

**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LA READAPTATION**

---

**Directeur Professeur Jacques LUAUTE**

---

DISCORDANCE DE L'AUDIOMÉTRIE TONALE RÉALISÉE AU  
CASQUE TDH 39 VERSUS L'AUDIOMÉTRIE IN-SITU

MEMOIRE présenté pour l'obtention du

**DIPLOME D'ETAT D'AUDIOPROTHESISTE**

par

LAGIER Manon

Autorisation de reproduction

LYON, le 20/10/2023

**David COLIN**  
Responsable de l'Enseignement

N° 958



Président  
**Pr Frédéric FLEURY**

Vice-président CFVU  
**M. CHEVALIER Philippe**

Vice-président CA  
**M. REVEL Didier**

Vice-président CS  
**M. VALLEE Fabrice**

Directeur Général des Services  
**M. ROLLAND Pierre**

## Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est  
Directeur  
**Pr. RODE Gilles**

U.F.R d'Odontologie  
Directeur  
**Pr. SEUX Dominique**

U.F.R de Médecine Lyon-Sud  
Charles Mérieux  
Directrice  
**Pr BURILLON Carole**

Institut des Sciences Pharmaceutiques  
et Biologiques  
Directrice  
**Pr VINCIGUERRA Christine**

Département de Formation et  
Centre de Recherche en Biologie  
Humaine  
Directeur  
**Pr SCHOTT Anne-Marie**

Institut des Sciences et Techniques de  
Réadaptation  
Directeur  
**Pr LUAUTE Jacques**

Comité de Coordination des  
Etudes Médicales (CCEM)  
**Pr COCHAT Pierre**

---

---

## Secteur Sciences et Technologies

U.F.R. Des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (S.T.A.P.S.)

Directeur

**M. VANPOULLE Yannick**

Institut des Sciences Financières et d'Assurance (I.S.F.A.)

Directeur

**M. LEBOISNE Nicolas**

Institut National Supérieur du Professorat et de l'éducation (INSPé)

Directeur

**M. CHAREYRON Pierre**

UFR de Sciences et Technologies

Directeur

**M. ANDRIOLETTI Bruno**

POLYTECH LYON

Directeur

**Pr PERRIN Emmanuel**

IUT LYON 1

Directeur

**M. VITON Christophe**

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique de Lyon (ESCPE)

Directeur

**M. PIGNAULT Gérard**

Observatoire astronomique de Lyon

Directeur

**Mme DANIEL Isabelle**

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier M. GALLEGO Stéphane pour son accompagnement tout au long de la réalisation du mémoire.

Je remercie également les professeurs, intervenants et membres de l'administratif de l'université Claude Bernard Lyon 1 pour les enseignements fournis au cours de ces trois années de formations.

Merci à Christophe MICHEYL, travaillant chez le fabricant d'aides auditives Starkey et audioprothésiste D.E, pour son aide précieuse et son implication dans le mémoire.

Un grand merci aux patients ayant participé à l'étude pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Enfin, merci à ma famille et mes proches pour leur soutien moral et leur avis critique apporté au présent mémoire.

# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>1</b>
<b>RESUME</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>A) <u>PARTIE THÉORIQUE</u></b>	<b>7</b>
<b>I. L'oreille</b>	<b>7</b>
<b>1. L'oreille externe</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Le pavillon</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Le conduit auditif externe</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Fonction de transfert</b>	<b>9</b>
<b>2. Les tuyaux sonores</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Tuyaux ouverts – fermés</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Tuyaux fermés – fermés</b>	<b>11</b>
<b>3. L'oreille moyenne</b>	<b>12</b>
<b>3.1 La membrane tympanique</b>	<b>12</b>
<b>3.2 La chaîne ossiculaire</b>	<b>13</b>
<b>II. Méthodes de mesure des seuils auditifs</b>	<b>13</b>
<b>1. Audiométrie au casque</b>	<b>13</b>
<b>2. Audiométrie In-situ</b>	<b>15</b>
<b>2.1 In-situ PHONAK</b>	<b>15</b>
<b>2.2 In-situ STARKEY</b>	<b>15</b>
<b>III. La calibration des transducteurs</b>	<b>16</b>
<b>IV. Facteurs influençant la différence entre l'audiométrie conventionnelle et la mesure In-situ</b>	<b>17</b>

1. Paramètres acoustiques et anatomiques	17
2. Impédance de l'oreille	18
<b>B) <u>PARTIE EXPÉRIMENTALE</u></b>	<b>19</b>
I. Méthode	19
II. Participants	19
1. Groupe témoin (T)	20
2. Groupe A	20
3. Groupe B	21
III. Matériel	21
IV. Procédure	22
V. Hypothèses	23
<b>C) <u>RÉSULTATS</u></b>	<b>24</b>
I. Présentation des seuils obtenus via les différents transducteurs	24
II. Différences champ libre – casque	27
III. Différences In-situ – casque	30
1. Dôme ouvert	31
2. Dôme fermé	33
3. Dôme power	35
IV. Influences du changement de dôme sur les résultats	37
1. Groupe T	37
2. Groupe A	38
3. Groupe B	39
V. Anatomie des oreilles	39
1. Longueur et longueur résiduelle du CAE	40
2. Volume résiduel du CAE	41

3. Hauteur et largeur au point du dôme	42
VI. Relation entre le volume et les différences In-situ – casque	42
1. Dans les fréquences aiguës	43
2. Dans les fréquences graves	44
D) <u>DISCUSSION</u>	44
I. Différences champ libre – casque	44
II. Différences In-situ – casque	46
III. Changement de dôme au sein des groupes	48
IV. Anatomie des oreilles	50
V. Relation entre l’anatomie et les résultats obtenus	51
VI. Limites de l’étude	52
E) <u>CONCLUSION</u>	52
F) <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	54
G) <u>ANNEXES</u>	58

## RESUME

**Objectifs :** Des écarts importants ont été relevés entre le casque et l'In-situ chez plusieurs sujets. C'est pourquoi, la variabilité des résultats avec ces deux méthodes va être mesurée. Puis les facteurs favorisant ces écarts seront déterminés. **Matériel et méthode :** 30 sujets ont participé à l'étude, divisés en trois groupes selon les différences In-situ – casque : un groupe témoin (casque et In-situ similaires), un groupe A (casque meilleur que l'In-situ) et un groupe B (In-situ meilleure que le casque). Des empreintes ont permis de relever les caractéristiques des CAEs, complétées à l'aide d'un tube sonde lyric pour mesurer la longueur du conduit. Une mesure In-situ a été réalisée avec différents dômes pour évaluer les facteurs acoustiques. **Résultats :** Des écarts de 10dB ou plus ont été relevés chez certains patients. Une relation entre les différences In-situ – casque et les facteurs acoustiques et anatomiques est notable. Alors qu'un changement de dôme impacte significativement l'In-situ chez le groupe témoin, celui-ci n'a pas d'influence sur le groupe B. L'analyse des empreintes démontre que les conduits du groupe B possèdent un volume résiduel plus petit. Enfin, une corrélation a été observée entre ce volume et les différences In-situ – casque : plus le volume résiduel augmente, plus la pression au tympan délivrée par l'écouteur In-situ diminue, donc plus la différence augmente. **Conclusion :** De meilleurs résultats en In-situ pour le groupe B sont expliqués par le comportement du dôme, qui est plus obturant que prévu. Les caractéristiques anatomiques particulières ainsi que la faible cavité résiduelle créent des différences entre l'In-situ et le casque pouvant excéder les 10dB. La mesure In-situ permet de prendre en compte les facteurs propres du patient afin que l'intensité des stimuli perçus soit la plus adaptée en fonction des paramètres individuels de chaque appareillage. En conclusion, la mesure In-situ est plus adaptée selon moi pour réaliser l'adaptation des aides auditives plutôt que le casque.

## INTRODUCTION

Lors de l'adaptation des aides auditives, les logiciels de réglages calculent un gain cible en se basant sur des seuils liminaires tonaux. Ces seuils peuvent être mesurés conventionnellement via des écouteurs supra ou intra-auraux mais également via la mesure In situ qui délivre les stimuli à travers les appareils. Cette nouvelle technique, développée il y a quelques années, évalue les réponses au plus près du tympan en prenant en compte les caractéristiques propres des patients. Cependant, les résultats obtenus conventionnellement ne sont pas toujours identiques à ceux mesurés grâce à la mesure In-situ, avec des différences très variables d'un sujet à un autre. En effet, un écart pouvant excéder les 10 dB entre l'In-situ et le casque était fréquemment visible chez les patients lors des consultations.

L'objectif de ce mémoire est dans un premier temps, de mesurer la variabilité des résultats entre les méthodes de mesure de l'audition. Puis, les facteurs associés à ces différences seront analysés, pour finalement décider du procédé le plus adéquat à privilégier pour l'adaptation des aides auditives. Pour cela, le mémoire se déclinera de la manière suivante : une première partie sera consacrée à la théorie en détaillant les propriétés anatomiques et acoustiques de l'oreille ainsi que les différents tests effectués. La deuxième partie présentera l'étude pratique ainsi que les résultats associés.

## **A) PARTIE THÉORIQUE**

### **I. L'oreille**

L'oreille est l'organe sensoriel responsable de l'audition. Celle-ci recueille les sons environnants et les transmet au cerveau pour les traiter. Elle se divise en trois parties : l'oreille externe, moyenne et interne, chacune ayant son rôle et des caractéristiques propres. Pour l'étude, seules l'oreille externe et moyenne seront détaillées.

#### **1. L'oreille externe**

L'oreille externe est la porte d'entrée des ondes sonores. Elle est associée à un cornet acoustique (1, Wikipédia), captant les vibrations sonores et les conduisant jusqu'à la membrane tympanique afin de les transmettre à l'oreille moyenne puis interne. Son anatomie et ses caractéristiques particulières permettent le filtrage des fréquences graves, une amplification des fréquences de l'intelligibilité de la parole et contribue à la localisation dans l'espace (Ballachanda, 2). L'oreille externe se compose du pavillon et du conduit auditif externe (CAE).

##### **1.1 Le pavillon**

Le pavillon ou *auricule* représente la partie visible de l'oreille. Il mesure entre 6 et 6.5cm de haut et 2.5 à 3.6 cm de large (Avillac, 3). Sa composition cartilagineuse (fibres élastiques) entraîne une expansion de ses dimensions avec l'âge (Sforza, 4). Son objectif est de recueillir les sons de l'environnement et de les diriger vers le conduit auditif. A l'aide des différents reliefs et dépressions présents à sa surface, il joue le rôle d'un résonateur, amplifiant naturellement les fréquences comprises entre 2000Hz et 7000Hz (2, Ballachanda).

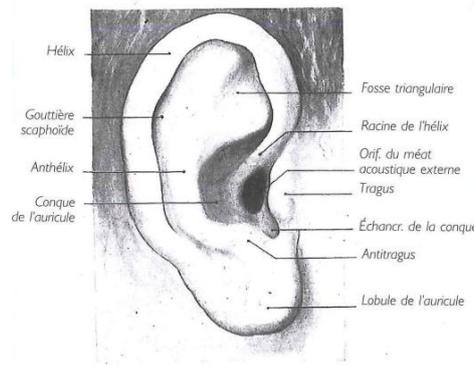


Figure 1 : Vue latérale du pavillon ou auricule (D'après Avillac, 3).

## 1.2 Le conduit auditif externe

Le conduit auditif externe peut être assimilé à un tube sonore reliant le pavillon à l'oreille moyenne. Il forme un S italique dans le plan horizontal et est terminé par le tympan. Le tiers externe est fibro-cartilagineux, en continuité avec le cartilage du pavillon. Des glandes cérumineuses, spécialisées dans la production de cérumen, assurent la protection de l'oreille contre les éléments externes (insectes, débris). Les deux tiers internes sont osseux, sans glandes cérumineuses (3, Avillac).

La longueur du CAE est comprise en moyenne entre 20 et 30 mm selon la délimitation des parois supérieures et antérieures. Effectivement, la membrane tympanique formant un angle de  $43^{\circ} \pm 4^{\circ}$  avec l'axe du conduit, la paroi postérieure supérieure mesure environ 25 mm de long, tandis que la distance antéro-inférieure est environ 6 mm plus longue (5, Salvinelli). Une variation de la longueur peut s'observer selon la méthode utilisée (empreintes, radiologie par tomographie, etc.) (Wayne Staab, 6). La hauteur à l'entrée du conduit se situe entre 8.88mm et 12.5mm et la largeur est comprise entre 5.7mm et 9.12mm (Staab W., 7). Enfin, le volume moyen est de  $1.23\text{cm}^3$  chez les hommes et de  $1.06\text{cm}^3$  chez les femmes (8, Barnes).

### 1.3 Fonction de transfert

L'oreille externe, associée à d'autres parties du corps comme le torse, le cou ou encore la tête jouent le rôle de filtres auditifs. En effet, la pression au niveau du tympan n'est pas linéaire selon les fréquences. Le CAE pouvant être rattaché à un tube avec une extrémité ouverte et une extrémité fermée, celui-ci est le foyer de phénomène de résonances (2, Ballachanda). Tandis que les graves sont diffractés, les fréquences comprises entre 2kHz à 7kHz sont amplifiées naturellement, avec un maximum aux alentours de 3kHz, (9, Kruger B.) fréquence propre du conduit auditif, variable selon la longueur et le diamètre (Ballachanda, 2). La somme de toutes ces résonances sont responsables d'une amplification naturelle allant jusqu'à 20dB vers 3000Hz (figure 2). Cependant, la fréquence de résonance ainsi que le gain naturel de l'oreille seront altérés en présence d'un embout dans l'oreille, plus ou moins selon le dôme utilisé.

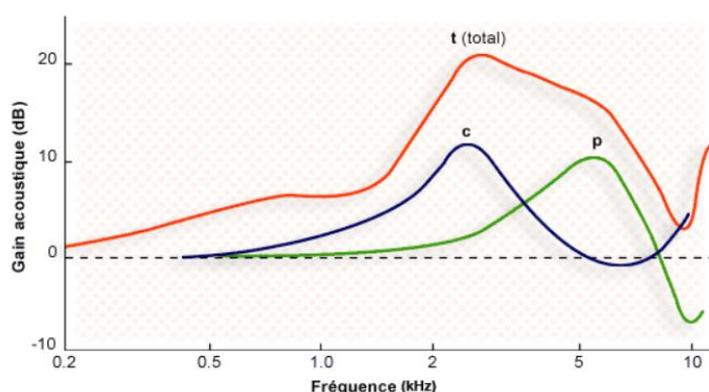


Figure 2 : Effet du pavillon (p, vert) et du conduit auditif externe (c, bleu) sur l'amplitude de la vibration sonore (gain acoustique) pour l'azimut 45° dans le plan horizontal. A 3 kHz, la somme cumulée (t, rouge) de ces gains correspond à 20 dB (= amplitude du signal d'entrée x10) D'après le site web cochlea.eu, (10).

## 2. Les tuyaux sonores

Comme dit précédemment, le conduit auditif se comporte comme un tuyau sonore. Lors de l'installation d'une aide auditive, l'embout va plus ou moins venir l'obturer. L'amplification résultante au tympan se compose alors de l'association de plusieurs

flux, à savoir le flux naturel entrant dans le conduit, le flux amplifié par l'appareil, le flux réfléchi par le tympan et celui apporté par voix osseuse et cartilagineuse (11, Brocard C.). Selon la configuration du tuyau sonore, des ondes stationnaires se forment (figure 3), donnant lieu à de nombreuses résonances. C'est pourquoi, si l'on insère un microphone sonde dans le CAE et que l'on mesure le niveau de pression à divers endroits, de grosses variations pourront être observées.

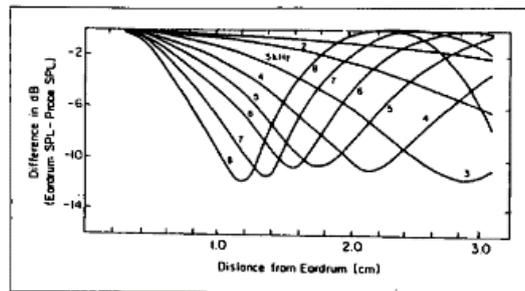


Figure 3 : Ondes stationnaires pour les fréquences 1 à 8.0 kHz. Les valeurs négatives en ordonnée correspondent à la différence de pression, en dB, entre le tympan et les niveaux sonores mesurés par la sonde à différents endroits le long du conduit (Ballachanda, 2).

## 2.1 Tuyaux ouverts – fermés

Le CAE est naturellement associé à un tuyau ouvert à son entrée et fermé au niveau de la membrane tympanique comme suit (12, Adessi C.) :

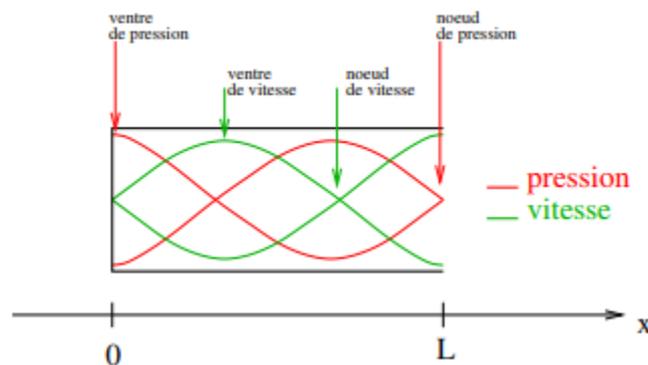


Figure 4 : Vitesse de l'onde et pression acoustique au sein d'un tuyau ouvert-fermé (Adessi, 12).

On peut observer au niveau de l'extrémité fermée un maximum de pression acoustique (ventre de pression), ainsi qu'une vitesse et un déplacement particulaire nul (nœud de vitesse). Au niveau de l'extrémité ouverte se produit la situation inverse, avec un nœud de pression et un ventre de vitesse. Dans cette configuration, les ondes incidentes et réfléchies s'additionnent constructivement pour former un ventre de pression vers le tympan. Cependant, lorsque l'on s'éloigne d'une distance  $x$  du tympan, les ondes peuvent s'additionner ou se soustraire en raison d'un déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente.

Dans ce cas, la fréquence propre du conduit auditif se définit par :

$$f_n = \frac{c}{4L}(2n - 1)$$

Avec «  $c$  » la célérité du son dans l'air en mètre par seconde (m/s), «  $L$  » la longueur du conduit auditif en mètres (m) et «  $n$  » un entier naturel où  $n=1$  correspond à la fréquence fondamentale et  $n > 1$  représente les harmoniques (12, Adessi C.).

## 2.2 Tuyaux fermés – fermés

Le tuyau fermé-fermé correspond à un conduit auditif obstrué par un dôme :

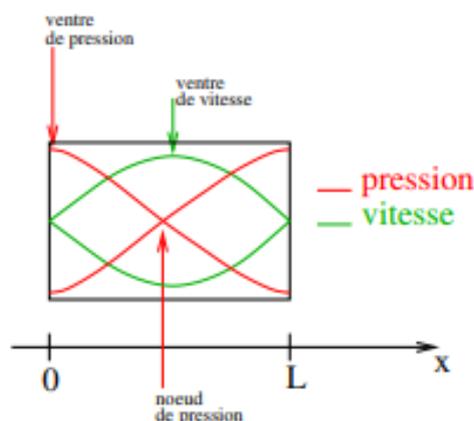


Figure 5 : Vitesse et pression acoustique au sein d'un tuyau fermé-fermé (12, Adessi C.).

Ici, on constate que les deux extrémités présentent les mêmes conditions à savoir un déplacement et une vitesse nuls en raison d'un nœud de vitesse, et d'un ventre de pression. Si l'on s'éloigne des extrémités, la pression diminue progressivement. Cette fois, la fréquence propre et les harmoniques dans cette configuration sont représentées par la relation :

$$f_n = n \times \frac{c}{2L}$$

### 3. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne est une cavité osseuse remplie d'air, située dans la partie pétreuse de l'os temporal, assurant la transmission du son de l'oreille externe vers l'oreille interne. Elle se compose de la membrane tympanique, la chaîne des osselets et de la Trompe d'Eustache, qui assure une bonne ventilation et égalise la pression entre l'oreille moyenne et la pression atmosphérique (13, thèse de Gonzalez Torrecilla S.).

#### 3.1 La membrane tympanique

Le tympan ou membrane tympanique est une membrane mince (0.1mm d'épaisseur), élastique, de forme ovale, mesurant 10mm de haut et 9mm de large (Avillac, 3). En vue latérale, le tiers supérieur est appelé la pars flaccida et les deux tiers inférieurs correspondent à la pars tensa. Seule la pars tensa vibre sous l'effet des ondes sonores, la pars flaccida étant plus rigide et dépourvue de fibres. Enfin, le tympan possède un angle d'inclinaison de  $43^\circ \pm 4^\circ$  par rapport à l'axe du conduit (Salvinelli, 5).

### **3.2 La chaîne ossiculaire**

La chaîne ossiculaire est constituée de trois osselets (marteau, enclume et étrier) reliant la membrane tympanique à l'oreille interne. Le manche du marteau est inclus dans la pars tensa, permettant le transfert d'énergie du tympan aux osselets. Plusieurs muscles et tendons viennent s'insérer sur les osselets dont le muscle tenseur du tympan au niveau du manche du marteau et le muscle stapédien sur l'étrier. Ceux-ci rigidifient la chaîne afin de protéger l'oreille des sons forts et contrôler la transmission des fréquences graves (13, thèse de Gonzalez Torrecilla S.).

## **II. Méthodes de mesure des seuils auditifs**

Aujourd'hui, il existe plusieurs méthodes pour évaluer l'audition résiduelle des patients. La mesure des seuils au casque est la plus utilisée mais l'audiométrie peut également être réalisée avec des inserts ou via les aides auditives. Ces différents procédés conduisent à des résultats variables, plus ou moins importants selon les fréquences.

### **1. Audiométrie au casque**

L'audiométrie au casque est la méthode historique pour mesurer l'audition. Elle se réalise avec un audiomètre, qui génère des fréquences allant de 125 Hz à 8000 Hz. Mais il est possible de couvrir une gamme supplémentaire de 9 à 18 kHz avec un audiomètre hautes fréquences, celui-ci étant plus sensible à des modifications précoces de l'audition. C'est pourquoi, il peut être utilisé en dépistage sur des nourrissons ou jeunes patients (14, Hemmingsen). Un potentiomètre permet une mesure par pas de 1, 2 ou 5dB entre -10dB et 120 dB, l'unité étant le dB HL (Hearing Loss). Grâce à cette technique, les seuils auditifs par voie aérienne via un casque supra-aural et par voie osseuse à l'aide d'un vibreur sont mesurés (15, Bacon Nadia). Même si certaines études concluent à une variabilité test-retest inférieure à 10dB, (16,

Susan E. Voss) (17, Schmuziger) (18, Stuart) (19, O'Brien), des variations importantes sur les fréquences graves et aiguës peuvent être relevées (Ciric, 20), avec un maximum pouvant aller jusqu'à 21dB à 6000 Hz (21, Barlow). Sur les fréquences graves, cette variabilité peut s'expliquer par un manque d'étanchéité entre l'écouteur du casque et le pavillon, qui est à l'origine de fuites acoustiques. En effet, une réduction de la pression des fréquences inférieures à 500Hz peut être observée (Ciric, 20) (Voss SE, 22) en cas de scellage imparfait entre le transducteur et l'oreille. Sur les fréquences aiguës, un mauvais positionnement du casque aura pour effet d'écraser le tragus et de déformer le pavillon, conduisant à la fermeture du CAE (Barlow, 21) (Dodelé, 23). Sur la figure ci-dessous, le repositionnement du casque entraîne une variation allant de 5 à 8 dB (Ciric, 20). C'est pourquoi, certains audioprothésistes préféreront mesurer l'audition avec les inserts qui permettent de s'affranchir de ce problème d'effondrement du conduit auditif (24, Tokar-Prejna). Cependant, d'après la littérature, les seuils mesurés aux inserts sont inférieurs à ceux mesurés avec le casque sur certaines fréquences. De plus, la variabilité est plus importante via les inserts par rapport au casque (25, Bhatt).

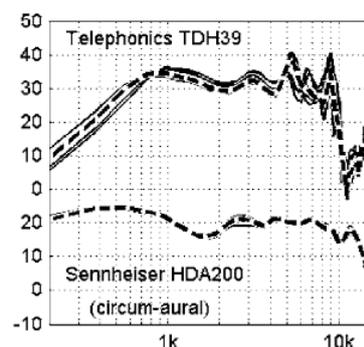


Figure 6 : Fonctions de transfert pour un sujet avec cinq emplacements d'un casque supra-aural (TDH39) et circum-aural (Sennheiser HDA200) (—), pour la capsule gauche avec la courbe moyenne (---). D'après Ciric, (20).

## 2. Audiométrie In-situ

L'expression *In-situ* est issue du latin, qui signifie « sur place ». Cette audiométrie consiste à « *mesurer l'audition non appareillée des patients en se servant des appareils auditifs pour générer les stimuli directement dans le conduit auditif* » (26, Smith-Olinde). Elle fut intégrée pour la première fois dans le logiciel de réglages de Widex en 1996 sous le nom de *sensogramme* (27, KUK F.). Cette méthode permet de prendre en compte le couplage acoustique utilisé et les caractéristiques anatomiques de chacun, dont le volume de la cavité résiduelle. D'après les études réalisées par Smith-Olinde sur des normo-entendants et par Pedersen, les variations test-retest mesurées en In-situ sont inférieures à 10dB, variation de test acceptée pour l'exécution de l'audiométrie au casque (26, Smith-Olinde) (28, Pederson).

### 2.1 In-situ PHONAK

La mesure In-situ de chez Phonak est appelée *Audiogramdirect*. Elle permet de mesurer les seuils auditifs de 250 à 8000 Hz. Le logiciel propose, si on le souhaite, un réajustement des gains à chaque mesure In-situ. De plus, il offre la possibilité de prendre en compte les effets d'événements et de fuites acoustiques de l'Anti-Larsen pour la mesure In-situ. Lorsque l'option est activée, l'intensité des stimuli délivrée lors de la mesure est ajustée selon le test d'Anti-Larsen et des fuites associées. Pour l'étude, cette option n'a pas été activée.

### 2.2 In-situ STARKEY

Chez Starkey, la mesure In-situ est disponible via l'*audiométrie in vivo*. Une mise à jour récente du logiciel Inspire a permis d'améliorer la précision du test, notamment pour les appareillages en dômes ouverts et en intra-auriculaires. Dans l'ancienne version, le calcul du niveau de pression acoustique (SPL) se basait sur une conversion

des seuils mesurés à l'aide des inserts au coupleur 2cc. C'est pourquoi, il était impossible de mesurer les seuils inférieurs à 1000 Hz en ouvert ou avec un intra. En effet, les effets d'événements et de fuites acoustiques se produisant dans les fréquences graves, ceux-ci auraient pu modifier les résultats. Depuis la nouvelle version, le calcul du niveau SPL dépend de l'option de couplage acoustique choisi dans le logiciel, qui permet de compenser les effets du couplage utilisé. L'ensemble des fréquences sont désormais mesurables via *l'audiométrie in vivo*, avec la version 2022.1. Une étude réalisée par Starkey, visant à comparer les deux versions, a conclu que les écarts de seuils par rapport à la mesure aux inserts ont fortement été diminués depuis la mise à jour, surtout dans les fréquences inférieures à 1000 Hz (29, Sarah I. et Christophe M.).

### **III. La calibration des transducteurs**

Tout transducteur doit être calibré afin que les stimuli soient perçus avec la même intensité, quel que soit le matériel utilisé. Cette calibration s'effectue dans des caissons acoustiques, appelés coupleurs. Il en existe plusieurs, chacun définit par un volume, représentant la cavité résiduelle. Le casque est calibré à l'aide d'un coupleur 6cc (pour 6cm<sup>3</sup>), correspondant au volume de la conque et du conduit auditif. Le coupleur 2cc est le premier coupleur mis au point puis normalisé en 1959 (30, Lemasson J.B). Son volume de 2cm<sup>3</sup> est supposé représenter le volume résiduel du conduit auditif. C'est celui-ci qui est utilisé pour la calibration des inserts. Les seuils mesurés au casque sont en dB HL alors que les inserts et l'*In-situ* se mesurent en dB SPL (Sound Pressure Level). C'est pourquoi il existe plusieurs systèmes de conversions pour passer d'un seuil HL à un niveau estimé SPL « au tympan » (31, Daban N.). Le champ libre est lui aussi calibré selon les propriétés (volume, bruit de fond) de la cabine insonorisée afin que les résultats correspondent au mieux avec ceux relevés au casque.

#### **IV. Facteurs influençant la différence entre l'audiométrie conventionnelle et la mesure In-situ**

Des études visant à comparer les résultats obtenus conventionnellement via le casque et les inserts de ceux mesurés en In-situ ont mis en évidence plusieurs facteurs influençant sur les seuils selon la méthode utilisée.

##### **1. Paramètres acoustiques et anatomiques**

L'anatomie ainsi que les propriétés acoustiques des ondes sonores ont un impact sur le niveau de pression mesuré au tympan. En effet, Clément KOSINSKI dans son mémoire, a démontré que la taille de l'écouteur, les dômes et l'anatomie du CAE influençaient les résultats du casque par rapport à l'In-situ (32, Kosinski C.). Cette variation est provoquée d'une part par le volume d'air présent dans la cavité résiduelle. Alors que le volume lié aux inserts est de  $0.5\text{cm}^3$ , celui du casque est de  $12\text{cm}^3$ , comprenant en plus du conduit auditif le volume de la conque et de l'air présent dans le coussinet de l'écouteur (16, Susan E. Voss) Ainsi, plus le volume entre le transducteur et le tympan est important, moins l'amplification sera importante, comme l'a démontré Valente. En effet, celui-ci a observé une différence comprise entre 2.4 et 10dB entre les inserts et le casque selon les fréquences (33, Valente). Un autre paramètre à prendre en compte dans la différence casque In-situ est le dôme utilisé, en lien direct avec les propriétés acoustiques des ondes sonores. Comme Dodelé l'indique dans son article, en présence d'un embout ouvert, « *plus l'extrémité de l'embout est proche du tympan, meilleure sera l'amplification des fréquences inférieures à 1500Hz* » (23, Dodelé). Clément, dans son mémoire, a observé qu'un changement de dôme affectait principalement les fréquences comprises entre 250 Hz et 1500 Hz alors que les aigus sont moins impactés. Les fréquences graves ayant de grandes longueurs d'ondes, celles-ci ressortent facilement du conduit auditif c'est

pourquoi il est nécessaire de passer sur un embout fermé afin de les contenir dans l'oreille. Les fréquences aiguës de leur côté ont des longueurs d'ondes très petites et ressortent très peu de l'oreille.

## **2. Impédance de l'oreille**

L'impédance se définit comme la résistance d'un milieu au passage d'une onde sonore (Avillac, 3). En audiologie, celle-ci se mesure grâce au test d'impédancemétrie, qui permet d'évaluer la compliance du tympan, c'est-à-dire la capacité de celui-ci à laisser passer les sons. De plus, il permet de vérifier le bon fonctionnement de l'oreille moyenne (osselets et muscles). L'impédance du tympan est directement liée à celle de l'oreille moyenne, le manche du marteau s'insérant dans la membrane. Ainsi, lorsque l'on parle de l'impédance du tympan, on fait référence en réalité à l'impédance du système constitué du tympan, de l'oreille moyenne et interne. Plus les fréquences sont aiguës, plus l'impédance augmente. En présence d'une pathologie de l'oreille, celle-ci peut être altérée et la pression transmise est alors modifiée (15, Bacon). D'après Keefe, l'impédance mesurée dépend directement des caractéristiques anatomiques du conduit (longueur, diamètre) et de la cavité de l'oreille moyenne (34, Keefe). Elle diminue proportionnellement à l'augmentation du volume résiduel, notamment dans les fréquences graves (16, Susan E. Voss), créant des différences de pression jusqu'à 35dB en cas de pathologie par rapport à une oreille normale (22, Voss E.S). Un phénomène d'amortissement des ondes sonores a également lieu, celui-ci étant créé par l'air présent dans la cavité résiduelle qui se comporte comme un coussin d'air. Il a été démontré que les écouteurs encastrés (inserts ou In-situ) sont plus sensibles aux variations de pression en raison d'un faible volume d'air contenu dans la cavité résiduelle, qui est plus susceptible d'être altéré par rapport au casque, dont le volume est 24 fois plus important (22, Voss E.S).

## **B) PARTIE EXPÉRIMENTALE**

Chez certains patients, les seuils mesurés en In-situ sont supérieurs d'au moins 10dB par rapport au casque. Mais d'après la littérature, les résultats avec les inserts sont moins bons qu'au casque, causés par l'air présent dans la cavité résiduelle. De plus, on a vu que l'utilisation d'un embout peut conduire à des fuites acoustiques. C'est pourquoi il serait acceptable de dire que les seuils mesurés avec les appareils auditifs devraient être également inférieurs au casque, le volume résiduel se rapprochant de celui des inserts. Le but de cette étude est donc de comprendre les facteurs pouvant expliquer de meilleurs résultats en In-situ par rapport au casque chez une partie des sujets.

### **I. Méthode**

Un seul rendez-vous par participant a été nécessaire pour effectuer l'ensemble des tests. Tout d'abord, l'audition a été mesurée au casque TDH 39. Puis, l'audiométrie In-situ a été réactualisée avec les appareils Phonak des patients. L'audition a par la suite été mesurée en champ libre oreille par oreille, avec une empreinte en controlatéral, qui permettra par la suite de relever les caractéristiques anatomiques. Une audiométrie In-situ avec des appareils Starkey a ensuite été effectuée, avec différents types et tailles de dômes. Enfin, la longueur du CAE a été recueillie à l'aide d'un tube sonde lyric.

### **II. Participants**

Un total de trente sujets a participé à cette l'étude, seize femmes et quatorze hommes. Tous les patients étaient malentendants, appareillés depuis plus d'un mois et avaient un tympan fermé. Le degré de surdité n'était pas un facteur d'exclusion, les sujets ayant des pertes légères à sévères ont pu participer. Ceux présentant des acouphènes

ont cependant été exclus de l'étude par soucis de confusion des signaux sonores avec leurs acouphènes, ainsi que les personnes possédant des exostoses dans le conduit (excroissances osseuses) ou des bouchons de cérumen. Le recrutement s'est effectué par téléphone et lors des rendez-vous de contrôles trimestriels. Les participants ont été divisés en trois groupes, selon la différence entre les seuils mesurés au casque et ceux mesurés en In-situ avec leurs appareils de la marque Phonak, associés à leur couplage acoustique :

### **1. Groupe témoin (T)**

Le groupe témoin inclut les sujets dont l'audiométrie au casque TDH 39 et l'audiométrie In-situ ne présentent pas de différence excédant les 5dB sur au moins six fréquences parmi les huit mesurées. Dix-neuf patients, neuf hommes et dix femmes constituent ce groupe et trente-quatre oreilles ont été testées, certains sujets ayant une oreille recrutée dans un groupe et l'autre dans un second groupe. Les sujets ont entre 67 ans et 86 ans, avec une moyenne d'âge de 75 ans. La perte tonale moyenne mesurée au casque est de 44 dB HL pour l'oreille gauche et de 45 dB HL pour l'oreille droite.

### **2. Groupe A**

Le groupe A représente les patients dont l'audiométrie au casque TDH 39 est meilleure que l'audiométrie In-situ, phénomène déjà expliqué dans la littérature par des fuites acoustiques au niveau du dôme. Les sujets incluent dans ce groupe doivent avoir au moins deux fréquences d'une même octave où les seuils en In-situ sont moins bons de 10dB minimum par rapport au casque. Par exemple, sur l'octave 1000-2000Hz qui comprend les fréquences 1000Hz, 1500Hz et 2000Hz, deux de ces trois fréquences doivent avoir des seuils en In-situ moins bons de 10dB ou plus. Cinq patients

constituent ce groupe, trois hommes et deux femmes, la moyenne d'âge étant de 71 ans. La perte tonale moyenne est de 42 dB HL bilatéralement.

### **3. Groupe B**

Le groupe B correspond au groupe dont l'audiométrie In-situ est meilleure que celle au TDH 39. Ce phénomène n'ayant pas encore été expliqué dans la littérature, il sera donc éclairci dans cette étude à travers cet échantillon. Au moins deux fréquences d'une même octave pour lesquelles l'In-situ est meilleure de 10dB minimum par rapport au casque est nécessaire pour intégrer ce groupe. Dix patients le compose, cinq hommes et cinq femmes, et seize oreilles ont été testées. Les sujets ont entre 49 et 89 ans, avec une moyenne de 78 ans. La perte tonale moyenne est de 47 dB HL pour l'oreille gauche et de 48 dB HL pour l'oreille droite.

La référence des 10dB minimum pour l'inclusion des patients aux groupes A et B s'est basée sur la variation test-retest en In-situ, qui, selon la littérature, est toujours inférieure à 10dB. De plus, ces 10dB représentent la variation de test acceptée pour l'exécution de l'audiométrie conventionnelle au casque. Pour le groupe témoin, une limite de +/- 5dB a été préférée aux 10dB pour éviter les limites d'inclusion entre les groupes, l'audiométrie In-situ se mesurant par pas de 5dB.

### **III. Matériel**

Les tests audiométriques ont été réalisés dans une cabine insonorisée. L'audiomètre utilisé est un YAMAHA AX-397, deux haut-parleurs sont présents à 90° de chaque côté du patient. Pour l'audiométrie tonale, les sujets étaient équipés d'un casque TDH 39. Une audiométrie In-situ a été réalisée avec les appareils Phonak des patients pour le recrutement puis avec une paire d'appareils Starkey, des LIVIO EDGE AI 2400 RIC R, couplés à des écouteurs (gain 50dB) de différentes tailles selon les besoins.

Les dômes utilisés sont des Starkey ouverts, fermés et power. Une seringue ainsi qu'une pâte constituée d'un mélange de silicone et de catalyseur ont été utilisées pour la réalisation des empreintes. Enfin, un pied à coulisse a permis de relever les caractéristiques anatomiques sur les empreintes et un tube sonde a été utilisé pour mesurer la longueur du conduit auditif.

#### **IV. Procédure**

Pour commencer, les oreilles furent observées avec un otoscope. L'In-situ Phonak fut réalisée avec le couplage acoustique actuel du patient pour réactualiser la mesure, c'est-à-dire avec le dôme et les paramètres acoustiques dans le logiciel propre au patient. L'option « utiliser les effets d'événements pour l'Anti-Larsen » présente sur le logiciel Target n'a pas été utilisée lors de la mesure. Un test au casque a été fait lorsque celui-ci n'avait pas été réalisé pendant le recrutement. L'audition des sujets a également été mesurée en champ libre, monoralement via un haut-parleur pour connaître leur « vraie » audition, sans l'influence du positionnement du casque. Pour ce faire, une empreinte après le second coude a été réalisée sur l'oreille non testée et le patient fut placé à un mètre en face d'un haut-parleur. Les seuils auditifs ont ensuite été mesurés avec les appareils Starkey via la mesure In-situ avec différents dômes. Le changement de dôme n'a pas été signalé dans le logiciel, toutes les mesures ont été effectuées en « embout sur mesure occlus » afin d'avoir le plus de dynamique de test possible. Les dômes testés diffèrent selon les groupes :

- Pour le groupe A, un dôme ouvert et un dôme fermé ont été testés dans deux tailles différentes, ainsi qu'un dôme power en une taille. La première taille de dôme correspondait à la taille idéale par rapport au CAE, basée sur la comparaison avec le dôme Phonak du sujet. La deuxième taille de dôme

correspondait à la taille au-dessus du premier, en prenant soin de vérifier qu'il ne soit pas trop gros, auquel cas il pourrait y avoir des fuites acoustiques.

- Pour le groupe témoin et le groupe B, trois dômes ont été testés (ouvert, fermé et power) dans une seule taille, choisie en fonction du conduit des patients. Comme pour le groupe A, celle-ci dépendait du dôme actuel du patient et après vérification de son bon positionnement dans le conduit.

En ce qui concerne la taille des écouteurs Starkey, celle-ci a été choisie de telle sorte que le fil de l'écouteur soit bien plaqué contre la peau des participants et qu'il ne ressorte pas de l'oreille, conjointement avec le dôme. Pour la majorité des patients, la taille d'écouteur Starkey préférée était une taille au-dessus de Phonak. Enfin, les longueurs des conduits sont relevées à l'aide du tube sonde lyric et les empreintes sont analysées avec le pied à coulisse.

## **V. Hypothèses**

Les hypothèses suivantes représentent les questions qui seront éclaircies dans ce mémoire :

- ➔ Si la calibration est correcte, aucune différence de résultats entre le casque et le champ libre n'est observable.
- ➔ Il n'y a pas de différence entre les résultats au casque et en In-situ Starkey.
- ➔ Il n'y a pas de différence entre les seuils mesurés via les appareils Phonak et Starkey.
- ➔ Un changement de dôme (du plus ouvert au plus obturant) aura pour effet de réduire les différences In-situ – casque et donc d'améliorer les seuils In-situ chez le groupe témoin et A.

- Le changement de dôme n'aura pas d'effet sur les différences In-situ – casque pour le groupe B.
- La cavité résiduelle du groupe B est moins importante que celle du groupe A et du groupe témoin.
- Une corrélation entre les différences In-situ – casque et le volume de la cavité résiduelle existe, la cavité résiduelle est un critère influençant l'écart de résultat obtenu.
- La mesure In-situ est plus adaptée pour faire les pré réglages des aides auditives puisqu'elle prend en compte les facteurs acoustiques et anatomiques des patients.

Nous allons maintenant passer à la partie expérimentale et présenter les résultats obtenus.

## **C)RÉSULTATS**

### **I. Présentation des seuils obtenus via les différents transducteurs**

Avant l'analyse approfondie des données, je vais commencer par présenter les résultats obtenus pour chaque groupe via les différentes méthodes de mesure d'audition.

Pour cela, j'ai effectué la moyenne des seuils obtenus pour tous les patients d'un même groupe sur chaque fréquence, et ce chez les trois groupes.

### Résultats au casque :

La figure ci-dessous représente les moyennes et écarts-types des seuils auditifs tonaux mesurés au casque pour les trois groupes en fonction des fréquences. On peut voir que les pertes moyennes sont assez similaires, avec une perte un peu plus importante pour le groupe B dans les fréquences extrêmes.

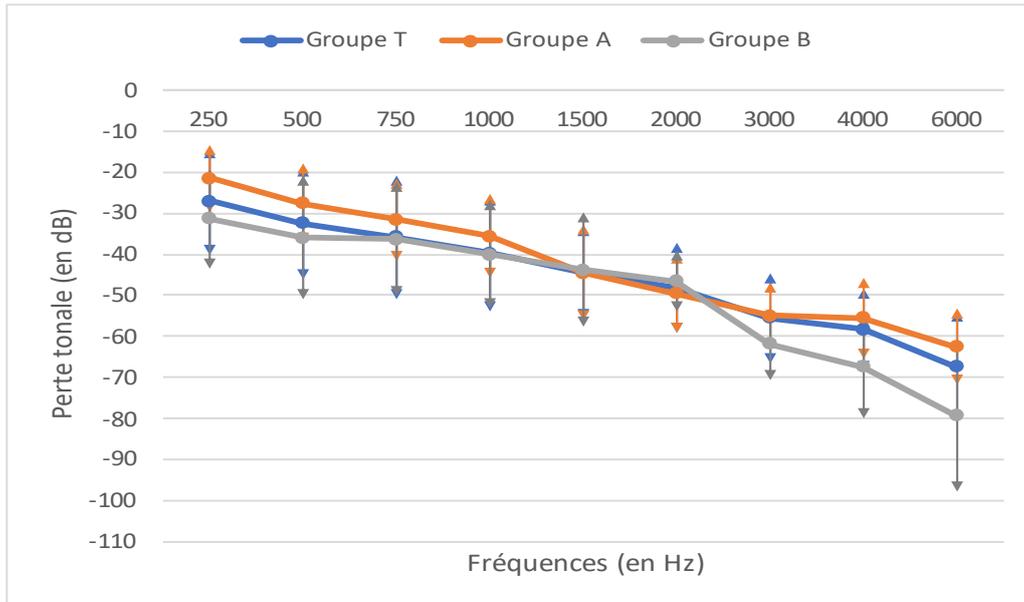


Figure 7 : Moyennes et écarts-types des résultats au casque chez les trois groupes.

### Résultats en champ libre :

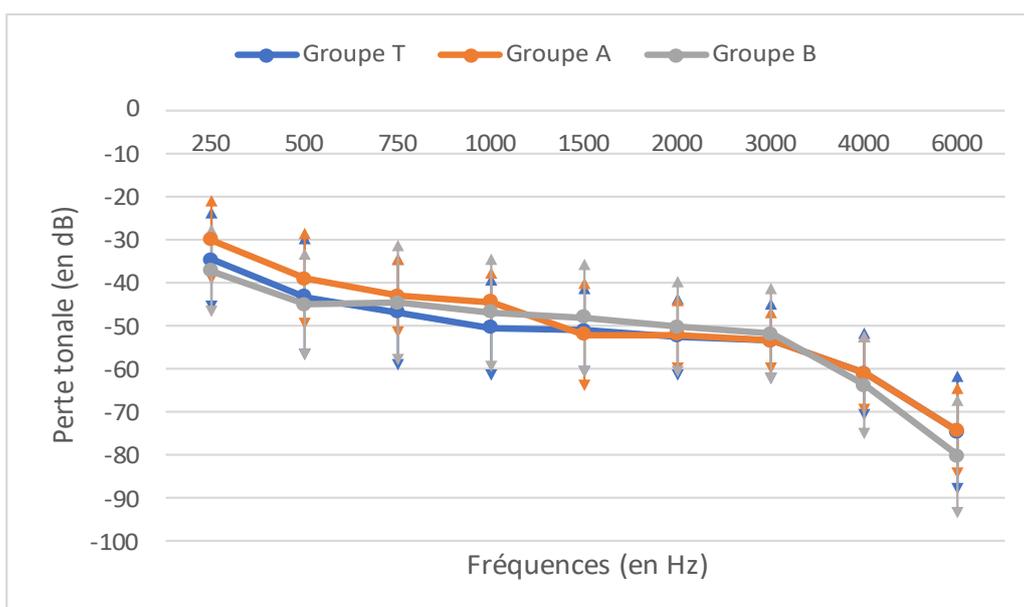


Figure 8 : Moyennes et écarts-types des résultats en champ-libre pour les trois groupes.

Le test en champ libre a été réalisé oreille par oreille avec une empreinte en controlatérale. En moyenne, les seuils sont plus élevés par rapport au casque sur toutes les fréquences pour les trois groupes, plus visibles dans les fréquences graves.

### Résultats en In-situ :

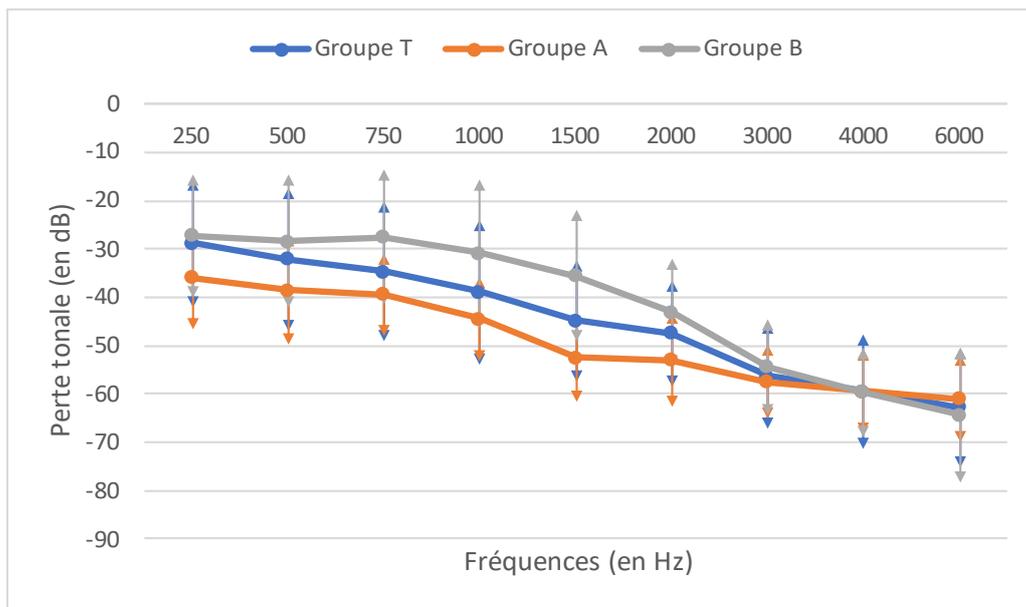


Figure 9 : Moyennes et écarts-types des résultats obtenus via l'audiométrie In-situ chez les trois groupes.

La figure 9 permet de visualiser les différences de résultats en In-situ pour les trois groupes. On retrouve bien les critères d'inclusion avec de meilleurs seuils pour le groupe B ainsi que des seuils plus importants chez le groupe A, la différence allant jusqu'à 15dB sur les médiums entre les deux groupes.

Pour la suite des résultats, l'analyse se déroulera toujours de la même manière, à savoir :

- Une comparaison des moyennes des différences entre les transducteurs utilisés.
- Un nuage de points afin de prendre en compte tous les patients et ne pas se baser que sur des moyennes.

## II. Différences champ libre – casque

Dans un premier temps, les différences champ libre – casque ont été calculées chez tous les patients en soustrayant les seuils au casque des seuils en champ libre.

Ensuite, une moyenne de ces différences fut effectuée pour chaque fréquence chez les trois groupes. Voici les résultats obtenus :



Figure 10 : Moyennes des différences champ libre – casque pour les trois groupes.

Dans les fréquences graves, la différence champ libre – casque est positive, ce qui signifie que les seuils obtenus en champ libre sont supérieurs à ceux au casque, et ce, chez les trois groupes. La différence à 3000Hz passe négative, puis redevient positive à partir de 4000 Hz chez le groupe T et A. Cependant, on remarque une grosse différence d'environ 10dB à partir de 3000Hz pour le groupe B où les seuils au casque sont moins bons, alors qu'on observe l'inverse pour le groupe A et B sur ces mêmes fréquences.

Pour confirmer ces observations, j'ai réalisé une comparaison de moyennes. Après vérification de la normalité de mes variables, j'ai décidé de faire tous les tests en non paramétrique, certaines variables respectant la loi normale et d'autres non. De ce fait,

j'ai utilisé le test de Wilcoxon Mann-Whitney pour comparer mes moyennes. L'hypothèse nulle est la suivante : « la moyenne de la différence champ libre – casque n'est pas significativement différente ». Le risque d'erreur a été fixé à 5%. Une p-value < 0.05 conduit au rejet de l'hypothèse nulle. Au contraire une p-value > 0.05 ne permet pas de conclure sur une différence significative des moyennes.

Fréquences/ Groupes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
T/A	0.672	0.846	0.973	0.393	0.972	0.368	0.978	0.34	0.097
T/B	0.754	0.34	0.385	0.084	0.987	0.933	0.015	0.031	0.283
A/B	0.574	0.642	0.434	0.704	0.805	0.547	0.033	0.024	0.05

Figure 11 : Comparaison des moyennes des différences champ libre – casque entre les trois groupes.

Ce test met en évidence une différence significative entre les moyennes des groupes T/B et A/B à partir de 3000 Hz. Cependant, on ne peut pas conclure quant à une différence significative entre T/A, ce qui signifie que seul le groupe B dévie significativement. Notre observation précédente est donc bien confirmée.

Pour compléter l'analyse et visualiser l'ensemble des sujets, deux nuages de points ont été réalisés, dans deux bandes fréquentielles : de 250 à 1000 Hz pour les fréquences « graves » et de 1500 Hz à 4000 Hz pour les fréquences « aigues ». Pour ce faire, les quatre seuils les composant (par exemple sur 250-1000 Hz, on a quatre fréquences : 250, 500, 750 et 1000) ont été moyennés. L'abscisse correspond à la moyenne des quatre différences de la mesure In-situ Phonak – casque, et l'ordonnée correspond à la moyenne des quatre différences pour la mesure champ libre – casque.

### Dans les fréquences aigus (1500-4000 Hz) :

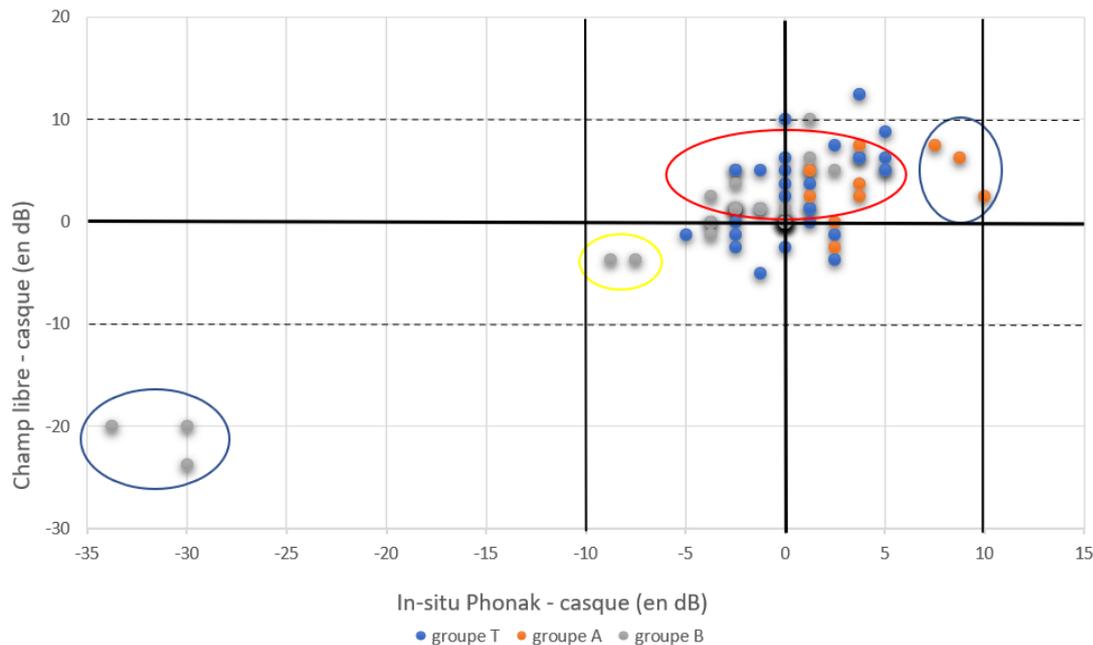


Figure 12 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence champ libre – casque chez les trois groupes dans les aigus (1500-4000 Hz).

Sur cette représentation, les trois groupes sont représentés par des points de couleurs différents. Si l'on se concentre sur la différence champ libre – casque (en ordonnée), tous les points à l'exception de quelques-uns, se situent dans la plage des +/-10dB (en pointillés). Les points se situant au-dessus de l'origine (cercle rouge), la différence champ libre – casque est positive, ce qui rejoint les résultats décrits précédemment. Cependant, trois oreilles (entourées en bleu) possèdent une différence de -20dB, signifiant que les seuils en champ libre sont 20dB meilleurs qu'au casque.

Si l'on regarde maintenant l'axe des abscisses qui correspond à la différence In-situ Phonak – casque, les différences sont également comprises entre -10 et +10dB. On retrouve les patients dont l'In-situ est meilleure que le casque, entourés en jaune (groupe B) et à contrario les sujets dont l'In-situ est moins bonne que le casque, entourés en bleu, qui appartiennent au groupe A. On observe également pour nos trois

oreilles déviantes, une différence négative entre l'In-situ Phonak et le casque, plus importante (entre -30 et -33dB) qu'entre le champ libre et le casque.

### Dans les fréquences graves (250-1000 Hz) :

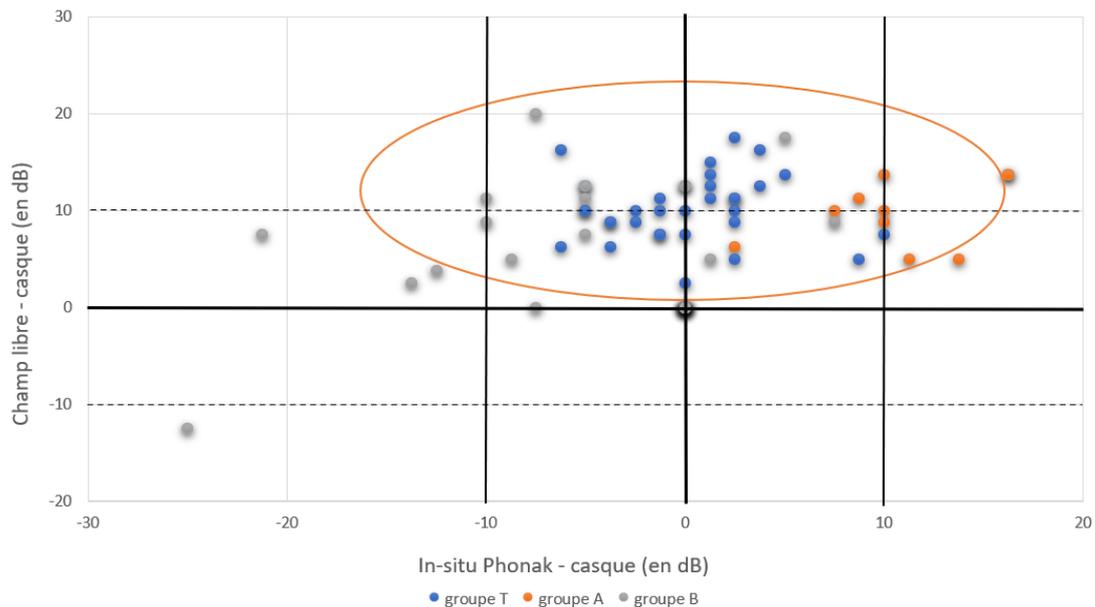


Figure 13 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence champ libre – casque chez les trois groupes dans les graves (250-1000 Hz).

Premier constat par rapport aux aigus : la dispersion des points est plus importante, ce qui s'explique par les propriétés physiques des ondes sonores. Les effets d'événements et de fuites acoustiques sont plus importants, impactant plus fortement les résultats. Malgré cela, on retrouve une différence champ libre – casque positive (cercle orange), supérieure à 10dB pour la moitié des patients environ, avec un maximum à 20dB.

### III. Différences In-situ – casque

Les différences In-situ Phonak – casque ainsi que les différences In-situ Starkey – casque vont maintenant être observées, pour les trois dômes utilisés. Les seuils Phonak ont été relevés avec les paramètres acoustiques des patients (embout et paramètres acoustiques dans le logiciel propre à chaque sujet). Pour Starkey, les trois In-situ ont été réalisées avec comme paramètres acoustiques dans le logiciel « embout

sur mesure occlus ». C'est pourquoi, pour rendre plus comparable les seuils Starkey des seuils Phonak, une correction des seuils Starkey a été appliquée, afin de prendre en compte les effets d'événements et de fuites acoustiques selon le dôme. Elle est issue d'une étude réalisée par le fabricant Starkey, dont les résultats m'ont été fournis par Christophe MICHEYL.

Fréquences (Hz)/ Dôme	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000
OUVERT	-37.7	-26.3	-18.5	-12	-6.3	+2.7	+3.2	-2.7
FERMÉ	-25.7	-14.9	-8.6	-4.6	-2.7	+1.9	+2.5	-2.8
POWER	-19.6	-11.3	-7	-3.8	-2	+1.9	+2.1	-2.9

Figure 14 : Tableau de conversion appliqué aux seuils In-situ Starkey selon les dômes et fréquences.

## 1. Dôme ouvert

Le groupe « AT1 » correspond au groupe A testé avec la première taille de dôme et le groupe « AT2 » correspond à la deuxième taille utilisée, qui je le rappelle, correspond à une taille au-dessus de la première. Afin de pouvoir visualiser les deux tailles de dômes sur le nuage de points, j'ai soustrait 0.8 à la moyenne des différences du deuxième dôme, les résultats obtenus étant très proches.

La comparaison des moyennes n'a pas montré de différences significatives entre les deux tailles de dômes du groupe A. C'est pourquoi, seules les données du premier dôme ont été utilisées pour les autres comparaisons. Le test a montré des différences significatives entre les groupes T/B et AT1/B sur presque toutes les fréquences et sur les fréquences extrêmes entre T et AT1.

Si l'on regarde maintenant le nuage de points :

**Dans les fréquences aigues (1500-4000 Hz) :**

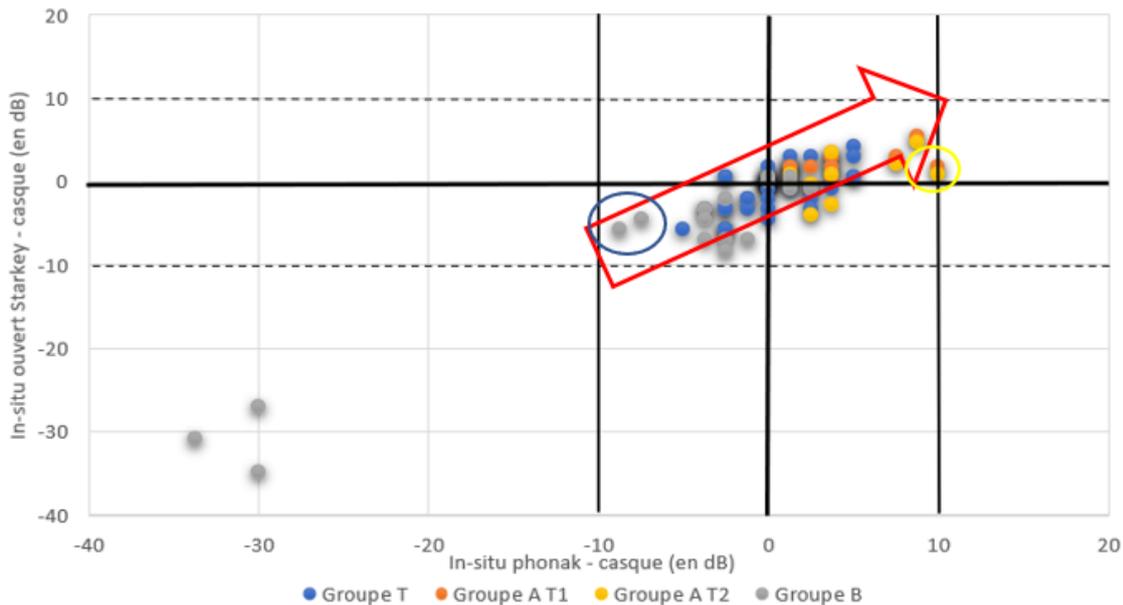


Figure 15 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence In-situ ouvert Starkey – casque chez les trois groupes dans les aigus (1500-4000 Hz).

L'abscisse représente les différences In-situ Phonak – casque et l'ordonnée les différences In-situ ouvert Starkey – casque. Ici, les différences In-situ Starkey ouvert – casque se trouvent entre -10 et +10dB à l'exception de trois oreilles dont la différence est d'environ -30dB. Les seuils au casque étant soustraits à l'In-situ sur les deux axes, on peut voir une corrélation entre les In-situ Phonak et Starkey (flèche rouge), ce qui veut dire que les seuils ne sont pas si différents entre les deux marques. On remarque cependant, que la différence In-situ – casque est légèrement moins importante avec Starkey. Par exemple, pour le point entouré en jaune, on note une différence de +10dB avec Phonak alors qu'elle est d'environ +3dB chez Starkey. De même pour les deux points entourés en bleu mais dont les différences sont négatives. Enfin, les points représentant les deux tailles de dôme chez le groupe A sont très proches, confirmant la non-significativité trouvée via la comparaison précédente.

## Dans les fréquences graves (250-1000 Hz) :

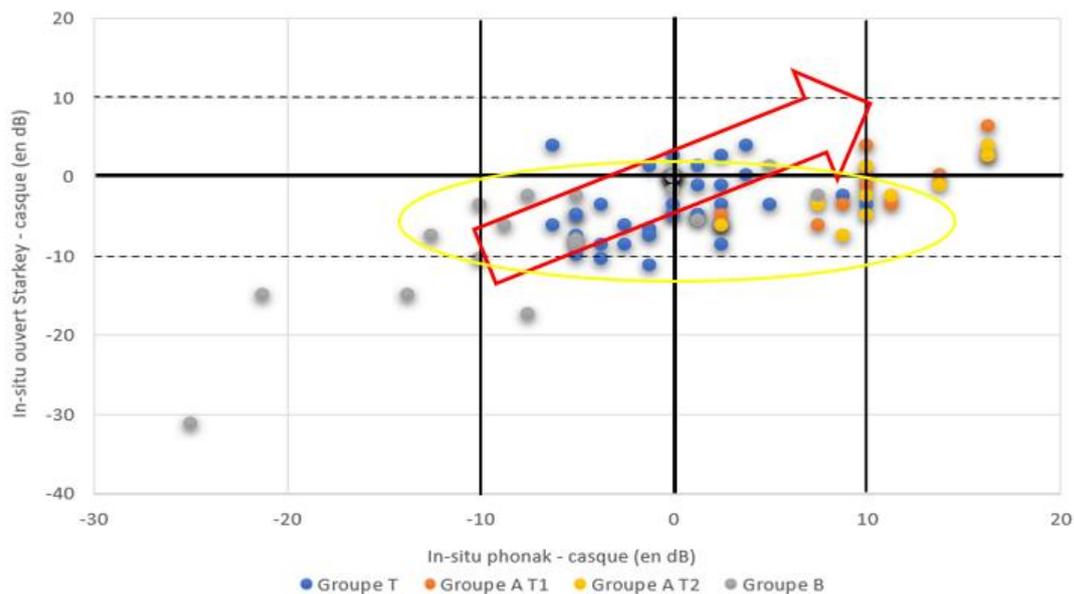


Figure 16 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence In-situ ouvert Starkey – casque chez les trois groupes dans les graves (250-1000 Hz).

Comme tout à l'heure, la dispersion est plus importante que dans les aigus. La différence In-situ Starkey – casque est négative pour la plupart des patients (cercle jaune). Les sujets du groupe A ayant des différences In-situ Phonak – casque importantes ont des différences moins importantes avec Starkey, comme dans les aigus. En effet, alors qu'on observe des différences allant jusqu'à +15dB chez Phonak, celles-ci sont d'environ +5dB chez Starkey pour les oreilles en question. La corrélation, bien qu'existante pour le groupe T, est beaucoup moins visible pour le groupe A et B. Enfin, il y a peu de différence entre les deux tailles de dômes pour le groupe A.

## 2. Dôme fermé

Les points « AT2 » ont été décalés pour faciliter la lecture du graphique de la même manière que précédemment pour le dôme ouvert.

Des différences significatives sont observables lors du test de comparaison de moyennes entre T/B et A1/B sur le 1000Hz et les fréquences >3000 Hz. Aucune

significativité n'est à souligner entre T/A1 ainsi qu'entre A1/A2 comme pour le dôme ouvert.

Regardons maintenant le nuage de points :

**Dans les fréquences aigues (1500-4000 Hz) :**

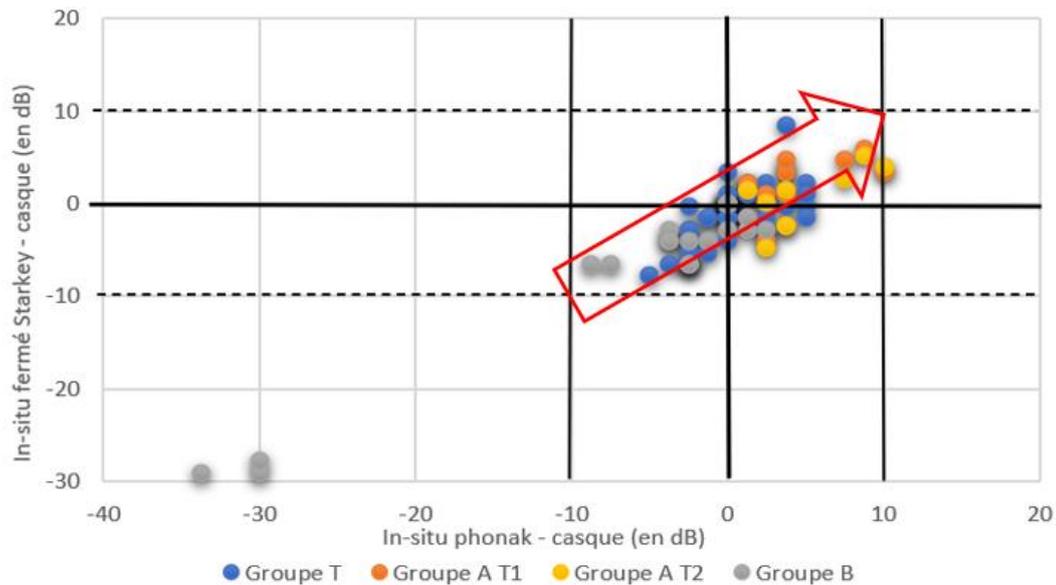


Figure 17 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence In-situ fermé Starkey – casque chez les trois groupes dans les aigus (1500-4000 Hz).

Les différences avec ce dôme ne dépassent pas les +/-10dB. On remarque peu de différences sur ce graphique par rapport au dôme ouvert si ce n'est une meilleure homogénéité des points autour de l'origine, signifiant que les seuils en In-situ se rapprochent des seuils au casque.

### Dans les fréquences graves (250-1000 Hz) :

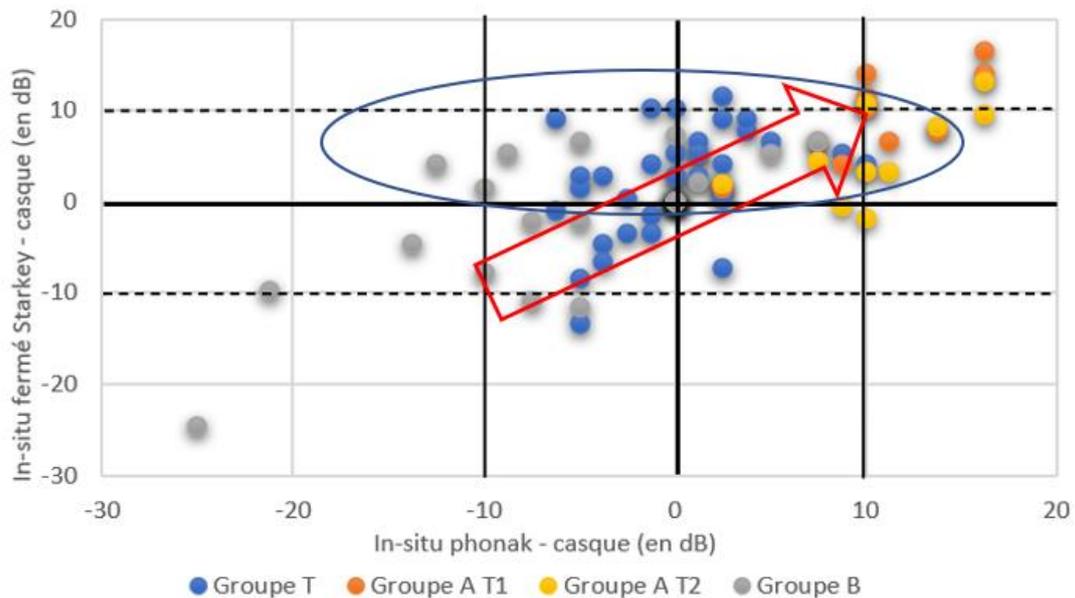


Figure 18 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence In-situ fermé Starkey – casque chez les trois groupes dans les graves (250-1000 Hz).

Contrairement au dôme ouvert, une grande partie des points (cercle bleu) se situent désormais au-dessus de l'axe des abscisses. Les sujets du groupe A possédant une différence de +15dB en Phonak, ont également une différence supérieure à 10dB avec Starkey contrairement au dôme ouvert où elle était moins importante. Enfin, la corrélation est présente malgré une déviation plus importante des résultats.

### 3. Dôme power

Le test de Wilcoxon indique des différences significatives dans les fréquences aigues, seulement entre T/B et A/B. Aucune significativité n'est mise en avant dans les fréquences inférieures à 1000Hz avec ce dôme.

### Dans les fréquences aigues (1500-4000 Hz) :

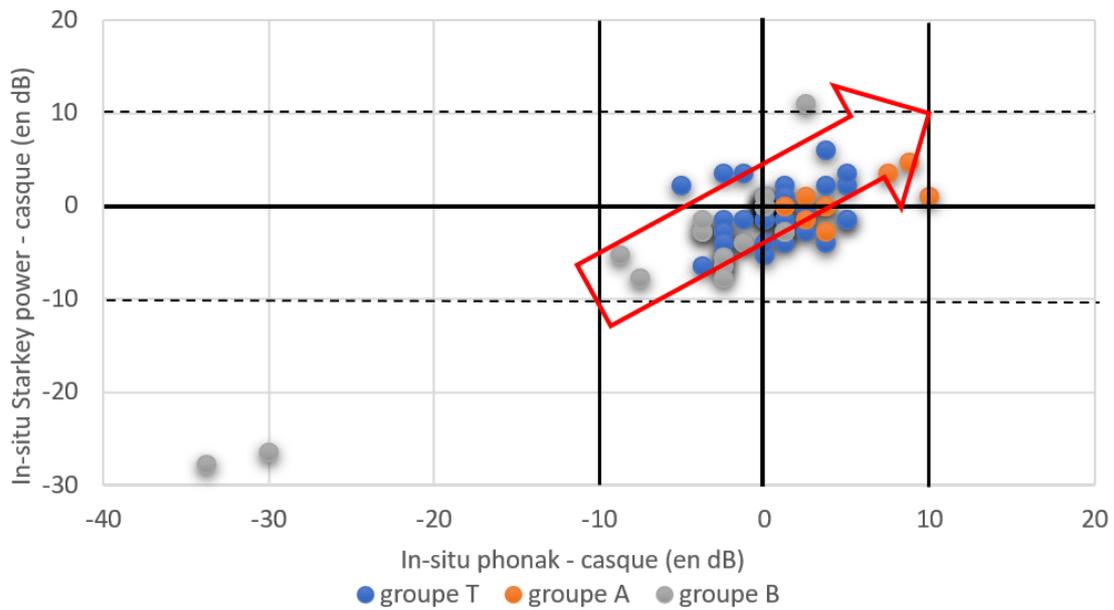


Figure 19 : Différence In-situ Phonak – casque par rapport à la différence In-situ power Starkey – casque chez les trois groupes dans les aigus (1500-4000 Hz).

Là encore, on retrouve une très bonne homogénéité des points autour de l'origine.

La corrélation entre les deux mesures d'In-situ est forte, très peu de points s'écartent de la droite, avec des différences n'excédant pas les 10dB.

### Dans les fréquences graves (250-1000 Hz) :

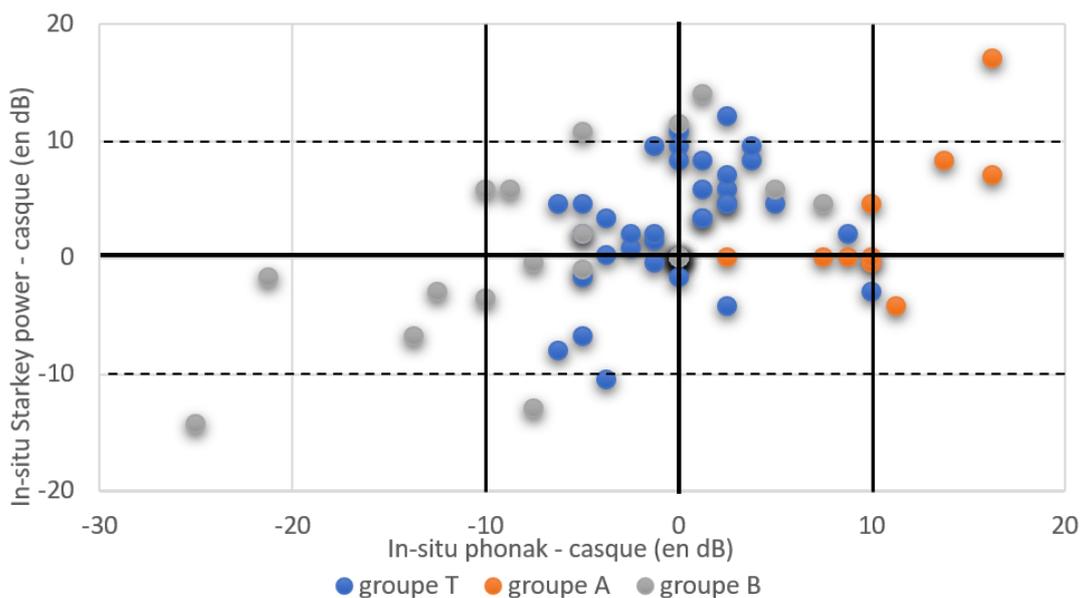


Figure 20 : Différence In situ Phonak – casque par rapport à la différence In situ power Starkey – casque chez les trois groupes dans les graves (250-1000 Hz).

Le dôme power utilisé est un ancien modèle de chez Starkey, décliné en seulement deux tailles. Sa forme très ronde et sa matière le rend peu déformable. Je n'ai utilisé que celui de petite taille, l'autre étant beaucoup trop gros pour les patients. On voit une grande dispersion du nuage de points pour ce dôme. Chez certains patients, il était très efficace et obturant mais pour d'autres, il était compliqué de boucher correctement l'oreille.

#### IV. Influences du changement de dôme sur les résultats

Dans le but de voir si le changement de dôme améliore les seuils auditifs significativement, les moyennes des différences In-situ Starkey – casque au sein des groupes ont été comparées, pour les trois dômes testés. Les seuils Starkey utilisés pour cette comparaison sont ceux avant la conversion appliquée. Ce test revient directement à comparer les seuils In-situ entre eux pour les différents dômes, les résultats au casque étant soustraits à chaque fois. L'identification des dômes est la suivante : O pour dôme ouvert, F pour dôme fermé et P pour dôme power.

##### 1. Groupe T :

Fréquences/ Dômes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
O/F	0.039	0.088	0.026	0.03	0.016	0.042	0.507	0.891	0.810
O/P	<0.001	0.001	<0.0001	<0.001	0.003	0.056	0.282	0.281	0.397
F/P	0.116	0.123	0.095	0.209	0.417	0.811	0.708	0.390	0.473

Figure 21 : Comparaison des seuils obtenus pour les trois dômes chez le groupe T.

On remarque des seuils significativement différents ( $p < 0.05$ ) entre le dôme ouvert et fermé ainsi qu'entre le dôme ouvert et power dans les fréquences inférieures à

1500Hz. Cependant, il n'y a pas de différence entre les seuils obtenus avec le dôme fermé et le dôme power.

Le graphique ci-dessous représente les seuils moyens obtenus pour le groupe témoin selon les trois dômes. On remarque une amélioration d'environ 5dB en moyenne lorsque l'on passe d'un dôme ouvert à un dôme fermé et 5dB également entre un dôme fermé à un dôme power pour les fréquences inférieures à 1500 Hz ce qui rejoint les résultats de la comparaison de moyennes.

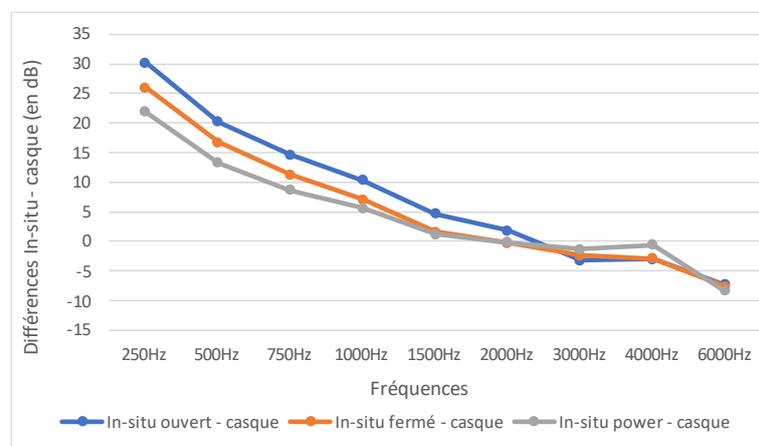


Figure 22 : Moyennes des différences In-situ – casque pour les trois dômes chez le groupe témoin.

## 2. Groupe A :

Pour ce groupe, plusieurs seuils ressortent significatifs du test de comparaison, mais les fréquences concernées sont isolées. On peut donc dire que le changement de dôme a peu affecté les résultats en In-situ. En regardant le graphique ci-dessous, les fréquences supérieures à 2000Hz ne sont pas impactées. Visuellement, le dôme power s'éloigne des autres avec une amélioration de 10dB par rapport au dôme ouvert et 5dB avec le dôme fermé. Comme pour le nuage de points, il n'y a pas de différences entre les deux tailles de dômes ouverts et fermés.

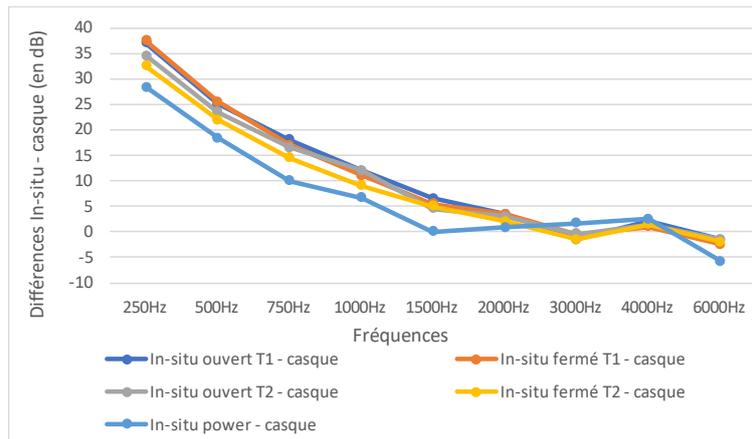


Figure 23 : Moyennes des différences In-situ – casque pour les trois dômes chez le groupe A.

### 3. Groupe B :

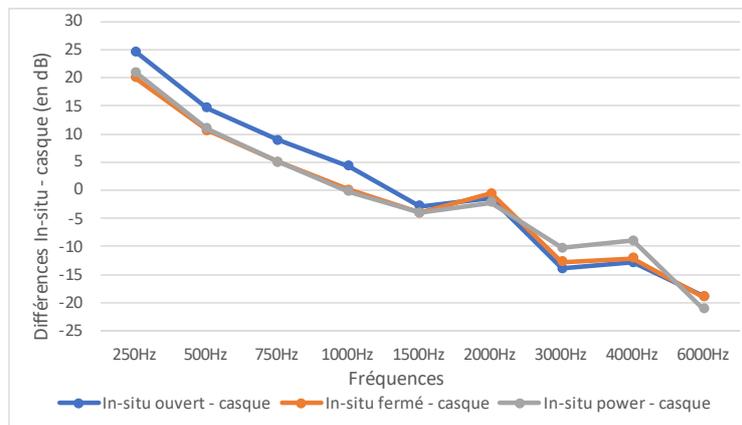


Figure 24 : Moyennes des différences In-situ – casque pour les trois dômes chez le groupe B.

Aucune différence significative n'est observable via le test de comparaison des seuils. Graphiquement, on remarque une différence entre le dôme ouvert et les dômes fermés et power sur les fréquences inférieures à 1500 Hz, mais elle n'est pas significative.

### V. Anatomie des oreilles

Les empreintes réalisées chez les patients ont permis de recueillir plusieurs données anatomiques des conduits, à savoir :

- La longueur, de l'entrée du méat acoustique jusqu'à la membrane tympanique à l'aide d'un tube sonde lyric. Afin d'être rigoureux et de pouvoir comparer les mesures, le tube sonde était toujours placé de la même manière, sur la paroi interne du conduit. En reportant cette longueur sur les empreintes, la longueur totale de l'oreille, du tragus à la membrane pouvait être déduite.
- La hauteur et la largeur au positionnement du dôme dans le CAE. Pour cela, le câble écouteur associé au dôme étaient positionnés sur l'empreinte et les mesures étaient relevées à l'aide du pied à coulisse.
- Lors des mesures en dôme power, si l'écouteur ressortait de l'oreille, c'est-à-dire quand le câble écouteur n'était pas plaqué contre la peau des sujets, la longueur du dépassement était relevée. En effet, si l'écouteur n'est pas bien placé, le volume de la cavité résiduelle est directement impacté.

La distance ainsi que le volume de la cavité résiduelle ont été calculés. D'après la littérature, le volume d'un cône associé à une base elliptique a été préféré au rayon du conduit. En effet, il devient de plus en plus étroit vers la membrane et la section où se situe le dôme n'est pas circulaire (34, Keefe).

## 1. Longueur et longueur résiduelle du CAE

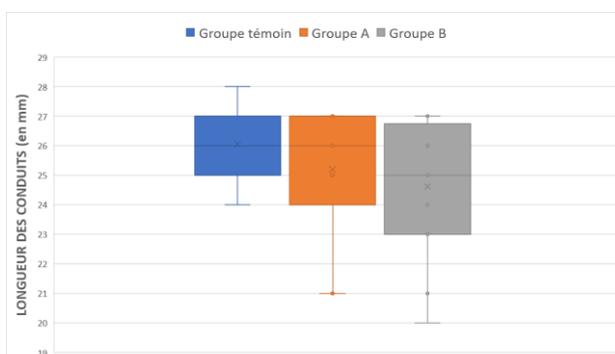


Figure 25 : Longueur des conduits auditifs externes (méat-tympan, en mm), relevée via le tube sonde selon les groupes.

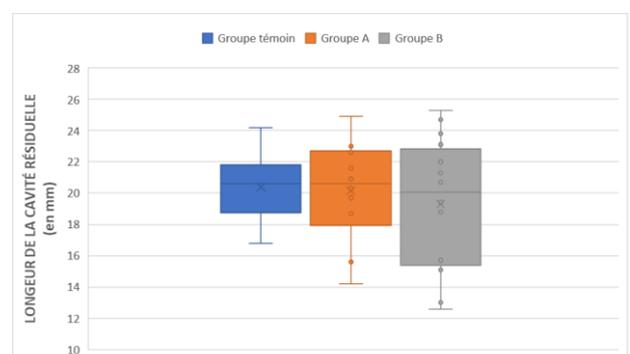


Figure 26 : Longueur de la cavité résiduelle (en mm) en fonction des groupes.

La mesure de la longueur du CAE à l'aide du tube sonde lyric montre des disparités entre les groupes. Avec une moyenne de 26.06mm, le groupe témoin possède les conduits les plus longs avec un maximum à 28mm. Ceux du groupe A sont un peu moins longs avec une moyenne de 25,20mm. Enfin, le groupe B présente des longueurs comprises entre 20 et 27mm, avec une moyenne de 24.63mm. Quant à la variabilité des mesures, elle est plus importante pour les groupes A et B.

Contrairement à la longueur des conduits, la longueur résiduelle n'est pas significativement différente ( $p$ -value  $>0.05$ ). Effectivement, les moyennes sont assez proches, à savoir 20.39mm pour le groupe témoin, 20.15mm pour le groupe A et 19.30mm pour le groupe B. Cependant, les écarts-types sont plus importants pour le groupe A et B.

## 2. Volume résiduel du CAE

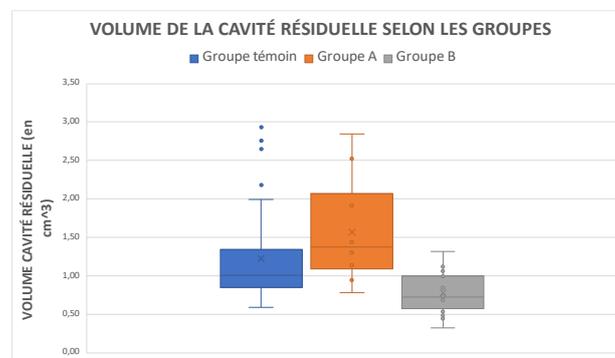


Figure 27 : Volume de la cavité résiduelle (en  $\text{cm}^3$ ) selon les groupes.

Le volume résiduel est significativement différent entre les groupes T/B et A/B mais pas entre T/A ( $p$ -value  $<0.05$ ). En effet, le graphique ci-dessus montre des volumes résiduels bien plus importants pour le groupe A avec un maximum à plus de  $2\text{cm}^3$ . Au contraire, l'ensemble des sujets du groupe B possèdent un volume inférieur à  $1.5\text{cm}^3$  avec une moyenne de  $0.59\text{cm}^3$ .

### **3. Hauteur et largeur au point du dôme**

La hauteur et la largeur des conduits au niveau du dôme dans le conduit ont également été observées dans cette étude. Les variables ne suivant pas la loi normale, le test de comparaison de moyenne de Wilcoxon Mann-Whitney a été utilisé.

Le test montre une différence significative de la hauteur entre les groupes T/A et A/B et une différence notable de la largeur entre les groupes T/B et A/B. Si l'on regarde les moyennes, les conduits du groupe T ont une hauteur d'environ 9.2mm et une largeur de 6mm. Le groupe A possède des conduits plus hauts (11.2mm) et un peu plus larges (6.45mm). Le groupe B est celui dont la hauteur et la largeur sont les moins importantes (8.49mm et 4.67mm respectivement).

### **VI. Relation entre le volume et les différences In-situ – casque**

Afin d'observer si les facteurs anatomiques peuvent influencer sur la différence de résultats, une régression entre le volume de la cavité résiduelle et les différences In-situ – casque a été réalisée. La méthode de régression utilisée (régression de Deming) permet de prendre en compte les erreurs d'estimation des variables (35, XLstat). Ici, l'erreur liée à la variable X= volume de la cavité résiduelle a été fixée à +/-1mm. Les mesures sur empreintes ont été relevées via un pied à coulisse, avec une précision au dixième de millimètre. Cependant, des incertitudes liées à la manipulation persistent d'où la prise en compte d'une éventuelle variation dans la corrélation. Le volume résiduel a été exprimé en décibels ( $20 \cdot \log_{10}(\text{volume})$ ) afin de le rendre comparable à la différence In-situ – casque qui est également en décibels. Pour cela, les différences In-situ Stakey ouvert – casque et In-situ Starkey fermé – casque ont été moyennées afin d'observer d'un côté les dômes ouverts et fermés et d'un autre côté les dômes power.

## 1. Dans les fréquences aigues

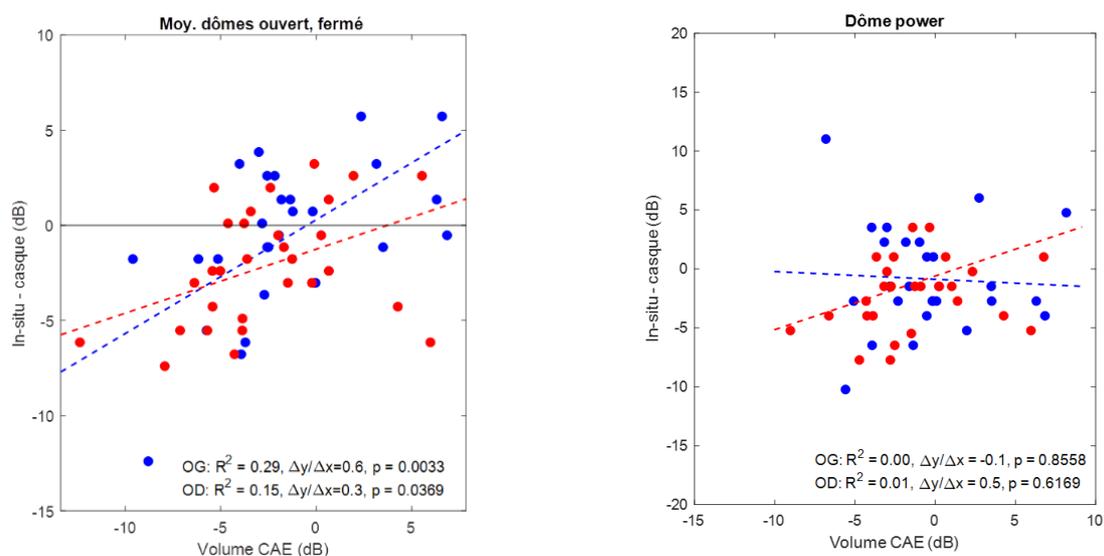


Figure 28 et 29 : Corrélation entre le volume résiduel du CAE et les différences In-situ – casque pour les dômes ouverts/fermés à gauche et dômes power à droite dans les aigus.

Les points bleus correspondent aux oreilles gauches et les points rouges aux oreilles droites. Dans les aigus, une corrélation s'observe entre les variables pour les dômes ouverts et fermés ( $p < 0.05$ ). Le coefficient de détermination  $R^2$  indique que les différences In-situ – casque s'expliquent à hauteur de 29% par le volume sur l'oreille gauche et 15% sur l'oreille droite. Concernant le dôme power, la corrélation n'est pas significative ( $p > 0.05$ ), avec des valeurs de  $R^2$  nulles. Ce qui signifie que le volume résiduel du conduit, en présence de dômes power, ne peut expliquer la différence entre les résultats du casque et de l'audiométrie In-situ.

## 2. Dans les fréquences graves

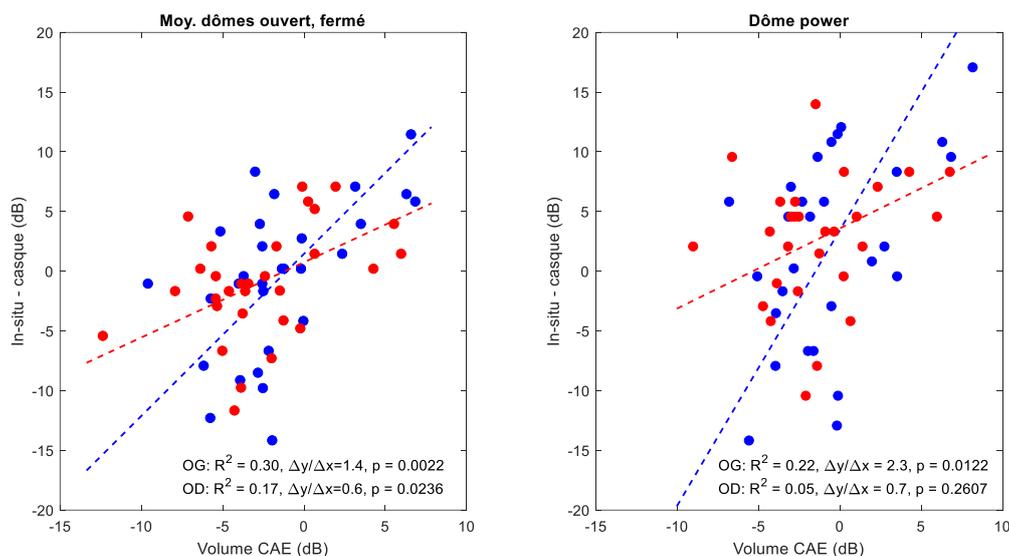


Figure 30 et 31 : Corrélation entre le volume résiduel du CAE et les différences In-situ – casque pour les dômes ouverts/fermés à gauche et dômes power à droite dans les graves.

Comme précédemment, la corrélation est présente pour les dômes ouverts et fermés ( $p < 0.05$ ). Les valeurs du  $R^2$  sont similaires à celles observées dans les fréquences aiguës, 0.30 à gauche et 0.17 à droite. Concernant le dôme power, le test est significatif, mais seulement pour l'oreille gauche ( $p < 0.05$ ) avec un  $R^2$  de 0.22.

## D) DISCUSSION

### I. Différences champ libre – casque

Premièrement, nous avons vu qu'il y avait une différence entre les résultats obtenus en champ libre et au casque (figure 10). En effet, les seuils mesurés en champ libre sont plus importants sur toutes les fréquences à l'exception du 3000 Hz pour le groupe A et B, et sur les fréquences supérieures à 3000 Hz chez le groupe B où la différence est négative. Cette différence peut être expliquée par un bruit de fond élevé dans la cabine ou par un problème de calibration d'un des deux transducteurs. Effectivement, la différence devrait être nulle si la calibration est correcte. Donc soit l'intensité des

stimuli délivré par le champ libre était trop faible, soit le bruit de fond de la cabine gênait la perception des signaux sonores, ou soit le casque était mal calibré et délivrait des intensités trop fortes. Si ce phénomène avait été observé que chez le groupe B, la question d'un potentiel lien avec l'anatomie des conduits aurait pu se poser puisqu'on sait que la pression est inversement proportionnelle au volume (33, Valente) et que le volume résiduel est moindre pour ce groupe. Mais ici, cette différence est présente chez tous les patients.

Trois oreilles possèdent des différences champ libre – casque comprises entre -20 et -30 dB dans les aigus, cet écart se retrouvant également dans la différence In-situ Phonak – casque et In-situ Starkey – casque pour tous les dômes testés. Le casque étant déduit de l'In-situ et du champ libre, une explication possible pourrait venir de celui-ci. En effet, les seuils au casque sont pour ces trois oreilles très inférieurs au champ libre et à l'In-situ. Une raison possible serait un collapsus de l'oreille c'est-à-dire une fermeture ou un écrasement de celui-ci, causé par le positionnement du casque sur l'oreille. Ce phénomène appelé « effondrement des conduits » a déjà été observé dans la littérature (Dodelé, 23) et touche principalement les fréquences aiguës. Il est dû à une dégénérescence des fibres dans le tissu élastique du derme de l'oreille et provoque une élévation des seuils, plus marquée sur les aigus, pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de décibels. Une solution possible comme l'a fait Clodna dans son étude, est d'insérer un spéculum dans le conduit avant de mettre le casque sur les oreilles, permettant de le garder ouvert pendant le test (36, Clodna F.). Si on regarde les empreintes de ces trois oreilles, elles présentent toutes une similitude au niveau de l'entrée du CAE. La hauteur est beaucoup plus importante que la largeur, le conduit est donc très fin. Cette configuration anatomique favorise l'écrasement de celui-ci lors de l'installation du casque.

Dans les basses fréquences, la dispersion des résultats entre le casque et le champ libre peut s'expliquer par de nombreux facteurs en plus de la calibration. La fonction de transfert est maximale sur les fréquences 2000-4000Hz. Cependant, celle-ci peut varier d'un sujet à un autre selon l'anatomie du CAE. En effet, la longueur, la forme de l'entrée du conduit auditif, la taille et la forme de la conque ainsi que les effets de diffraction de la tête entrent en jeu pour le test en champ libre. Une étude a montré que chez les femmes, une modification du volume n'influence pas sur la fonction de transfert du champ libre alors que chez les hommes ayant de gros conduits, la magnitude de cette fonction est diminuée sur les fréquences 3 à 8kHz, et plus élevée sur 1.6 et 2 kHz (37, Hellström P.). La fonction de transfert se trouve donc décalée vers les fréquences graves pour les conduits plus volumineux. Vient s'ajouter à cela des différences d'impédance au niveau du tympan, influençant la pression transmise. L'hypothèse de départ ne peut être validée puisque des différences ont été observées entre la mesure au casque et en champ-libre chez tous nos patients, sûrement dûes à une calibration incorrecte d'un des transducteurs.

## **II. Différences In-situ – casque**

Pour les trois dômes testés, les résultats obtenus sont plus dispersifs dans les graves. En cause, le dôme présent dans le conduit qui se comporte comme un obstacle ainsi que les propriétés des basses fréquences. Possédant de grandes longueurs d'ondes, les graves ont plus de facilité à ressortir de l'oreille. Cependant, selon l'anatomie des conduits et l'impédance du système, un même dôme n'aura pas le même comportement chez tous les patients. La place du dôme dans l'oreille, son orientation par rapport à l'axe du tympan ainsi que la distance et le volume résiduel sont à prendre en compte dans les différences.

Dans les basses fréquences, on voit que la différence In-situ Starkey – casque, qui est négative en dôme ouvert devient positive en dôme fermé et power. Cette observation s'explique par les conversions que nous avons appliquées aux seuils Starkey afin de prendre en compte les effets d'événements et de fuites acoustiques. Celles-ci sont très larges et peuvent légèrement sur ou sous-estimer les fuites par rapport au casque, selon l'embout utilisé. De plus, elles ont été définies par rapport aux inserts et non au casque, dont le volume résiduel est différent. Notre hypothèse est validée, nous observons des différences entre l'In-situ et le casque, plus au moins importantes selon les fréquences et les caractéristiques anatomiques du patient. Cela rejoint l'étude de Voss qui, en comparant les résultats via trois traducteurs différents (casques et inserts), conclue que les pressions acoustiques dépendent des dimensions du CAE et de l'impédance de l'oreille au niveau de la membrane tympanique (Voss SE, 22).

En ce qui concerne la corrélation entre l'In-situ Phonak et Starkey, nous avons vu qu'il y avait une différence In-situ – casque moins importante avec Starkey. Les mesures Phonak ont été réalisées avec les paramètres acoustiques et les dômes des patients, qui pouvaient être un dôme ouvert, fermé, cap dôme ou un Cshell. Pour Starkey, les dômes ont été séparés pour l'analyse des résultats contrairement à Phonak. En effet, tous les types de dômes Phonak ont été regroupés dans la différence In-situ Phonak – casque. Les effets d'événements et de fuites acoustiques étant corrigés différemment selon le dôme et les marques, il est normal d'observer des différences. A noter qu'elles restent très faibles puisque peu de points divergent sur le nuage de points, avec une différence n'excédant jamais les 10dB dans les aigus. De plus, la forme de l'écouteur, différente chez les deux marques, ainsi que son orientation dans le conduit peuvent également avoir un impact sur l'écart observé. Malgré le changement du filtre et du dôme pour les appareils des patients, les écouteurs Phonak n'étaient pas neufs,

contrairement aux Starkey utilisés, ce qui peut expliquer une différence plus importante entre l'In-situ Phonak et le casque qui est diminuée avec Starkey. S'ajoute à cela une différence de matière entre les dômes des deux marques, les Starkey sont globalement plus rigides. Nous avons émis comme hypothèse que les seuils Phonak et Starkey ne présentaient pas de différences. Nous avons noté un écart de quelques décibels entre les deux marques, cependant toujours inférieur à 10dB. Au vu des facteurs cités ci-dessus, nous ne pouvons pas entièrement valider cette hypothèse. Il faudrait, pour la conforter, refaire l'In-situ Phonak avec des écouteurs neufs et réaliser les mesures avec une seule marque de dôme.

### **III. Changement de dôme au sein des groupes**

La mesure des trois In-situ a permis d'observer l'influence du dôme sur les résultats. Les fréquences aiguës (>1500 Hz) sont très peu impactées par ce changement. En effet, aucune différence significative au sein des groupes n'a été mise en évidence par le test de comparaison. On note quand même graphiquement une légère amélioration de la différence In-situ – casque avec le dôme power pour les trois groupes sur les fréquences 3000Hz et 4000Hz. Les fréquences graves (<1500Hz) quant à elles, sont impactées selon le dôme utilisé. Pour le groupe témoin, une significativité est à relever entre le dôme ouvert et fermé ainsi qu'entre le dôme ouvert et power (figure 22). Effectivement, le dôme power améliore les seuils auditifs d'environ 5dB en moyenne par rapport au dôme fermé et de 10dB environ par rapport au dôme ouvert (figure 21). Ces mesures rejoignent les résultats du mémoire de Clément : plus on bouche l'oreille, moins la différence entre l'In-situ et le casque est élevée. Ce qui s'explique par une baisse des fuites acoustiques, les fréquences graves restent dans le conduit.

Chez le groupe A, le test n'a pas mis en évidence de différences significatives entre les différents dômes, sur l'ensemble des fréquences. Nous nous attendions plutôt à

voir une amélioration des seuils, proportionnelle à l'obstruction de l'oreille comme pour le groupe témoin. Cependant le graphique 23 permet de noter une différence de 10dB entre le dôme ouvert et le dôme power. De plus, il n'y a pas de différences entre les deux tailles concernant les dômes ouverts et fermés, ce qui a été confirmé par une non-significativité lors du test de comparaison des moyennes. La deuxième taille de dôme étant plus grosse que la première, nous nous attendions à ce que les seuils soient meilleurs avec celle-ci, avec une réduction des fuites acoustiques. Une explication possible résulte sur le fait que les patients du groupe A possèdent des conduits plus hauts et larges. Le conduit n'étant pas circulaire, si la hauteur et/ou la largeur du conduit est plus importante que la hauteur et/ou la largeur du dôme malgré une taille au-dessus, l'air a pu s'échapper.

Pour finir, le groupe B ne présente pas de différences significatives, sur l'ensemble des fréquences, quels que soient les dômes (figure 24). Malgré cela, une différence de 5dB pour le dôme ouvert par rapport aux dômes fermés et power est visible dans les fréquences inférieures à 1500 Hz. Les seuils pour les fréquences 3000Hz et 4000Hz sont légèrement meilleurs avec le dôme power comme on a pu le voir pour le groupe A mais sans significativité lors du test de comparaison. Une non significativité des différences In-situ – casque pour ce groupe peut s'expliquer par le comportement du dôme dans l'oreille. Contrairement au groupe A où le conduit pouvait être plus large et/ou haut que les dômes, l'effet inverse a pu se produire chez ces sujets. Si le dôme ouvert est plus haut et/ou large que le conduit, le dôme se comporte comme un dôme fermé, les parois du conduit ayant fermées les aérations présentent sur le dôme. Effectivement, l'analyse des caractéristiques anatomiques de ce groupe a montré une moyenne de la hauteur et de la largeur moins importante que le groupe A. C'est pourquoi, il est normal de ne pas trouver de différences entre le dôme ouvert et fermé.

Le dôme power utilisé était très rigide, peu déformable et pour certains patients trop gros. Les fuites n'ont pas été bouchées par le dôme d'où la non-significativité entre les dômes fermés et power. L'hypothèse selon laquelle le changement de dôme n'a pas d'effet sur les différences In-situ – casque pour le groupe B est validée. L'hypothèse liée au groupe T pour laquelle le changement de dôme améliore les seuils est également confirmée. Cependant, nous ne pouvons pas valider cette même hypothèse chez le groupe A puisque seulement quelques fréquences isolées sont significatives d'après le test de comparaison de moyennes.

#### **IV. Anatomie des oreilles**

Nous avons remarqué une différence significative de la longueur des CAE. Le groupe B possède des conduits en moyenne moins longs que le groupe T et A. Cependant, la longueur résiduelle n'est pas significativement différente contrairement à la longueur mesurée avec le tube sonde lyric. Si l'on se concentre sur le volume résiduel, le groupe B possède également les conduits les moins volumineux. Le volume étant différent mais pas la longueur résiduelle, cela signifie que la variation du volume est créée par une différence de hauteur et de largeur du CAE. C'est ce qui a été confirmé lors de l'analyse de la hauteur et de la largeur au point du dôme. La hauteur est significativement différente entre les groupes T/A et A/B. Après observation des empreintes, les patients du groupe A possèdent effectivement des hauteurs plus importantes. Ce qui explique en partie les fuites acoustiques observées sur les fréquences graves. La largeur est également significative entre T/B et A/B. De même, l'observation des empreintes montre que les sujets du groupe B ont des conduits très fins. Un dôme ouvert chez un patient du groupe témoin peut se comporter comme un dôme fermé chez un sujet du groupe B au vu de son anatomie particulière. C'est pourquoi on observe de meilleurs seuils pour ce groupe. Notre hypothèse selon

laquelle le volume résiduel du groupe B est inférieur à celui du groupe T et A est validée.

## **V. Relation entre l'anatomie et les résultats obtenus**

Dans les fréquences aiguës, la corrélation entre le volume résiduel et les différences In-situ a montré une relation entre les deux variables pour les dômes ouverts et fermés. Selon la loi de Boyle-Mariotte, le volume occupé par une certaine quantité de gaz est inversement proportionnel à sa pression. Ce qui signifie que  $P = k/V$ , ou  $k$  est une constante dépendante du gaz considéré,  $P$  la pression et  $V$  le volume (38, Boyle-Mariotte). La relation, ici, va dans le sens attendu : plus le volume augmente, plus la pression au tympan délivrée par l'écouteur en In-situ diminue, donc plus la différence In-situ – casque augmente. Le coefficient de détermination  $R^2$  nous indique que les différences sont expliquées à hauteur de 29% du volume pour l'oreille gauche et 15% pour l'oreille droite. D'autres facteurs, dont l'impédance de l'oreille et du transducteur peuvent expliquer une partie des 60% restants. La corrélation ne montre pas de lien pour le dôme power, provoqué par le dôme même. Sa taille et sa rigidité n'ont pas permis de rendre la mesure In-situ la plus précise possible.

Dans les fréquences graves, une corrélation s'observe également pour les dômes ouverts et fermés avec des valeurs de  $R^2$  très similaires. Pour le dôme power, le test est significatif pour l'oreille gauche mais pas l'oreille droite. Ce résultat est à considérer avec précautions, d'autant plus que d'après l'étude réalisée par Noh, il n'y a pas de différence significative du volume entre l'oreille gauche et l'oreille droite (Noh, 39).

Ces résultats rejoignent l'étude de Dodelé qui affirme que plus l'extrémité de l'embout (en ouvert) est proche du tympan, meilleure sera l'amplification. Il ajoute qu'en cas de dôme fermé, plus le volume de la cavité résiduelle diminue, plus l'amplification sera

importante (Dodelé, 23) Nous pouvons donc valider notre hypothèse selon laquelle un lien existe entre le volume résiduel et les différences In-situ – casque.

## **VI. Limites de l'étude**

Le nombre de sujets recrutés pour cette étude s'élève à 30, soit 60 oreilles testées. Les participants ayant été divisés en trois groupes, il aurait été intéressant d'avoir des échantillons plus importants et de tailles équivalentes afin d'être plus représentatif de l'ensemble de la population appareillée.

L'analyse des empreintes fut limitée par la profondeur de celles-ci. Malgré une prise d'empreintes après le second coude, les informations situées entre le coton de l'empreinte et le tympan restent inconnues. L'utilisation du tube sonde lyric a cependant permis de compléter l'empreinte, mais l'inclinaison du tympan rend les mesures moins fiables. Il aurait été préférable de faire les empreintes à l'aide d'un module Otoscan, qui permet de bénéficier de numérisation 3D des oreilles. De plus, afin de définir la longueur résiduelle, l'écouteur utilisé a été positionné sur les empreintes. Ce procédé, plus précis que le calcul, manque néanmoins de précision. Selon la forme des conduits, il est parfois difficile de se repérer.

## **E) CONCLUSION**

L'objectif de cette étude était d'essayer d'expliquer pourquoi certains patients ont des seuils en In-situ meilleurs qu'au casque et quels facteurs pouvaient en être à l'origine. Nous avons pu voir que le changement de dôme n'améliorait pas la différence pour ce groupe, contrairement au groupe témoin. Les dômes sont plus obturants que ce qui est prévu en moyenne par le logiciel de réglages, créant des différences plus importantes par rapport au casque. De plus, un volume résiduel moins important, couplé à des conduits plus hauts et moins larges que la moyenne entraînent un

écrasement des aérations du dôme et donc une amélioration des résultats. Nous avons pu voir des différences de 10dB entre le casque et la mesure In-situ chez certains de ces patients. L'adaptation des aides auditives basée sur le test au casque plutôt qu'avec l'In-situ conduirait donc à un gain variable de 5dB entre les deux procédés, en considérant la méthode du demi-gain pour le calcul du pré réglage. Aussi, le test au casque ne prend pas en compte les facteurs anatomiques et acoustiques liés aux fuites dans les fréquences graves. C'est la raison pour laquelle la mesure In-situ, selon moi, est plus adaptée pour effectuer les pré réglages. Afin de compléter cette étude, il serait intéressant de faire tester et comparer aux sujets, un réglage issu d'un pré réglage casque et un autre issu de la mesure In-situ afin de noter ou non une différence de perception.

## **F) BIBLIOGRAPHIE**

- 1) WIKIPEDIA. Wikipédia : l'encyclopédie libre [en ligne]. « Cornet acoustique », créé le 17/08/2011. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cornet\\_acoustique&oldid=198623764](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cornet_acoustique&oldid=198623764). (Consulté le 05/12/2022)
- 2) Ballachanda, B. B. « Theoretical and Applied External Ear Acoustics ». *Journal of the American Academy of Audiology* 8, no 6 (décembre 1997) : 411-20
- 3) Avillac Marie, Anatomie de l'Oreille externe, cours de première année d'audioprothèse de Lyon, année 2020.
- 4) Sforza, Chiarella, Gaia Grandi, Miriam Binelli, Davide G. Tommasi, Riccardo Rosati, et Virgilio F. Ferrario. « Age- and Sex-Related Changes in the Normal Human Ear ». *Forensic Science International* 187, n° 1-3 (30 mai 2009) : 110.e1-7
- 5) Salvinelli, Fabrizio, Maurizi, Maurizio, Calamita, Simonetta, D'alatri, Lucia, Capelli, Arnaldo and Carbone, Arnaldo (1991) « The External Ear and the Tympanic Membrane ». *A Three-dimensional Study*, *Scandinavian Audiology*, 20 : 4, 253 — 256
- 6) Wayne Staab, « The Human Ear Canal – III ». *HEARING HEALTH AND TECHNOLOGY MATTERS* (23 juin 2014). Disponible sur : <https://hearinghealthmatters.org/waynesworld/2014/human-ear-canal-iii/> (Consulté le 15/11/2022).
- 7) Staab, Wayne. « The Human Ear Canal V » *HEARING HEALTH AND TECHNOLOGY MATTERS* (7 juillet 2014). Disponible sur : <https://hearinghealthmatters.org/waynesworld/2014/human-ear-canal-v/>. (Consulté le 15/11/2022).
- 8) Barnes, Jason, Roy T. Sabo, et Daniel H. Coelho. « A Novel Method to Measure the External Auditory Canal : Normative Data and Practical Implications ». *American Journal of Otolaryngology* 39, n° 2 (avril 2018) : 146-49
- 9) Kruger, B. « An Update on the External Ear Resonance in Infants and Young Children ». *Ear and Hearing* 8, n° 6 (décembre 1987) : 333-36
- 10) Armand Dancer, Patrick Minary. « Gain acoustique de l'oreille externe ». Oreille – Oreille externe. Image extrait de : <http://www.cochlea.eu/oreille-generalites/oreille-externe>. (Consulté le 3 décembre 2022).
- 11) BROCARD C., HAEBERLE J. « La mesure in vivo : philosophie et description, Adaptation et mesure d'efficacité » *Audio infos*, octobre 2011 ; N°164 : p 28 à 34.

- 12) Adessi Christophe, Cours de Physique Acoustique, cours de première année d'audioprothèse, 2020. Extrait du site : <ilm-perso.univ-lyon1.fr/~cadessi/audioP\_Acoustique.html> (consulté le 07/10/2022).
- 13) Sandra GONZALEZ TORRECILLA, « Evaluation de la pression intracrânienne absolue par une technologie non invasive auditive ». Thèse présentée à l'Université de Clermont Auvergne pour l'obtention du grade de DOCTEUR d'Université, spécialités Neurosciences (2019).
- 14) Hemmingsen, Dagny, Niels Christian Stenklev, et Claus Klingenberg. « Extended High Frequency Audiometry Thresholds in Healthy School Children ». International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology 144 (1 mai 2021) : 110686.
- 15) Bacon Nadia, cours d'audiométrie, cours de première année d'audioprothèse, 2020
- 16) Susan E. Voss, J. Rosowski, Saamil N.Merchant, Aaron R. Thornton, Christopher A. Shera, and William T.Peake, « Middle Ear Pathology Can Affect the Ear-Canal Sound Pressure Generated by Audiologic Earphones ». Ears and Hearing, volume 21 (2000), pages 265-274
- 17) Schmuziger, Nicolas, Rudolf Probst, et Jacek Smurzynski. « Test-Retest Reliability of Pure-Tone Thresholds from 0.5 to 16 KHz Using Sennheiser HDA 200 and Etymotic Research ER-2 Earphones ». Ear and Hearing 25, n° 2 (avril 2004) : 127-32.
- 18) Stuart, Andrew, Rob Stenstrom, Cynthia Tompkins, et Sandra Vandenhoff. « Test-Retest Variability in Audiometric Threshold with Supraaural and Insert Earphones among Children and Adults ». Audiology : official organ of the International Society of Audiology 30 (1 février 1991) : 82-90.
- 19) O'Brien, Anna, Gitte Keidser, Ingrid Yeend, Lisa Hartley, et Harvey Dillon. « Validity and Reliability of In-Situ Air Conduction Thresholds Measured through Hearing Aids Coupled to Closed and Open Instant-Fit Tips ». International Journal of Audiology 49, n° 12 (décembre 2010) : 868-76.
- 20) Cirić, Dejan G., et Dorte Hammershøi. « Coupling of Earphones to Human Ears and to Standard Coupler ». The Journal of the Acoustical Society of America 120, n° 4 (octobre 2006) : 2096-2107.
- 21) Barlow, Christopher, Lee Davison, Mark Ashmore, et Ray Weinstein. « Amplitude Variation in Calibrated Audiometer Systems in Clinical Simulations ». Noise & Health 16, n° 72 (octobre 2014) : 299-305.
- 22) Voss, S. E., J. J. Rosowski, C. A. Shera, et W. T. Peake. « Acoustic Mechanisms That Determine the Ear-Canal Sound Pressures Generated by Earphones ». The Journal of the Acoustical Society of America 107, n° 3 (mars 2000) : 1548-65.

23) Léon DODELE, « Les corrections acoustiques de la courbe de réponse ». *Cahier de l'audition*, numéro 5, volume 26 septembre/octobre 2013, pages 7-22.

24) Tokar-Prejna, S., et J. Meinzen-Derr. « Relationship between Transducer Type and Low-Frequency Hearing Loss for Patients with Ventilation Tubes ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 70, n° 6 (1 juin 2006) : 1063-67.

25) Bhatt, Ishan. « Supra-aural transducer-related artifact contributes to overestimation of noise-induced hearing loss ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 143 (1 avril 2018) : 2055-58.

26) Smith-Olinde, Laura, Nannette Nicholson, Courtney Chivers, Patricia Highley, et D Williams. « Test–Retest Reliability of In Situ Unaided Thresholds in Adults ». *American journal of audiology* 15 (1 juillet 2006) : 75-80.

27) KUK Francis, PhD « In-Situ Thresholds for Hearing Aid Fittings ». *The Hearing Review* (1 novembre 2012). Disponible sur : <<https://hearingreview.com/hearing-products/accessories/earmolds/in-situ-thresholds-for-hearing-aid-fittings-november-2012-hr>> (Consulté le 05/12/2022).

28) Pedersen, Jenny Nesgaard. « The Inside Scoop on In-Situ Testing ». *AudiologyOnline* a continued family site (19/03/2012). Disponible sur : <<https://www.audiologyonline.com/articles/inside-scoop-on-in-situ-771>> (Consulté le 11/10/2022).

29) Sarah I. et Christophe M., *Audiométrie in-vivo de Starkey : une flexibilité et une précision accrue*, (20 octobre 2022). Disponible sur : [www.starkeypro.com](http://www.starkeypro.com)

30) LEMASSON Jean-Baptiste, « Introduction à l'appareillage en 2020 », cours de première année d'audioprothésiste à Lyon, année 2020.

31) Daban, Nicolas. « Comparaison entre la mesure du RECD et l'audiométrie in situ dans le cadre de la méthodologie DSL » *Médecine humaine et pathologie*. 2013. Hal-01866855f

32) Clément KOSINSKI, « Audiométrie in-situ, effets anatomiques et embouts ». Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Etat d'Audioprothésiste, Université Claude Bernard Lyon 1, 2020.

33) Valente Michael, Lisa G Potts, L Maureen Valente, William Vass, et Joel Goebel. « Intersubject Variability of Real-Ear Sound Pressure Level : Conventional and Insert Earphones » (1994). Publications. Paper 18.

34) Keefe, Douglas H., Jay C. Bulen, Kathy Hoberg Arehart, et Edward M. Burns. « Ear-canal impedance and reflection coefficient in human infants and adults ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 94, n° 5 (novembre 1993) : 2617-38.

- 35) Regression de Deming, Xlstats. Disponible sur : <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/deming-regression> (consulté le 15/01/2023)
- 36) Cliodna F. O Mahoney and Linda M. Luxon (1996). Misdiagnosis of hearing loss due to ear canal collapse : a report of two cases. The Journal of Laryngology & Otology, 110, pp 561-566 doi :10.1017/S0022215100134279
- 37) Hellström P. The relationship between sound transfer functions and hearing levels. Hearing Research 88 (1995) 54-60
- 38) WIKIPEDIA. Wikipédia : l'encyclopédie libre [en ligne]. Loi de Boyle Mariotte, créé le 13/03/2004. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Boyle-Mariotte](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Boyle-Mariotte) (consulté le 20/01/2023)
- 39) Noh, Heil, et Dong-Hee Lee. « Direct Measurement of Ear Canal Volume in a Pediatric Population : Can We Explain Its Individual Variation in Terms of Age and Body Weight ? » International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology 76, n° 5 (1 mai 2012) : 658-62. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2012.01.035>. (Consulté le 10/10/2022).

## G) ANNEXES

1- Comparaison des moyennes de la différence In-situ Starkey dôme ouvert –  
casque.

Fréquences/ Groupes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
T/AT1	0.015	0.062	0.132	0.506	0.243	0.374	0.212	0.008	0.008
T/B	0.032	0.017	0.011	0.035	0.243	0.073	0.001	<0.001	<0.001
AT1/B	<0.001	0.001	0.006	0.072	0.019	0.016	0.001	<0.001	0.002
AT1/AT2	0.147	0.674	0.587	0.913	0.322	0.7	0.708	0.885	1

2- Comparaison des moyennes de la différence In-situ Starkey dôme fermé –  
casque.

Fréquences/ Groupes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
T/A1	0.287	0.887	0.947	0.875	0.885	0.195	0.467	0.614	0.462
T/B	0.464	0.144	0.073	0.008	0.057	0.853	0.004	0.014	0.055
A1/B	0.14	0.410	0.214	0.043	0.11	0.228	0.005	0.028	0.044
A1/A2	0.803	0.360	0.679	0.936	0.499	1	0.997	0.423	0.323

3- Comparaison des moyennes de la différence In-situ Starkey dôme power –  
casque.

Fréquences/ Groupes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
T/A	0.398	0.319	0.750	<0.001	0.864	0.713	0.083	0.313	0.317
T/B	0.907	0.375	0.143	0.025	0.779	0.263	0.004	0.013	<0.001
A/B	0.360	0.128	0.257	0.167	0.832	0.337	0.002	0.007	0.016

4- Comparaison des seuils obtenus pour les trois dômes chez le groupe A.

Fréquences/ Dômes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
O/F	0.704	0.929	0.847	0.848	0.883	<0.001	0.708	0.714	0.741
O/P	0.069	0.116	0.045	0.137	0.044	0.210	0.316	0.009	0.233
F/P	0.064	0.079	0.052	0.0223	0.081	0.210	0.316	0.009	0.233

5- Comparaison des seuils obtenus pour les trois dômes chez le groupe B.

Fréquences/ Dômes	250Hz	500Hz	750Hz	1000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz
O/F	0.502	0.318	0.263	0.105	0.131	0.980	0.922	0.926	0.714
O/P	0.633	0.283	0.112	0.074	0.598	0.611	0.368	0.616	0.426
F/P	0.858	0.919	0.690	0.869	0.404	0.587	0.39	0.50	0.563

6- Comparaison des moyennes de la hauteur et de la largeur chez les trois groupes.

Caractéristiques au point du dôme / groupes	Hauteur	Largeur
T/A	0.01	0.281
T/B	0.429	0.002
A/B	0.006	0.002