



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale -  
Pas de Modification 2.0 France (CC BY-NC-ND 2.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr>

Université Claude Bernard Lyon 1



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

---

**Directeur Docteur Xavier PERROT**

---

**LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RÉGLAGES POUR L'ÉCOUTE DE LA  
MUSIQUE**

MEMOIRE présenté pour l'obtention du

**DIPLÔME D'ÉTAT D'AUDIOPROTHÉSISTE**

par

PASKO Marie

Autorisation de reproduction

LYON, le 14 octobre 2016

**Stéphane GALLEGO**  
Directeur Délégué à l'Enseignement

N° 671



Président  
**Pr Frédéric FLEURY**

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

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

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

Secrétaire Général  
**M. HELLEU Alain**

## Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est  
Directeur  
**Pr. ETIENNE Jérôme**

U.F.R d'Odontologie  
Directeur  
**Pr. BOURGEOIS Denis**

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  
**Dr Xavier PERROT**

Comité de Coordination des  
Etudes Médicales (CCEM)  
**Pr ETIENNE Jérôme**

## 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**

Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education

Directeur

**M. MOUGNIOTTE Alain**

UFR de Sciences et Technologies

Directeur

**M. DE MARCHI Fabien**

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 à remercier tout d'abord mon maître de stage et de mémoire, Monsieur Stéphane GALLEGO, pour sa présence, son investissement, son accompagnement permettant ainsi l'élaboration de ce mémoire au sein de son laboratoire Audition conseil « Entendre et Comprendre ». Je le remercie également pour toutes les connaissances et l'aide qu'il a pu m'apporter afin de pouvoir réaliser cette étude.

Je voudrais également remercier Monsieur David COLIN qui a réalisé le logiciel permettant d'effectuer les tests.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Fabien SELDRAN pour sa lecture attentive et les conseils qu'il a pu m'apporter.

Je remercie également toute l'équipe des laboratoires Audition Conseil de Lyon pour leur chaleureux accueil, particulièrement Mademoiselle Camille GRANIER audioprothésiste D.E pour ses connaissances, son soutien et ses conseils et pour son aide dans la recherche des patients à tester.

J'aimerais ensuite remercier toutes les personnes ayant participé à mes tests notamment mes camarades d'audioprothèse et du cursus musique/musicologie permettant ainsi la réalisation de cette étude.

Pour finir, je tiens à remercier toute ma famille et mes amis pour leur soutien incommensurable.

# SOMMAIRE

## Introduction

### I. Partie théorique

#### 1. PERCEPTION DE LA HAUTEUR TONALE

1.1 Codage tonotopique

1.2 Codage temporel

1.3 La perception de l'intensité et son influence sur la tonie

1.4 Les troubles de la perception de la hauteur tonale liées à une surdité de perception endocochléaire

#### 2. APPROCHE DE LA PERCEPTION MUSICALE

2.1 Définition de la musique

2.2 Les intervalles et création de la gamme tempérée

2.2.1 La gamme tempérée

2.2.2 Le cent et le savart

2.2.3 La perception de l'octave

- Elargissement de l'octave

- L'Echelle de mel

2.3 Différences spectrales entre la parole et la musique

#### 3. CODAGE DE LA TONIE ET SURDITÉ

3.1 L'impact des mécanismes centraux sur la tonie

3.2 Une distorsion de tonie : la diplacousie

## Partie expérimentale

### II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 1. SUJETS TESTÉS

#### 2. MATÉRIEL UTILISÉ

2.1 Comparaisons des différents réglages utilisés pour l'élaboration des tests

#### 3. DÉROULEMENT DES TESTS RÉALISÉS

3.1 Tests subjectifs : écoutes musicales

3.2 Tests d'équilibre de tonie à résultats quantitatifs

### III. RÉSULTATS

#### 1. AUDIOMÉTRIE TONALE LIMINAIRE

#### 2. TESTS SUBJECTIFS

#### 3. TESTS D'ÉQUILIBRE DE TONIE

#### 4. ÉQUILIBRE DE TONIE AVEC DES SUJETS NORMOENTENDANTS

#### MUSICIENS ET NON-MUSICIENS

### IV. DISCUSSION

### V. CONCLUSION

## INTRODUCTION

Il arrive que des malentendants puissent se plaindre de la qualité d'écoute de la musique avec les appareils auditifs. Il peut parfois s'agir d'une déformation sonore. Les notes de musique peuvent être entendues comme étant fausses selon certains patients. L'appareillage du musicien peut s'avérer compliqué, demandant une qualité sonore musicale irréprochable afin que celui-ci puisse exercer correctement son métier (Chasin et Russo, 2004).

Cependant, des distorsions de perception de la hauteur tonale peuvent empêcher une bonne écoute de la musique. Un pré-réglage comme celui d'un fabricant ne corrige pas ce phénomène avec l'amplification apportée. C'est pourquoi nous allons nous demander si les propriétés audiométriques peuvent avoir une influence sur l'ampleur des distorsions de tonie et s'il est possible d'effectuer un réglage permettant de compenser ces distorsions causées par une perte auditive afin d'avoir une meilleure écoute musicale avec des aides auditives.

Dans une première partie, nous rappellerons les différents facteurs de codage de la hauteur tonale. Nous pourrions rapprocher ceci avec la perception de la musique pour pouvoir enfin parler de la perception de la hauteur tonale affectée par une perte auditive.

La deuxième partie concernera l'expérimentation, le but étant de tester l'équilibre de la tonie avec différents réglages dans le but de savoir si un réglage peut améliorer la qualité d'écoute musicale avec aides auditives.



# I. PARTIE THÉORIQUE

## 1. Perception de la hauteur tonale.

### 1.1 Codage tonotopique

Le codage tonotopique est aussi appelé théorie de la place. Georg von Békésy (1960) a travaillé sur un modèle de la cochlée visant à montrer qu'à l'écoute d'un son pur, les vibrations de la périlymphe mettent en mouvement la membrane basilaire dans une zone spécifique selon la fréquence du son pur. Les hautes fréquences se situent dans la partie basale de cette membrane, et les basses fréquences au niveau de l'apex. Ceci implique que les neurones répondent préférentiellement à une fréquence caractéristique selon leur position sur la membrane basilaire. Cette organisation tonotopique s'effectue également au niveau du cortex auditif primaire situé dans le lobe insulaire. Chaque fréquence a une zone qui lui est propre dans ce cortex, néanmoins cela reste une organisation complexe et propre à chacun.

Le modèle de Békésy est insuffisant pour expliquer la finesse d'un tel codage. En effet, nous n'arrivons pas à expliquer la précision du lieu du pic de la membrane basilaire causé par le stimulus. Le modèle de Békésy explique la tonotopie passive, c'est-à-dire sans l'intervention des cellules ciliées externes. Cette étude ayant été effectuée sur des cadavres d'éléphants, la tonotopie active ne pouvait être observée.

La tonotopie active représente le modèle précédemment décrit avec la motilité des cellules ciliées externes. Ces cellules ont pour rôle d'accorder et amplifier le mouvement de la membrane basilaire. Elles permettent le codage des 60 premiers décibels, ainsi que l'amélioration de la résolution fréquentielle. Les cellules ciliées externes amplifient la zone spécifique à la fréquence du son pur entendu et affinent ce lieu ou le pic de résonance de cette membrane se situe, expliquant ainsi cette

finesse recherchée. Lorsque ces cellules entrent en action, elles décalent de quelques millimètres le lieu d'oscillation de la membrane basilaire vers l'apex.

## 1.2 Codage temporel

La perception de la hauteur tonale ne se résume pas seulement à la théorie de la place. Au niveau d'une fibre nerveuse constituant le nerf auditif et à l'écoute d'un son pur, le neurone émet des potentiels d'action de la même manière synchronisée que la fréquence de la stimulation acoustique. Ce phénomène se nomme « phase locking ». Cependant, un potentiel d'action ne peut en suivre un autre qu'après un temps défini (5ms) : c'est la période réfractaire relative. C'est le temps de la restauration de la valeur de repos d'une cellule après un potentiel d'action émis. Si la fréquence devient trop élevée, la fibre ne pourra pas conduire d'autres potentiels d'action, celle-ci étant déjà dépolarisée. Toute stimulation est donc inefficace : c'est la période réfractaire absolue. Le phénomène de phase locking a donc des limites au delà d'une certaine fréquence. A partir d'un son pur supérieur ou égal à environ 1000Hz, une fibre ne suffit plus pour effectuer cette synchronisation de décharge avec le stimulus. D'autres fibres sont ainsi recrutées pour être en phase avec cette onde de propagation périodique. Weber et Bray en 1930 ainsi que Moore en 1997 ont montré que jusqu'à 4000 voire 5000 Hz, l'ensemble des fibres répondant à la stimulation acoustique se retrouve en phase avec le stimulus en rassemblant toutes les réponses de chaque fibre.

Nous avons vu que deux codages coexistaient pour permettre la perception de la hauteur tonale (la tonie). Or on remarque que le codage temporel est efficace pour un son pur inférieur ou égal à 4 ou 5 kHz. Effectivement, ce système prédomine pour la perception d'un son pur grave jusqu'à 1000 Hz. A partir de cette fréquence, jusqu'à 4000 Hz, le codage temporel et tonotopique contribuent tous les deux à la

perception de la tonie. Au-delà, il y a prédominance du dernier système de codage cité.

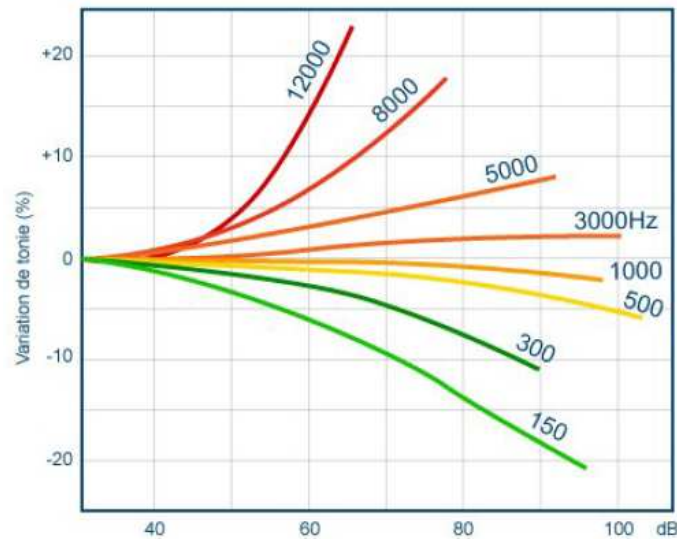
Selon Oxenham (2008), les malentendants privilégieraient ces indices temporels pour la compréhension par rapport aux malentendants. Pour Heinz (2010), le renforcement du codage temporel chez le malentendant pourrait s'expliquer par un nombre de fibres recrutées plus important du fait de la perte des cellules ciliées externes et de l'élargissement des filtres auditifs.

### 1.3 La perception de l'intensité et son influence sur la tonie

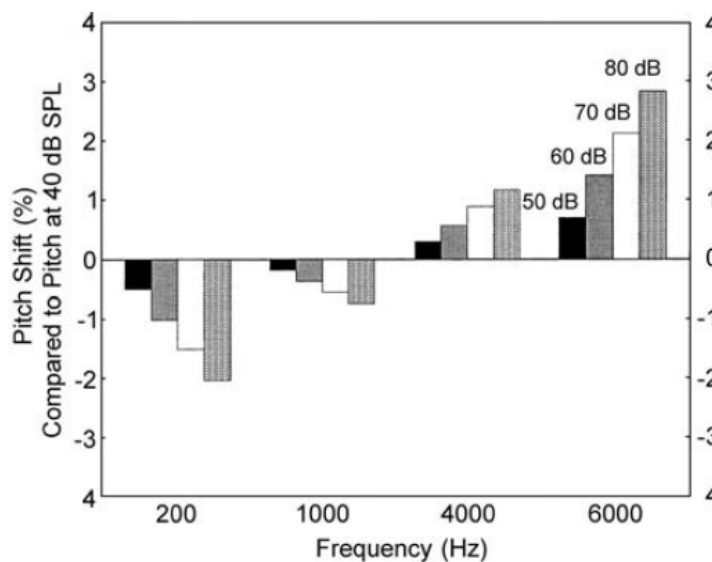
L'intensité sonore est codée grâce à de multiples systèmes au niveau de l'oreille interne. Lorsqu'un son pur de forte intensité se présente, l'amplitude des mouvements de la membrane basilaire s'accroît. En revanche, les cellules ciliées externes ne jouent leurs rôles d'amplificateur cochléaire que pour des sons de faibles intensités. Le taux de décharge d'une fibre nerveuse augmente également avec l'intensité. Plus le son sera de forte intensité, plus il y aura de neurones recrutés afin de coder ce dernier. Il existe également différents types de fibres nerveuses codant pour des intensités différentes (fibres à seuil bas, médium et haut). L'intensité d'un son pur croît également avec le nombre de fibres nerveuses recrutées. Au seuil de perception, au niveau du nerf cochléaire, on observe que seule la fibre de la fréquence du son pur entendu émet des potentiels d'action. Si on augmente l'intensité de ce son, la membrane se soulèvera plus et les fibres nerveuses codant pour les fréquences voisines seront également recrutées jusqu'à élargir considérablement la bande fréquentielle dans laquelle les neurones sont recrutés.

L'intensité peut avoir un effet sur la tonie au-delà 40-50 dB. En 1986, Burns avait observé cette influence de l'intensité sur la perception de la hauteur tonale. En

psychoacoustique, plus cette valeur augmentera, plus le changement de la hauteur tonale perçue sera important pour certaines fréquences. Les graves seront ressentis comme étant plus graves qu'ils ne sont en réalité et les aigus encore plus aigus. Les fréquences médium restent par contre inchangées. (cf figures 1.1a et 1.1b).



**Figure 1.1a :** Variation de tonie en fonction de l'intensité (source : cochlea.eu)



**Figure 1.1b :** Variation de tonie en fonction de l'intensité (Gelfand, 2009)

#### 1.4 Les troubles de la perception de la hauteur tonale liées à une surdité de perception endocochléaire

Les cellules ciliées externes jouent un rôle dans la perception de la hauteur tonale. Le pic du mouvement de la membrane basilaire est déplacé de quelques millimètres vers l'apex grâce à ces cellules permettant de percevoir ainsi ce son pur un peu plus grave. S'il y a une altération des cellules ciliées externes, il n'y a pas l'amplification du pic de la membrane basilaire ainsi que le décalage vers l'apex (figure 1.2). Nous retournons donc au mécanisme passif de la tonotopie comme décrit dans le modèle de Bekesy (1960).

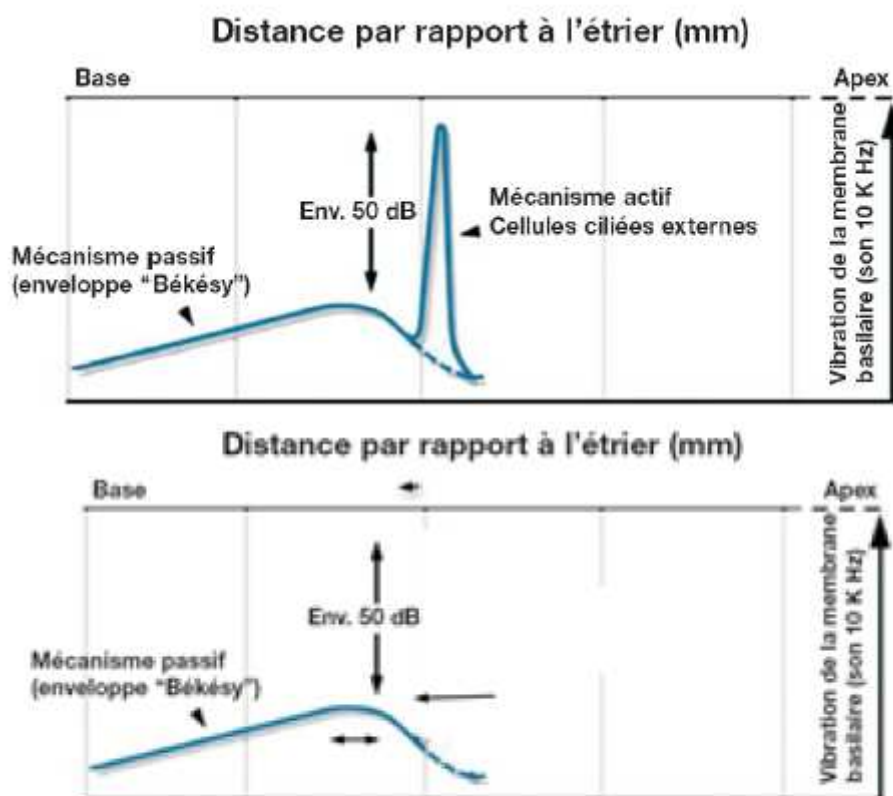


Figure 1.2 : L'influence des cellules ciliées externes sur la membrane basilaire.

En l'absence de cellules ciliées externes, les filtres cochléaires sont ainsi plus larges, le son est perçu moins nettement mais également plus aigu que chez le normoentendant. Lorsqu'un son de forte intensité est émis, celui-ci est donc perçu plus aigu, les cellules ciliées externes ne jouant plus leur rôle. Ce phénomène est appelé « basal shift », ce qui signifie décalage de la fréquence caractéristique vers la base de la cochlée.

## **2. Approche de la perception musicale**

### 2.1 Définition de la musique

La musique est un art permettant de combiner des sons. Ces sons dits complexes périodiques en musique seront appelés des notes possédant chacune une fréquence déterminée. Un son complexe périodique est composé de plusieurs sons de fréquences différentes. La plus basse appelée la fondamentale imposera la hauteur tonale de la note. Ce son est superposé par d'autres sons multiples de la fondamentale, ce sont les harmoniques. L'intensité est décroissante selon la grandeur du multiple. Ces harmoniques ont un classement selon la proximité de la fondamentale, l'harmonique la plus proche sera l'harmonique d'ordre 1, puis la suivante d'ordre 2 et ainsi de suite. La fondamentale et l'ensemble des harmoniques constituent ce qui s'appelle le timbre de l'instrument de musique. Une séquence de plusieurs sons de hauteurs différentes jouée de manière cohérente peut constituer une mélodie (Oxenham, 2012).

### 2.2 Les intervalles et création de la gamme tempérée

#### 2.2.1 La gamme tempérée

Un intervalle est l'écart entre deux notes jouées en même temps ou séparément. En acoustique, c'est le rapport entre deux fréquences différentes en hertz. Ceci peut

produire une sensation d'écoute agréable. On dira donc que l'intervalle est « consonant. » Dans le cas contraire, il est « dissonant ». En physique, un intervalle sera perçu plus harmonieux si les maxima coïncident. L'octave est ce qui constitue en musique l'intervalle le plus grand. Ayant pour valeur le double de la fréquence de la première note jouée, on pourra donc dire que cet intervalle est perçu comme le plus harmonieux. En occident, on divise une octave en douze intervalles égaux appelé demi-tons chromatiques, c'est la gamme au tempérament égal ou la gamme tempérée. En musique, on utilise le plus couramment l'échelle diatonique qui est la gamme divisée en 7 intervalles : cinq intervalles dont le rapport entre deux fréquences est de  $9/8$  appelé le ton, et deux intervalles ayant un rapport de  $256/243$  appelé demi ton diatonique. Nous sommes toujours dans la gamme tempérée sachant qu'un ton est équivalent à un demi-ton diatonique ajouté à un demi-ton chromatique, le rapport du demi-ton chromatique ( $2.187/2.048$ ) étant plus important que le demi-ton diatonique. Le demi-ton n'a donc pas pour valeur la moitié d'un ton. Si l'on multiplie la valeur physique de deux demi-tons diatoniques la valeur trouvée ne sera pas celle d'un ton, on appellera cet écart le « comma ». En musique le demi-ton diatonique signifie que la note jouée après la première aura le nom de la note suivant la précédente (do et ré bémol) contrairement à un demi-ton chromatique (do et do dièse). Une oreille très entraînée peut arriver à percevoir la différence entre ces deux intervalles.

### 2.2.2 Le cent et le savart

Le cent et le savart sont des unités qualifiant de très petits intervalles. On peut calculer le nombre de savarts et de cents qui existent entre deux fréquences fondamentales grâce à des formules comprenant le logarithme. On peut avec ces unités de valeurs, calculer un intervalle à l'échelle logarithmique.

Un savart est représenté approximativement comme étant le plus petit intervalle décelable par une oreille entraînée. Inventé par Félix Savart, la formule permettant de trouver le nombre de savarts dans un intervalle entre deux fréquences  $f_2$  et  $f_1$  exprimé en hertz est la suivante :

$$N = 1000 \times \log_{10} (f_2/f_1)$$

Sachant que le rapport d'une octave est de 2 :1 , on trouvera donc qu'il y a 301 savarts dans cet intervalle. Le demi-ton tempéré a une valeur de 25 savarts.

Le cent est l'unité de mesure des graduations d'un accordeur électronique. Un cent représente la plus petite valeur d'intervalle utilisée. C'est le centième d'un demi-ton tempéré. Ayant 12 demi-tons égaux dans une gamme tempérée, on peut considérer qu'il y a 1200 cents dans une octave et qu'un demi-ton comprend 100 cents.

### 2.2.3 La perception de l'octave

#### 2.2.3.1 Effet d'élargissement de l'octave

Ward en 1954 a affirmé qu'un individu avait la capacité de reconnaître une octave si les deux fréquences fondamentales sont inférieures à 5000 Hz. Nous avons vu qu'une octave avait pour valeur le double de la fréquence d'un premier son émis. Selon certains auteurs (Ward 1954 ; Walliser 1969 ; Terhardt 1971 ; Sundberg ; Lindqvist 1973 ; McKinney et al 1999), il y aurait un effet d'élargissement de l'octave croissant avec la hauteur de la fréquence. La figure 1.3 nous montre la déviation du rapport 2 :1 qualifiant l'octave en fonction de la fréquence la plus basse de l'octave selon les différents auteurs de cette recherche. Ce rapport pour deux sons de 2000Hz et la fréquence de l'octave perçue serait augmenté d'environ 3%. Cela



confirmerait la limite de détermination d'une octave à 4-5kHz. Pour des sons graves, on remarque que le rapport se rapproche de la valeur théorique. Ce phénomène serait expliqué par la prédominance du codage tonotopique au-delà de 4-5kHz.

FIG. 1

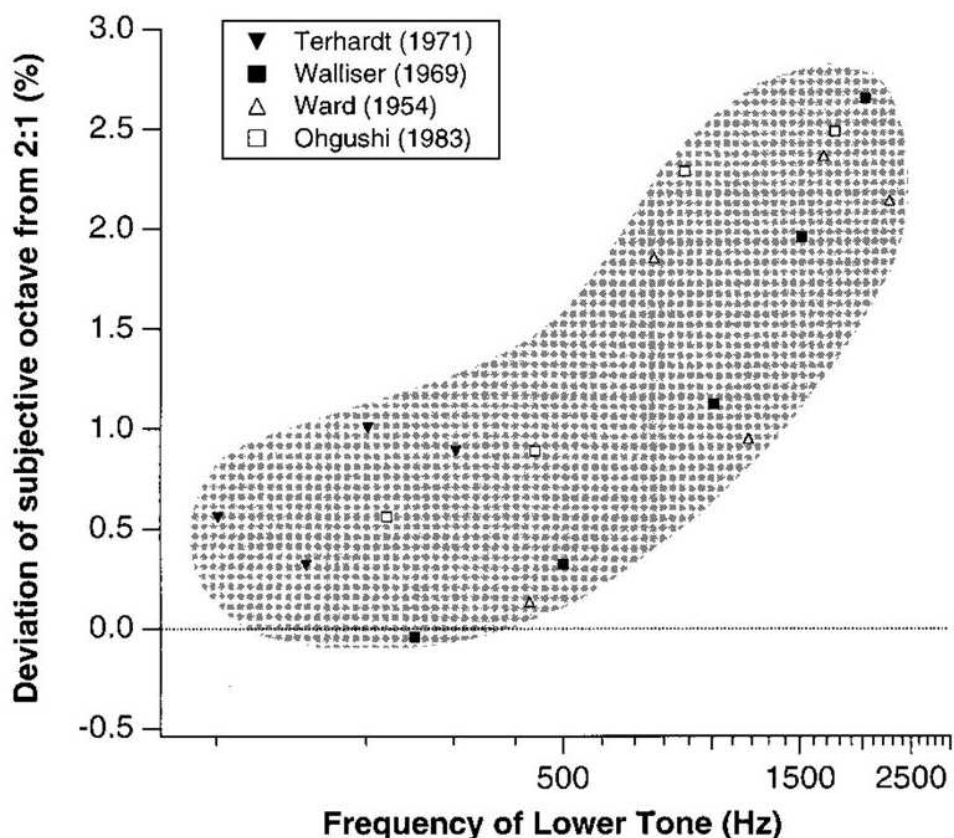


Figure 1.3 : La perception de l'octave en fonction de la fréquence selon Terhardt, Walliser, Ward et Ohgushi. (McKinney et al, 1999)

### 2.2.3.2 L'échelle de mel

Une autre étude a été faite concernant la perception de la hauteur tonale. En 1937, Stevens et al ont proposé une échelle mesurant le doublement de hauteur, le mel. Cette expérience est basée sur cinq sujets ayant eu pour consigne de trouver la moitié de la fréquence pour dix sons de fréquences différentes avec une sonie

constante de 60 dB. Au-delà de 500 Hz, l'octave n'est plus perçue comme étant le doublement de la fréquence. Cette échelle a été conçue de telle manière à ce que 1000 Hz correspondent à 1000 mels. Si on se place sur cette échelle, l'octave sera perçue comme étant le double de la première valeur. La sensation d'un doublement de hauteur pour un son de 1000 mels (1000 Hz) sera 2000 mels représentant 3428 Hz. Un son de 3428 Hz serait donc perçu comme étant deux fois plus aigu qu'un son de 1000 Hz. La sensation de hauteur ou tonie croît donc moins rapidement que la valeur fréquentielle. La formule suivante permet de convertir les Hertz en mel :

$$m = 1127 \times \ln (1 + (f/100))$$

Cependant, cette échelle a fait l'objet de nombreuses critiques. Les notions musicales ne seraient pas en accord avec l'échelle de mel. Ils considéreraient que la musique serait basée sur une échelle différente. Cette échelle a également été critiquée par Greenwood (2004) qui remet en cause la méthode expérimentale de Stevens. Le mel a donc souvent été écarté de la perception musicale. Il a même été supposé que cette échelle serait plus utilisée pour percevoir la hauteur tonale d'un bruit plutôt que des intervalles musicaux (Hartmann, 2004).

### 2.3 Différences spectrales entre la parole et la musique

En acoustique, la fréquence définit la hauteur de la perception du son c'est-à-dire que plus la fréquence est élevée, plus ce son sera perçu aigu.

Le champ auditif nécessaire à la compréhension de la parole est compris entre 250 et 4000 Hz. En musique, ce champ est plus élargi. On peut observer que pour un piano par exemple, la note la plus grave est le « la -2 » ayant pour fréquence 27.5 Hz, et la note la plus aiguë caractérisant de « do 7 » est de 4186 Hz. On constate donc qu'il y a un élargissement de la bande spectrale pour la musique

comparée à la parole notamment dans les graves. Nous parlons uniquement de la fréquence fondamentale, ce qui veut dire que les fréquences supérieures à celle-ci pouvant être perçues par l'oreille humaine, constituent les harmoniques donnant le timbre du son. (Sicot, 2014)

### **3. Codage de tonie et surdité**

#### **3.1 L'impact des mécanismes centraux sur la tonie**

Comme la cochlée, l'aire auditive primaire a une organisation de telle manière à ce que chaque fréquence corresponde à un emplacement particulier dans cette zone selon la hauteur de celle-ci. Le cerveau a la capacité de s'organiser et de se réorganiser via de constantes interactions antérogrades et rétrogrades. Lors du développement cérébral, des connexions entre neurones se créent de manière organisée donnant la fonctionnalité de cette fibre selon son emplacement. Cependant, il peut y avoir une réorganisation de neurones en réponse à une stimulation environnementale. La capacité de réorganisation du système nerveux central selon les afférences et efférences met donc en évidence une plasticité neuronale. Ceci peut avoir lieu dans le cas d'un entraînement ou apprentissage, et d'une privation. Plusieurs expériences ont montré que l'entraînement moteur pouvait favoriser l'apport de connexions neuronales à l'emplacement exact dans les aires motrices correspondant à la zone commandant le membre utilisé pour cet apprentissage. La plasticité neurale a été démontrée dans le cas d'une privation qu'elle soit motrice ou sensorielle. On peut faire le rapprochement avec une perte auditive progressive liée à l'âge avec une perte principalement dans les hautes fréquences. Il y a une réorganisation au niveau du cortex auditif primaire c'est-à-dire que la zone codant initialement pour les fréquences élevées codera pour des fréquences plus basses en particulier autour de la fréquence de coupure, les

fréquences plus hautes n'étant plus stimulées. Cela caractérise une plasticité de privation post-lésionnelle et le phénomène est d'autant plus important que la pente est grande (Thai-Van et al. 2002-2003). On parlera donc d'une réattribution fréquentielle les neurones ayant établi des connexions avec les zones voisines encore stimulées. La tonie dépend donc du système nerveux central.

Cependant, il a été démontré qu'il pouvait y avoir une réversibilité partielle de cette réattribution fréquentielle due au port d'aides auditives à long terme. Les fréquences aiguës sont de nouveau stimulées, ce qui engendre une réorganisation corticale afin de restituer en partie ces fréquences. On parlera de réafférentation auditive (Gabriel, 2006).

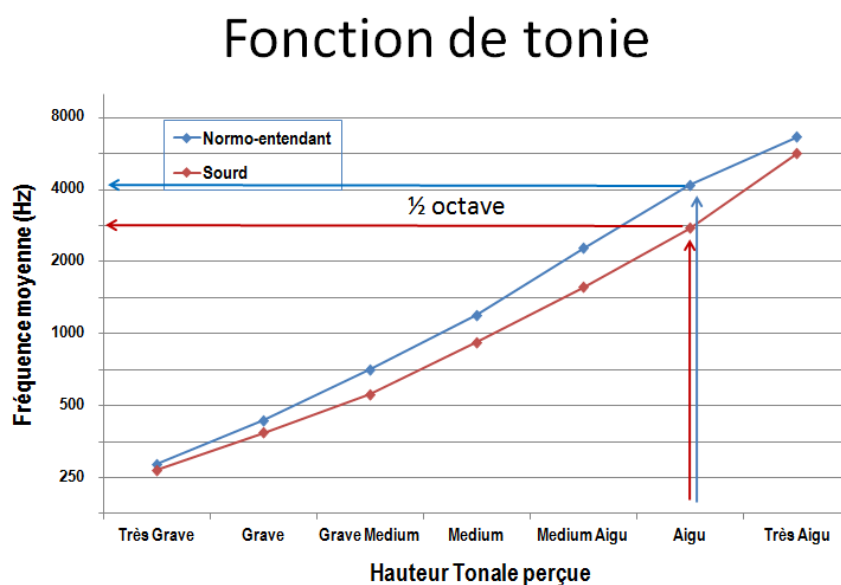
### 3.2 Une distorsion de tonie : la diplacousie

Une perte auditive peut engendrer des distorsions de tonie telle que la diplacousie. Il existe trois types de diplacousie, la plus connue étant la diplacousie binaurale dysharmonique, caractérisée par une différence de perception de la hauteur tonale par les deux oreilles, pour un même stimulus. Il existe également la diplacousie binaurale avec écho créant un retard de perception d'une fraction de seconde pour une oreille, ainsi que la diplacousie monaurale dysharmonique doublant la tonalité d'un son à tonalité unique pour une même oreille. Cette dernière reste relativement rare. (Gallego et al, 2015a)

La diplacousie binaurale dysharmonique est un phénomène qui a plusieurs causes. Pour une perte d'audition naturelle et progressive, la perte des cellules ciliées externes dans la cochlée engendre un décalage du pic de résonance de la membrane basilaire vers la base en présence d'un stimulus, ce pic étant décalé de

quelques millimètres vers l'apex pour un normo-entendant. Le basal-shift pourrait expliquer en partie que le son puisse être perçu plus aigu par rapport à une oreille d'un normo-entendant. La diplacousie est ressentie généralement lorsqu'il y a une asymétrie auditive entre les deux oreilles. Ce phénomène peut être mieux détecté par un musicien (Baconnin, 2008) mais il est rarement perçu pour une perte bilatérale symétrique.

Le basal-shift expliquerait les phénomènes périphériques aboutissant à cette distorsion de tonie. Cependant, qu'en est-il au niveau central ? La perte auditive entraîne une privation engendrant une réorganisation neuronale donc une réattribution fréquentielle. Le décalage de la perception de tonie serait donc causé par des mécanismes périphériques et centraux. Le malentendant percevrait le son plus aigu par rapport à la réalité. Une étude (Roux, 2011) a été menée aboutissant à une mesure de la fonction de tonie chez le normo-entendant et le malentendant. La figure 1.4 montre que le malentendant percevrait effectivement les sons plus aigus qu'un normo-entendant.



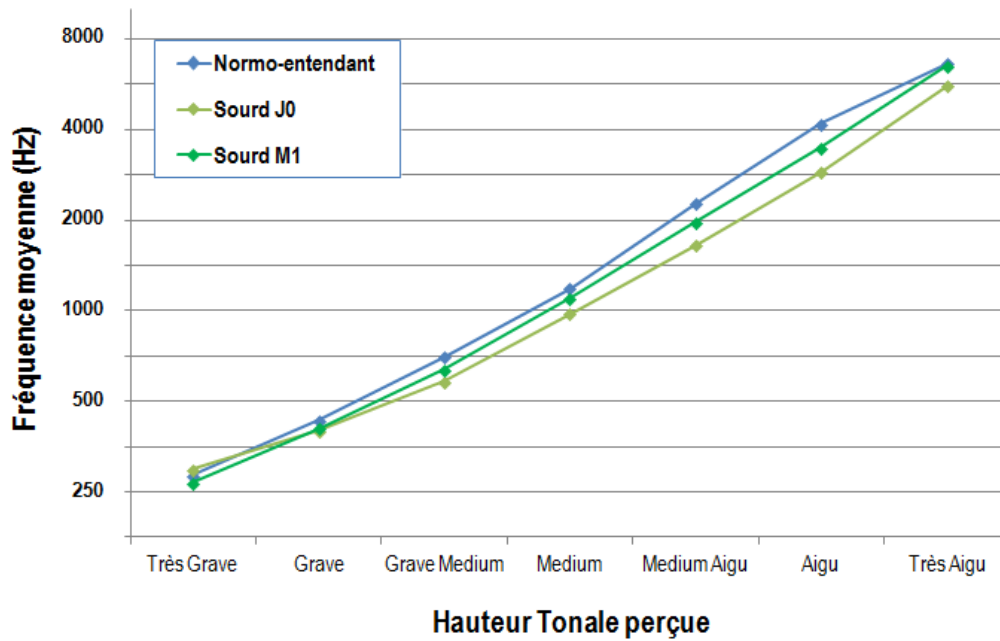
**Figure 1.4 :** Hauteur tonale perçue en fonction de la fréquence (Gallego et al, 2015b)

On remarque que l'écart de perception entre les normo-entendants et les malentendants peut aller jusqu'à  $\frac{1}{2}$  octave, ce qui est relativement important. Cependant, les patients devaient estimer la hauteur des stimuli selon des données semi-quantitatives. En serait-il de même pour la perception des notes de musique ? On remarque dans cette même figure que la perception des graves chez le malentendant et le normo-entendant reste approximativement identique, mais également que l'écart entre ces deux fonctions croît à partir des graves-medium, voire médium, jusqu'à devenir suffisamment grand pour que cela devienne significatif. Si l'on admet que ce document est valable en musique, cela voudrait dire qu'un  $la_3$  de fréquence 440Hz ne serait pas perçu comme étant la même note qu'un  $la_5$  de fréquence 1760Hz. Dans ce cas, la perception d'un accord de musique sur deux octaves serait déformée et perçue comme étant dissonant, désagréable à l'écoute. L'intensité ayant une influence sur la perception de la hauteur tonale, on pourrait émettre l'hypothèse que l'amplification apportée par une aide auditive pourrait accentuer cet écart créant ainsi une dissonance lors d'une écoute musicale si l'on ne s'en remet qu'au plan périphérique. C'est à cette question que nous tenterons de répondre par cette étude.

L'appareillage permet une réorganisation au niveau de l'aire auditive primaire rétablissant les connexions neuronales qui auraient pu disparaître du fait de la désafférentation suite à la perte auditive. La figure 1.5 est la représentation de la fonction de tonie d'un échantillon de normo-entendants, de malentendants avant le port d'aides auditives, et ce même échantillon après appareillage. On observe que la fonction de tonie des malentendants se rapproche de celle des normoentendants après un mois d'appareillage. Cela joue en faveur d'un rôle du système nerveux central sur la perception de la hauteur tonale. Il y aurait donc effectivement une

réorganisation centrale permettant de rétablir la fonction de tonie proche de celle d'un normo-entendant.

## Fonction de tonie



**Figure 1.5 :** Hauteur tonale perçue en fonction du temps de port de l'aide auditive (d'après Gallego et al, 2015b)

## **II. MATERIEL ET METHODES**

### **1. Sujets testés**

L'ensemble de la population testée rassemble 27 sujets, 13 sont malentendants et 14 sont normo-entendants réparties en deux groupes de 7 normo-entendants musiciens et 7 normo-entendants non musiciens.

La population témoin comprend deux groupes de 7 sujets jeunes. Un groupe âgé de 21 à 23 ans est composé de musiciens effectuant plusieurs heures de pratiques instrumentales par jour, l'autre groupe âgé de 22 à 30 ans ne pratique pas un instrument au quotidien. Ces deux groupes vont être comparés dans le but d'appréhender la difficulté du test et de savoir s'il y a une différence de perception d'équilibre tonal entre un sujet musicien et non musicien.

La population malentendante rassemble 13 personnes dont 12 sujets appareillés. Parmi eux, dix sont atteints d'une presbycusie (sujets âgés de 63 à 91 ans), un sujet d'une surdité congénitale âgé de 22 ans, et un autre d'une surdité plate (44 ans).

### **2. Matériel utilisé**

Pour effectuer une audiométrie, nous utilisons l'audiomètre AURICAL ainsi qu'un casque TDH-39. Dans le but d'estimer l'équilibre de tonie entre deux sons espacés d'une octave, un test spécifique a été élaboré grâce au logiciel MATLAB installé sur un ordinateur portable programmé pour effectuer les tests et l'enregistrement de ceux-ci. Nous travaillerons avec AUDEO-V50, appareils auditifs RITE de la marque Phonak afin de pouvoir programmer plusieurs réglages basés sur l'audiométrie



tonale liminaire et supraliminaire du patient grâce au logiciel Phonak Target. Les tests statistiques ont été calculés grâce au logiciel Excel stat.

### 2.1 Comparaisons des différents réglages utilisés pour l'élaboration des tests.

Nous avons vu que deux effets engendraient une distorsion de tonie suite à une perte auditive : le décalage du pic du mouvement de la membrane basilaire suite à une atteinte des cellules ciliées externes, et la réattribution fréquentielle provoquée par la capacité de réorganisation neuronale du cortex cérébral. Nous allons effectuer trois réglages dans le but de savoir si l'on peut compenser le « basal-shift » au niveau périphérique, et si ceci aurait une incidence sur l'équilibre de tonie, permettant ainsi une meilleure écoute musicale avec appareils auditifs. Afin de contrôler les sons arrivant à l'oreille du sujet, nous choisissons d'utiliser des doubles dômes.

Le premier programme testé est un réglage fabricant de la marque Phonak. Ce réglage comporte de la compression selon l'intensité du son arrivant à l'appareil auditif. Tous les débruiteurs ont été désactivés ainsi que l'anti-larsen (larsen bloc chez phonak). Ce programme sera comparé avec les deux autres réglages suivants afin d'observer les éventuelles modifications d'équilibre de tonie selon l'amplification. Les microphones restent omnidirectionnels dans les trois programmes. Nous nommerons ce réglage « Reg<sub>FAB</sub> ».

Le deuxième programme Reg<sub>HG1C</sub> (half gain) est basé sur un réglage en demi gain sur un canal c'est-à-dire sans compression, linéaire, amplifiant sur un seul canal la moitié de la moyenne de la perte auditive tonale (= moyenne basée sur les fréquences 500-1000-2000-4000Hz). De ce fait, les fréquences graves reçoivent la même amplification que les fréquences aiguës. On peut donc supposer que ce

réglage puisse compenser les problèmes d'équilibre de tonie provoqués à cause du « basal shift », les fréquences aigües étant moins amplifiées donc perçues théoriquement plus graves que si l'amplification était plus importante, comme ce que l'on peut trouver dans le programme du fabricant.

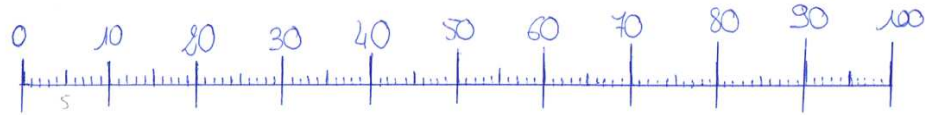
Le troisième et dernier programme (Reg<sub>HGMC</sub>) est un réglage utilisant le demi-gain comme le réglage précédent mais par demi-octave (MC = multicanaux). L'amplification est linéaire, cependant les hautes fréquences ont une amplification plus importante par rapport aux deux autres réglages en accord avec les audiogrammes correspondant. On peut comparer ce réglage avec le premier programme : les aigus sont beaucoup amplifiés par l'appareil auditif, mais la compression n'est pas utilisée dans ce dernier réglage.

Les fréquences au-delà de 4000 Hz ont été sous amplifiées uniquement lorsque le sujet présentait un pincement de son champ dynamique auditif dans les hautes fréquences, c'est-à-dire s'il présentait une faible dynamique entre le seuil de perception auditif et le seuil d'inconfort. Le gain sur ces fréquences a également été diminué en présence d'effet larsen.

### **3. Déroulement des tests réalisés**

#### **3.1 tests subjectifs : écoutes musicales**

Les sujets malentendants ont écouté trois morceaux de musique de caractéristiques différentes. Pour chaque morceau, les trois réglages ont été testés. La personne devait juger la qualité d'écoute musicale en inscrivant une note comprise entre 0 et 100 sur l'échelle visuelle analogique ci-dessous.



La première musique choisie s'intitule « Les trompettes d'Aïda », musique instrumentale de l'opéra « Aïda » (1871) du célèbre compositeur italien du XIXe siècle : Giuseppe Verdi. Cette fanfare est, comme son nom l'indique, composée uniquement de cuivres (trompettes et cors). On reconnaît ce morceau par sa mélodie jouée par plusieurs trompettistes sur un accompagnement interprété par des joueurs de cor. Ce morceau comporte peu de variations de nuances.

Le deuxième extrait écouté était « La foule », chanson française chantée par Edith Piaf, composée par Michel Rivgauche et écrite par Angel Cabral en 1957. Comparé aux deux autres extraits écoutés, ce morceau est le seul à avoir une mélodie chantée. Les instruments accompagnant la voix sont : le piano, l'accordéon ainsi que des instruments à vent. Cette musique est plus nuancée que la précédente, notamment grâce aux accordéons et instruments à vent.

La troisième musique est un extrait de « Divenire » composé en 2007 par Ludovico EINAUDI, compositeur italien. La composition instrumentale est un piano ainsi qu'un orchestre à corde comprenant des violons, violoncelles et contrebasses. Les graves sont accentués en partie par le piano et les contrebasses. La mélodie est jouée par le piano. On peut percevoir des moments plus *piano* voire *pianissimo* mais également *forte*, c'est donc un morceau très nuancé. Les *crescendo* sont nettement perçus.

Les musiques ont été choisies de manière à ce que la composition instrumentale, l'époque et le caractère de la musique soient différents.

### 3.2 Tests d'équilibre de tonie à résultats quantitatifs

Pour l'ensemble des sujets, une audiométrie tonale liminaire au casque en son pur a été effectuée afin de déterminer le seuil de perception des fréquences suivantes : 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 et 8000 Hertz. Un seuil subjectif d'inconfort a également été réalisé en ces fréquences.

Nous avons cherché à mesurer l'équilibre de la tonie entre deux sons distants d'une gamme. L'octave doit être perçue comme étant l'intervalle la plus consonante. Si nous faisons donc entendre par exemple un do<sub>4</sub> (523.25Hz) et un do<sub>5</sub> (1046.5 Hz), la deuxième note jouée aura la même sonorité que la précédente mais sera perçue comme étant plus aigüe. C'est avec cet intervalle que nous pourrions suspecter ou non un décalage entre les notes graves et aiguës. Si un tel décalage est présent, le sujet percevra une dégradation de la qualité d'une écoute musicale, la perception des harmoniques pouvant être décalé par rapport à la fondamentale.

Le but est d'observer si les propriétés audiométriques peuvent avoir une influence sur les distorsions de tonie et l'influence des réglages sur ces distorsions.

Nous choisissons donc de tester les trois réglages enregistrés dans les AUDEO Venture 50. Grâce au logiciel programmé MATLAB, les deux haut-parleurs situés à 1 mètre du patient et branchés à l'ordinateur portable pouvaient faire entendre les sons nécessaires à la récolte des données. Nous testons les deux oreilles en même temps. Un son de 500Hz était écouté par le sujet. Aléatoirement, un deuxième stimulus suivant le premier avait une des valeurs suivantes : 841 Hz, 878 Hz, 917 Hz, 958 Hz, 1000 Hz, 1044 Hz, 1091 Hz, 1139 Hz, 1189 Hz. Le sujet testé devait donc faire une comparaison entre le 1<sup>er</sup> son à 500 Hz et le deuxième son plus aigu. Ces fréquences sont centrées autour de 1000Hz, double de 500Hz, considérés comme

l'octave en musique. La valeur des fréquences proches de 1000Hz ont une différence de  $1/16^{\text{ème}}$  à  $4/16^{\text{ème}}$  d'octave.

$$\text{Ex : } 1000 \cdot (2^{1/16}) = 1044 \text{ Hz}$$

Le sujet testé devait déterminer si ce deuxième stimulus était plus grave ou plus aigu que l'octave du 500Hz, fréquence que l'on pourrait presque associer à un si<sup>3</sup> en musique, cette note ayant une fréquence de 493.88 Hz. La personne testée pouvait également reconnaître l'intervalle « octave ». Ce test s'effectue avec des sons purs. Afin d'assurer la reproductibilité des réponses, chaque son de fréquence différente passait dix fois. Le sujet écoute une série de 90 sons.

Nous avons donc expliqué que le sujet devait répondre si le deuxième son à 1000 Hz ou autour de cette fréquence était perçu comme étant plus aigu ou plus grave que l'octave du premier son écouté à 500 Hz. Lorsque le patient répondait « plus aigu que l'octave du premier son », Matlab comptabilisait cette réponse avec la valeur numérique « 1 ». Lorsque le deuxième son était perçu comme étant « plus grave que l'octave du premier son », la valeur numérique associée était 0. Chaque série de deux sons étant entendue 10 fois, une fréquence fixe perçue plus aigüe pendant toute la durée du test prendra la valeur 10 ( $=10 \cdot 1$ ). Dans le cas où une fréquence est toujours perçue comme étant plus grave que l'octave, la valeur 0 caractérisera celle-ci. Lorsque le patient considèrera que le deuxième son a la même sonorité que le premier, il dira que les deux sons sont identiques ou que le deuxième son sera une fois sur deux plus aigu ou plus grave. La valeur de la fréquence étant perçue comme l'octave du premier prendra une valeur avoisinant 5.

Exemple :

1 <sup>er</sup> son (Hz)	2 <sup>eme</sup> son (Hz)	Nombre de réponse « plus grave » (=x)	Nombre de réponse « plus aigu » (=y)	Résultat Matlab =(x*0)+(y*1)
500	841	10	0	(0*10)+0 =0
500	878	9	1	1
500	917	8	2	2
500	958	7	3	3
500	1000	5	5	5
500	1044	3	7	7
500	1091	1	9	9
500	1039	0	10	10
500	1189	0	10	10

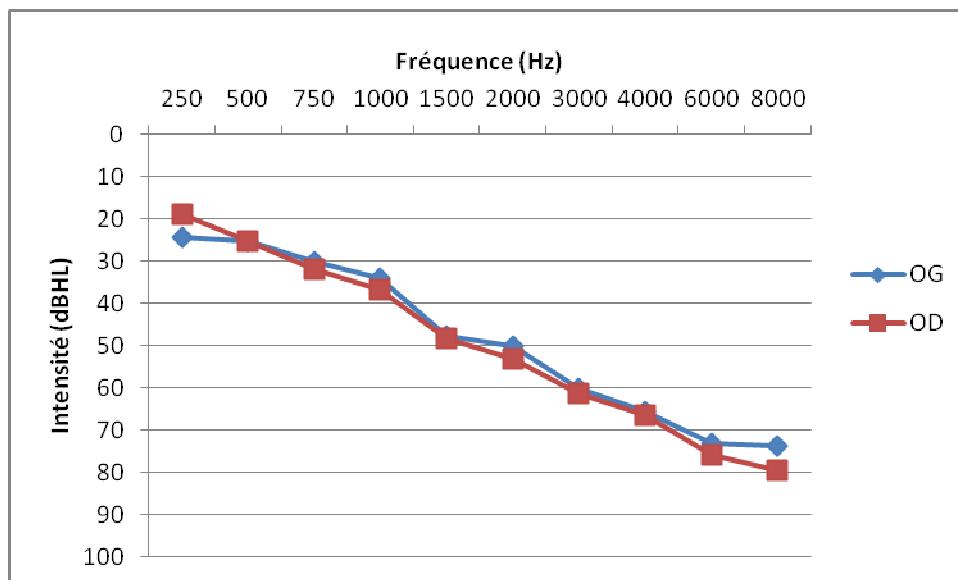
**Tableau II.1** : Exemple de résultats des tests de mesure d'équilibre de tonie

Les trois programmes décrits et installés sur les appareils auditifs adaptés en fonction de la surdité du patient ont été testés grâce à ce protocole. La durée du test était d'environ 1h par sujet.

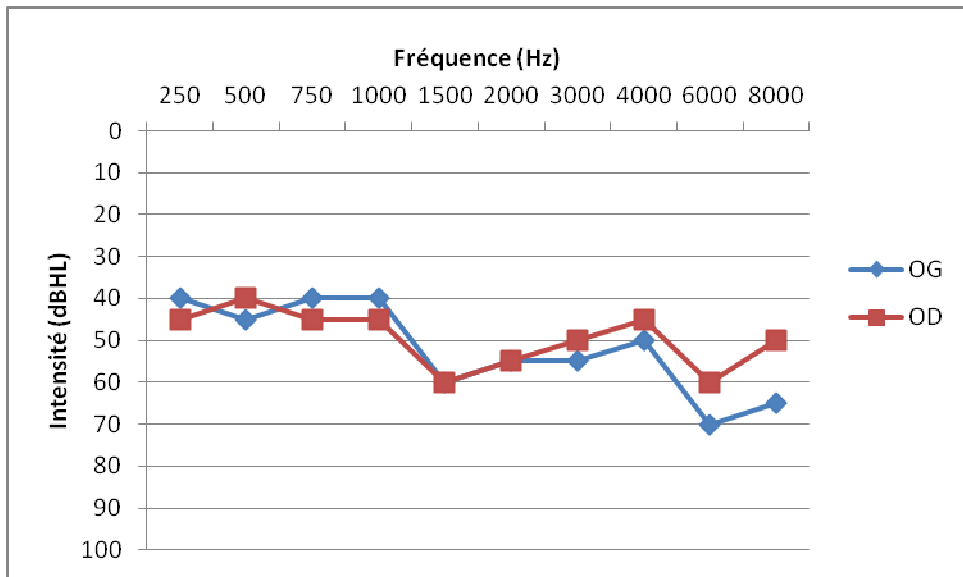
### III. RESULTATS

#### 1. Audiométrie tonale liminaire

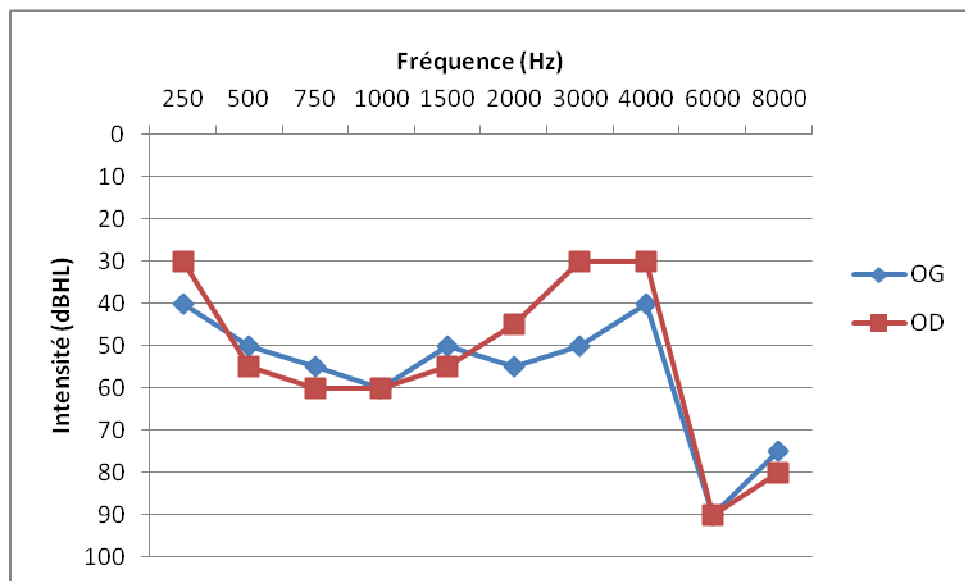
Rappelons que sur les 13 sujets testés, 11 sont atteints d'une surdité de perception symétrique avec une perte plus importante sur les aigus que sur les graves, typique d'une presbycusie. Un sujet a une surdité plate bilatérale, et un autre, une surdité congénitale avec une audiométrie en « u ». Seul un sujet ayant une surdité typique d'une presbycusie n'est pas appareillé.



**Figure 3.1** : moyenne des seuils tonaux liminaires des sujets ayant une surdité de perception bilatérale, les aigus étant plus atteints que les graves (n=11). En bleu, les moyennes des seuils tonaux liminaires de l'oreille gauche et en rouge celles de l'oreille droite.



**Figure 3.2 :** seuils tonaux oreille gauche (bleu) et oreille droite (rouge) du sujet ayant une surdité plate symétrique.



**Figure 3.3 :** seuils tonaux liminaires du sujet atteint d'une surdité congénitale.



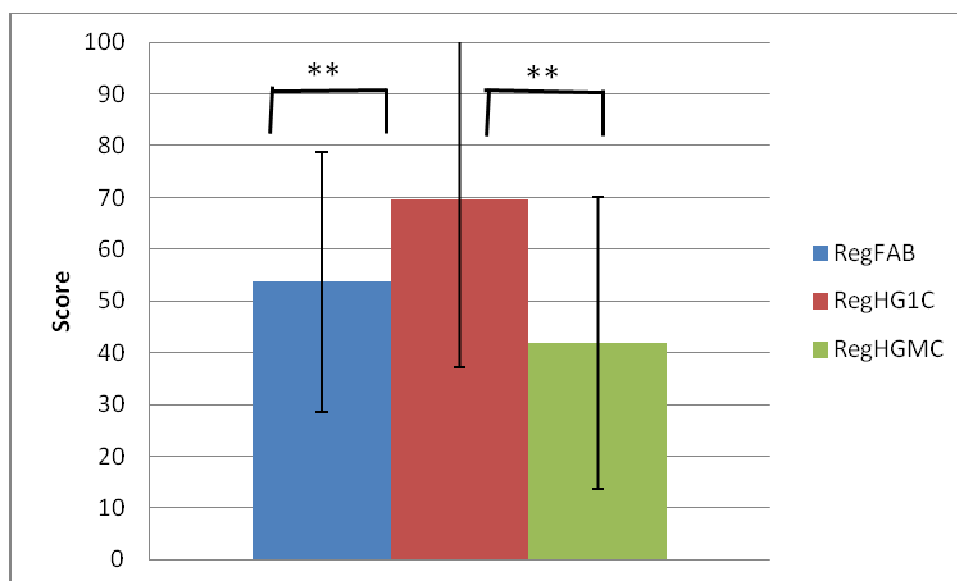
## 2. Tests subjectifs

Tous les malentendants confondus ( $n=13$ ) ont pu faire l'écoute des trois musiques en évaluant la qualité musicale perçue pour chaque réglage transmis aux aides auditives de marque Phonak. Le Tableau 3.1 résume les évaluations données par chaque sujet en écoutant « Les trompettes d'Aïda » de Verdi, le Tableau 3.2 correspond aux données collectées à l'écoute de « La foule » interprétée par Edith Piaf et « Divenire » de Ludovico Einaudi pour le Tableau 3.3. Nous avons utilisé le test t de student afin de pouvoir comparer les résultats obtenus pour chaque réglage. Auparavant, nous avons vérifié que nos données passaient les tests de la normalité.

Dans la figure 3.4, nous observons que le réglage par méthode du demi-gain par demi-octave obtient une moyenne de 41.8 sur 100, plus faible que le réglage fabricant (53.7 sur 100) comprenant de la compression d'intensité ou encore le réglage par méthode du demi-gain sur un canal en linéaire qui obtient le meilleur score moyen de 69.7 sur 100. Nos échantillons sont appariés. Si l'on compare deux à deux ces différentes moyennes, le test t de student révèle que  $Reg_{HG1C}$  fournit un résultat significativement meilleur que le programme fabricant  $Reg_{FAB}$  ( $p<0.01$ ) et que le programme en demi-gain par demi-octave ( $p<0.01$ ) pour l'écoute subjective de la qualité musicale. En comparant le réglage fabricant ( $Reg_{FAB}$ ) avec la méthode du demi-gain par demi-octave ( $Reg_{HGMC}$ ), nous n'observons pas de différence significative ( $p>0.05$ ). On pourrait supposer que pour un morceau contenant principalement des cuivres notamment des trompettes, la méthode du demi-gain sur un canal serait un réglage plus approprié pour ce type de musique, la moyenne des notes attribuées étant plus élevée.

SUJET	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC
X1	45	65	35
X2	26	20	0
X3	60	70	60
X4	70	90	80
X5	60	100	80
X6	90	100	0
X7	90	80	85
X8	50	80	30
X9	50	70	10
X10	40	60	74
X11	57	76	60
X12	50	80	30
X13	10	15	0
<b>MOYENNE</b>	<b>53.7</b>	<b>69.7</b>	<b>41.8</b>

**Tableau 3.1 :** notes sur une échelle de 0 à 100 de la qualité sonore perçue avec les trois réglages à l'écoute des « trompettes d'Aïda » de Verdi. En rouge, la moyenne des notes sur chaque réglage.



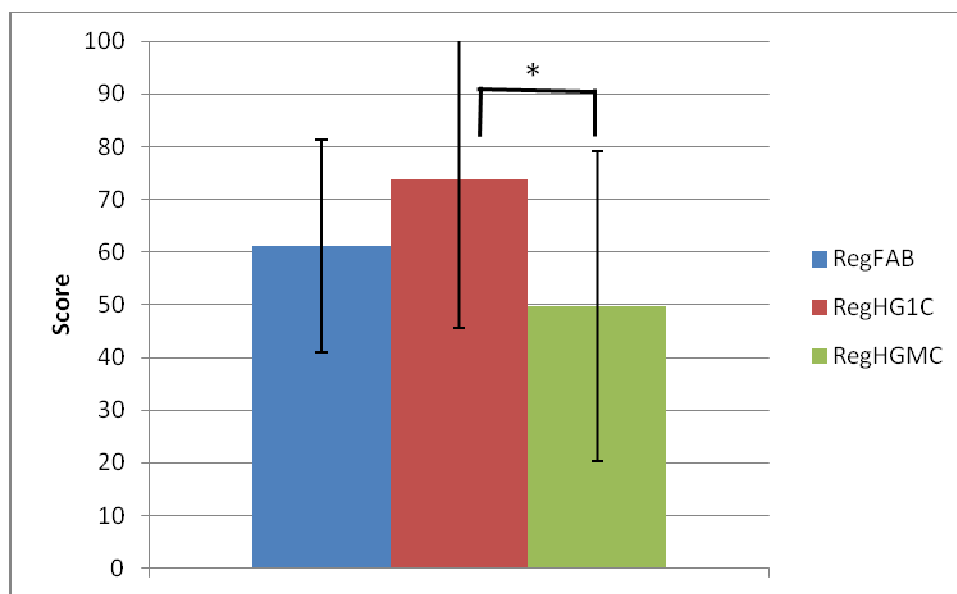
**Figure 3.4 :** Résultats du test subjectif à l'écoute de « trompettes d'Aïda » de Verdi.

Le tableau 3.2 et la figure 3.5 présentent les résultats obtenus pour la chanson « La foule » interprétée par Edith Piaf. Le meilleur score est obtenu par Reg<sub>HG1C</sub> (73.8 sur 100) suivi par Reg<sub>FAB</sub> (61.2 sur 100) et par le réglage en demi-gain par demi-octave Reg<sub>HGMC</sub> (49.7 sur 100). La qualité sonore perçue avec Reg<sub>HG1C</sub> est

meilleure qu'avec Reg<sub>HGMC</sub> de façon significative (test t,  $p < 0.05$ ) et qu'avec Reg<sub>FAB</sub> mais là, la différence n'est pas significative ( $p > 0.05$ ). Enfin, il n'y a pas non plus de différence significative entre Reg<sub>HG1C</sub> et Reg<sub>HGMC</sub> ( $p > 0.05$ ).

SUJET	Reg <sub>FAB</sub>	Reg <sub>HG1C</sub>	Reg <sub>HGMC</sub>
X1	45	65	35
X2	20	60	35
X3	70	80	40
X4	90	90	95
X5	100	70	90
X6	80	100	0
X7	80	75	90
X8	40	80	20
X9	70	85	30
X10	50	70	90
X11	50	75	70
X12	70	50	50
X13	30	60	1
<b>MOYENNE</b>	<b>61.2</b>	<b>73.8</b>	<b>49.7</b>

**Tableau 3.2** : notes sur une échelle de 0 à 100 de la qualité sonore perçue avec les trois réglages à l'écoute de « La Foule » chanté par Edith Piaf. En rouge, la moyenne des notes sur chaque réglage.

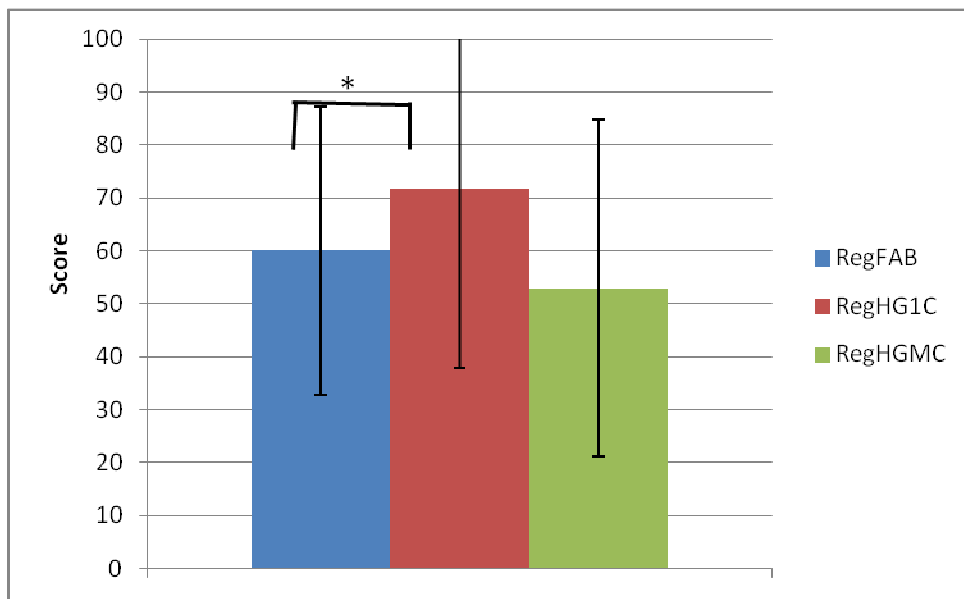


**Figure 3.5** : Résultats du test subjectif à l'écoute de «La foule» d'Edith Piaf.

La figure 3.6 représente la moyenne des notes collectées de la même manière que les tableaux précédents avec une écoute instrumentale de Ludovico Einaudi composée d'un piano et d'un ensemble à corde. On remarque cette fois-ci encore que la moyenne la plus élevée est attribuée au réglage en demi-gain sur un canal (71.6 sur 100). La moyenne des notes qualifiant la qualité de la perception de la musique écoutée pour le réglage fabricant est de 60 sur 100, supérieure à celle du demi-gain par demi-octave étant de 52.9 sur 100. La qualité d'écoute musicale avec le réglage Reg<sub>HG1C</sub> est significativement meilleure qu'avec le réglage Reg<sub>FAB</sub> ( $p < 0.05$ ) et elle est meilleure que Reg<sub>HGMC</sub> mais la différence n'est pas significative ( $p > 0.05$ ). Il n'apparaît pas non plus de différence significative entre Reg<sub>FAB</sub> et Reg<sub>HGMC</sub> ( $p > 0.05$ ).

SUJET	Reg <sub>FAB</sub>	Reg <sub>HG1C</sub>	Reg <sub>HGMC</sub>
X1	70	80	60
X2	20	56	10
X3	70	50	70
X4	80	90	90
X5	70	90	100
X6	100	100	0
X7	100	100	80
X8	50	80	20
X9	65	95	80
X10	40	60	80
X11	60	85	83
X12	30	40	10
X13	25	5	5
<b>MOYENNE</b>	<b>60</b>	<b>71.6</b>	<b>52.9</b>

**Tableau 3.3 :** notes sur une échelle de 0 à 100 de la qualité sonore perçue avec les trois réglages à l'écoute de « Divenire » de Ludovico EINAUDI. En rouge, la moyenne des notes sur chaque réglage.



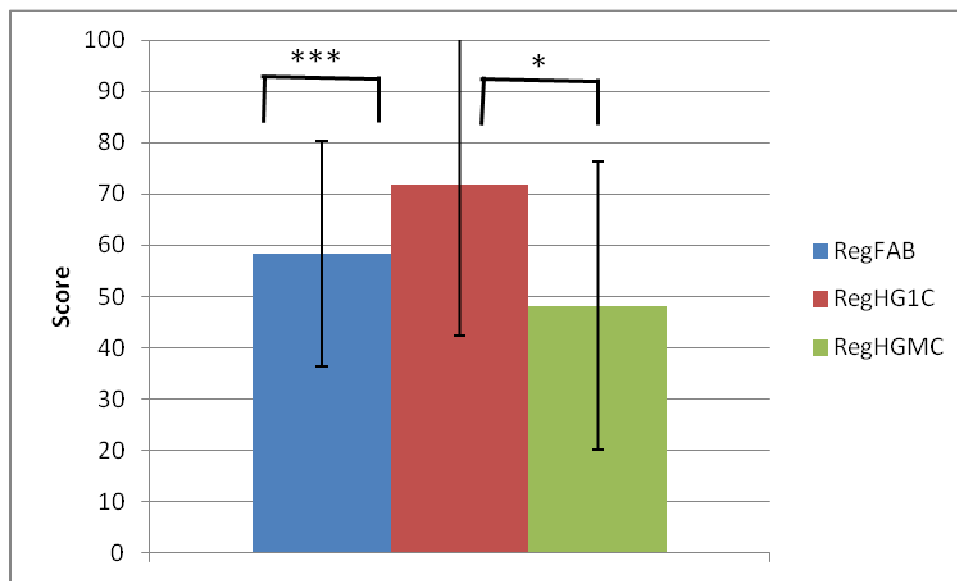
**Figure 3.6 :** Résultats du test subjectif à l'écoute de «Divenire» de Ludovico EINAUDI.

La figure 3.7 représente les moyennes des notes données par les patients en fonction des réglages pour les trois musiques écoutées. Un sujet X a noté trois fois un réglage, trois musiques ayant été écoutées. Cela nous a permis d'effectuer une moyenne globale caractérisant la qualité d'écoute musicale avec les appareils auditifs. Or, ces moyennes représentent l'ensemble des écoutes et ne caractérisent donc pas l'influence de la composition instrumentale. Le programme  $Reg_{FAB}$  a obtenu une moyenne de 58.3 sur 100, le réglage  $Reg_{HG1C}$  obtient la moyenne la plus élevée soit 71.7 sur 100, et le dernier réglage  $Reg_{HGMC}$  obtient 48.2 sur 100. Les tests statistiques montrent que la qualité de la musique perçue avec le réglage  $Reg_{HG1C}$  est significativement meilleure qu'avec  $Reg_{FAB}$  ( $p < 0.001$ ) et  $Reg_{HGMC}$  ( $p < 0.05$ ). Ces deux derniers réglages ne diffèrent pas entre eux de manière significative ( $p > 0.05$ ).

En général, c'est donc le réglage  $Reg_{HG1C}$  que les sujets ont préféré par rapport aux deux autres.

SUJET	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC
X1	53.3	70	43.3
X2	22	45.3	15
X3	66.7	66.7	56.7
X4	80	90	88.3
X5	76.7	86.7	90
X6	90	100	0
X7	90	85	85
X8	46.7	80	23.3
X9	61.7	83.3	40
X10	43.3	63.3	81.3
X11	55.7	78.7	71
X12	50	56.7	30
X13	21.7	26.7	2
<b>MOYENNE</b>	<b>58.3</b>	<b>71.7</b>	<b>48.2</b>

**Tableau 3.4 :** moyenne des notes des trois musiques pour chaque sujet. La moyenne en rouge située en bas du tableau représente la moyenne des notes pour chaque réglage.



**Figure 3.7 :** Moyennes et Résultats statistiques des tests subjectifs pour les trois écoutes musicales.

### 3. Test d'équilibre de tonie

Parmi les 13 sujets testés, nous avons une sous population de 9 sujets dont un atteint d'une surdité congénitale et un autre d'une surdité plate bilatérale. Les 7

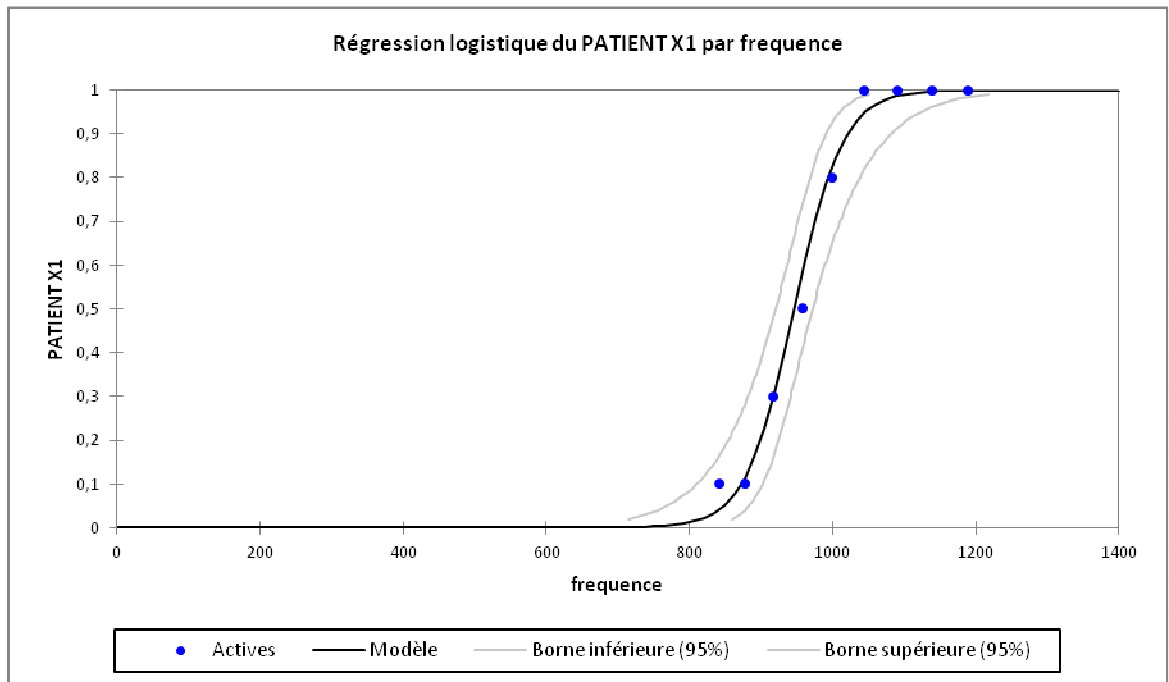
autres sujets ont une surdité plus importante sur les hautes fréquences que sur les basses fréquences portant des appareils de correction auditive au quotidien.

La hauteur du son perçu par rapport à l'octave sera transformée en valeur quantitative. Rappelons qu'un son désigné comme étant plus aigu que l'octave du premier son pur à 500 Hz aura une valeur qui tendra vers 10. Dans le cas contraire, cette valeur tendra vers 0 si le deuxième stimulus est perçu comme étant plus grave. Pour expliquer notre analyse, nous avons représenté les résultats obtenus du patient X1 dans le tableau 3.5. Chaque colonne représente les résultats du test avec le réglage indiqué. La première colonne du tableau représente les 9 fréquences entendues aléatoirement par le patient, égales ou légèrement supérieures ou inférieures à 1000Hz. La fréquence de l'intervalle par rapport au son de référence 500Hz est également indiquée. Lorsque l'on se rapproche du chiffre 5, le sujet perçoit la fréquence correspondante comme étant l'octave de 500Hz.

	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC
841	1	0	1
878	1	3	1
917	3	6	5
958	5	6	7
1000	8	8	9
1044	10	6	10
1091	10	10	9
1139	10	10	10
1189	10	10	10

**Tableau 3.5 :** données collectées du patient X1 avec les tests d'équilibre de tonie en son pur 500Hz-1000Hz

Les données collectées sont quantitatives, mais les fréquences sont des données qualitatives. Les échantillons sont appariés. Afin de pouvoir trouver pour chaque sujet la fréquence étant perçue comme l'octave supérieure à 500Hz, une régression logistique était nécessaire (figure 3.8).



**Figure 3.8 :** Représentation sigmoïdale des résultats du test avec le réglage  $Reg_{FAB}$  pour le sujet X1 permettant une régression logistique

Ceci a permis d’ajuster le modèle et de trouver la fréquence se rapprochant le plus de celle perçue comme étant l’octave du son pur à 500 Hz. Pour chaque test et chaque réglage, nous avons pu établir les moyennes de ces fréquences grâce aux régressions de variable. Cela nous permet de comparer deux à deux ces trois réglages et observer si les trois réglages ont une influence sur l’équilibre de tonie. La distribution des données suivant une loi normale, le test t de student sur série appariée a été utilisé.

### Résultats en fonction du réglage :

Les moyennes mesurées des fréquences perçues comme étant l’octave du son pur pour chaque réglage est représenté dans le tableau 3.6 (n=9). Pour les trois réglages comparés, on trouve qu’il n’y a pas de différence significative pour la fréquence de l’octave perçue ( $p > 0.05$ ).



Réglage	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC
Moyenne des fréquences (en Hertz)	998	997	1008

**Tableau 3.6 :** moyennes des fréquences de l'octave perçu par rapport à une fréquence de 500Hz en son pur.

### Résultats interindividuels :

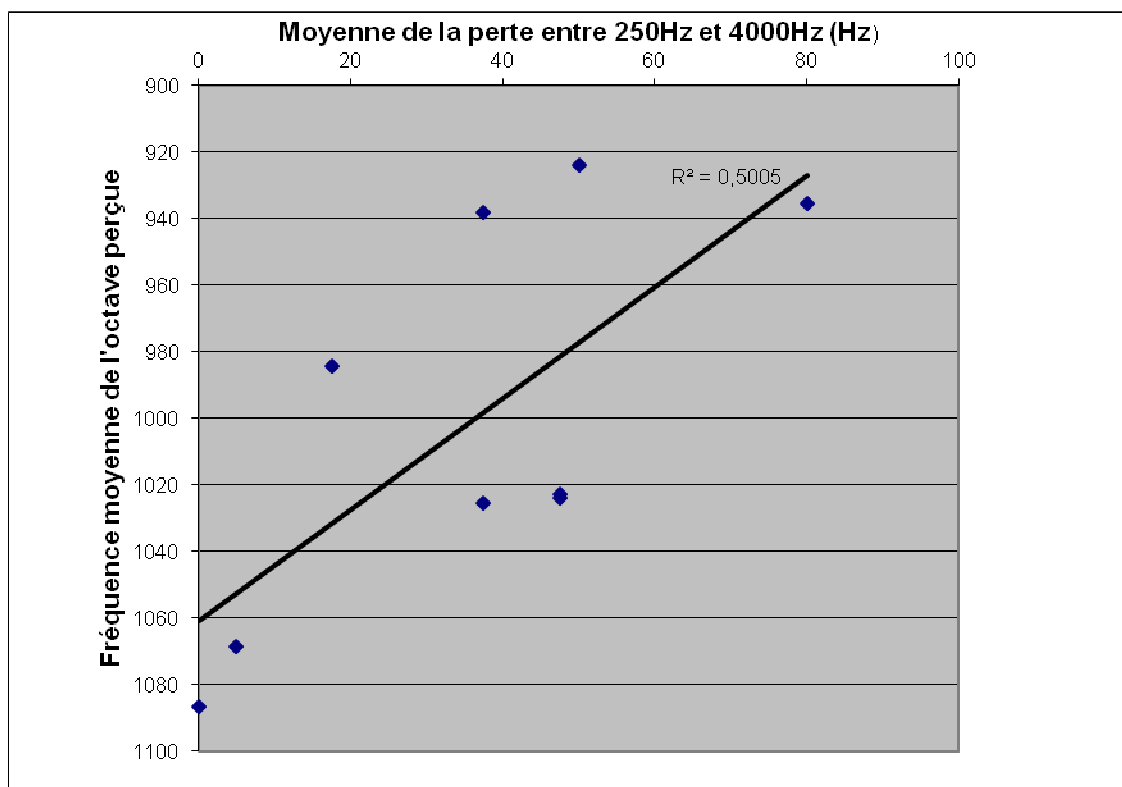
Après avoir étudié la moyenne des résultats de chaque réglage, nous nous sommes intéressés aux résultats de chaque sujet (tableau 3.7) afin de comprendre la disparité des résultats. En effet nous remarquons que la moyenne des fréquences obtenues est comprise entre 923.9 Hz et 1086.5 Hz soit une différence de 162.6 Hz équivalent à un intervalle se rapprochant de trois demi-tons (tierce mineure en musique), non négligeable à l'écoute pour un normo-entendant.

Sujet	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC	Moyenne
X1	946.4	939.1	929	938.2
X2	992.8	984	976	984.2
X3	937.6	900.1	933.9	923.9
X4	1001.5	1028.8	1045.7	1025.3
X5	943	935.3	928.5	935.6
X8	1024	1006.3	1041.7	1024
X10	1100.8	1078.4	1080.3	1086.5
X11	1045.2	1073.6	1086.7	1068.5
X13	988.3	1027.3	1053.3	1022.9

**Tableau 3.7 :** Résultats individuels des tests de perception de l'octave

Sujet	Fréquence moyenne de perception de l'octave	Différence moyenne de perte entre 4000 et 250Hz (dBHL)
X10	1086.5	0
X11	1068.5	5
X4	1025.3	37.5
X8	1024	47.5
X13	1022.9	47.5
X2	984.2	17.5
X1	938.2	37.5
X5	935.6	80
X3	923.9	50

**Tableau 3.8 :** Comparaison de la différence moyenne de la perte auditive entre 4000 et 250Hz avec la moyenne de la fréquence de l'octave obtenue



**Figure 3.9 :** Influence de la perte moyenne entre 250 et 4000Hz sur la moyenne des fréquences perçues comme l'octave d'un son pur à 500Hz

D'après la figure I.1, l'intensité n'aurait pas beaucoup d'impact sur la variation de tonie à 1000Hz. Nous pouvons donc éliminer le fait que la différence d'amplification contenu dans chaque réglage pour chaque sujet influencerait les résultats. Nous nous intéressons donc à l'audiométrie de chaque sujet afin de savoir si la différence des seuils auditifs pourrait avoir un lien avec les résultats ci-dessus. Les audiogrammes situés dans l'annexe 1 sont classés selon les fréquences perçues moyennes obtenues dans l'ordre décroissant. Rappelons que lorsqu'il y a un décalage au niveau de la perception de l'octave, la fréquence obtenue sera inférieure à 1000 Hz cette dernière étant perçue plus aiguë que la normale. Nous remarquons que les valeurs de la fréquence perçue diminuent proportionnellement à la pente de l'audiogramme entre 500 et 1000 Hz. Cela pourrait donc signifier que les propriétés audiométriques du sujet auraient une influence sur le degré de la déviation de la perception d'un son pur à 1000Hz par rapport au 500 Hz.

La figure 3.9 permet d'illustrer l'influence de la perte moyenne entre 250 et 4000Hz sur la perception de l'octave d'un son à 500Hz. Nous remarquons la déviation de la tonie augmente avec la pente de la perte dans cet échantillon. En effectuant une régression linéaire nous voyons que la corrélation  $R^2$  est d'environ 0,5. Le test de corrélation de Pearson nous montre que la moyenne de la perte entre 250 et 4000Hz aurait une influence significative sur le décalage de la tonie ( $p < 0.05$ ). On peut supposer que cette déviation fréquentielle augmenterait en même temps que la pente de la perte auditive. Le décalage de la tonie serait donc plus important sur un sujet avec une audiométrie en pente de ski par rapport à un sujet ayant une surdité plate.

#### **4. Equilibre de tonie avec des sujets normoentendants musiciens et non-musiciens**

Les tests d'équilibre de tonie sont basés sur la reconnaissance d'un intervalle musical le plus consonant nommé « octave ». Nous nous sommes donc demandé s'il y avait une différence entre la perception de la fréquence de l'octave d'un son à 500 Hz entre des sujets non musiciens et des sujets pratiquant plusieurs heures par jour de la musique. Nous avons testé 7 sujets musiciens et 7 sujets non musiciens afin d'effectuer une comparaison. Comme pour l'échantillon de malentendants, ils ont effectué les tests d'équilibre de tonie en essayant de trouver si le son était plus aigu ou plus grave que l'octave de 500 Hz (soit 1000Hz) en son pur. Nous avons pu ainsi comparer les résultats de ces deux échantillons. Les tests statistiques révèlent qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus ( $p > 0.05$ ). On remarque également que les résultats des normoentendants musiciens sont plus précis c'est-à-dire que des sujets sont arrivés à trouver plus précisément la fréquence de l'octave d'un son à 500Hz. En effet, le tableau 3.10 nous indique que la fréquence perçue comme étant l'octave d'un son pur à 500Hz est très bien perçue pour 4 sujets sur 7. Lorsque l'on trace la courbe sigmoïdale reliant les points obtenus pendant les tests, on remarque que celle-ci est plus inclinée chez les non-musiciens que les musiciens. Cela peut traduire une difficulté de la réalisation du test plus grande chez les normoentendants non-musiciens que chez les musiciens.

En effectuant une régression logistique, on arrive à déterminer si les résultats obtenus pour chaque sujet sont statistiquement supérieurs ou inférieurs à la valeur de référence pour une octave.

Cela signifierait que le fait d'être musicien ou non musicien n'influencerait pas les résultats des tests effectués sur des malentendants non musiciens. Cependant l'échantillon étant faible, cela pourrait ne pas être assez représentatif de la réalité.

<b>SUJET NON-MUSICIENS</b>	<b>Moyenne (en Hertz)</b>	<b>Seuil de significativité (&lt; ; = ; &gt; à 1000Hz)</b>
N1	1027,8	>1003
N2	922,9	<957
N3	967,4	<993
N4	998,2	Egal (NS)
N5	959	<986
N6	1028,4	>1002
N7	984,5	Egal (NS)
<b>Moyenne</b>	<b>984</b>	x

**Tableau 3.9 :** Moyenne et résultats statistiques obtenus après régression logistique des sujets normoentendants non-musiciens. (NS = non significatif)

<b>SUJET MUSICIENS</b>	<b>Moyenne (en Hertz)</b>	<b>Seuil de significativité (&lt; ; = ; &gt; à 1000Hz)</b>
N8	1000	Egal (NS)
N9	1000	Egal (NS)
N10	1000,5	Egal (NS)
N11	1000	Egal (NS)
N12	1047,4	>1019
N13	1022,3	>1002
N14	1046,9	>1019
<b>Moyenne</b>	<b>1016.7</b>	X

**Tableau 3.10 :** Moyenne et résultats statistiques obtenus après régression logistique des sujets normoentendants musiciens. (NS= non significatif)

## IV.DISCUSSION

### 1. La mise en relation du test subjectif avec l'équilibre de tonie

Nous avons remarqué que le degré de déviation de la hauteur tonale pouvait être influencé par les propriétés audiométriques du sujet. En effet plus la pente est accentuée entre 500 et 1000 Hz, plus la moyenne des valeurs observées diminue, ce qui signifie une accentuation du décalage de la tonie. Etant en connaissance de ces résultats nous allons étudier l'influence de l'écoute musicale avec les différents réglages testés.

Nos résultats ont montré que la qualité de perception musicale était significativement meilleure avec le réglage Reg<sub>HG1C</sub> qu'avec les deux autres réglages testés.

Regardons les résultats du test subjectif en fonction de l'audiogramme du sujet ayant effectué le test de perception de l'octave 500-1000 Hz dans l'ordre indiqué dans l'Annexe 1 afin de mieux comprendre les résultats obtenus lors de l'écoute musicale. En commençant par les sujets X10 et X11 qui présentent respectivement une audiométrie typique d'une surdité congénitale ainsi qu'une surdité plate soit une pente très faible, la différence de seuil entre 500 Hz et 1000 Hz n'excède pas 5 dB HL. Nous observons qu'en moyenne, le sujet X10 obtenant la fréquence la plus haute a préféré le réglage Reg<sub>HGMC</sub>. La personne X11 a par contre préféré le Reg<sub>HG1C</sub> (78.7/100) le résultat étant très proche de celui obtenu avec Reg<sub>HGMC</sub> (71/100). Les 5 sujets suivant (X4, X8, X13, X2, X1), atteints d'une surdité de type presbyacousie, ont attribué de meilleures notes au réglage Reg<sub>HG1C</sub>. Parmi

eux, 4 ont eu une moyenne ne dépassant pas 43.3 sur 100 avec le réglage  $Reg_{HGMC}$  contrairement aux sujets X10 et X11.

Nous observons que  $Reg_{FAB}$  n'a pas obtenu la meilleure moyenne pour chaque sujet entre les différents réglages proposés. Il en est de même pour le réglage  $Reg_{HGMC}$  lorsqu'il s'agit d'un patient atteint d'une presbyacousie. Le réglage  $Reg_{FAB}$  a la particularité de contenir un système de compression d'intensité contrairement aux deux autres réglages ainsi qu'une plus forte amplification dans les aigus que  $Reg_{HG1C}$ . On pourrait en déduire que la compression d'intensité pourrait diminuer la qualité de perception musicale. De plus certains sujets ont remarqué un manque de nuances pendant les écoutes avec ce réglage. Les sujets ayant préféré le réglage  $Reg_{HG1C}$  sont majoritairement atteints d'une presbyacousie. Le réglage en demi-gain par demi-octave ( $Reg_{HGMC}$ ) est programmé avec une amplification plus importante sur les aigus, ceci étant basé sur la perte de chaque demi octave des sujets après avoir effectué l'audiométrie tonale au casque. Les aigus sont plus amplifiés dans le cas où nous devons effectuer ce réglage pour une personne atteinte d'une surdité plus importante sur les aigus comme pour les surdités presbyacousiques. Cependant, les résultats des tests de perception de l'octave 500-1000 Hz nous ont montré que le degré de diplacousie pouvait être lié à la pente de l'audiogramme. Cela signifierait que la surdité pourrait créer un déséquilibre de la tonie entre 500 et 1000 Hz proportionnellement à l'audiogramme. Comme énoncé dans la partie théorique, un son complexe musical est composé d'une fondamentale ainsi que des harmoniques, multiples de cette première allant jusqu'à de très hautes fréquences constituant le timbre d'un instrument de musique. En tenant compte de cela ainsi que de la figure 1.1a et 1.1b qui illustre la tonie en fonction de l'intensité, on pourrait supposer que le fait d'apporter une amplification importante dans les

fréquences aiguës accentuerait le décalage de tonie, les hautes fréquences étant perçues plus aiguës pour des fortes intensités. Cela signifierait que les harmoniques composant les sons musicaux pourraient être perçues comme plus aiguës et ne seraient donc pas en accord avec la relation mathématique par rapport à la fondamentale d'un point de vue perceptif, ce qui pourrait expliquer la sensation d'entendre des sons musicaux désagréables avec le réglage  $Reg_{HGMC}$  pour une personne atteinte de presbyacousie. L'amplification importante dans les hautes fréquences pourrait accentuer le déséquilibre de tonie causé par la surdité. Cela pourrait expliquer également la préférence du réglage  $Reg_{HG1C}$  par rapport au réglage  $Reg_{FAB}$ . Le réglage en demi-gain sur un canal  $Reg_{HG1C}$  est autant amplifié dans les graves que dans les aigus, le gain étant calculé en fonction de la moyenne de perte tonale. L'amplification moins importante sur les aigus, contrairement aux autres programmes, pourrait expliquer la préférence de plusieurs sujets pour  $Reg_{HG1C}$  lors de l'écoute musicale. Il s'agit également d'une amplification linéaire sur toute la bande passante. Cela expliquerait aussi le fait que le sujet X10 atteint d'une surdité congénitale puisse préférer le réglage  $Reg_{HGMC}$ . Etant une surdité inversée, dans les fréquences basses et médium, il est possible que le phénomène de basal shift ait lieu sur la partie de la membrane basilaire codant pour ces fréquences et non sur la partie où sont codées les hautes fréquences comme on pourrait le constater avec une presbyacousie. Concernant le sujet X11, la perte auditive de ce sujet étant égale sur toutes les fréquences, il n'y aura pas de grandes différences entre les réglages  $Reg_{HG1C}$  et  $Reg_{HGMC}$ , les aigus étant aussi amplifiés que les graves.

Deux sujets (X3 et X5) ont obtenues des scores presque égaux entre  $Reg_{HG1C}$  et un autre réglage. La moyenne attribuée aux réglages  $Reg_{FAB}$  et  $Reg_{HG1C}$  pour le sujet X3 sont identiques (66.7/100). Il a cependant attribué la meilleure note au

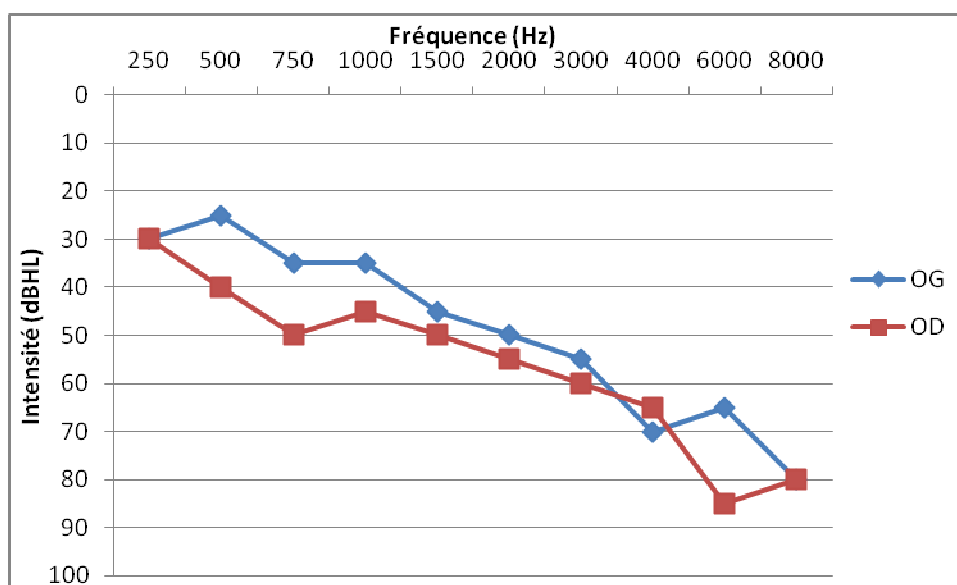


réglage  $Reg_{HG1C}$  pour deux musiques sur trois (G. Verdi et E. Piaf). On peut donc supposer que ces résultats pourraient être en accord avec les scores obtenus avec les autres sujets testés, le réglage en demi-gain sur un canal obtenant une moyenne plus élevée celle obtenue avec les autres réglages pour deux musiques sur trois.

Les trois sujets n'ayant pas effectué le test d'équilibre de tonie à 500-1000 Hz sont atteints d'une surdité liée à l'âge. Les notes obtenues avec le sujet X7 sont très proches pour les trois réglages. Cependant, on remarque que le réglage  $Reg_{HG1C}$  a obtenu la meilleure moyenne pour deux sujets sur trois (X9 et X13). Cela pourrait contribuer à la confirmation de l'hypothèse que l'amplification trop importante des aigus accentuerait le décalage de tonie, qui diminue ainsi la qualité d'écoute musicale.

## 2. Cas particulier du sujet X6

Nous nous intéressons à présent au sujet X6. Contrairement aux autres personnes testées, celui-ci n'est pas appareillé au quotidien. La figure 4.1 représente l'audiométrie tonale de ce sujet.



**Figure 4.1** : audiométrie tonale liminaire au casque du sujet X6

Sujet	RegFAB	RegHG1C	RegHGMC	Moyenne
X6	812.2	862.7	866.5	847.1

**Tableau 4.1 :** *Sujet X6 : résultats du test de perception de l'octave 500-1000 Hz avec les trois réglages.*

On remarque que toutes les fréquences obtenues sont inférieures à la valeur de l'octave 1000Hz de référence. Ce sujet a eu les résultats les plus décalés dans les basses fréquences. Cela laisserait supposer que ce sujet entendrait une note plus aiguë qu'une personne normoentendante et malentendante appareillée. Le sujet n'étant pas appareillé, on pourrait penser qu'il n'y aurait pas eu une réorganisation des fibres nerveuses due au renouvellement des stimulations au niveau de l'aire auditive primaire grâce au port permanent d'appareils auditifs. En effet, il a été montré que le port d'aides auditives pouvait avoir une influence sur le rétablissement de la fonction de tonie (figure 1.5, Gallego 2015b). Cela peut donc expliquer pourquoi les résultats du test montrent un décalage vers les fréquences graves plus important pour ce sujet. Il se pourrait que les notes soient perçues plus aiguës que chez le normo-entendant. Les cellules ciliées externes ne pouvant pas assurer leur rôle, il y a probablement le phénomène de « basal shift » au niveau de la cochlée notamment pour le lieu codant les hautes fréquences. De plus une désafférentation corticale au niveau de l'aire auditive primaire a pu accentuer ce décalage.

Le réglage en demi-gain sur un canal Reg<sub>HG1C</sub> a obtenu la meilleure moyenne pour ce sujet également. Le réglage Reg<sub>HGMC</sub> a obtenu une moyenne de 0 sur 100. Compte tenu des résultats du test d'équilibre de tonie, on pourrait donc en déduire que le décalage de tonie provoqué par la perte auditive puisse être accentué par

l'amplification importante apportée par un tel réglage, en accord avec l'hypothèse que nous proposons pour expliquer nos résultats.

## V. CONCLUSION

Ce travail visait à étudier l'équilibre de tonie en fonction des propriétés audiométriques de chaque sujet ainsi que l'influence que peuvent apporter trois réglages différents sur l'écoute de la musique : le réglage du fabricant, le réglage en demi-gain sur un canal et le réglage en demi-gain par demi-octave. Nous avons pu observer que le réglage en demi-gain sur un canal apportait significativement une meilleure qualité d'écoute musicale par rapport aux deux autres réglages testés. Un réglage linéaire a été plus apprécié qu'un réglage comprenant de la compression d'intensité. Nous avons vu également que les propriétés audiométriques ont une influence sur le degré de déviation de la tonie. En effet les tests ont montré que le degré de déviation de tonie évoluait en fonction de la pente de l'audiogramme. Ainsi nous avons pu supposer que l'amplification, apportée de manière à corriger la perte auditive sur les hautes fréquences, pourrait accentuer ce déséquilibre de tonie et ainsi diminuer la qualité de l'écoute musicale, les harmoniques des sons complexes pouvant subir le déséquilibre de tonie à cause de l'amplification importante des aigus ainsi que le phénomène de basal shift provoqué par la perte auditive dans ces fréquences. Les distorsions de tonie sont donc présentes chez le malentendant notamment lorsque la surdité est plus importante sur les aigus que sur les graves. Aujourd'hui, la diplacousie est un phénomène qui n'est pas mesuré, pas quantifié et pas forcément soupçonné par un audioprothésiste lambda. Dans un premier temps, il est nécessaire de mieux appréhender les conséquences de la surdité sur la fonction de tonie et les distorsions fréquentielles en général. Cela pourra permettre par la suite de mieux cibler la correction auditive à apporter pour améliorer l'écoute de la musique.

Le Maître de Mémoire  
GALLEGO Stéphane

VU et PERMIS D'IMPRIMER  
LYON, le 14 octobre 2016

Le directeur de l'enseignement  
Stéphane GALLEGO

## BIBLIOGRAPHIE

Bacconin M. *Approche de la diplacousie sur un plan quantitatif : étude chez le musicien*. 82p. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'état d'audioprothèse. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2008.

Bekesy, G V. *Experiments in hearing* (1960). Mc Graw-Hill, New York.

Burns, Edward M. Turner C. *Pure tone pitch anomalies. II. Pitch intensity effects and diplacusis in impaired ears*. J acoust social Am (January 1986).

Chasin M, Russo F A, *Hearing aids and music*. (2004), Trends amplification, 8(2), 35-47

Gabriel D, Veuillet E, Vesson JF, Collet L. *Rehabilitation plasticity: influence of hearing aid fitting on frequency discrimination performance near the hearing-loss cut-off*. Hearing research (2006) ; 213(1-2):49-57

Gallego S, Colin D, Truy E, Girod A. *Equilibre de tonie valeur normative chez le normo-entendant ; mesure chez le malentendant*. Cahiers de l'audition (2015a, juin), p. 20-28.

Gallego S, Colin D, Truy E. (2015, Juin). *Plasticité cérébrale et rehabilitation auditive de la diplacousie*. ORL Autrement, 1<sup>er</sup> semestre 2015b p19-22.

GELFAND S A (2009), *Hearing : an introduction to psychological and physiological acoustics*.

Greenwood DD. *The Mel Scale's disqualifying bias and a consistency of pitch-difference equisections in 1956 with equal cochlear distances and equal frequency ratios*. Hear Res. 1997 jan; 103(1-2):199-224.

Hartmann W M, *Signals, Sound, and Sensation*. Springer, 2004 P296-297

Heinz MG, Swaminathan J, Boley JD, Kale S. *Across-Fiber Coding of Temporal Fine-Structure: Effects of Noise-Induced Hearing Loss on Auditory-Nerve Responses*. The Neurophysiological Bases of Auditory Perception 2010, Part 9, 621-630

Lorenzi A, Chaix B, [www.cochlea.eu](http://www.cochlea.eu).

Mc Kinney, Martin F, Bertrand Delgutte (1999, novembre), *A possible neurophysiological basis of the octave enlargement effect*. J Acoustic Soc Am 106 (5), 2679-2692

Oxenham AJ, *Pitch perception*. (2012, septembre), *Journal of Neuroscience* 32 (39) , 13335-13338

Oxenham AJ. *Pitch perception and auditory stream segregation: implications for hearing loss and cochlear implants*. Trends Amplif. 2008;12(4):316-31.

Sicot M. *Evaluation de l'apport des programmes musicaux sur la perception musicale chez le malentendant appareillé*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'état d'audioprothèse. Fougère : Université de Rennes 1, école d'audioprothèse Joseph E. Bertin, 2014. 107p.

Sundberg J, Lindqvist J. *Musical octaves and pitch*. J Acoust Soc Am. 1973;54:922–929.

Terhardt E. *Die tonhöhe harmonischer klänge und das oktavintervall*. Acustica. 1971;24:126–136

Thai-Van H, Micheyl C, Moore BC, Collet L. *Enhanced frequency discrimination near the hearing loss cut-off: a consequence of central auditory plasticity induced by cochlear damage?* Brain. 2003;126(Pt 10):2235-45.

Thai-Van H, Micheyl C, Norena A, Collet L. *Local improvement in auditory frequency discrimination is associated with hearing-loss slope in subjects with cochlear damage*. Brain. 2002;125(Pt 3):524-37.

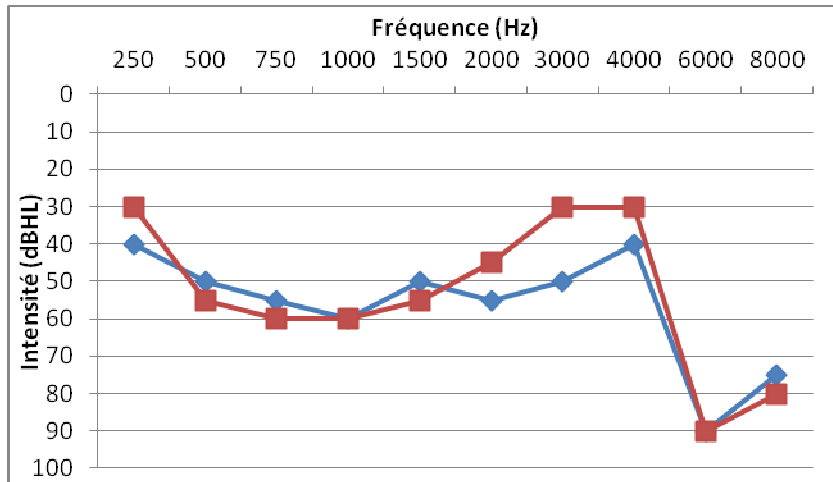
Walliser V. *Über die spreizung von empfundenen intervallen gegenüber mathematisch harmonischen intervallen bei sinustönen*. Frequenz. 1969;23:139–143.

Ward W. *Subjective musical pitch*. J Acoust Soc Am. 1954;26:369–380.



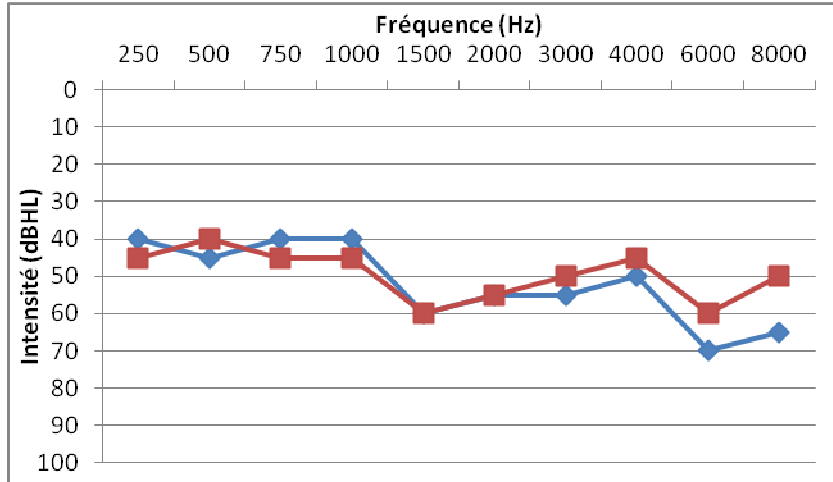
# ANNEXE 1

## Audiométries tonales classés selon les résultats des tests de perception de l'octave:



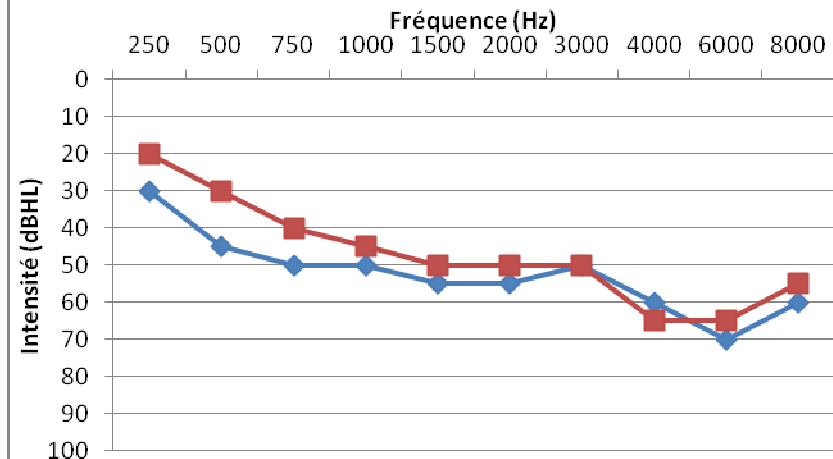
$F_{m1000} = 1086.5$

Sujet X10



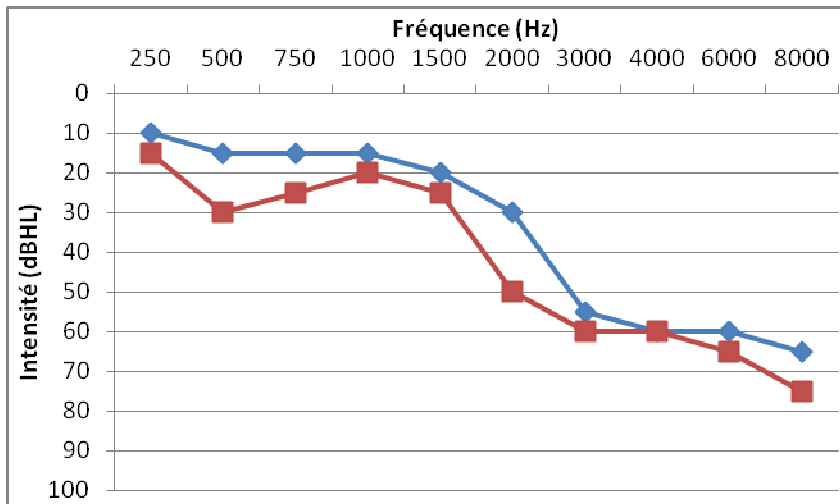
$F_{m1000} = 1068.5$

Sujet X11



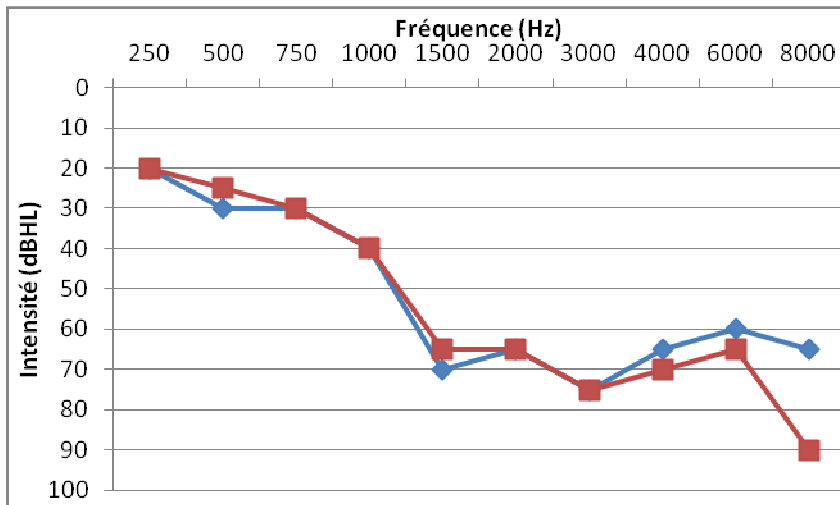
$F_{m1000} = 1025.3$

Sujet X4



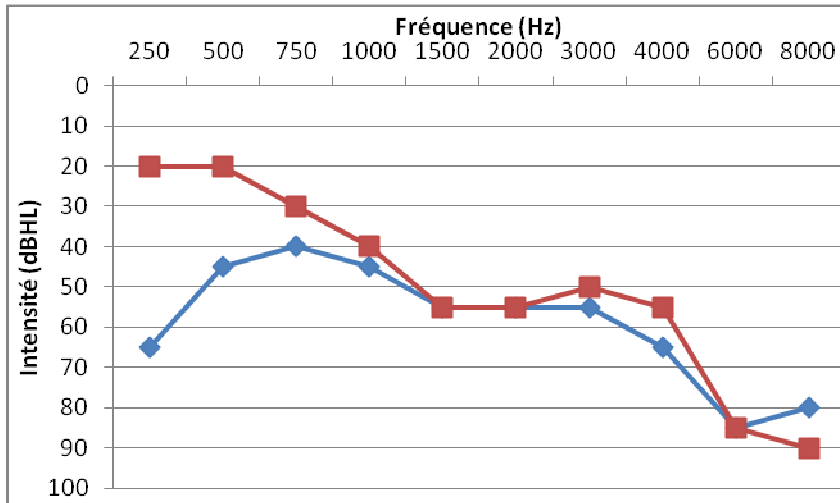
$$F_{m1000} = 1024$$

Sujet X8



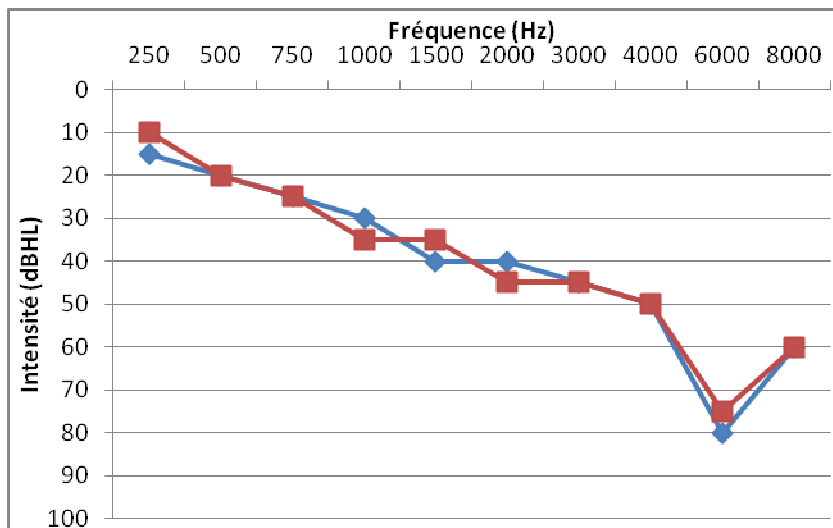
$$F_{m1000} = 1022.9$$

Sujet X13



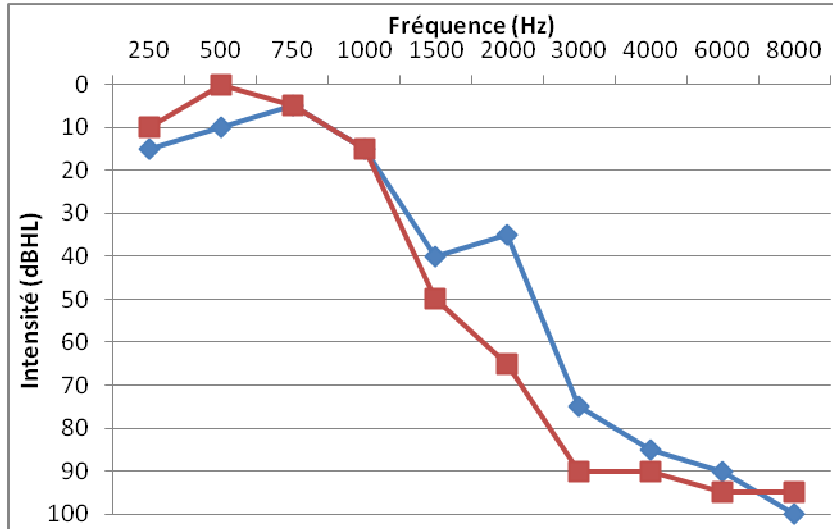
$$F_{m1000} = 984.2$$

Sujet X2



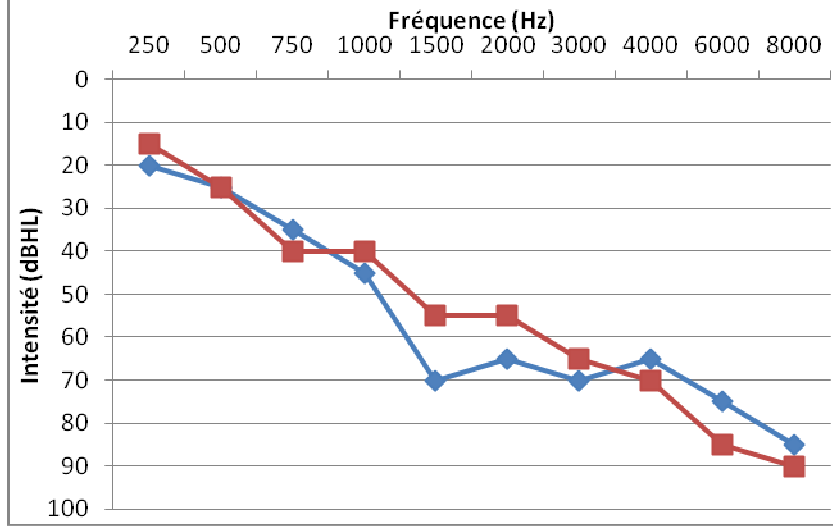
$F_{m1000} = 938.2$

Sujet X1



$F_{m1000} = 935.6$

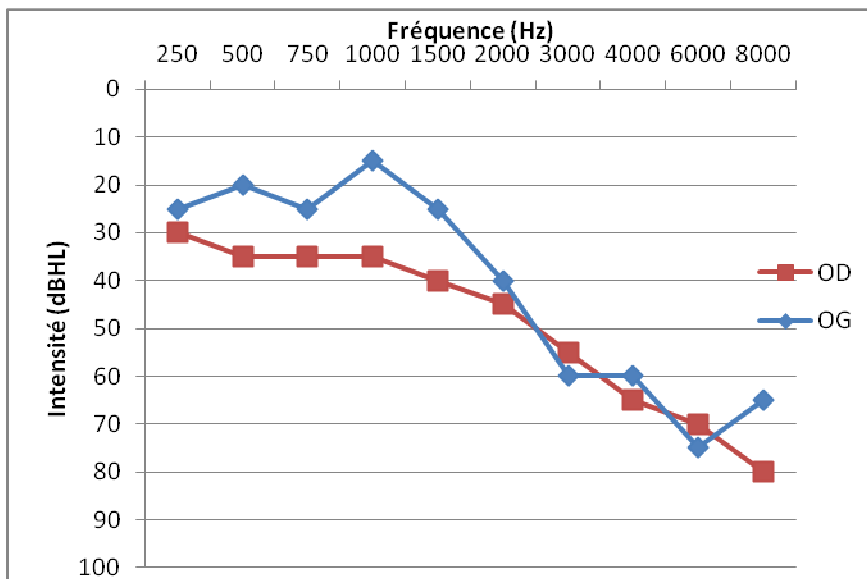
Sujet X5



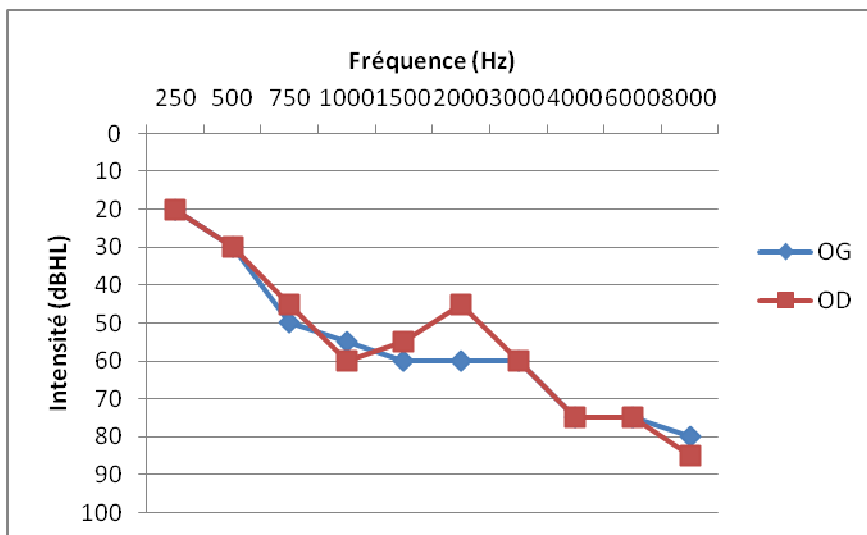
$F_{m1000} = 923.9$

Sujet X3

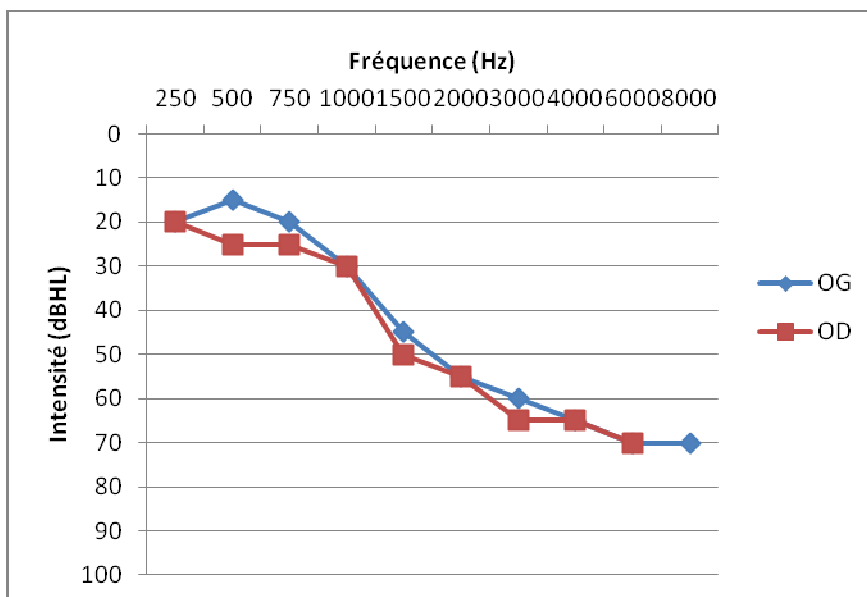
Audiogrammes des sujets ayant effectué uniquement le test d'écoute musicale :



Sujet X7

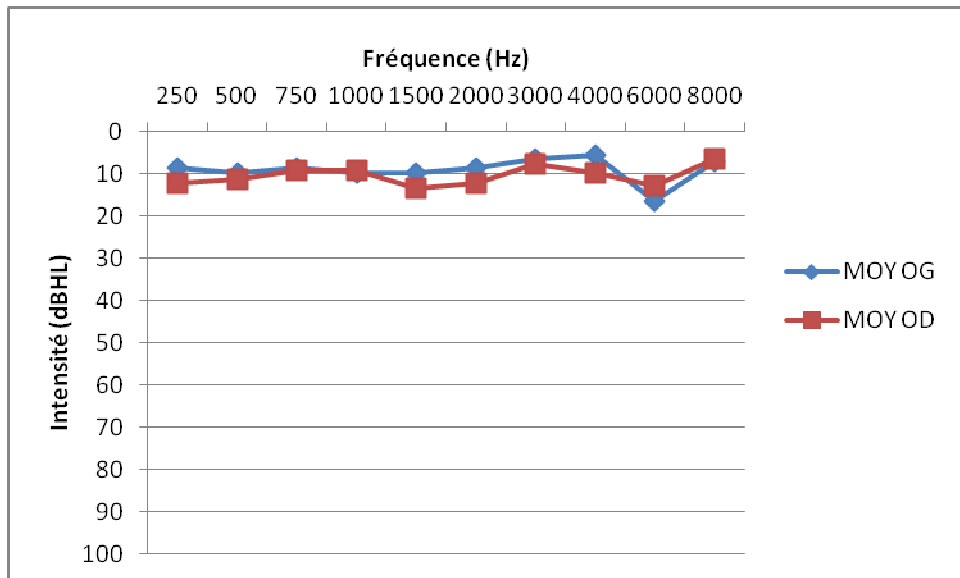


Sujet X9



Sujet X13

Moyenne des audiométries tonales des normoentendants non-musiciens :



Moyenne des audiométries tonales des normoentendants musiciens :

