,319	1,307	1,296	1,286	1,276	1,266	1,257	1,248
Δ CGS	0,292	0,304	0,315	0,325	0,335	0,345	0,354	0,363
Piste	25	26	27	28	29	30	31	32
CGS _S	1,239	1,231	1,223	1,215	1,208	1,201	1,194	1,188
Δ CGS	0,372	0,380	0,388	0,396	0,403	0,410	0,417	0,423

Annexe IV : Consignes du test de discrimination de timbre

Le test de timbre est présenté au sujet de la façon suivante :

« Vous allez entendre des sons répartis sur plusieurs écoutes. A chaque écoute, trois sons vous sont proposés. Parmi ces trois sons, l'un d'entre eux est différent des deux autres. Il faut me dire s'il s'agit du son placé en première position, en deuxième position ou en troisième position. Vous pouvez également me dire que les sons vous paraissent identiques. Nous allons commencer par un entraînement à la difficulté aléatoire qui ne sera pas comptabilisé. Ensuite, le niveau de difficulté du test s'adaptera en fonction de vos réponses qui, cette fois-ci, seront comptabilisées. »

Annexe V : Logiciel de préréglage CAM2B_v2

Monday, March 01, 2021

File Results to Display Help About

Client Data | Audiogram Values | Graph: Audiogram | Aid Specification

Ref: Date of consultation:

Name: Date of birth:

Previous experience with hearing aid(s)

Address:

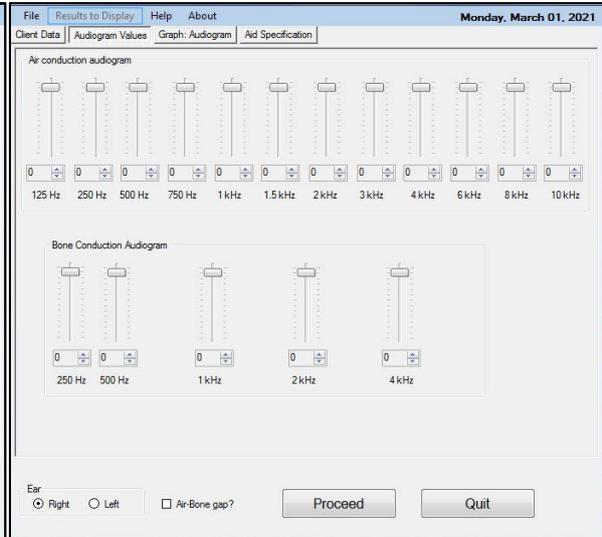
Telephone:

Day: Evening:

Notes:

Ear: Right Left Air-Bone gap?

Proceed Quit



Monday, March 01, 2021

File Results to Display Help About

Client Data | Audiogram Values | Graph: Audiogram | Aid Specification

Channel	Low edge	High edge	CT
1	50	281	55
2	281	355	55
3	355	447	50
4	447	561	45
5	561	708	45
6	708	894	45
7	894	1118	45
8	1118	1414	45
9	1414	1789	45
10	1789	2236	45
11	2236	2808	45
12	2806	3550	40
13	3550	4470	40
14	4470	5610	42
15	5610	7080	43
16	7080	8940	45

Load from existing configurations: 16channel

Custom Values: Create ... Clear

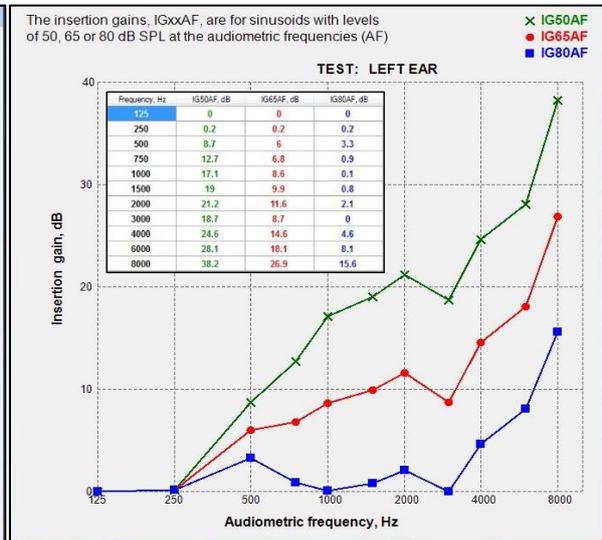
Ref. Mic. Position: Above pinna Below pinna Close to tragus

Aid Type: ITE BTE ITC CIC Own ...

Maximum value of compression ratio: 3

Ear: Right Left Air-Bone gap?

Proceed Quit



Annexe VI : Données brutes de NE – Audiométrie, EM et test de timbre

Patient			Audiométrie tonale								Expérience musicale					Test de timbre				
N°	Age	Sexe	O	125	250	500	1000	2000	4000	8000	PTM	Q1	Q2	Q3	Q4	Total	BF	MF	HF	
1	25	H	D	5	5	5	5	5	0	0	4	3	-2	0	0	0	-2	4	2	3
			G	5	5	5	0	0	5	10	3									
2	21	H	D	10	5	10	5	5	5	0	6	5	2	1	0,5	-0,5	3	2	2	2
			G	5	5	5	5	0	5	0	4									
3	36	H	D	10	10	0	5	5	0	5	3	3	-2	0	0	0	-2	3	3	5
			G	10	5	0	5	5	0	10	3									
4	41	F	D	20	25	15	10	15	5	10	11	8	-4	0	-0,5	-0,5	-5	4	3	3
			G	10	10	5	5	5	5	15	5									
5	62	H	D	15	15	10	15	20	40	55	21	20	2	1	0,5	0	3,5	2	2	3
			G	5	10	10	10	20	35	45	19									
6	36	F	D	5	10	15	10	10	15	30	13	9	-4	0	-0,5	-0,5	-5	3	2	3
			G	5	5	5	5	5	10	0	6									
7	38	H	D	10	10	15	15	15	20	10	16	16	-4	0	0	0	-4	3	3	3
			G	10	10	20	15	15	15	10	16									
8	46	H	D	15	10	10	5	10	10	5	9	11	0	0	0,5	0,5	1	2	2	2
			G	10	10	15	10	10	15	0	13									
9	26	F	D	5	5	10	10	10	10	0	10	11	-4	0	0,5	-0,5	-4	2	2	2
			G	5	5	10	10	10	15	0	11									
10	40	F	D	10	10	10	10	15	10	0	11	13	-4	0	0,5	0	-3,5	3	3	2
			G	10	10	10	10	20	20	10	15									
11	52	F	D	10	10	10	5	5	0	5	5	6	-4	0	0	-0,5	-4,5	3	2	3
			G	5	5	5	5	5	10	0	6									
12	55	H	D	15	15	5	0	10	25	30	10	8	-2	0	0	-0,5	-2,5	4	4	3
			G	10	10	5	5	5	5	40	5									
13	20	F	D	5	5	10	5	5	5	5	6	5	2	0	0,5	-0,5	2	3	3	3
			G	5	5	5	5	5	0	5	4									
14	21	F	D	5	5	0	5	0	-5	-5	0	-1	-2	0	0	0	-2	4	2	3
			G	0	5	5	0	-5	-5	0	-1									
15	21	F	D	15	15	15	10	10	10	5	11	9	-4	0	0	0	-4	3	3	5
			G	15	10	10	5	5	5	0	6									
16	33	F	D	15	15	15	10	10	0	15	9	9	0	0	0	0	0	4	2	2
			G	20	15	10	5	10	10	10	9									
17	24	F	D	20	15	15	5	5	-5	10	5	7	-4	0	0	0	-4	4	2	5
			G	15	10	10	5	10	10	15	9									
18	63	F	D	15	15	5	10	10	10	20	9	9	-4	0	-0,5	0,5	-4	4	3	4
			G	10	10	10	15	10	5	45	10									
19	31	F	D	10	15	15	5	5	0	5	6	7	-4	0	-0,5	0	-4,5	4	3	2
			G	15	15	15	5	0	10	10	8									
20	35	F	D	10	10	10	15	10	0	15	9	9	2	1	0,5	0	3,5	3	3	2
			G	5	5	5	10	15	10	10	10									
21	34	H	D	10	10	10	10	0	5	20	6	8	0	0	-0,5	0	-0,5	3	2	2
			G	5	5	10	10	5	10	10	9									
22	28	F	D	10	5	5	5	5	10	-5	6	8	-4	0	0	-0,5	-4,5	2	4	4
			G	10	10	10	10	10	5	0	9									
23	27	H	D	15	15	15	15	15	-5	-5	10	9	2	1	0,5	0,5	4	2	3	3
			G	10	10	10	15	10	0	0	9									
24	25	F	D	10	5	5	0	0	5	20	3	3	-4	0	-0,5	-0,5	-5	4	3	5
			G	10	5	5	5	0	5	10	4									
25	30	H	D	15	15	10	10	0	0	0	5	7	-2	1	0	0,5	-0,5	2	2	2
			G	15	15	10	5	10	10	0	9									
26	25	H	D	5	10	10	5	5	5	0	6	6	0	0	-0,5	0	-0,5	2	3	3
			G	5	10	15	10	0	-5	0	5									
27	51	F	D	10	10	10	5	30	15	0	15	16	-4	0	0,5	-0,5	-4	3	3	3
			G	15	15	10	10	30	15	0	16									
28	28	F	D	15	15	15	5	5	0	0	6	8	-4	0	-0,5	-0,5	-5	3	2	1
			G	15	15	20	5	5	10	5	10									
29	37	F	D	15	20	20	15	10	10	15	14	13	0	0	0,5	0,5	1	3	3	2
			G	20	20	20	10	10	10	15	13									
30	48	H	D	15	15	10	10	5	-5	5	5	3	-4	0	0	-0,5	-4,5	5	3	5
			G	15	10	10	0	-5	0	15	1									
31	39	F	D	0	5	5	5	10	5	5	6	5	2	0	0	0,5	2,5	2	2	2
			G	10	10	5	5	5	0	0	4									

Annexe VII : Données brutes de P – Audiométrie, EM, appareillage et test de timbre

Patient			Audiométrie tonale																	Expérience musicale						
N°	Age	Sexe	O	125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000	BF	MF	HF	PTM	Pte.	Asv.	Q1	Q2	Q3	Q4	Total	
1	93	H	D	30	35	45	50	50	65	60	60	80	80	75	43	43	52	63	59	11	1	-4	0	0,5	0	-3,5
			G	30	35	45	50	50	70	70	70	75	75	75	43	43	55	65	60	59						
2	64	F	D	20	15	20	30	25	35	45	45	55	65	55	20	21	30	42	36	9	4	4	1	0,5	0,5	6
			G	15	20	25	25	20	35	35	40	50	60	55	22	22	27	35	33	34						
3	77	F	D	20	20	25	20	15	55	50	60	60	90	80	20	20	30	42	38	13	8	-2	0	0,5	0	-1,5
			G	25	25	25	20	20	35	50	75	85	95	90	23	22	32	31	47	41						
4	60	H	D	20	20	20	15	10	15	15	40	65	60	55	17	18	15	18	28	11	4	4	1	0,5	0,5	6
			G	15	20	20	20	15	20	30	60	60	50	65	18	17	22	35	31	29						
5	65	F	D	30	40	45	50	55	55	50	45	45	70	60	47	51	50	54	53	1	8	0	0	0,5	-0,5	0
			G	35	45	60	60	60	60	55	50	50	60	70	55	51	58	55	56	53						
6	59	F	D	15	20	25	30	35	40	45	40	40	35	55	27	27	35	40	36	5	3	4	1	0,5	0,5	6
			G	15	20	25	30	35	40	35	35	40	45	55	27	27	32	37	34	35						
7	73	F	D	25	35	50	50	55	60	50	50	40	55	45	47	45	52	48	49	3	3	4	1	0,5	0,5	6
			G	20	25	50	55	55	55	50	45	45	60	43	45	53	53	52	50	50						
8	82	H	D	25	30	40	45	50	55	55	70	70	95	80	25	33	48	58	54	12	6	-4	0	0,5	0	-3,5
			G	10	10	25	30	40	50	60	60	65	70	70	40	40	42	45	55	48						
9	88	H	D	25	25	20	25	25	60	65	85	95	105	110	23	23	37	62	51	18	3	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	25	25	20	25	25	55	75	90	95	105	110	23	23	40	65	63	53						
10	69	H	D	25	25	40	40	40	45	50	60	60	70	60	35	37	43	50	48	9	5	-4	0	0,5	0	-3,5
			G	25	30	40	45	45	50	55	70	70	85	65	38	38	47	45	53	50						
11	74	H	D	25	30	40	45	50	70	85	90	95	100	110	40	38	58	77	68	19	1	-4	0	0,5	0	-3,5
			G	20	25	35	40	45	65	75	90	110	110	110	35	38	52	55	77	66						
12	86	F	D	35	50	50	50	60	65	70	70	75	105	85	53	49	60	68	64	7	8	-2	0	0	0	-2
			G	30	35	50	50	50	55	60	55	65	65	60	45	49	53	57	58	60						
13	84	F	D	30	30	35	40	35	50	60	55	60	80	80	33	35	43	53	49	12	8	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	30	30	35	35	45	55	55	60	90	85	85	37	35	45	44	58	56						
14	80	F	D	30	25	35	35	30	35	35	30	60	60	55	30	29	33	33	40	9	1	-2	0	0	-0,5	-2,5
			G	25	25	35	30	25	35	40	40	65	40	35	28	29	33	33	43	41						
15	86	H	D	10	15	20	30	40	45	55	75	70	90	90	25	26	38	42	46	17	9					
			G	30	5	30	25	45	50	60	70	85	85	80	27	26	45	45	63	59						
16	69	F	D	15	30	40	50	50	55	60	65	60	45	60	40	39	50	48	52	7	6	-4	0	-0,5	0	-4,5
			G	10	25	45	45	45	50	45	50	50	45	50	38	39	45	45	46	49						
17	89	H	D	30	30	35	45	45	50	55	55	65	65	65	37	37	45	55	50	9	1	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	30	30	35	40	45	50	55	60	70	85	80	37	37	45	45	56	51						
18	67	F	D	20	35	45	50	50	50	55	50	55	45	43	44	48	53	50	49	7	11	4	0	0,5	0	4,5
			G	25	30	50	55	55	65	65	70	70	70	65	45	44	57	53	63	60						
19	76	F	D	15	15	30	30	35	40	50	50	55	60	65	27	31	38	47	43	11	6	-2	0	0,5	0	-1,5
			G	25	25	40	40	40	40	45	55	70	65	65	35	31	42	40	52	46						
20	84	H	D	20	25	25	30	35	45	40	50	50	60	75	28	28	33	37	38	8	8	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	20	20	25	30	40	55	55	60	60	65	75	28	28	40	52	47	45						
21	85	F	D	45	45	50	50	45	55	65	75	75	95	80	47	44	53	62	59	8	4	0	0	0	-0,5	-0,5
			G	35	35	40	45	50	60	60	60	70	90	80	42	44	50	60	61	55						
22	78	H	D	10	15	20	25	40	50	50	70	75	85	80	25	26	37	55	46	15	3	-2	0	-0,5	0	-2,5
			G	10	15	25	25	40	55	55	65	75	80	85	27	26	40	37	56	48						
23	78	F	D	25	30	45	45	45	60	70	65	70	95	70	40	37	53	62	58	10	4	0	0	0,5	0	0,5
			G	20	25	30	35	45	70	75	70	65	80	65	33	37	50	62	62	54						
24	69	F	D	20	20	30	35	35	35	40	30	30	55	60	28	29	35	35	34	4	4	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	20	25	30	35	35	35	40	40	45	80	70	30	29	35	40	38	36						
25	84	H	D	15	15	25	55	65	80	70	75	75	100	35	36	53	53	70	59	14	0	-4	0	-0,5	-0,5	-5
			G	20	25	30	40	55	75	70	85	80	100	110	37	36	52	68	69	59						
26	90	F	D	20	25	50	50	50	55	60	60	60	70	50	42	43	53	57	55	9	3	2	0	0,5	0	2,5
			G	30	35	45	50	50	55	65	70	70	75	80	43	43	53	62	59	56						
27	86	H	D	15	10	10	25	30	50	50	55	80	85	70	17	14	30	27	16	9	-4	0	0	-0,5	-4,5	
			G	10	5	10	15	20	35	40	50	65	65	65	12	14	23	42	34	38						
28	79	H	D	40	40	50	65	65	75	90	80	80	85	90	52	50	68	67	71	12	0	-4	0	0,5	-0,5	-4
			G	35	35	50	55	60	70	85	80	90	95	100	48	50	65	78	78	71						
29	66	F	D	20	25	30	40	45	55	55	55	70	75	70	33	29	43	40	50	11	9	-4	0	0,5	0	-3,5
			G	15	15	25	35	35	35	50	55	55	70	65	25	29	37	47	41	46						
30	74	F	D	15	20	30	45	50	55	55	60	70	11													

P	Appareillage						Test de timbre									Améliorations								
							Oreilles Nues			NAL-NL2			Cam2			ON - NAL			ON - Cam			NAL - Cam		
	N°	Fabricant	Type	Gamme	Age	1er	BF	MF	HF	BF	MF	HF	BF	MF	HF	BF	MF	HF	BF	MF	HF	BF	MF	HF
1	Phonak	RIC	Haut	0	>10	8	11	32	9	8	14				-1	3	18							
2	Widex	RIC	Haut	0	0	4	3	5	3	3	3	3	2	3	1	0	2	1	1	2	0	1	0	
3	Phonak	RIC	Haut	0	10	6	6	12	5	6	5				1	0	7							
4	Widex	RIC	Haut	0	0	1	1	4	1	1	3	1	1	2	0	0	1	0	0	2	0	0	1	
5	Oticon	RIC	Haut	1	6	32	27	3	16	3	3	8	3	3	16	24	0	24	24	0	8	0	0	
6	Phonak	RIC	Haut	0	0	5	2	2	5	2	2	5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	Starkey	CIC	Haut	1	1	23	3	3	8	7	6	4	6	6	15	-4	-3	19	-3	-3	4	1	0	
8	Oticon	RIC	Haut	0	>10	5	7	8	2	2	6	3	2	6	3	5	2	2	5	2	-1	0	0	
9	Oticon	RIC	Haut	2	>10	6	10	32	3	3	9				3	7	23							
10	Oticon	RIC	Haut	0	6	17	14	20	9	6	12	10	5	6	8	8	8	7	9	14	-1	1	6	
11	Oticon	RIC	Haut	0	>10	8	9	32	9	3	19	8	4	16	-1	6	13	0	5	16	1	-1	3	
12	Oticon	RIC	Début	0	9	6	5	12	5	5	7	5	4	7	1	0	5	1	1	5	0	1	0	
13	Oticon	RIC	Haut	3	>10	6	14	29	6	5	13				0	9	16							
14	Widex	RIC	Haut	0	7	4	4	6	3	3	4				1	1	2							
15	Beltone	RIC	Haut	5	6	32	9	32	18	8	11				14	1	21							
16	Starkey	CIC	Haut	1	1	30	5	7			12						-5							
17	Oticon	RIC	Haut	0	6	14	2	4	22	3	5				-8	-1	-1							
18	Oticon	RIC	Haut	0	7	2	3	6	4	4	6	4	3	6	-2	-1	0	-2	0	0	0	1	0	
19	Oticon	RIC	Haut	1	1	6	2	5	6	2	4	5	1	4	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
20	Oticon	RIC	Début	1	6	5	7	17	8	5	3				-3	2	14							
21	Oticon	RIC	Haut	0	6	7	7	32	7	5	15				0	2	17							
22	Oticon	RIC	Haut	2	8	4	5	17	2	3	7	1	2	5	2	2	10	3	3	12	1	1	2	
23	Oticon	RIC	Haut	1	10	6	7	32	6	11	18	5	7	11	0	-4	14	1	0	21	1	4	7	
24	Oticon	RIC	Haut	1	5	5	3	4	4	3	3				1	0	1							
25	Oticon	RIC	Début	0	>10	32	32	32	7	5	6	7	4	6	25	27	26	25	28	26	0	1	0	
26					5	2	4	15																
27	Oticon	RIC	Haut	0	4	5	3	8	3	4	6	3	3	4	2	-1	2	2	0	4	0	1	2	
28	Oticon	RIC	Haut	2	6	32	32	32	2	4	5	3	2	2	30	28	27	29	30	30	-1	2	3	
29	Oticon	RIC	Début	1	6	4	7	8	4	5	5				0	2	3							
30	Widex	RIC	Haut	0	9	4	5	20	3	4	6	2	4	6	1	1	14	2	1	14	1	0	0	
31	Oticon	BTE	Milieu	3	3	8	6	11	6	4	11	6	4	11	2	2	0	2	2	0	0	0	0	
32	Oticon	RIC	Haut	0	10	11	29	32	6	8	12				5	21	20							
33	Bernafon	RIC	Milieu	0	6	4	3	3	4	2	2	4	3	2	0	1	1	0	0	1	0	-1	0	
34	Starkey	BTE	Début	3	3	9	3	9	8	6	8				1	-3	1							
35					8	7	15	32																
36						3	2	3																

Annexe VIII : Données brutes de P – Préréglage NAL-NL2 et CAM2

N°	O	Gain	NAL-NL2										Cam2											
			125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000	125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
1	D	Faible	X	11	17	21	25	28	31	33	34	35	35											
		Moyen	X	5	9	13	18	21	24	26	28	29	29											
		Fort	X	-1	0	3	7	11	13	16	19	19	19											
	G	Faible	X	13	18	22	26	29	33	35	35	38	38											
		Moyen	X	6	10	14	18	23	26	29	30	31	31											
		Fort	X	-2	0	3	8	13	16	19	21	20	20											
2	D	Faible	0	1	4	7	10	15	20	22	29	23	15	0	0	4	10	11	15	19	15	22	27	27
		Moyen	0	0	0	0	2	5	8	9	12	6	0	0	0	3	5	5	8	11	7	12	17	16
		Fort	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	-4	0	0	2	0	0	0	2	0	2	7	5
	G	Faible	2	6	5	6	8	11	16	19	25	20	13	0	0	6	8	9	14	15	14	19	24	27
		Moyen	0	0	0	0	1	2	4	7	10	4	0	0	0	4	4	4	7	8	6	10	14	16
		Fort	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-2	-4	0	0	3	0	0	1	0	0	4	5	
3	D	Faible	X	-3	0	2	6	13	19	24	27	27	24											
		Moyen	X	-3	0	1	3	7	12	17	20	20	19											
		Fort	X	-3	0	-1	-1	0	3	7	10	11	12											
	G	Faible	X	-3	2	7	11	17	21	26	27	27	25											
		Moyen	X	-3	1	3	7	12	16	21	24	24	22											
		Fort	X	-3	-1	1	4	7	13	17	18	18												
4	D	Faible	2	4	1	3	6	8	11	17	26	25	18	0	0	4	4	4	4	6	15	27	24	27
		Moyen	0	1	0	0	1	1	2	9	17	11	2	0	0	3	1	2	2	4	7	17	14	16
		Fort	0	1	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	7	4	5
	G	Faible	3	6	4	6	8	14	20	26	33	29	20	0	0	4	4	6	9	13	20	25	19	34
		Moyen	0	1	0	0	2	5	9	13	18	13	3	0	0	3	2	3	4	7	10	15	9	23
		Fort	0	1	0	0	1	2	1	0	1	0	-4	0	0	2	0	0	0	1	0	5	0	12
5	D	Faible	-2	-1	4	7	11	14	17	17	19	20	20	0	0	6	11	15	17	19	13	15	12	26
		Moyen	-2	-2	1	3	6	9	11	10	12	13	14	0	0	4	6	7	9	11	5	7	4	16
		Fort	-2	-2	-1	-2	-1	1	2	2	3	5	6	0	0	3	0	0	1	2	0	0	0	5
	G	Faible	-2	-1	4	7	11	13	14	16	18	19	19	0	0	6	11	15	16	15	12	15	17	26
		Moyen	-2	-2	1	3	6	8	9	9	11	13	14	0	0	4	5	7	8	8	5	7	7	16
		Fort	-2	-2	-1	-2	-1	0	0	1	3	5	5	0	0	3	0	0	1	1	0	0	0	5
6	D	Faible	2	10	15	21	25	30	33	36	38	39	38	3	10	17	18	24	25	25	26	34	46	46
		Moyen	0	2	4	6	8	10	11	14	16	20	20	2	8	11	12	14	15	15	16	24	36	37
		Fort	0	1	2	3	4	2	1	3	5	10	10	2	6	5	5	4	6	5	6	14	26	27
	G	Faible	0	2	7	13	18	25	30	32	33	34	33	0	2	10	11	21	22	26	23	27	31	37
		Moyen	0	1	2	4	5	9	9	8	9	12	12	0	1	6	7	11	13	16	13	17	21	27
		Fort	0	0	1	2	3	4	1	1	1	2	2	0	0	1	2	2	4	6	3	7	11	17
7	D	Faible	0	1	5	11	15	24	30	30	31	31	30											
		Moyen	0	1	2	3	4	10	13	15	17	18	18											
		Fort	0	0	1	2	3	4	4	6	9	11	12											
	G	Faible	0	2	6	13	17	25	31	31	34	31	32											
		Moyen	0	1	2	3	4	10	16	18	19	20	20											
		Fort	0	0	1	2	3	5	8	9	11	13	13											
8	D	Faible	7	12	12	17	20	25	28	30	32	33	32	3	3	14	14	17	19	21	21	25	30	30
		Moyen	1	4	2	2	4	6	6	6	8	10	10	2	3	9	8	9	10	12	11	15	20	19
		Fort	1	4	2	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	5	2	0	1	2	1	5	10	8
	G	Faible	8	13	14	19	24	29	32	34	37	37	36	3	3	14	16	19	21	24	25	30	39	35
		Moyen	1	4	3	4	7	10	10	12	15	16	17	2	3	9	9	10	11	14	15	20	29	23
		Fort	1	4	2	0	1	1	1	2	4	5	6	2	2	5	2	0	1	4	5	10	19	12
9	D	Faible	7	17	21	27	31	37	41	37	40	43	44	3	3	14	17	22	31	37	33	44	51	60
		Moyen	0	4	8	10	13	21	26	27	29	33	32	2	3	9	10	12	21	27	23	34	41	48
		Fort	0	2	4	5	6	14	15	16	18	26	26	2	2	5	2	2	11	18	13	24	31	37
	G	Faible	2	8	16	23	28	35	38	36	36	35	35	0	1	11	15	19	28	33	34	52	56	60
		Moyen	0	2	6	9	12	19	23	25	29	29	29	0	1	8	8	10	18	23	24	42	46	48
		Fort	0	1	4	5	6	11	12	14	21	25	25	0	1	4	2	0	8	13	14	32	36	37

12	D	Faible	16	22	23	27	31	34	38	39	42	42	42	8	8	19	19	26	28	30	25	33	51	51
		Moyen	3	8	7	9	11	13	15	15	20	25	25	7	7	13	12	16	18	21	15	23	41	39
		Fort	1	4	2	1	2	4	4	4	4	10	15	15	5	6	6	4	6	8	11	5	13	31
	G	Faible	11	17	20	22	25	27	29	29	31	32	32	5	5	19	19	22	23	26	19	27	27	30
		Moyen	2	5	5	5	6	7	7	6	7	10	10	5	5	13	11	12	14	16	9	17	17	19
		Fort	1	4	1	0	0	0	0	0	0	1	1	4	4	6	3	2	4	6	0	7	7	8
13	D	Faible	10	16	18	19	21	30	31	30	28	31	31											
		Moyen	2	5	5	4	4	9	10	14	17	16	15											
		Fort	1	2	3	1	1	6	7	10	13	12	12											
	G	Faible	8	13	14	16	19	28	31	30	28	31	31											
		Moyen	2	5	5	5	5	10	13	20	25	23	22											
		Fort	1	2	3	1	2	6	9	14	18	18	17											
14	D	Faible	4	10	12	12	15	17	19	22	30	25	16											
		Moyen	0	0	2	3	6	6	5	9	14	9	-1											
		Fort	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1											
	G	Faible	4	10	11	11	13	16	20	22	28	19	11											
		Moyen	0	0	2	2	5	6	7	10	13	8	0											
		Fort	0	0	1	1	2	0	0	0	-1	-1	-4											
15																								
16																								
17																								
18	D	Faible	8	13	14	17	19	22	23	22	24	23	23	0	0	16	19	22	21	21	18	19	21	19
		Moyen	1	4	2	1	2	3	1	0	1	3	4	0	0	11	11	12	11	12	8	10	11	10
		Fort	1	4	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	5	3	2	1	2	0	0	1	0
	G	Faible	10	16	19	23	26	30	32	33	34	34	34	3	3	19	20	24	27	28	25	30	31	34
		Moyen	2	5	5	6	7	11	11	11	12	12	13	2	2	13	12	14	17	18	15	20	21	23
		Fort	1	4	2	-1	-1	1	0	0	1	1	2	2	2	6	4	4	7	8	5	10	11	12
19	D	Faible	2	6	5	9	12	17	21	22	24	25	25	0	0	9	12	15	17	21	17	22	25	34
		Moyen	1	4	2	-1	-1	0	0	0	1	1	3	0	0	6	6	7	9	12	7	12	15	23
		Fort	1	4	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	3	1	0	1	2	0	2	5	12
	G	Faible	5	9	11	14	16	19	22	23	26	27	26	3	3	14	14	17	18	19	20	30	28	34
		Moyen	1	4	2	0	1	1	0	1	4	5	6	2	3	9	8	9	9	11	10	20	18	23
		Fort	1	4	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2	2	5	2	0	1	2	0	10	8	12
20	D	Faible	3	8	8	12	17	20	24	25	29	29	X											
		Moyen	1	3	1	1	3	4	3	3	6	8	X											
		Fort	1	3	1	0	1	1	1	1	1	1	X											
	G	Faible	3	7	8	13	20	25	30	31	33	33	X											
		Moyen	1	3	1	2	5	7	8	7	10	12	X											
		Fort	1	3	1	0	1	1	1	1	1	3	X											
21	D	Faible	4	13	18	22	23	27	28	27	29	30	31											
		Moyen	0	2	6	6	7	9	10	8	10	11	12											
		Fort	0	1	2	3	3	2	1	0	0	2	2											
	G	Faible	1	7	12	18	21	25	27	27	29	29	29											
		Moyen	0	2	3	5	5	8	8	8	10	10	11											
		Fort	0	1	2	3	3	1	0	-1	-1	0	1											
22	D	Faible	1	4	5	13	18	25	30	32	32	32	31	0	0	4	9	17	21	21	25	33	40	46
		Moyen	1	4	2	3	5	8	9	11	14	15	16	0	0	3	4	9	11	12	15	23	30	35
		Fort	1	4	2	0	1	1	1	2	3	6	7	0	0	2	0	0	1	2	5	13	20	24
	G	Faible	2	4	6	14	19	26	31	32	32	32	31	0	0	6	10	17	23	24	23	33	38	50
		Moyen	1	4	2	3	5	8	10	11	13	15	16	0	0	4	4	9	13	14	13	23	28	39
		Fort	1	4	2	0	1	1	1	1	3	6	7	0	0	3	0	0	3	4	3	13	18	28
23	D	Faible	11	17	16	20	22	26	30	31	34	35	35	3	3	16	16	19	26	30	23	30	45	39
		Moyen	1	4	3	2	3	7	9	9	10	12	12	2	3	11	9	10	16	21	13	20	35	27
		Fort	1	4	2	-1	-1	0	0	-1	-1	2	3	2	2	5	2	0	6	11	3	10	25	16
	G	Faible	6	11	9	14	18	23	27	29	32	32	32	0	0	9	13	19	30	33	24	27	36	34
		Moyen	1	4	2	0	1	6	8	9	10	12	12	0	0	6	7	10	20	23	14	17	26	23
		Fort	1	4	2	-1	-1	0	0	-1	1	2	2	0	0	3	1	0	10	13	4	7	16	12
24	D	Faible	1	4	7	9	10	13	14	14	15	17	18											
		Moyen	0	2	4	2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1											
		Fort	0	1	4	2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1											
	G	Faible	1	4	7	9	12	15	17	19	23	24	24											
		Moyen	0	2	4	2	1	-1	-1	-1	0	3	3											
		Fort	0	1	4	2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1											

25	D	Faible	3	7	12	19	27	34	39	40	40	39	39	0	0	6	21	28	33	30	26	33	36	60
		Moyen	1	3	3	6	10	15	19	18	20	25	25	0	0	4	13	18	23	21	16	23	26	48
		Fort	1	3	2	1	4	8	8	7	9	16	16	0	0	3	5	8	13	11	6	13	16	37
	G	Faible	8	13	16	21	28	33	38	40	43	42	42	0	0	9	16	24	31	30	30	36	51	60
		Moyen	1	3	3	5	10	15	19	23	25	31	31	0	0	6	9	14	21	21	20	26	41	48
		Fort	1	3	2	1	3	7	8	12	14	24	24	0	0	3	2	4	11	11	10	16	31	37
26																								
27	D	Faible	1	3	1	8	14	22	28	30	32	31	30	0	0	0	9	13	21	21	20	35	39	39
		Moyen	1	3	1	2	4	6	7	8	10	12	12	0	0	0	4	6	11	12	10	25	29	27
		Fort	1	3	1	0	1	1	1	1	1	2	3	0	0	0	0	0	1	2	0	15	19	16
	G	Faible	1	3	1	4	9	17	23	26	29	29	28	0	0	0	4	9	15	17	18	27	28	34
		Moyen	1	3	1	0	1	2	2	2	5	7	8	0	0	0	2	4	8	9	8	17	18	23
		Fort	1	3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	0	7	8	12	
28	D	Faible	22	28	27	31	35	39	42	43	42	42	36	10	11	19	24	28	33	40	29	36	41	54
		Moyen	7	12	13	15	18	23	26	22	22	29	29	9	9	13	16	18	23	30	19	26	31	43
		Fort	1	4	5	7	9	16	15	11	11	19	19	7	7	6	7	8	13	20	9	16	21	32
	G	Faible	18	24	25	31	35	40	44	43	42	42	36	8	8	19	21	26	31	37	29	41	47	60
		Moyen	4	8	11	14	17	23	25	22	26	31	31	7	7	13	13	16	21	27	19	31	37	48
		Fort	1	4	4	6	8	15	14	11	15	22	22	5	6	6	5	6	11	18	9	21	27	37
29	D	Faible	3	7	9	14	19	23	27	28	28	30	X											
		Moyen	1	4	1	1	3	4	4	5	8	10	X											
		Fort	1	4	1	0	0	0	0	0	0	1	X											
	G	Faible	1	4	5	9	14	19	24	25	28	28	X											
		Moyen	1	4	1	0	1	2	2	1	4	6	X											
		Fort	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	X											
30	D	Faible	3	10	16	18	23	25	27	30	37	30	19	0	0	9	17	22	23	24	21	30	56	60
		Moyen	0	2	7	8	11	11	10	13	19	11	-2	0	0	6	10	12	13	14	11	20	46	48
		Fort	0	1	2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-4	0	0	3	2	2	3	4	1	10	36	37
	G	Faible	6	19	25	27	32	34	36	39	41	38	27	5	6	16	21	26	27	28	25	35	56	60
		Moyen	0	7	13	14	18	18	18	21	26	20	5	5	5	11	13	16	17	18	15	25	46	48
		Fort	0	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	13	5	-4	4	4	5	5	6	7	8	5	15	36	37
31	D	Faible	5	5	9	15	22	25	27	30	32	32	31	3	3	4	15	22	16	21	22	35	46	55
		Moyen	1	1	2	3	5	7	7	10	14	15	16	2	3	3	8	12	8	12	12	25	36	43
		Fort	1	1	2	1	1	1	0	1	6	7	9	2	2	2	2	2	0	2	2	15	26	32
	G	Faible	18	18	24	27	33	36	38	40	32	42	34	5	5	19	20	24	26	30	28	30	42	60
		Moyen	7	7	12	14	15	17	18	19	18	22	23	5	5	13	13	14	16	21	18	20	32	48
		Fort	1	1	3	5	5	7	8	9	8	12	13	4	4	6	5	4	6	11	8	10	22	37
32	D	Faible	6	15	20	27	30	36	40	42	42	43	42											
		Moyen	1	4	8	10	12	18	22	24	26	30	31											
		Fort	0	2	4	4	4	10	11	13	15	22	23											
	G	Faible	3	10	14	21	25	31	36	38	40	39	39											
		Moyen	0	2	4	6	8	14	17	16	20	21	22											
		Fort	0	2	4	2	2	6	6	5	9	11	13											
33	D	Faible	0	2	3	8	12	18	23	24	25	26	26	0	0	1	6	9	13	19	19	38	35	46
		Moyen	0	2	3	5	10	13	17	18	20	22	22	0	0	1	2	4	7	11	9	28	25	35
		Fort	0	2	3	3	5	7	8	10	12	16	16	0	0	1	0	0	0	2	0	18	15	24
	G	Faible	0	2	6	13	21	27	32	33	34	34	34	0	0	4	14	15	22	28	25	35	39	58
		Moyen	0	2	3	8	15	21	26	28	29	30	30	0	0	3	8	7	12	18	15	25	29	47
		Fort	0	2	3	4	7	12	18	19	21	23	23	0	0	2	2	0	2	8	5	15	19	36
34	D	Faible	7	7	7	9	15	29	32	35	39	23	X											
		Moyen	-3	-2	-2	1	7	21	25	29	31	17	X											
		Fort	-7	-7	-7	-5	-1	13	16	20	23	9	X											
	G	Faible	9	9	9	11	15	28	32	36	39	23	X											
		Moyen	-1	-1	-1	2	8	21	25	29	31	17	X											
		Fort	-7	-7	-7	-5	-1	13	16	20	23	9	X											
35																								
36																								
Moyenne (n=17)	Faible	5,5	9,7	12	16	20,5	25,1	28,8	30,4	32,5	32,3	29,9	1,84	2,28	10,1	14	18,3	21,9	24,5	22,3	30,3	36,2	42,6	
	Moyen	1	3,4	3,9	4,8	7,09	10	11,5	12,5	15,1	16	14,7	1,6	1,97	6,84	7,92	9,94	13	15,4	12,6	20,4	26,3	31,6	
	Fort	0,5	2,2	1,7	1	1,85	3,32	3,41	3,56	5,21	7,35	7,09	1,25	1,55	3,57	2,05	1,77	4,06	6,25	3,5	10,6	16,6	20,5	
	Total	2,3	5,1	5,8	7,3	9,81	12,8	14,6	15,5	17,6	18,6	17,2	1,56	1,93	6,85	7,99	10	13	15,4	12,8	20,4	26,4	31,6	