الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme**

de **MASTER En** : Génie Biomédical

Spécialité : Électronique et Maintenance Biomédicale

Par : Soualah Aya

Sujet

La réalisation d'un audiomètre informatique sur PC développé sous environnement Python.

Soutenu publiquement le 22 /06/ 2026 devant le jury composé :

- **Président :** M. BEREKSI REGUIG Anes, (MCA) Département de Génie Biomédical
- **Examinateur :** M. HADJ AHMED Ismail, (MCB) Département de Génie Biomédical
- **Encadreur :** M. KHOLKHAL Mourad, (MCA) Département de Génie Biomédical

Année universitaire 2025 /2026

Dédicace :

Louange à Allah, le Très-Haut, qui m'a donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire :

À ma chère mère

Aucune parole ne pourra exprimer tout mon amour et ma gratitude envers toi.
Merci pour tes sacrifices, ton soutien, tes prières et ton affection infinie.
Que Dieu te protège et te garde toujours auprès de nous.

À mes chers frères et mes chères sœurs(Nacira,Hadia,Saida,Hichem,Tamer,Bilel)

Merci pour votre présence, vos encouragements et votre confiance en moi.
Vous avez toujours été une source de motivation et de bonheur dans ma vie.

Aux enfants de ma sœur (Massina,Massiva,Dassine,Selyane)

Vos sourires apportent la joie et la lumière dans nos vies.
Je vous souhaite un avenir rempli de réussite et de bonheur.

à ma tante et à son époux (Salima et abdesalam)
Un grand merci pour leur soutien, leurs encouragements et leur gentillesse

Je remercie aussi mon autre tante (Houria et ainsi que sa fille Amira) pour leur présence et leur soutien moral.

À la charmante maman de mon amie Aya ,(Bija)

Un grand merci pour votre générosité, votre hospitalité et votre grand cœur

À mes amies : Aya, Doua ,Ikram,Hafida,Houria,Fatima,Amani, Chiraz, Amina,tesnim,khouloud

Merci pour tous les beaux souvenirs partagés durant les années d'études.
Votre soutien, votre patience et vos encouragements m'ont beaucoup aidée tout au long de ce parcours.

À toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin

Je dédie ce travail avec beaucoup d'amour et de reconnaissance

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à **M. BEREKSI REGUIG Anes (MCA)**, Président du jury, pour l'honneur qu'il me fait en présidant cette soutenance.

Je remercie également **M. HADJ AHMED Ismail**, **(MCB)**, Examinateur, pour le temps consacré à l'évaluation de ce mémoire ainsi que pour ses remarques et observations constructives.

J'adresse enfin mes vifs remerciements à **M. KHOLKHAL Mourad (MCA)**, mon Encadreur, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce projet.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

RÉSUMÉ

Ce projet de fin d'études porte sur la conception et la réalisation d'un audiomètre informatique sur PC développé sous Python. L'objectif est de proposer une solution moderne et économique pour le dépistage des troubles auditifs par audiométrie tonale. Le système intègre la génération de signaux sonores, le contrôle de l'intensité acoustique ainsi qu'une interface graphique permettant le tracé de l'audiogramme en temps réel et la sauvegarde des résultats des tests dans une base de données. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité et l'efficacité d'une solution logicielle dédiée au dépistage auditif et mettent en évidence le potentiel des technologies informatiques dans le domaine du génie biomédical.

Mots-clés : Audiomètre informatique, Python, Audiométrie tonale, Traitement numérique du signal, Calibration, Audiogramme.

ABSTRACT

This final-year project focuses on the design and development of a PC-based digital audiometer using Python. The main objective is to provide a modern and cost-effective solution for hearing disorder screening through pure-tone audiometry. The system integrates sound signal generation, sound intensity control, and a graphical user interface that enables real-time audiogram plotting and the storage of test results in a database. The obtained results demonstrate the feasibility and effectiveness of a software-based solution for hearing screening and highlight the potential of computer technologies in the field of biomedical engineering.

Keywords: Digital audiometer, Python, Pure-tone audiometry, Digital signal processing, Calibration, Audiogram.

الملخص:

يتناول مشروع التخرج هذا تصميم وإنجاز مقياس سمع رقمي على الحاسوب تم تطويره باستخدام لغة بايثون. يهدف المشروع إلى تقديم حل حديث واقتصادي للكشف عن اضطرابات السمع بواسطة تخطيط السمع النغمي. يدمج النظام توليد الإشارات الصوتية، والتحكم في شدة الصوت، بالإضافة إلى واجهة رسومية تتيح رسم مخطط السمع في الوقت الفعلي وحفظ نتائج الاختبارات في قاعدة بيانات. وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها إمكانية وفعالية الحلول البرمجية المخصصة للكشف عن اضطرابات السمع، كما أبرزت الإمكانات الكبيرة للتقنيات المعلوماتية في مجال الهندسة الطبية الحيوية.

الكلمات المفتاحية: مقياس سمع رقمي، بايثون، تخطيط السمع النغمي، مخطط السمع، الكشف عن اضطرابات السمع

Table des matières

Introduction générale : 14
Anatomie et physiologie du système auditif 1
1 **Introduction :** 1
2 **Anatomie de l'oreille :** 2
2.1 **L'oreille externe :** 2
2.1.1 **Le pavillon :** 2
2.1.2 **Le conduit auditif externe :** 3
2.2 **L'oreille moyenne :** 4
2.2.1 **La caisse du tympan** : 4
2.2.2 **La chaîne des osselets :** 4
2.2.3 **Les cavités mastoïdiennes :** 5
2.2.4 **La trompe d'Eustache :** 5
2.3 **L'oreille interne :** 5
2.3.1 **Les canaux semi-circulaires :** 5
2.3.2 **La cochlée :** 5
2.3.3 **L'organe de corti :** 6
3 **Les centres nerveux et la voie auditive primaire :** 7
4 **Fonctionnement du système auditif humain :** 8
5 **La surdité (hypoacousie) :** 8
5.1 **Définition :** 8
5.2 **Classification de la surdité : les types** 8
5.3 **Les degrés de surdité (classification BIAP) :** 9
6 **Explorations fonctionnelles auditives :** 10
6.1 **Les méthodes subjectives** : 10
6.1.1 **L'acoumétrie :** 10
6.1.2 **Le test de Rinne :** 11
6.1.3 **Le test de Weber :** 11
6.1.4 **L'audiométrie :** 12
6.1.5 **L'audiométrie tonale :** 12
6.1.6 **Le masquage en audiométrie tonale :** 13
6.1.7 **Calcul de la perte auditive :** 13

6.1.8 **Exemples de résultats en audiométrie tonale :** 14
6.1.9 **L'audiométrie vocale :** 16
6.2 **Les méthodes objectives :** 16
6.2.1 **L'impédancemétrie :** 16
6.2.2 **La tympanométrie :** 17
6.2.3 **Les oto-émissions acoustiques :** 18
6.2.4 **Un potentiel évoqué (PE) :** 18
7 **Les principales maladies de l'oreille :** 20
8 **Traitement des maladies de l'oreille :** 20
9 **Le son et l'audition :** 21
9.1 **Définition de son :** 21
9.1.1 **Les caractéristiques de son :** 21
9.1.2 **La pression acoustique :** 21
9.1.3 **Le codage neuronal du son :** 22
10 **Conclusion :** 23
CHAPITRE : 0 2 24
Méthodologie et réalisation de l'audiomètre numérique 24
1 **Introduction :** 24
2 **État de l'art des audiomètres :** 24
3 **Choix technologiques** 25
3.1 **Pourquoi Python ?** 25
3.2 **Bibliothèques utilisées :** 26
4 **Architecture générale :** 26
5 **Diagramme fonctionnel de l'interface graphique** 26
6 **Structure logicielle :** 27
7 **Interface graphique avec Tkinter:** 27
7.1 **Présentation de Tkinter :** 27
7.2 **Organisation de l'interface :** 28
7.2.1 **Widgets et interactions :** 28
8 **Génération et lecture des sons :** 29
8.1 **Génération d'une onde sinusoïdale avec NumPy :** 29
9 **Enveloppe de fondu (fade in/out) :** 29

10 **Lecture stéréo avec SoundDevice :** 30
11 **Gestion des niveaux sonores et des décibels :** 30
11.1 **La référence et le dB "local''.** 30
11.2 **Conversion tension ↔ dB.** 30
12 **Algorithme du test audiométrique :** 31
13 **Gestion du multithreading :** 32
14 **Visualisation avec Matplotlib :** 32
14.1 **L'audiogramme : conventions graphiques :** 32
14.2 **Intégration dans Tkinter :** 33
14.3 **Interprétation automatique :** 34
15 **Persistance des données avec SQLite :** 34
35
16 **Export des résultats (CSV):** 37
17 **Protections de sécurité :** 38
18 **Conclusion :** 38
CHAPITRE 0 3 39
Résultats, tests et interprétations 39
1 **Introduction :** 39
2 **Environnement et conditions de test :** 39
3 **Résultats des tests :** 40
3.1 Sujet 1 : (24 ans) 40
3.2 Sujet 2 : (34 ans) 43
3.3 Sujet 3 : (55 ans) 45
3.4 Sujet 4 : (77 ans) 48
4. **Discussion Physiopathologique : L'Effet du Vieillissement (Âge vs Seuils)** 50
5. **Validation Scientifique et Métrologique de l'Audiomètre Informatique :** 51
6. **Conclusion :** 51
Conclusion Générale : 52

LA LISTE DES FIGURES :

Chapitre 01 : Anatomie et physiologie du système auditif

Figure 1. 1 : Anatomie de l'oreille. 1
Figure 1. 2 : Oreille externe 2
Figure 1. 3 : Le pavillon 2
Figure 1. 4 : Le conduit auditif externe 3
Figure 1. 5 : Les composant de tympan 3
Figure 1. 6 : L'oreille moyenne 4
Figure 1. 7 : L'oreille interne 5
Figure 1. 8 : Section axiale de la cochlée 6
Figure 1. 9 : Schéma-des-voies-auditives primaires 7
Figure 1. 10 : Les graphes des surdités 9
Figure 1. 11 : Les degrés de surdité 10
Figure 1. 12 : Casque TDH39 utilisée en audiométrie 12
Figure 1. 13 : Vibrateur pour la voie osseuse 12
Figure 1. 14 : Surdité mixte 14
Figure 1. 15 : Surdité de transmission 15
Figure 1. 16 : Surdité de perception 15
Figure 1. 17 : La courbe d'audiométrie vocale 16
Figure 1. 18 : Trois types classiques de tympanogrammes 17
Figure 1. 19 : Principe de l'OEA 18
Figure 1. 20 : Réponse OEA 18
Figure 1. 21 : Principe et exemple d'un PEA 19

Chapitre 02 : Méthodologie et réalisation de l'audiomètre numérique

Figure 2. 1 : Organisation de l'interface 27
Figure 2. 2 : L'audiogramme d'audition normal 32
Figure 2. 3 : Diagnostic automatique de votre programme 34
Figure 2. 4 : La structure de base des donnes 34
Figure 2. 5: Table de patient 35
Figure 2. 6: Exemple test d'oreille gauche de patient id 4 35
Figure 2. 7: Exemple test d'oreille droite de patient id 4 36
Figure 2. 8: La somme des patients et des testes 36
Figure 2. 9: Export des résultats (CSV) 37
Figure 2.10: Message pour exportation d'un fichier CSV 38

Chapitre 03 : Résultats, tests et interprétations

Figure 3. 1: Test sujet 1 40
Figure 3. 2: Tableau oreille gauche sujet 1 41
Figure 3. 3: Tableau oreille droite sujet 1 41
Figure 3. 4: Test sujet 2 43
Figure 3. 5: Tableau oreille gauche sujet 2 43
Figure 3. 6: Tableau oreille droite sujet 2 44
Figure 3. 7: Test sujet 3 45
Figure 3. 8: Tableau oreille gauche sujet 3 46
Figure 3. 9: Tableau oreille droite sujet 3 46
Figure 3. 10:Test sujet 4 48
Figure 3. 11:Tableau oreille gauche sujet 4.....48
Figure 3. 12 : Tableau oreille droite sujet 4.....49

LA LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre 01 : Anatomie et physiologie du système auditif

Tableau 1. 1 : Resultas test de weber..... 11
Tableau 1. 2 : Symboles utilisés en audiométrie ..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre 02 : Méthodologie et réalisation de l'audiomètre numérique

Tableau 2. 1 : Les Choix technologiques 25
Tableau 2. 2 : Widgets et interactions 28
Tableau 2. 3 : La structure d'audiogramme..... 33
Tableau 2. 4 : Interprétation automatique 34
Tableau 2. 5 : Table patients..... 37
Tableau 2. 6 : Table tests 37

Chapitre 03 : Résultats, tests et interprétations

Tableau 3. 1 : Environnement et conditions de test..... 39
Tableau 3. 2 : Récapitulatif des Sujets..... 50

Liste des abréviations :

Terme	Définition
Audiogramme	Graphique représentant les seuils d'audition en fonction de la fréquence
Cellules ciliées	Cellules sensorielles de la cochlée assurant la transduction
Décibel (dB)	Unité logarithmique de rapport d'intensité
dB HL	Hearing Level : niveau corrigé par rapport à l'audition normale (norme ISO)
FFT	Fast Fourier Transform : algorithme de transformation temps-fréquence
Fréquence	Nombre de cycles par seconde (Hz)
Impédance	Résistance au passage du son
Masquage	Bruit présenté à l'oreille non testée pour éviter la participation
Tonotopie	Organisation spatiale des fréquences dans la cochlée
Transduction	Conversion d'une forme d'énergie en une autre

Introduction générale :

L'évaluation de la fonction auditive a profondément évolué, passant des tests acoumétriques empiriques aux audiomètres électroniques traditionnels. Bien que performants, ces dispositifs matériels classiques s'avèrent onéreux, volumineux et complexes à calibrer sur le plan chirurgical ou de la maintenance hospitalière. L'état de l'art actuel s'oriente donc vers l'audiométrie sur PC (*PC-based audiometry*), une approche moderne exploitant la puissance des cartes son haute résolution et la flexibilité de la programmation logicielle. En utilisant le langage Python et ses bibliothèques scientifiques (NumPy, SoundDevice, Matplotlib), il devient possible de concevoir des solutions de dépistage hautement fidèles, mobiles et accessibles, capables de générer des signaux d'une pureté acoustique rigoureuse conformes aux normes CEI et ISO. C'est dans cette perspective d'innovation biomédicale que s'inscrit ce projet de fin d'études, dédié au développement de l'application « Audiométrie Numérique V5.5 ». Pour exposer notre démarche, le présent manuscrit est structuré en trois chapitres fondamentaux. Le premier chapitre pose les bases théoriques à travers l'étude anatomique et physiopathologique du système auditif, ainsi que les classifications des surdités selon les recommandations du Bureau International d'Audio-Phonologie (BIAP). Le deuxième chapitre est consacré à l'ingénierie logicielle, détaillant la conception de l'interface graphique sous Tkinter, l'algorithme de génération tonale et la gestion de la base de données relationnelle sous SQLite. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats des tests effectués pour valider notre audiomètre numérique. Nous décrivons d'abord l'environnement de test, puis les tests unitaires des composants, la validation fonctionnelle sur des sujets volontaires (sains et présentant des pertes légères), et enfin une interprétation des données et diagramme discussion physiopathologique et la validation scientifique et métrologique de l'audiomètre .

Chapitre 01 :

Anatomie et physiologie du système auditif

1 Introduction :

L'oreille est l'organe humain chargé d'enregistrer les sons du milieu extérieur par un système très compliqué de transmission des ondes sonores. Elle comprend trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne (Voir Figure 1.1). Le système auditif humain se caractérise par une sensibilité remarquable, couvrant une gamme de fréquences audibles de 20 Hz à 20 kHz et un large éventail de pressions acoustiques, allant de 20 µPa à 20 Pa, soit une dynamique impressionnante de 120 dB. Cette sensibilité cependant tendance à diminuer avec l'âge.

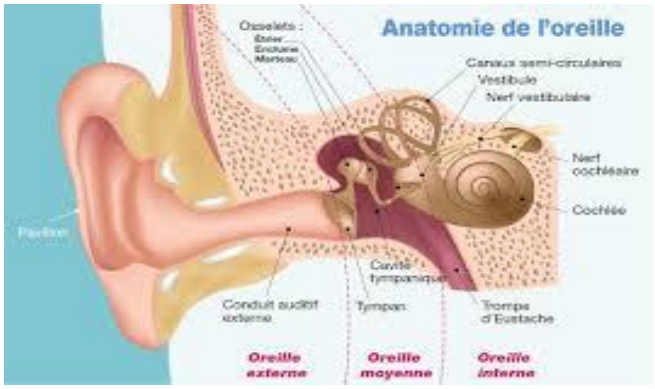


Figure 1. 1: Anatomie de l'oreille.

2 Anatomie de l'oreille :

2.1 L'oreille externe :

L'oreille externe (voir Figure 1.2) est la partie visible de l'oreille qui comprend le pavillon et le conduit auditif externe [1].

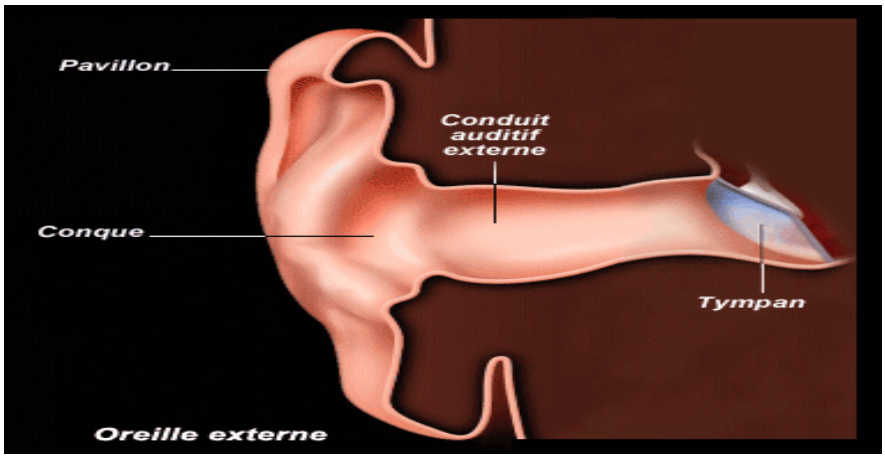


Figure 1. 2: Oreille externe.

2.1.1 Le pavillon :

Le pavillon est la lamelle semi-rigide faisant saillie à la face latérale du crâne. C'est la partie de l'oreille qui est externe et visible. Il est constitué par des reliefs et des creux d'origine cartilagineuse, et recouvert sur ses deux faces par la peau. La face externe comprend (voir Figure 1. 3) : la conque (l'endroit où débute le conduit auditif externe), le tragus, l'antitragus, l'anthélix, la gouttière de l'anthélix et l'hélix. La face interne est séparée de la paroi crânienne par le sillon céphalo-auriculaire [1]

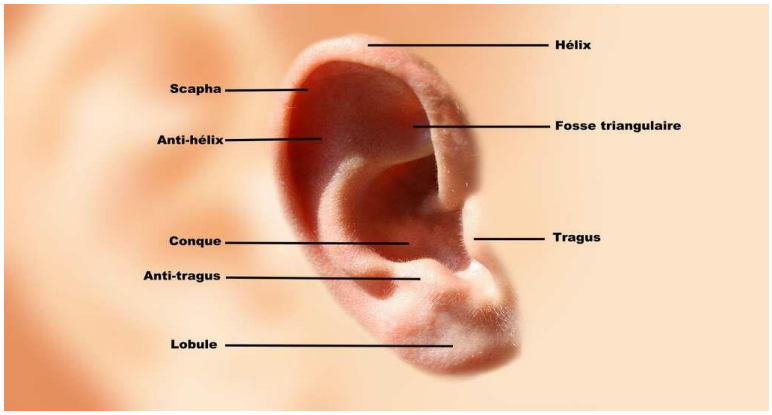


Figure 1. 3 : Le pavillon

2.1.2 **Le conduit auditif externe :**

Le conduit auditif externe Est aussi appelé méat acoustique externe (MEA) et s'étend de la conque jusqu'au tympan (Voir Figure 1.4) sur une longueur d'environ 25 mm et un diamètre de 8 à 9 mm (Voir Figure 1.5)
Sa partie interne est formée d'un tissu osseux et sa partie externe
D'un tissu fibro-cartilagineux [1].

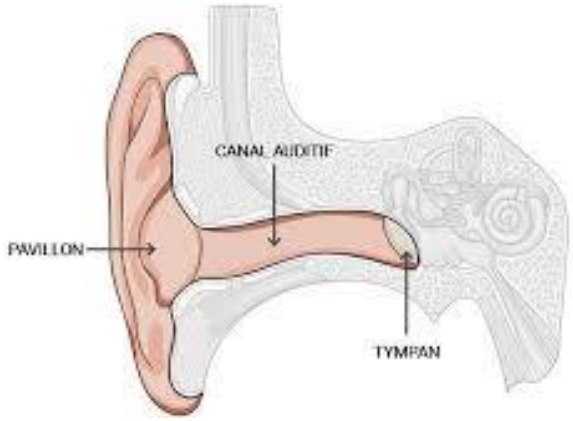


Figure 1. 4 : Le conduit auditif externe

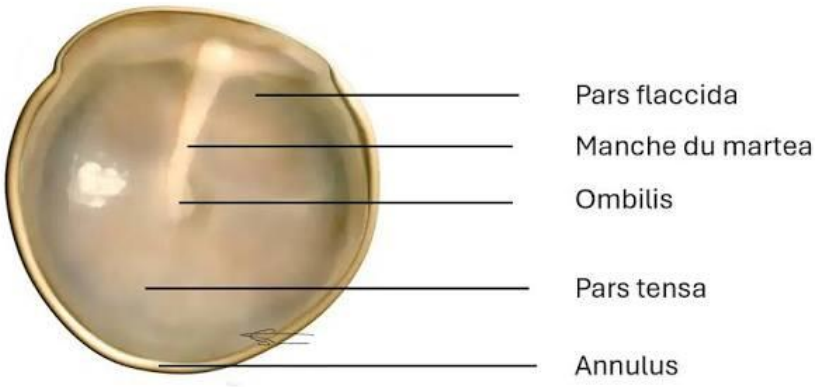


Figure 1. 5 : Les composant de tympan.

2.2 L'oreille moyenne :

L'oreille moyenne est l'organe essentiel de transmission sonore [1]

(Voir Figure 1. 6) Il est constitué de 03 parties : la caisse du tympan, l'antre mastoïdien et la trompe d'Eustache.

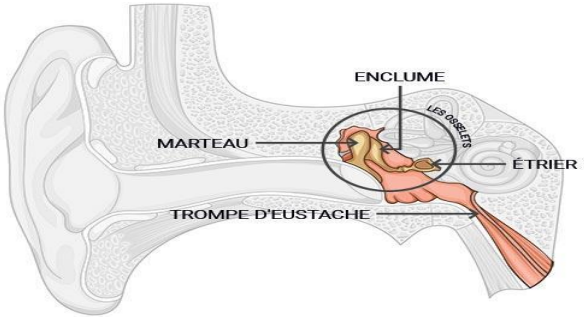


Figure 1. 6 : L'oreille moyenne

2.2.1 La caisse du tympan :

Est une cavité cylindrique constituée de la chaîne des osselets et contenant 06 parois [1].

- En haut, **la paroi antérieure** montre l'orifice du canal du muscle de marteau ; en bas, **l'orifice de la trompe d'Eustache**.
- **La paroi inférieure**, ou plancher, correspond à la région du golfe de la jugulaire.
- **La paroi postérieure ou mastoïdienne**, ouverture en haut.

- **La paroi interne ou labyrinthique** sépare la caisse du tympan de l'oreille interne
- **La paroi supérieure ou crânienne** est le segment tympanique.

2.2.2 La chaîne des osselets :

Ils sont trois et sont maintenus entre eux par des articulations et des ligaments [1] :

- **Le marteau** : le plus gros et le plus externe possède un manche, un col, deux apophyses et une tête articulaire avec l'enclume. Il a le muscle du marteau ou tenseur du tympan qui étouffe les bruits violents, innervé par une branche du nerf mandibulaire.
- **L'enclume** : à l'arrière du marteau présente un corps et deux branches supérieure et inférieure qui se terminent par une apophyse lenticulaire.
- **L'étrier** : formé d'une tête, de deux branches antérieure et postérieure, et d'une platine. Il possède le muscle de l'étrier antagoniste du muscle du marteau qui permet l'écoute des bruits faibles, innervé par un rameau du facial.

2.2.3 Les cavités mastoïdiennes :

Elles sont constituées de l'antre mastoïdien (cavité à parois multiples : supérieure, postérieure, interne, latérale et antérieure) et des cellules mastoïdiennes (cavités de petites dimensions, distinguées en cinq groupes) [1].

2.2.4 La trompe d'Eustache :

Est un canal de 35 à 45 mm de longueur, oblique en avant, en bas et en dedans, mettant en communication la caisse du tympan avec le rhinopharynx. Elle est constituée d'une partie osseuse et d'une partie cartilagineuse. Sa muqueuse est de type pharyngé et forme l'amygdale tubaire [1].

2.3 L'oreille interne :

L'oreille interne est l'organe principal de l'audition, (Voir Figure 1.7) car c'est le responsable de la transduction du signal acoustique en message nerveux. Son anatomie et sa physiologie très complexes sont à l'origine des capacités auditives très performantes dont disposent les mammifères. Elle est caractérisée par la cochlée et les canaux semi-circulaires [7].

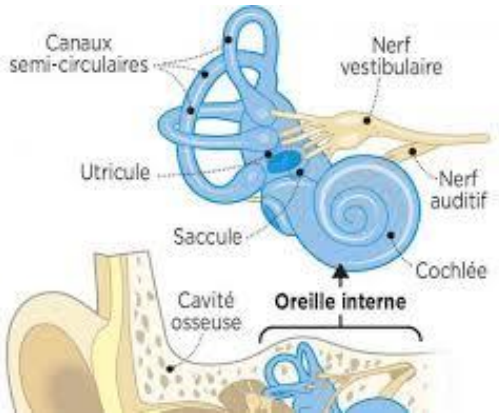


Figure 1. 7 : L'oreille interne

2.3.1 Les canaux semi-circulaires :

Servent à l'équilibre du sujet, conjointement avec la vue et la proprioception [7].

2.3.2 La cochlée :

Est un transducteur mécano-neurosensoriel (transforme l'énergie mécanique en influx nerveux) qui sert d'intermédiaire entre le son et le cerveau (Voir Figure 1.8). Elle se présente sous forme de spirale d'environ 35 mm de long qui vibre sous les coups de la chaîne ossiculaire. Cette cochlée est séparée par une membrane sur toute sa longueur en deux demi-rampes remplies d'un liquide endolymphatique. Entre les rampes se trouve le canal cochléaire contenant l'organe sensoriel essentiel de l'audition : l'organe d Corti [7]

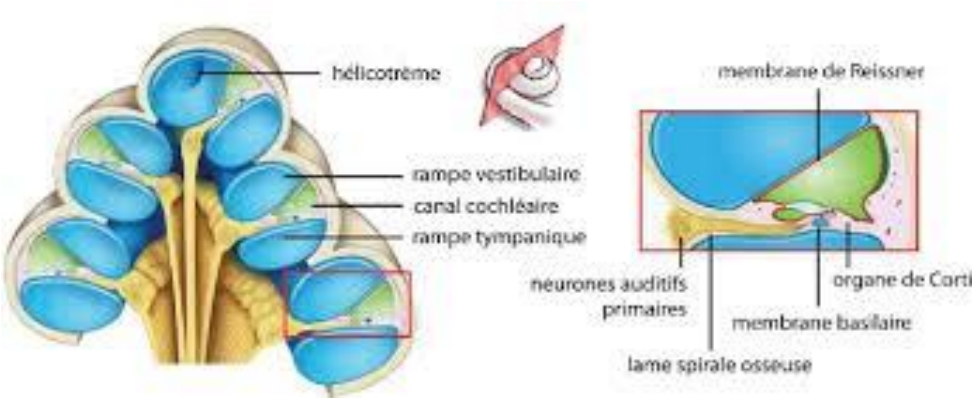


Figure 1. 8 : Section axiale de la cochlée.

2.3.3 L'organe de corti :

Repose sur la membrane basilaire et s'enroule de la base à l'apex de la spirale cochléaire. Il est composé des cellules sensorielles ou cellules ciliées connectées à des fibres nerveuses. Il existe deux types des cellules ciliées.

- **Les cellules ciliées internes (CCI) :** environ 3500
- **Les cellules ciliées externes (CCE) :** environ 12500

Chaque CCI est connectée à environ 10 fibres nerveuses tandis que 10 CCE sont contactées par une même fibre. Les CCI sont les « véritables » cellules sensorielles puisqu'elles transmettent 95 % des messages nerveux contre 5 % pour les CCE. Par opposition, les CCE reçoivent les messages efférents du système nerveux central [7]

3 Les centres nerveux et la voie auditive primaire :

Le cerveau auditif, aussi appelé cortex auditif ou cortex auditif central (Voir Figure 1.9), est au cœur des traitements auditifs binauraux. La voie auditive primaire est celle qui va permettre d'envoyer l'information sonore de la cochlée jusqu'au cortex auditif afin qu'elle soit reconnue et mémorisée. Cette voie est rapide (fibres myélinisées, peu de synapses) et effectue un décodage de plus en plus complexe en montant vers le cortex.

La voie auditive primaire passe par plusieurs relais, chaque relais a un rôle spécifique dans l'analyse et le décodage de l'information sonore

- **Noyau cochléaire du tronc cérébral :** décodage en intensité, durée, fréquence
- **Olive supérieur et colliculus inférieur :** localisation dans l'espace
- **Thalamus (corps genouillé médian) :** intégration des informations avec préparation d'une réponse verbale

Cortex auditif (aire n°4) : reconnaissance (discrimination) et mémorisation [9].

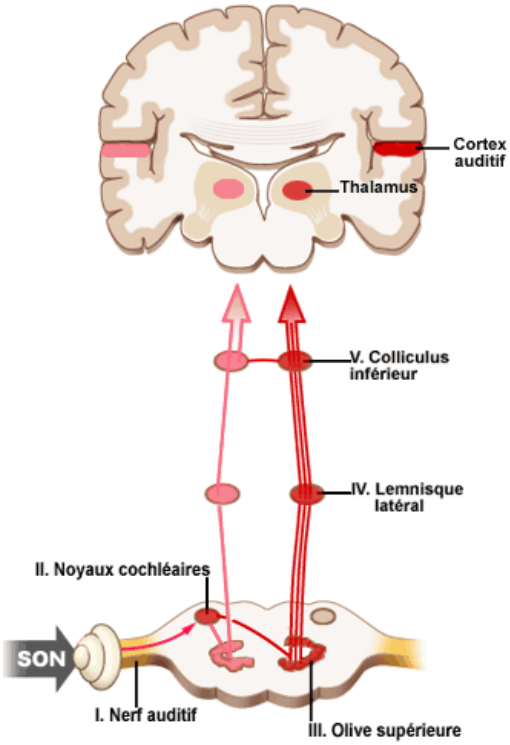


Figure 1. 9 : Schéma-des-voies-auditives primaire

Le colliculus inférieur, où s'opèrent des décussations avec l'autre relais controlatéral, joue un rôle majeur dans la stéréophonie. Les informations échangées vont permettre d'encoder de manière précise les différences interaurales de temps et d'intensité entre les deux oreilles et donc permettre la localisation sonore spatiale [9]

4 Fonctionnement du système auditif humain :

L'oreille externe a pour rôle de capter les sons venant de l'environnement. Elle permet aussi de renforcer certaines fréquences, notamment celles utiles pour comprendre la parole, tout en protégeant le tympan. Ce dernier est une fine membrane qui se met à vibrer lorsqu'elle reçoit les ondes sonores.

Ces vibrations sont ensuite transmises à l'oreille moyenne grâce aux trois osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Leur fonction est d'amplifier le mouvement du tympan et de le transmettre vers l'oreille interne, plus précisément à la cochlée.

À l'intérieur de la cochlée se trouvent des milliers de cellules ciliées plongées dans un milieu gélatineux. Ces cellules sont essentielles, car elles permettent à la fois d'amplifier les vibrations et de distinguer les différentes fréquences sonores, des plus graves aux plus aiguës. Elles transforment ensuite ces vibrations en signaux électriques.

Ces signaux sont finalement envoyés au cerveau, qui les analyse et les interprète pour nous permettre de reconnaître et

5 La surdité (hypoacousie) :

5.1 Définition :

La surdité correspond à une réduction, partielle ou complète, de la capacité auditive [15]. Elle se traduit par une altération du fonctionnement du système auditif, entraînant une augmentation du seuil auditif. Autrement dit, le son doit être plus intense que la normale pour être perçu par l'oreille [13].

La surdité peut être classée selon différents critères :

Selon le type : surdité de transmission, de perception ou mixte

Selon le degré de perte : légère, modérée, sévère, profonde ou totale

5.2 Classification de la surdité : les types

Surdité de transmission : ce type de surdité est lié à une atteinte de l'oreille externe ou moyenne. (Voir Figure 1.10) Dans ce cas, la conduction osseuse reste normale (courbe élevée), tandis que la conduction aérienne est diminuée, généralement sans dépasser une perte de 40 à 50 dB.

Surdité de perception : elle résulte d'une atteinte de l'oreille interne ou des voies nerveuses auditives. Les courbes de conduction aérienne et osseuse sont abaissées de manière parallèle, souvent avec une atteinte plus marquée des sons aigus.

Surdité mixte : ce type combine les caractéristiques des surdités de transmission et de perception. On observe une diminution de la conduction osseuse, associée à une baisse encore plus importante de la conduction aérienne, ce qui aggrave la perte auditive globale [11].

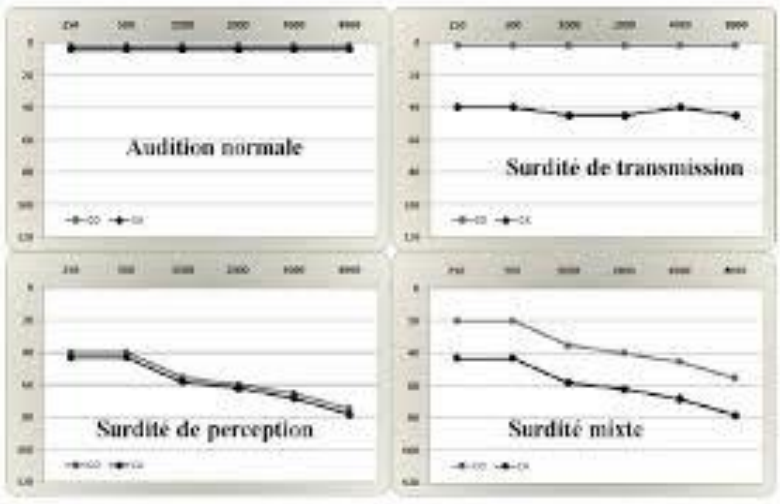


Figure 1.10: Les graphes des surdités

5.3 Les degrés de surdité (classification BIAP) :

Selon le Bureau International d'Audiophonologie (BIAP), les pertes d'audition sont classées en 6 catégories : (Voir Figure 1.11).

Normale : en dessous de 20 dB, on considère dans ce cas l'audition normale.

Légère : 21 à 40 dB, dans ce cas la perte devient gênante pour les sons faibles et souvent pour des sons aigus.

Moyenne : 41 à 70 dB, elle a pour conséquence une diminution notable de la compréhension de la parole.

Sévère : 71 à 90 dB, dans ce cas l'audition se limite aux sons forts et la compréhension est très difficile sans appareillage.

Profonde : 91 à 120 dB, dans ce cas la parole n'est plus du tout perçue et seuls les bruits très puissants entendus sans être nécessairement identifies.

Totale : Au-delà de 120 dB, pas d'audition mesurable [12].

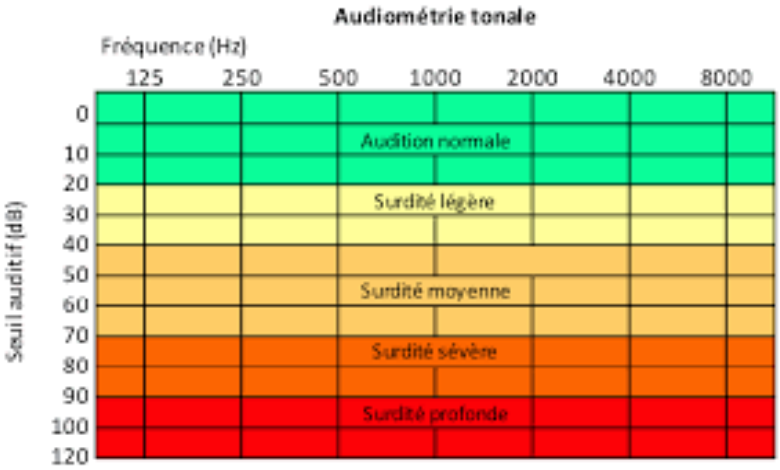


Figure 1.11 : Les degrés de surdité

6 Explorations fonctionnelles auditives :

Les explorations auditives ont pour but de confirmer la présence d'une perte auditive, d'en déterminer l'intensité ainsi que la nature, qu'il s'agisse d'une surdité de transmission, de perception ou mixte. Ces examens permettent au médecin d'établir un diagnostic précis face à un trouble de l'audition et d'en identifier la cause.

On distingue généralement deux types de méthodes [5] :

- **Les méthodes objectives :** elles ne dépendent ni de la participation du patient ni de l'interprétation de l'examinateur
- **Les méthodes subjectives :** elles nécessitent la collaboration du patient, et leurs résultats peuvent varier selon les réponses fournies et l'évaluation de l'observateur

6.1 Les méthodes subjectives :

Les méthodes subjectives reposent sur la participation active du patient. Elles exigent une bonne compréhension des consignes, ce qui peut constituer une limite dans certains cas. De plus, les résultats peuvent être influencés volontairement ou involontairement par le sujet examiné.

Ces méthodes regroupent principalement l'acoumétrie et l'audiométrie.

6.1.1 L'acoumétrie :

L'acoumétrie est l'une des premières techniques utilisées pour évaluer l'audition. Elle comprend deux formes : l'acoumétrie phonique et l'acoumétrie instrumentale.

L'acoumétrie phonique est une méthode simple de dépistage. Elle consiste à faire répéter au patient des mots prononcés à voix normale puis

à voix basse (chuchotée), tout en augmentant progressivement la distance entre le patient et l'examinateur.

L'acoumétrie instrumentale est plus couramment utilisée. Elle fait appel à un diapason et permet d'orienter le diagnostic vers le type de surdité. Elle repose principalement sur deux tests : le test de Rinne et le test de Weber.

6.1.2 Le test de Rinne :

Le test de Rinne permet de comparer la conduction osseuse et la conduction aérienne Il consiste à placer un diapason en vibration sur la mastoïde (conduction osseuse), puis à le positionner devant le conduit auditif externe (conduction aérienne).

- En cas de **surdité de transmission** (du côté testé) **:** la conduction osseuse est mieux perçue que la conduction aérienne. On parle alors de Rinne négatif.

- En cas **d'audition normale ou de surdité de perception :** la conduction aérienne est supérieure à la conduction osseuse. On parle dans ce cas de Rinne positif [5].

6.1.3 Le test de Weber :

Le test de Weber est réalisé uniquement en conduction osseuse. Comme le décrit Leveque, il consiste à placer un diapason vibrant au niveau du sommet du crâne (vertex) ou du front du patient, puis à lui demander de préciser de quel côté il perçoit le son

Trois situations peuvent se présenter :

Tableau 1. 1 : Résultats test de weber

Situation	Perception	Interprétation
Audition normale	Son perçu au centre, égal dans les deux oreilles	Weber centré
Surdité de perception	Son perçu du côté de l'oreille saine	Weber latéralisé du côté sain
Surdité de transmission	Son perçu du côté de l'oreille atteinte	Weber latéralisé du côté atteint

L'explication physiologique de ces résultats repose sur les mécanismes de conduction. En cas de surdité de transmission, les vibrations sonores transmises par voie osseuse sont moins atténuées dans l'oreille atteinte, notamment en raison d'une diminution des bruits environnants [5]

6.1.4 L'audiométrie :

Plusieurs L'audiométrie est un examen largement utilisé pour évaluer les capacités auditives. Elle repose sur l'utilisation d'appareils capables de générer des sons purs ainsi que des mots, qui sont transmis au patient à l'aide d'un casque dans un environnement insonorisé.

Les sons émis varient en fréquence et en intensité, ce qui permet d'explorer différentes zones de l'audition. En parallèle, des listes de mots sont proposées au patient, qui doit les répéter. Cette procédure permet de déterminer avec précision le seuil auditif pour les principales fréquences du domaine auditif humain.

Les données recueillies sont ensuite représentées sous forme d'un graphique appelé audiogramme Cet examen est dit subjectif, car il dépend de la participation et de la coopération du patient. De ce fait, il est généralement difficile à réaliser chez les enfants de moins de quatre ans.

On distingue deux grandes catégories d'audiométrie : l'audiométrie tonale et l'audiométrie vocale.

6.1.5 L'audiométrie tonale :

Limites des examens L'audiométrie tonale constitue l'examen de référence. Elle permet d'évaluer à la fois l'importance de la perte auditive et sa nature. Elle se réalise selon deux modes de transmission :

- La voie aérienne, à l'aide d'un casque placé sur l'oreille (Voir Figure 1.12).

- La voie osseuse, grâce à un vibrateur appliqué sur la mastoïde, permettant d'explorer directement l'oreille interne (Voir Figure 1.13).



Figure 1. 12 : Casque TDH39 utilisée en audiométrie



Figure 1. 13 : vibrateur pour la voie osseuse

L'audiométrie tonale a pour objectif de déterminer les seuils auditifs de chaque oreille, testée séparément, en utilisant deux types de conduction : la conduction aérienne et la conduction osseuse.

L'exploration des fréquences se fait de manière progressive, généralement selon les octaves, allant de 125 Hz à 8000 Hz. L'intensité des sons est également variée, habituellement de -10 dB jusqu'à 120 dB, avec des paliers de 5 dB, afin de définir avec précision le seuil minimal perçu pour chaque fréquence.

- En conduction aérienne, le son est transmis par un casque et traverse le conduit auditif externe, le tympan ainsi que les osselets avant d'atteindre l'oreille interne En revanche, la conduction osseuse permet de contourner ces structures en transmettant directement les vibrations à travers les os du crâne vers la cochlée.

Un examen audiométrique complet doit impérativement explorer ces deux voies de conduction. Cela permet d'obtenir deux courbes distinctes dont l'analyse aide à déterminer le degré et le type de surdité [21].

6.1.6 Le masquage en audiométrie tonale :

En audiométrie tonale on utilise le masquage dans le but d'empêcher l'oreille non testée de répondre à la place de celle en train d'être évaluée. Pour cela, on envoie dans l'oreille non testée un bruit blanc (bruit comportant toutes les fréquences du spectre sonore à intensité égale) dont le niveau doit être ajusté à chaque individu et à chaque fréquence. Il est recommandé d'utiliser un masquage lorsque l'écart entre les courbes aérienne et osseuse dépasse 45 dB.
L'application des règles d'efficacité et de non retentissement est l'une des méthodes qui permet de calculer le niveau du bruit utilisé pour le masquage :

- Critère d'efficacité (valeur minimale) : niveau du son test + delta d'assourdissement + la valeur du Rinne du côté de l'oreille à masquer
- Critère de non retentissement (valeur maximale) : niveau du son test + énergie de transfert transcrânien (60 dB) [21].

6.1.7 Calcul de la perte auditive :

Le traitement de Les résultats de l'audiométrie permet de mesurer le degré de surdité grâce à la perte totale moyenne calculée à partir de la conduction aérienne sur les fréquences 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz et 4000 Hz : L'audiométrie tonale a pour objectif de déterminer les seuils auditifs de chaque oreille, testée séparément, en utilisant deux types de conduction : la conduction aérienne et la conduction osseuse.

Perte totale moyenne = (Seuil_500Hz + Seuil_1000Hz + Seuil_2000Hz + Seuil_4000Hz) / 4

Le type de surdité est déduit de l'écart entre la courbe de la CA par rapport à la courbe de la CO et aussi des deux courbes par rapport à la normale (< 20 dB) [12]

Tableau 1.2 : Symboles utilisés en audiométrie

	Oreille droite	**Oreille gauche**
Voie aérienne	O	X
Voie osseuse	[	]

6.1.8 Exemples de résultats en audiométrie tonale :

- **Surdité de perception ou neurosensorielle :** la courbe osseuse est superposée à la courbe aérienne (Voir Figure 1.16).
- **Surdité de transmission :** abaissement de la courbe aérienne et des seuils normaux

(< 20 dB HL) en conduction osseuse (Voir Figure 1.15).

- Surdité mixte : les seuils aériens et osseux sont abaissés mais non superposés. La courbe aérienne est plus basse que la courbe osseuse (Voir Figure 1.14) [21].

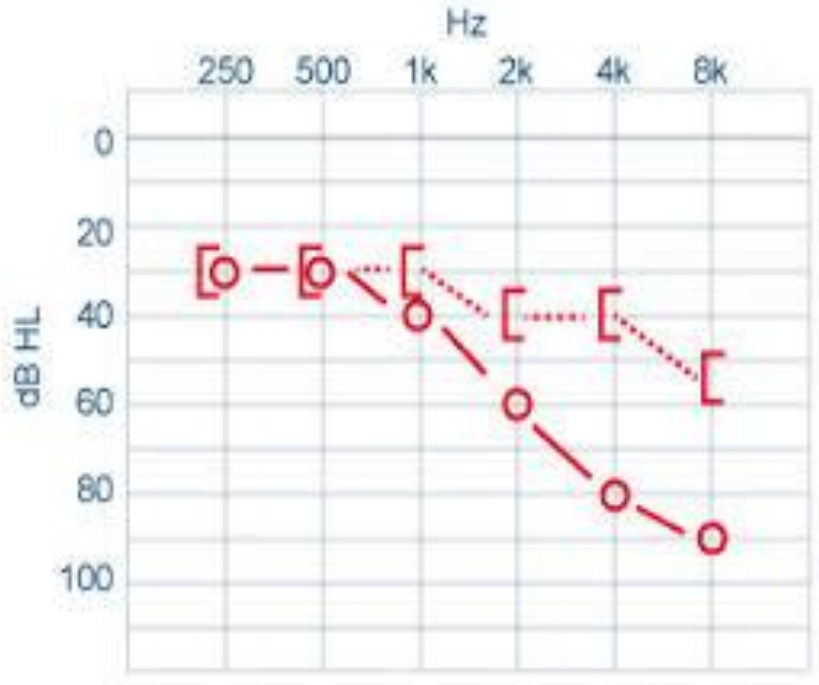


Figure 1. 14 : Surdité mixte

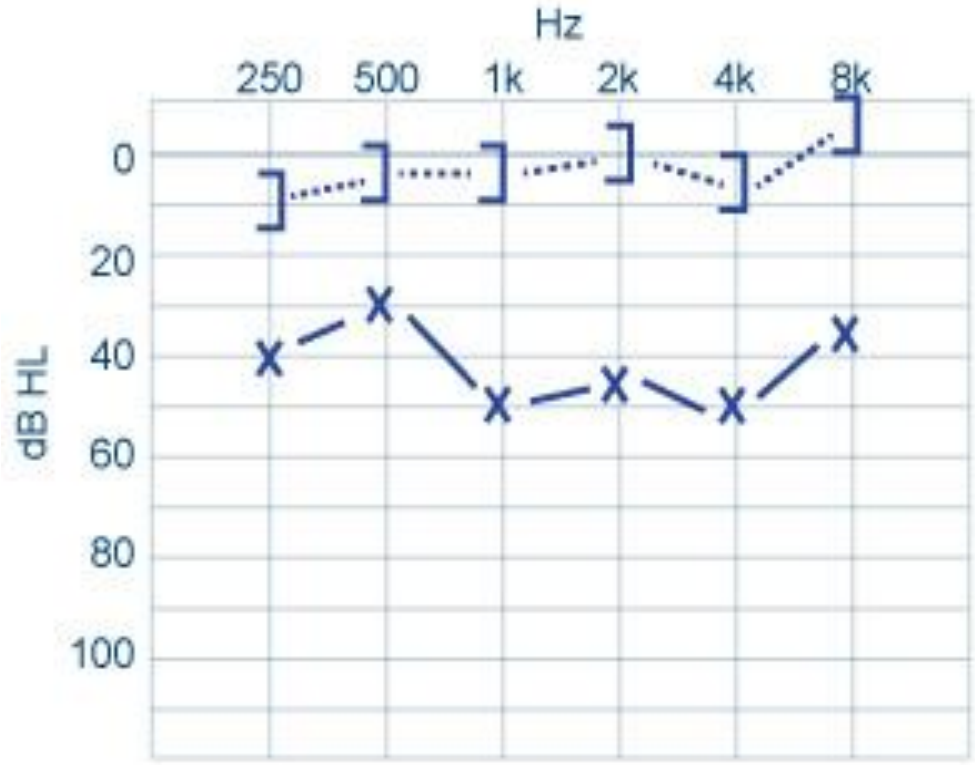


Figure 1.15: Surdité de transmission

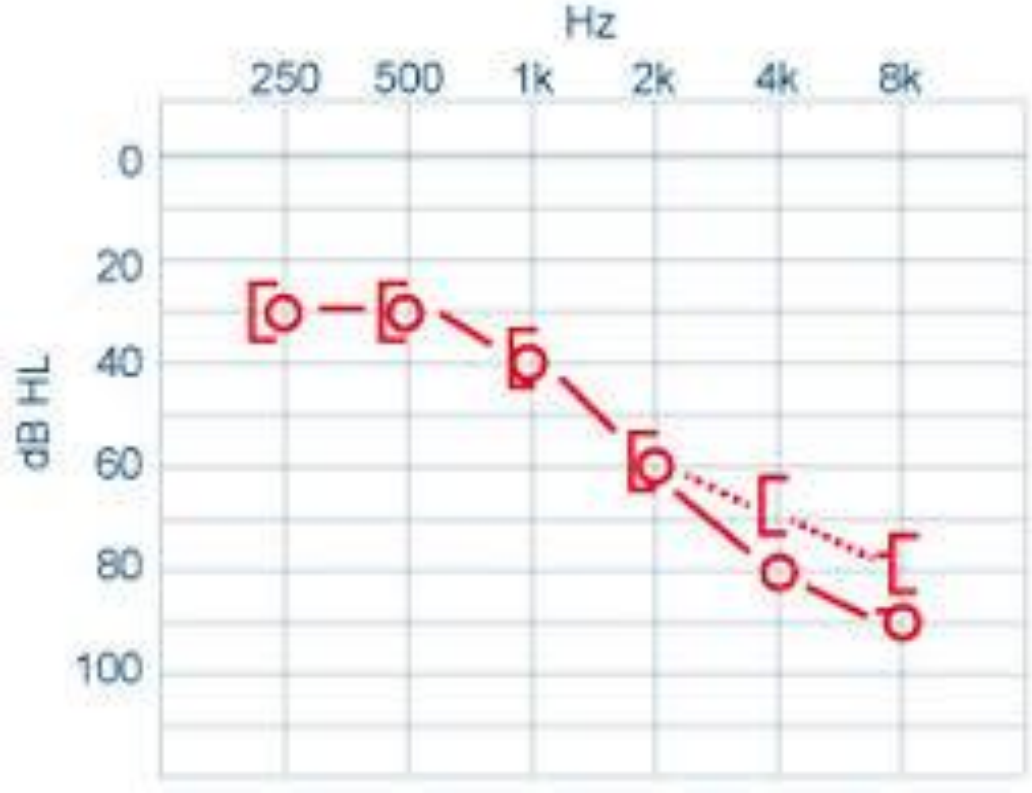


Figure 1. 16 : Surdité de perception

6.1.9 L'audiométrie vocale :

L'audiométrie vocale complète très souvent l'audiométrie tonale et confirme ses résultats. Elle consiste à faire répéter des mots, soit envoyés par le casque dans une oreille, soit envoyés par un haut-parleur placé devant le patient pour déterminer sa compréhension du langage (intelligibilité) ainsi que la discrimination (capacité à discerner des phonèmes) L'audiométrie vocale ne se pratique normalement pas pour la conduction osseuse.

En audiométrie vocale, les réponses correctes du patient (répétition exacte d'items entendus) sont notées en pourcentage (%) :

- Un score de 100 % à un niveau d'intensité inférieur à 20 dB HL est considéré comme normal (courbe A) (Voir Figure 1.17) Le seuil d'intelligibilité représente le niveau auquel 50 % des items (ou mots) sont compris.
- (La courbe B) dénote une hypoacousie
- (La courbe C) une perte sévère d'intelligibilité avec apparition de distorsions pour les intensités supérieures à 80 dB HL [11].

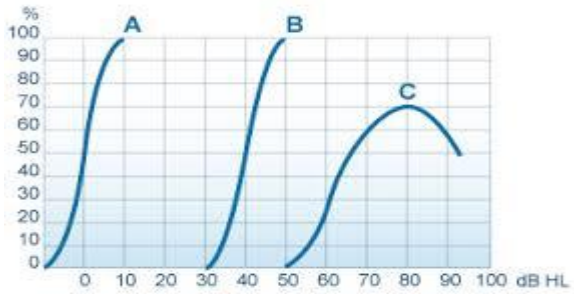


Figure 1. 17 : La courbe d'audiométrie vocale

6.2 Les méthodes objectives :

Les méthodes objectives sont basées sur l'enregistrement de l'activité électrique des divers relais de la voie auditive et ne font pas appel à la participation du sujet.

Il existe plusieurs types de méthodes objectives parmi lesquels on peut citer : l'impédancemétrie, les oto-émissions acoustiques (OEA), les potentiels évoqués auditifs (PEA) [29].

6.2.1 L'impédancemétrie :

L'impédance correspond à l'opposition qu'un système exerce au passage d'une vibration, qu'elle soit sonore, mécanique ou électrique. Elle résulte de deux éléments principaux : une partie liée aux frottements (résistance) et une autre liée à la masse et à la rigidité (réactance). Au niveau de l'oreille, les troubles sont le plus souvent influencés par la rigidité des structures.

En pratique audiologie, on s'intéresse au fonctionnement de l'oreille moyenne, notamment au système formé par le tympan et les osselets, qui permet une bonne transmission du son. Cette évaluation se fait grâce à l'impédancemétrie, qui regroupe plusieurs examens comme la tympanométrie et l'étude du réflexe stapédien.

L'impédancemètre est un appareil muni d'une sonde introduite dans le conduit auditif externe. Cette sonde comporte trois éléments : un haut-parleur qui envoie un son, un microphone qui capte le son après son passage dans l'oreille moyenne, et un dispositif qui fait varier la pression de l'air dans le conduit auditif [14].

6.2.2 La tympanométrie :

La tympanométrie a pour principe et finalité d'évaluer la souplesse du tympan, donc sa compliance (l'inverse de la rigidité). En envoyant un son pur de 226 Hz et en variant la pression dans le conduit auditif externe, on mesure simultanément l'évolution de l'écho recueilli, ce qui dessine le tympanogramme (avec les pressions en abscisse et la compliance en ordonnées).

Il existe trois types classiques de tympanogrammes (Voir Figure 1.18) :

- **Le normal, en forme de Tour Eiffel :** le pic de compliance est centré sur zéro ou presque, signifiant que la pression est la même en deçà et au-delà du tympan figure type A

- **Le tympanogramme en dépression** : le pic se déplace vers la gauche (pressions négatives), montrant que la caisse est mal aérée par la trompe d'Eustache figure type C

- **Le tympanogramme en dôme ou plat :** traduit une immobilité du tympan, signant presque toujours la présence d'un épanchement dans l'oreille moyenne, le plus souvent dû à une otite séro-muqueuse figure type B [14].

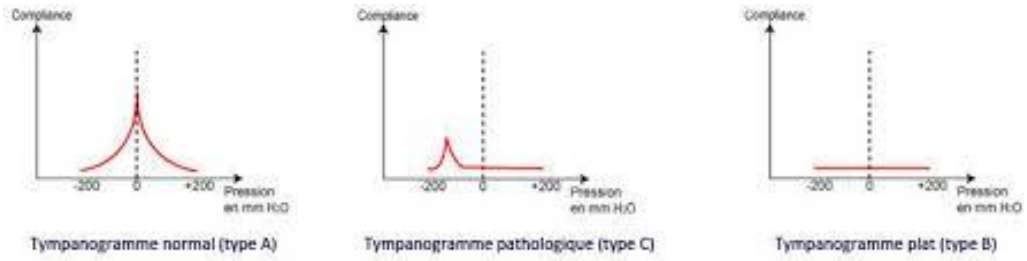


Figure 1.18 : Trois types classiques de tympanogrammes

6.2.3 **Les oto-émissions acoustiques :**

Les oto-émissions acoustiques sont un examen objectif, rapide et facile à réaliser. Elles servent à vérifier si les cellules ciliées externes de la cochlée fonctionnent correctement, notamment leur rôle dans l'amplification des sons.

Ce test repose sur la capacité de ces cellules à réagir à un son en se contractant et en produisant elles-mêmes un faible signal sonore [27]. Pour cela, on utilise une sonde placée dans le conduit auditif externe) (Voir Figure 1.19). Cette sonde contient un petit haut-parleur qui envoie un son, ainsi qu'un microphone qui capte la réponse produite par les cellules ciliées externes.

Le résultat de cet examen est généralement présenté sous forme d'une courbe montrant les variations de l'amplitude des sons produits par les oto-émissions acoustiques en fonction du temps (Voir Figure 1.20) ce qui permet d'analyser la réponse de l'oreille interne [16].

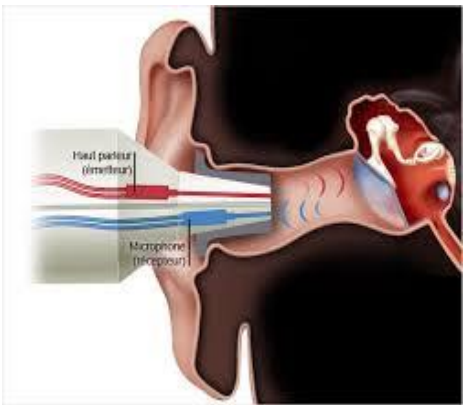


Figure 1.*19*: Principe de l'OEA

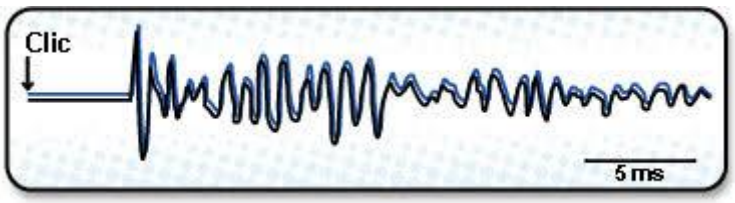


Figure 1.20 : Réponse OEA

6.2.4 **Un potentiel évoqué (PE) :**

Un potentiel évoqué (PE) est la réponse électrique évoquée par la stimulation d'un système sensoriel faisant décharger de façon synchrone une large population de fibres afférentes [17].

Les potentiels évoqués auditifs sont des réponses de l'activité électrique de la cochlée, de la branche cochléaire du nerf vestibulo-cochléaire et des premiers relais du tronc cérébral lors d'une stimulation sonore adaptée

Différentes ondes sont enregistrées et correspondent au résultat d'un PEA [18] :

- Onde I : ganglion spiral et nerf auditif
- Onde II : noyau cochléaire
- Onde III : olive protubérancielle
- Onde IV : noyau ventral du lemniscus latéral
- Onde V : tubercule quadrijumeau postérieur

Le principe du PEA (Voir Figure 1.21) est basé sur une électrode active placée sur le crâne (vertex) permettant d'enregistrer les potentiels évoqués et des haut-parleurs placés au niveau des oreilles permettant d'envoyer des stimulations sonores à des fréquences généralement aiguës (2000 Hz à 4000 Hz). L'analyse d'un PEA en clinique courante consiste à identifier les différentes ondes et à mesurer leur latence (intervalle de temps entre un stimulus et la réponse) par rapport au stimulus sonore. La latence est fonction de l'intensité de stimulation et donc du degré de surdité. Plus l'intensité diminue, plus les latences augmentent et plus l'amplitude des ondes diminue [19].

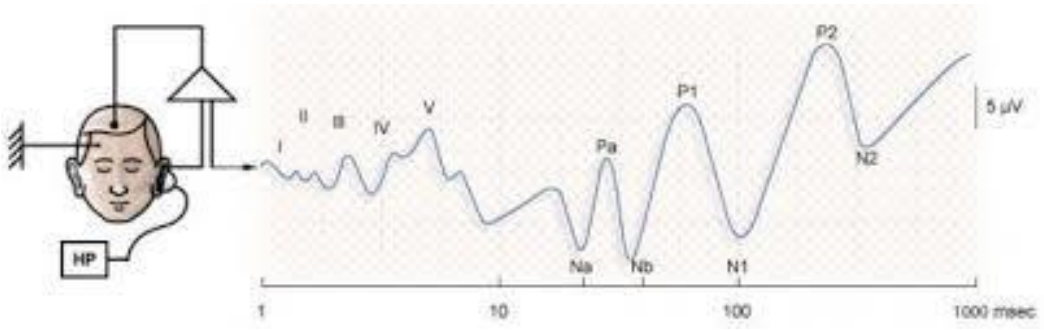


Figure 1. 21 : Principe et exemple d'un PEA

7 Les principales maladies de l'oreille :

L'oreille peut être affectée à différents niveaux, mais l'oreille moyenne est la plus fréquemment concernée. L'affection la plus répandue est l'otite, terme qui désigne toute infection de l'oreille.

Otite externe : infection aiguë, le plus souvent bactérienne, de la peau du conduit auditif externe. Le tympan est généralement épargné.

Otite moyenne : infection aiguë touchant la muqueuse de l'oreille moyenne et ses cavités voisines, le plus souvent d'origine bactérienne. Dans la majorité des cas, son évolution est favorable.

Otite interne : infection rare et grave de l'oreille interne pouvant provoquer des dommages irréversibles et entraîner une perte auditive significative.

L'otospongiose :(ou otosclérose) est une maladie touchant essentiellement la région antérieure de la fenêtre ovale, provoquant progressivement un blocage de l'étrier.

La presbyacousie : est le vieillissement normal de l'oreille interne qui débute dès 25 ans et se traduit par une perte progressive de l'audition avec l'âge, commençant par une perte de distinction des sons aigus puis progressivement des sons graves.

Les acouphènes : sont des bruits « parasites » qu'une personne entend sans que ceux-ci existent réellement, résultant d'un dysfonctionnement du système nerveux auditif [6]

8 Traitement des maladies de l'oreille :

Le traitement d'une affection de l'oreille ne peut commencer qu'après un diagnostic précis. Seul un ORL est qualifié pour examiner l'oreille et prescrire le traitement approprié.

Traitements médicaux : ils concernent principalement certaines surdités de transmission et les otites nécessitant des antibiotiques ou des anti-inflammatoires. Les médicaments et les gouttes auriculaires doivent être utilisés avec prudence, uniquement sur prescription médicale, car certains peuvent être toxiques pour l'oreille.

Traitements chirurgicaux : lorsque le traitement médical ne suffit pas à réduire les vertiges, la perte auditive, les sifflements ou la pression dans l'oreille, une intervention chirurgicale peut être nécessaire.

L'appareil auditif : est le traitement le plus utilisé contre la surdité. Sa structure comprend un microphone (étage d'entrée), un système d'amplification et de traitement du son (souvent numérique), un écouteur (étage de sortie) et une pile pour l'alimentation.

L'implant cochléaire : est une « cochlée artificielle » qui permet la stimulation directe des neurones cochléaires chez les patients présentant une surdité profonde [6].

9 Le son et l'audition :

9.1 Définition de son :

Le son est une vibration mécanique qui se propage dans un milieu élastique (gaz, liquide ou solide) sous forme d'ondes longitudinales. Dans l'air, la vitesse de propagation (célérité) est d'environ 340 m/s à 20°C [10].

9.1.1 Les caractéristiques de son :

Un son est caractérisé par trois attributs perceptifs principaux [10] :

1. **La hauteur (tonie) :** qualité qui permet de distinguer un son grave d'un son aigu. Elle est principalement liée à la fréquence (f), exprimée en Hertz (Hz). L'oreille humaine perçoit les fréquences de 20 Hz à 20 000 Hz, avec une sensibilité maximale entre 1 000 et 4 000 Hz (zone de la parole).

2. **L'intensité (sonie) :** qualité qui permet de distinguer un son faible d'un son fort. Elle est liée à l'amplitude de la vibration. En raison de l'immense gamme d'intensités perceptibles (rapport de 1 à 1 000 000), on utilise une échelle logarithmique : le décibel (dB).

3. **Le timbre** : qualité qui permet de distinguer deux sons de même hauteur et même intensité émis par des sources différentes. Il est lié au spectre des harmoniques (fréquences multiples de la fondamentale) qui enrichissent le son.

   Ces derniers permettent de le classer en trois (3) types [10].

- Son pur : c'est une variation acoustique composée d'une seule fréquence.

- Son musical : Combinaison d'une fréquence fondamentale et de ses harmoniques.

- Bruit : variation aléatoire sans périodicité du son qui donne une sensation auditive désagréable ou gênante.

9.1.2 La pression acoustique :

La pression acoustique est l'écart de pression (en Pascals) provoqué par le passage de l'onde sonore par rapport à la pression atmosphérique ambiante. Le seuil d'audibilité à 1000 Hz est fixé à $P_{\text{réf}} = 20\,\mu\text{Pa} = 2 \times 10^{-5}$ Pa, et le seuil de douleur se situe vers 20 Pa, soit un rapport de $1\,000\,000$.

Pour manipuler commodément cette large gamme, on utilise le niveau de pression acoustique (SPL) exprimé en décibels :

$$L_p \text{ (dB SPL)} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{P}{P_{\text{réf}}}\right)$$

Où:

- P = pression acoustique mesurée (en Pa)
- $P_{\text{réf}}$ = pression de référence $= 20\,\mu$Pa
- $\log_{10}$ = logarithme décimal

Ainsi, un doublement de la pression acoustique correspond à une augmentation de 6 dB. L'oreille humaine peut percevoir un écart d'environ 1 dB dans les conditions optimales [10].

9.1.3 Le codage neuronal du son :

Le système auditif utilise plusieurs mécanismes pour coder les paramètres du son [9] :

1/Codage de la fréquence :

- **Codage tonotopique (spatial) :** chaque fréquence excite une région spécifique de la membrane basilaire (lieu de l'excitation maximale). Ce principe est conservé jusqu'au cortex.

- **Codage temporel** (pour les basses fréquences < 4-5 kHz) : les potentiels d'action des fibres nerveuses se synchronisent sur la phase du stimulus (verrouillage de phase).

2/Codage de l'intensité :

- **Recrutement spatial** : plus l'intensité est forte, plus un grand nombre de fibres nerveuses sont recrutées (car l'onde se propage plus largement sur la membrane basilaire)

- **Recrutement temporel :** pour une fibre donnée, le taux de décharge (nombre de potentiels d'action par seconde) augmente avec l'intensité

Effet protecteur : le réflexe stapédien

- Lors d'une exposition à un son fort (> 80 dB HL), le muscle de l'étrier se contracte (réflexe bilatéral)

- Cette contraction rigidifie la chaîne ossiculaire, réduisant la transmission (environ 10-15 dB d'atténuation)

- Ce réflexe protège l'oreille interne des traumatismes sonores

10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'anatomie et le fonctionnement de l'oreille ainsi que les différents types de surdité. Nous avons aussi présenté les méthodes d'exploration auditive et les notions de base sur le son et l'audition. Ces informations nous aident à mieux comprendre le fonctionnement de l'audiométrie avant la réalisation pratique du système développé.

CHAPITRE :02

Méthodologie et réalisation de l'audiomètre numérique

1 Introduction :

La réalisation d'un audiomètre numérique complet nécessite la maîtrise de plusieurs domaines : la programmation graphique, le traitement numérique du signal, la visualisation de données, et la gestion de bases de données. Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie adoptée pour développer notre application, en justifiant les choix technologiques et en détaillant l'implémentation de chaque module fonctionnel.

2 État de l'art des audiomètres :

L'histoire des audiomètres remonte au XIXe siècle avec l'utilisation des diapasons pour les tests d'acoumétrie (tests de Rinne et Weber). Le premier audiomètre électronique fut développé par la Western Electric Company en 1922. Depuis lors, la technologie n'a cessé d'évoluer [25]

Aujourd'hui, les audiomètres professionnels (ex : Interacoustics AC40, Maico MA 50) sont des appareils autonomes, entièrement numériques, capables de générer des sons avec une distorsion harmonique inférieure à 2 %, une plage d'intensité de -10 à 120 dB HL, et une précision de calibration de ±1 dB. Cependant, leur coût (5 000 à 20 000 €) les rend inaccessibles dans de nombreux contextes (pays en développement, cabinets médicaux modestes, dépistage scolaire).

Notre approche se distingue par l'utilisation exclusive de Python et de bibliothèques open-source, ce qui offre plusieurs avantages : gratuité totale, portabilité (Windows, macOS, Linux), et transparence du code source

3 Choix technologiques

3.1 Pourquoi Python ?

Python est un langage de programmation interprété, de haut niveau, et multiplateforme. Son écosystème extrêmement riche de bibliothèques scientifiques et graphiques en fait un choix idéal pour un projet multidisciplinaire tel que celui-ci :

Tableau 2. 1: Choix technologiques

Besoin	Bibliothèque Python	Justification
Interface graphique	Tkinter	Intégré nativement, léger, multiplateforme
Calculs numériques	NumPy	Performance (langage C optimisé), manipulations de tableaux
Lecture audio	SoundDevice	Interface simple, faible latence, basé sur PortAudio
Visualisation	Matplotlib	Puissant, standard scientifique, intégrable dans Tkinter
Base de données	SQLite3	Sans serveur, fichier unique, support SQL
Export Excel	CSV (csv)	Format universel, simple à générer

Python est un langage de programmation interprété, de haut niveau, et multiplateforme. Son écosystème extrêmement riche de bibliothèques scientifiques et graphiques en fait un choix idéal pour un projet multidisciplinaire tel que celui-ci :[26]

3.2 Bibliothèques utilisées :

SoundDevice : interface Python vers PortAudio (bibliothèque C de gestion audio). Permet de lire et d'enregistrer des sons avec une latence minimale, en gérant les différents canaux (stéréo) et formats d'échantillonnage [27].

NumPy : bibliothèque fondamentale pour le calcul scientifique. Offre des tableaux multidimensionnels (array) avec des opérations vectorisées extrêmement rapides. Utilisée ici pour construire les sinusoïdes.[28].

Matplotlib : bibliothèque de visualisation de données. Utilisée pour tracer l'audiogramme (courbes des seuils, zones colorées, échelle log, axes inversés) [29].

Tkinter : bibliothèque standard de création d'IHM. Fournit des widgets (fenêtres, boutons, champs de saisie, etc.) et un gestionnaire d'événements [30].

SQLite3 : module d'accès à la base de données SQLite. Permet de créer des tables, d'insérer des données, et de faire des requêtes [31].

Threading : permet d'exécuter des tâches en parallèle (ici : lecture audio et interface graphique) sans bloquer l'application.[32]

4 Architecture générale :

5 Diagramme fonctionnel de l'interface graphique

L'architecture de notre application suit le modèle MVC (Modèle-Vue-Contrôleur) implicite :

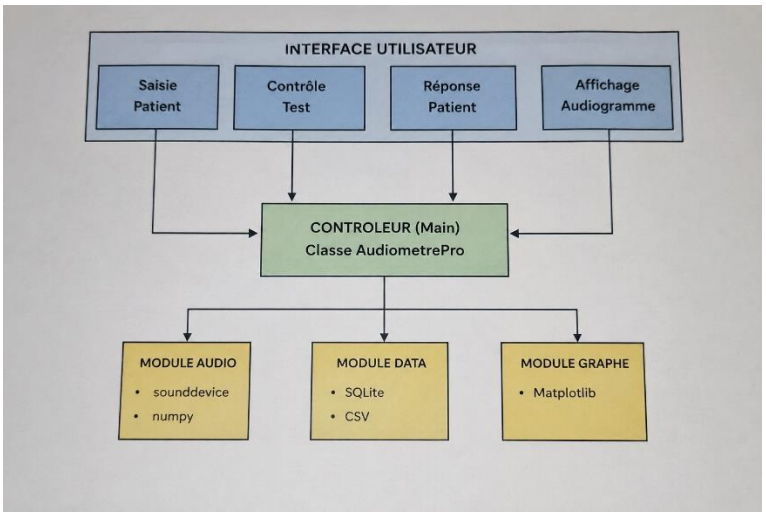


Diagramme fonctionnel de l'interface graphique

6 Structure logicielle :

Notre application est encapsulée dans une unique classe AudiometrePro qui contient :

- Les attributs : variables d'état (fréquences, résultats, volumes, options)
- Les méthodes : fonctions implémentant les fonctionnalités

Les 13 fréquences de test couvertes (125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 12000, 16000 Hz) couvrent l'ensemble du spectre audiométrique standard.

7 Interface graphique avec Tkinter:

7.1 Présentation de Tkinter :

Tkinter est la bibliothèque d'interface graphique (GUI) standard de Python. Elle repose sur Tcl/Tk et fournit une collection complète de widgets (boutons, étiquettes, champs de saisie, etc.). Ses avantages sont :[30]

- Intégré : aucune installation supplémentaire
- Léger : consomme peu de ressources
- Multiplateforme : identique sur Windows, macOS, Linux

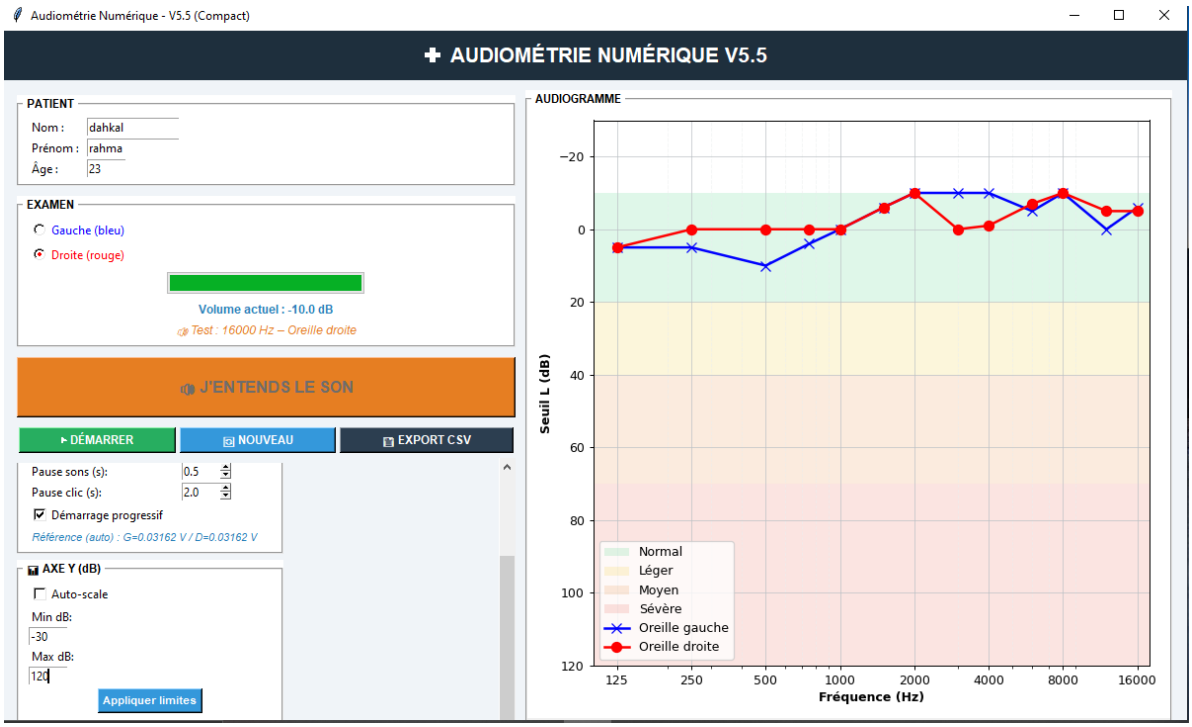


Figure 2. 1:Organisation de l'interface

7.2 Organisation de l'interface :

L'interface est organisée en **deux colonnes** principales :

Colonne gauche (informations et contrôles) :

1. **Bloc Patient :** saisie du nom, prénom et âge
2. **Bloc Examen** : sélection de l'oreille (gauche/rouge, droite/bleu), barre de progression, volume actuel
3. **Bouton de réponse** : '' J'ENTENDS LE SON" (bouton central, bien visible)
4. **Boutons de contrôle :** DÉMARRER, NOUVEAU, EXPORT CSV
5. **Paramètres de test** (déroulables) : mode auto/manuel, pas en dB, délais
6. **Réglage de l'axe Y** : auto-scale ou manuel

Colonne droite (visualisation) : (Voir Figure 2.1)

1. **Audiogramme :** tracé des seuils (bleu pour gauche avec "×", rouge pour droite avec "○")
2. **Zones colorées :** normale (vert), légère (jaune), moyenne (orange), sévère (rouge)
3. **Barre d'outils :** navigation (zoom, déplacement)

7.2.1 Widgets et interactions :

Tableau 2. 2:Widgets et interactions : [34]

Widget	Tkinter	Utilisation
Fenêtre principale	tk.Tk()	self.root
Cadres	tk.Frame	header, main, left_panel
Étiquettes	tk.Label	Titres, instructions
Champs texte	tk.Entry	Nom, prénom, âge
Boutons	tk.Button	Démarrer, nouveau, exporter, réponse
Boutons radio	tk.Radiobutton	Gauche/droite
Cases à cocher	tk.Checkbutton	Mode auto, démarrage progressif
Barre progression	ttk.Progressbar	Avancement du test
Zone graphique	FigureCanvasTkAgg	Intégration de Matplotlib

8 Génération et lecture des sons :

8.1 Génération d'une onde sinusoïdale avec NumPy :

La génération d'un son pur (sinus) est la brique élémentaire de l'audiométrie tonale. La fonction generer_audio(freq, vol, oreille) réalise cette opération python

```
def generer_audio(self, freq, vol, oreille):
    sr = 96000                  # Taux échantillonnage (Hz)
    duree = 0.5                 # Durée du son (s)
    t = np.linspace(0, duree, int(sr * duree), False)  # Vecteur temps

    # Onde sinusoïdale pure
    onde = np.sin(2 * np.pi * freq * t) * vol

    # Création du signal stéréo
    stereo = np.zeros((len(onde), 2))
    idx = 0 if oreille == "gauche" else 1  # Canal 0 = gauche, canal 1 = droite
    stereo[:, idx] = onde

    return stereo, sr [35]
```

9 Enveloppe de fondu (fade in/out) :

Un son débutant et finissant brutalement (onde commençant à l'amplitude max) produit un clic audible dû à la discontinuité du signal. Pour éviter cet artefact, on applique une enveloppe de fondu de durée fade = 40 ms :

python

```
fade = int(sr * 0.04)           # 40 ms en nombre d'échantillons

env = np.ones_like(t)           # Enveloppe initiale à 1

env[:fade] = np.linspace(0, 1, fade)   # Fade in (croissance linéaire de 0 à 1)

env[-fade:] = np.linspace(1, 0, fade)  # Fade out (décroissance de 1 à 0)

onde = onde * env               # Application à l'onde
```

Ainsi, l'enveloppe a une forme trapézoïdale : montée en 40 ms, palier à amplitude max, descente en 40 ms. Le son débute et se termine "silencieusement"[36].

10 Lecture stéréo avec SoundDevice :

La fonction sd.play() envoie le signal audio à la carte son. L'appel à sd.wait() bloque le thread jusqu'à la fin de la lecture. C'est cette attente qui nous permet de contrôler la durée du son (0,5 s). [37]

python

```
sd.play(audio, sr)   # Démarre la lecture (non bloquant)

sd.wait()            # Attend la fin (bloquant)
```

Gestion des canaux : notre signal stereo est un tableau NumPy de dimensions (n_echantillons, 2) :

- colonne 0 = canal gauche
- colonne 1 = canal droite

11 Gestion des niveaux sonores et des décibels :

11.1 La référence et le dB "local''.

En audiométrie professionnelle, les seuils sont exprimés en dB HL (Hearing Level), où 0 dB HL correspond au seuil d'audibilité moyen d'une population normale (norme ISO 389). Le dB HL est calibré : un son à 0 dB HL à 1 kHz correspond à une pression acoustique de 20 µPa [38].

Notre application ne disposant pas de ce calibrage absolu (dépendant du casque, de la carte son, du volume du système), nous utilisons un dB relatif local : le seuil à 1000 Hz est défini comme la référence 0 dB pour chaque oreille. Tous les autres seuils sont exprimés en écart par rapport à cette référence

11.2 Conversion tension ↔ dB.

La relation entre la tension (Vpp) et le niveau en dB est logarithmique :[39]

dB = 20 × $\log_{10}$(V_mesuré / V_référence)

V = V_référence × 10^(dB/20)

La fonction get_current_db(vpp, oreille) calcule le dB à partir de la tension Vpp :

python

```
def get_current_db(self, vpp, oreille):

    ref = self.get_ref_vpp_for_ear(oreille)  # Tension de référence pour cette oreille
```

```
        if ref <= 0:
            return 0
        return 20 * math.log10(vpp / ref)
```

Pour la conversion inverse (obtenir la tension correspondant à un dB donné) :

python

```
def vpp_from_db(self, db, oreille):
    ref = self.get_ref_vpp_for_ear(oreille)
    return ref * (10.0 ** (db / 20.0)) .
```

12 Algorithme du test audiométrique :

Le test suit le protocole classique de l'audiométrie tonale liminaire : pour chaque fréquence, on recherche le plus faible niveau sonore perçu par le patient (seuil) [40].

Algorithme simplifié :

Pour chaque fréquence dans la liste (125, 250, 500, ..., 16000 Hz) :

```
    Volume = Volume_de_départ (configurable)

    While (patient n'a pas cliqué) :
        Jouer le son (fréquence, volume)
        Attendre 0,3 seconde (inter_sound_delay)
        Volume = Volume × facteur_ augmentation   # Ex: ×1,12 pour +5 dB
        Si volume > 0,95 (max sécurité) :
            Enregistrer 0,95 comme seuil
 Break
```

13 Gestion du multithreading :

La lecture audio par sd.wait() bloque l'exécution du thread pendant 0,5 seconde. Or, l'interface graphique Tkinter doit rester réactive (le patient doit pouvoir cliquer à tout moment). La solution est d'isoler la boucle audio dans un thread dédié [41] :

python

threading.Thread(target=self.boucle_audio, daemon=True).start()

Pendant que ce thread joue les sons et attend la réponse, le thread principal continue de gérer les événements Tkinter (affichage, clics, mise à jour). La communication entre les deux threads se fait via :

- self.en_cours : variable booléenne partagée (thread-safe)
- self.root.after(...) : pour mettre à jour l'interface depuis le thread audio

Un verrou (_click_lock) est utilisé pour éviter les doubles réponses au cas où le patient cliquerait plusieurs fois rapidement

14 Visualisation avec Matplotlib :

14.1 L'audiogramme : conventions graphiques :

L'audiogramme est le graphique standard pour représenter les résultats d'un examen audiométrique) (Voir Figure 2.2) Il respecte les conventions internationales [42] :

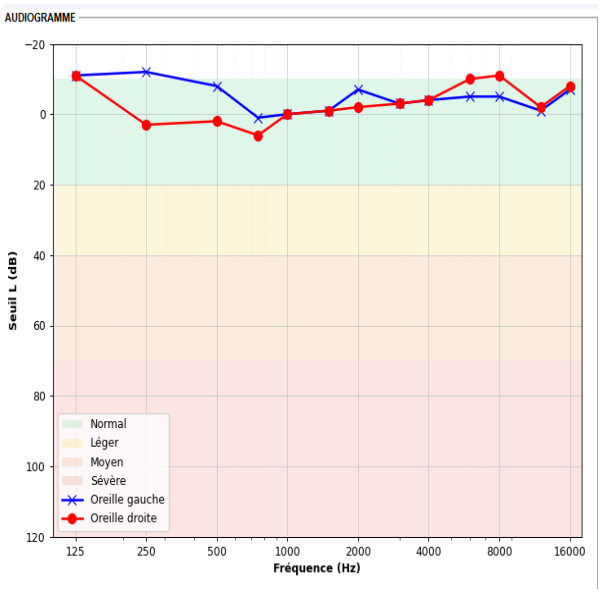


Figure 2. 2 : L'audiogramme d'audition normal

Tableau 2. 3: La structure d'audiogramme

Élément	Convention
Axe X (abscisse)	Fréquences (échelle logarithmique de 125 à 16 000 Hz)
Axe Y (ordonnée)	Intensité (dB) mais axe inversé (0 dB en haut, 120 dB en bas)
Courbe oreille gauche	Bleue, marqueur "×" (croix)
Courbe oreille droite	Rouge, marqueur "○" (cercle)

Zones colorées :

Les couleurs indiquent le niveau de perte auditive :

- **Vert :** audition normale
- **Jaune :** perte légère
- **Orange** : perte moyenne
- **Rouge** : perte sévère [42]

14.2 **Intégration dans Tkinter :**

Python [43]

self.fig, self.ax = plt.subplots(figsize=(6, 5), dpi=90) # Création de la figure

self.canvas = FigureCanvasTkAgg(self.fig, master=right_frame) # Intégration dans Tkinter

self.canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True) # Remplissage

La méthode rafraichir_graphique() est appelée à chaque nouvel enregistrement de seuil.

14.3 Interprétation automatique :

Le programme calcule automatiquement la moyenne des seuils auditifs.

Selon la valeur moyenne [42] :

Tableau 2. 4: Interprétation automatique

Niveau auditif	Interprétation
0 – 20 dB	Audition normale
20 – 40 dB	Perte légère
40 – 70 dB	Perte Moyenne
70 – 90 dB	Perte sévère
> 90 dB	Perte profonde

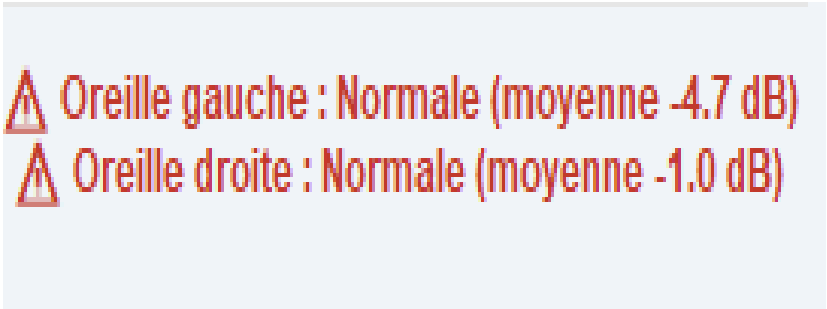


Figure 2. 3: Diagnostic automatique de votre programme

15 Persistance des données avec SQLite :

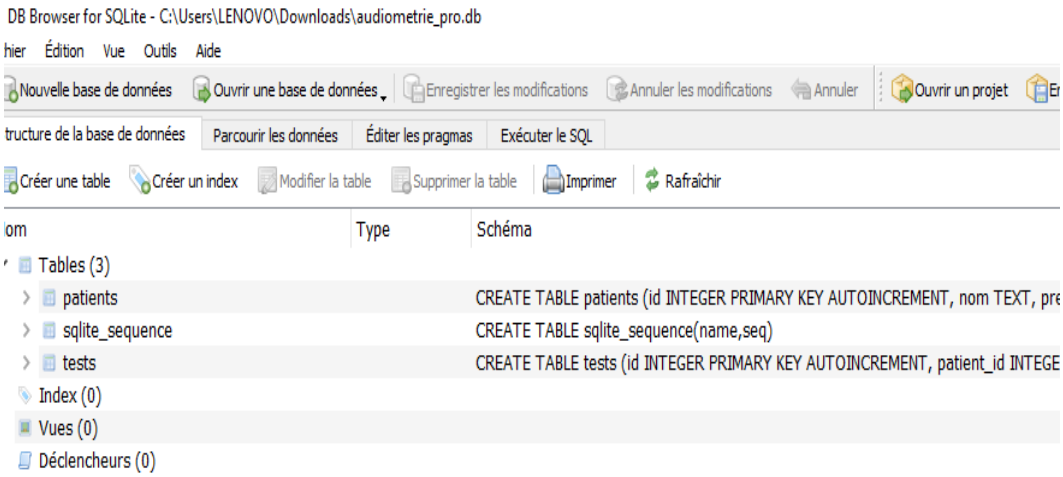
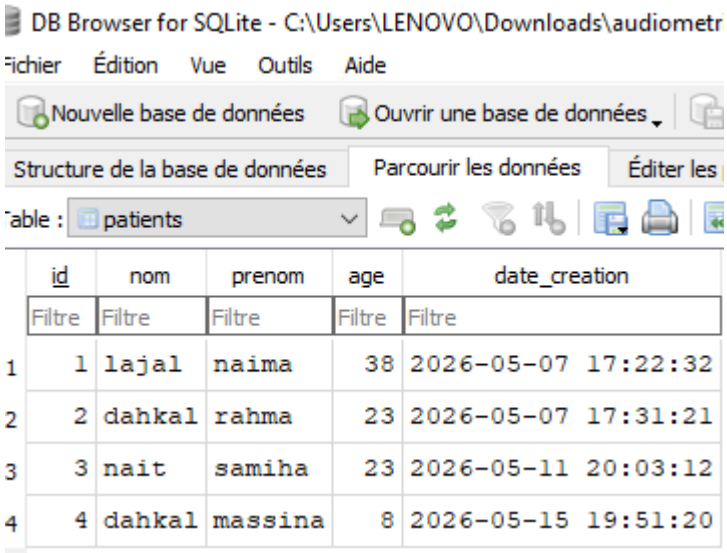
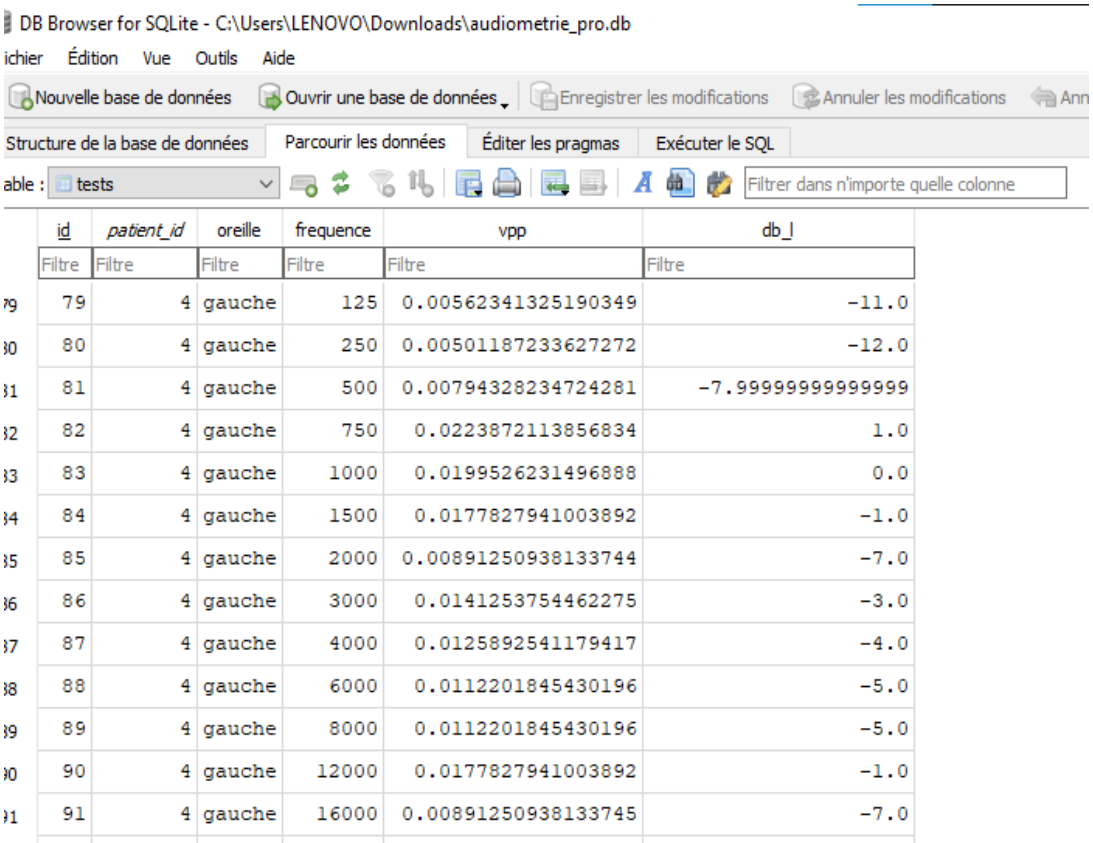


Figure 2. 4 : La structure de base des donnée



	id	nom	prenom	age	date_creation
	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
1	1	lajal	naima	38	2026-05-07 17:22:32
2	2	dahkal	rahma	23	2026-05-07 17:31:21
3	3	nait	samiha	23	2026-05-11 20:03:12
4	4	dahkal	massina	8	2026-05-15 19:51:20

Figure 2. 5 : Table de patient



	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
79	79	4	gauche	125	0.00562341325190349	-11.0
80	80	4	gauche	250	0.00501187233627272	-12.0
81	81	4	gauche	500	0.00794328234724281	-7.99999999999999
82	82	4	gauche	750	0.0223872113856834	1.0
83	83	4	gauche	1000	0.0199526231496888	0.0
84	84	4	gauche	1500	0.0177827941003892	-1.0
85	85	4	gauche	2000	0.00891250938133744	-7.0
86	86	4	gauche	3000	0.0141253754462275	-3.0
87	87	4	gauche	4000	0.0125892541179417	-4.0
88	88	4	gauche	6000	0.0112201845430196	-5.0
89	89	4	gauche	8000	0.0112201845430196	-5.0
90	90	4	gauche	12000	0.0177827941003892	-1.0
91	91	4	gauche	16000	0.00891250938133745	-7.0

Figure 2. 6: Exemple test d'oreille gauche de patient id 4

92	92	4	droite	125	0.000316227766016838	-11.0
93	93	4	droite	250	0.00158489319246111	3.0
94	94	4	droite	500	0.00141253754462275	2.0
95	95	4	droite	750	0.00223872113856834	6.0
96	96	4	droite	1000	0.00112201845430196	0.0
97	97	4	droite	1500	0.001	-1.0
98	98	4	droite	2000	0.000891250938133746	-2.0
99	99	4	droite	3000	0.000794328234724282	-3.0
100	100	4	droite	4000	0.000707945784384138	-4.0
101	101	4	droite	6000	0.000354813389233576	-10.0
102	102	4	droite	8000	0.000316227766016838	-11.0
103	103	4	droite	12000	0.000891250938133746	-2.0
104	104	4	droite	16000	0.000446683592150963	-8.0

Figure 2. 7 : Exemple test d'oreille droite de patient id 4

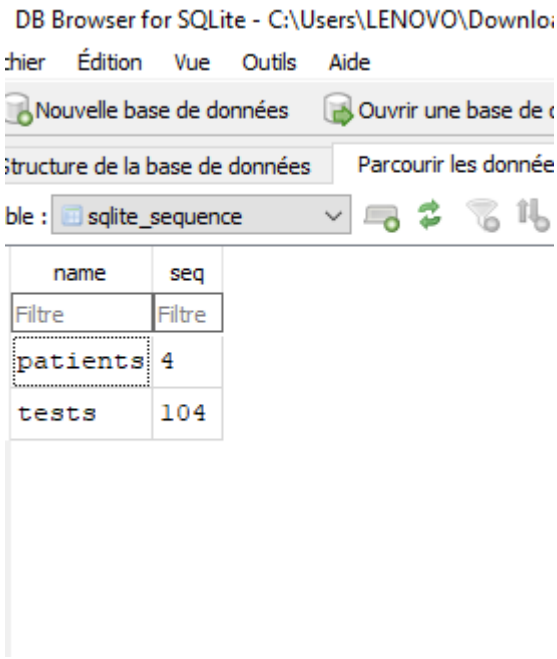


Figure 2. 8 : La somme des patients et des testes

Table patients :

Tableau 2. 5:Table patients

Colonne	Type	Description
Id	INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT	Identifiant unique
Nom	TEXT	Nom du patient
Prenom	TEXT	Prénom
Age	INTEGER	Âge
date_creation	TEXT	Date/heure du test

Table tests (relation avec table patients via patient_id) :

Tableau 2. 6:Table tests

Colonne	Type	Description
Id	INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT	Identifiant unique
patient_id	INTEGER	Référence vers patients(id)
Oreille	TEXT	"gauche" ou "droite"
Frequence	INTEGER	Fréquence en Hz
Vpp	REAL	Tension de seuil (V)
db_l	REAL	Niveau en dB (référence 1000 Hz)

La sauvegarde s'effectue à la fin du test des deux oreilles :
Elle insère le patient, puis insère tous les seuils enregistrés dans résultats.

16 Export des résultats (CSV):

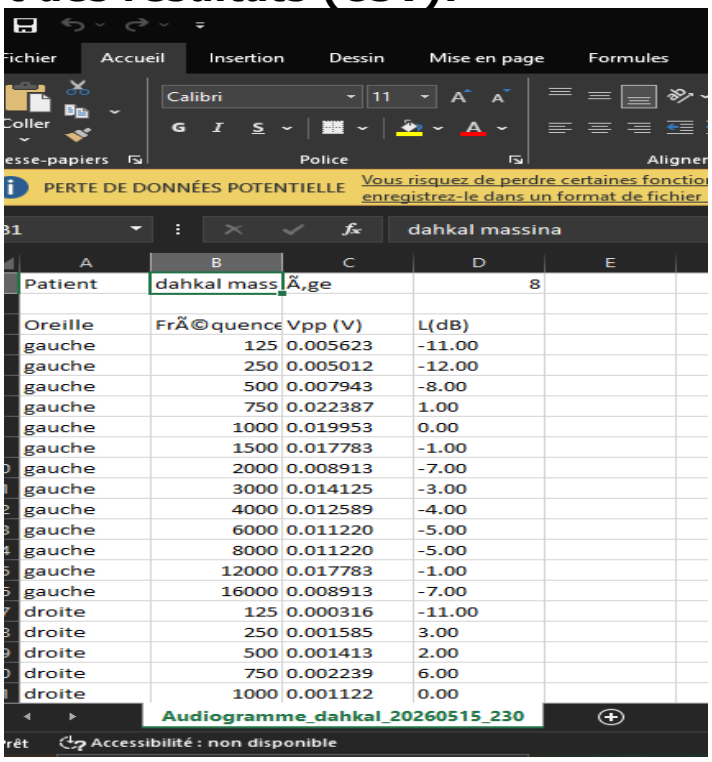


Figure 2. 9: Export des résultats (CSV)

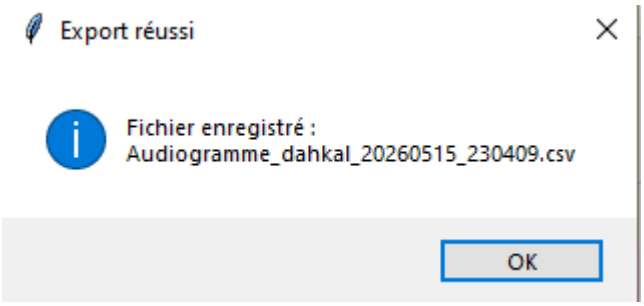


Figure 2. 10:Message pour exportation d'un fichier CSV

Dans des logiciels externes (Excel, SPSS),
L'application génère un fichier CSV (séparateur ;) :
Csv
Patient ; massina dahkal ;Âge;8

Oreille ; Fréquence (Hz);Vpp (V); L(dB)
Gauche ;125 ;0.05623 ;-11
gauche; 250 ;0.05012 ;-12
...
Le nom du fichier inclut le nom du patient et la date pour éviter les collisions : Audiogramme_dahkal_20260515_230409.cs

17 Protections de sécurité :

- vol_safe = min(self.volume_actuel, 0.95) : limite absolue à 0,95 Vpp (évite les volumes dangereux)
- En mode forcé, si le volume dépasse 0,95 V, on arrête le test et enregistre 0,95 comme seuil

[44]

18 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie et la réalisation du système d'audiométrie numérique. Le programme développé permet d'effectuer un test auditif complet avec génération
sonore, affichage graphique, sauvegarde des données et interprétation automatique.

CHAPITRE 03

Résultats, tests et interprétations

1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats des tests effectués pour valider notre audiomètre numérique. Nous décrivons d'abord l'environnement de test, puis les tests unitaires des composants, la validation fonctionnelle sur des sujets volontaires (sains et présentant des pertes légères), et enfin une discussion sur les performances, les limites et les perspectives d'amélioration.

2 Environnement et conditions de test :

Tableau 3. 1 : Environnement et conditions de test

Paramètre	Valeur / Description
Ordinateur	PC portable (Windows 11)
Carte son	Intégrée (Realtek High Definition Audio)
Casque	Casque circum-aural (type Sennheiser HD 200)
Cabine	Pièce calme (bruit ambiant ≈ 35 dB SPL)
Sujets	3 sujets adultes, volontaires, sans antécédents ORL connus
Logiciel	Python 3.10 avec bibliothèques mentionnées

3 **Résultats des tests :**

Protocole expérimental

Trois sujets volontaires ont été testés avec l'audiomètre développé. Pour chaque sujet, les seuils ont été mesurés pour les 13 fréquences, des deux oreilles.

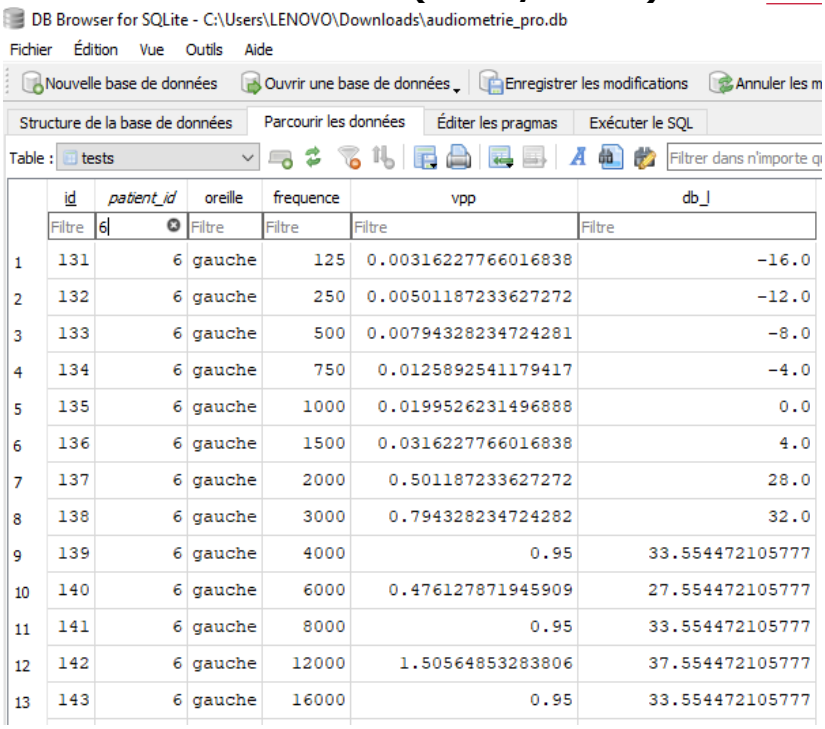
3.1 Sujet 1 : (24 ans)



Figure 3. 1 : Test sujet 1

Tableaux des seuils (dB) :

Oreille Gauche (Bleu / Croix) :


DB Browser for SQLite - C:\Users\LENOVO\Downloads\audiometrie_pro.db

Fichier Édition Vue Outils Aide

Nouvelle base de données | Ouvrir une base de données | Enregistrer les modifications | Annuler les m

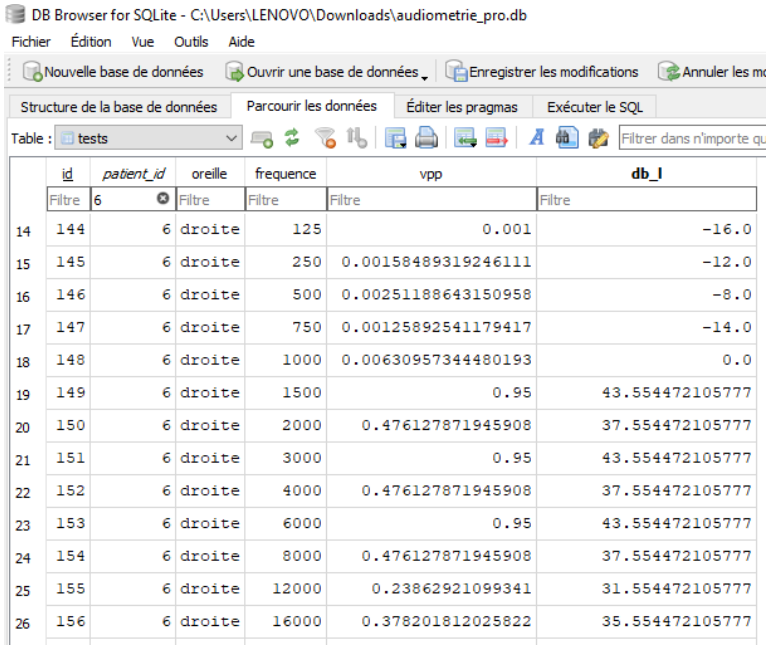
Structure de la base de données | Parcourir les données | Éditer les pragmas | Exécuter le SQL

Table : tests | Filtrer dans n'importe q

	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	6	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
1	131	6	gauche	125	0.00316227766016838	-16.0
2	132	6	gauche	250	0.00501187233627272	-12.0
3	133	6	gauche	500	0.00794328234724281	-8.0
4	134	6	gauche	750	0.0125892541179417	-4.0
5	135	6	gauche	1000	0.0199526231496888	0.0
6	136	6	gauche	1500	0.0316227766016838	4.0
7	137	6	gauche	2000	0.501187233627272	28.0
8	138	6	gauche	3000	0.794328234724282	32.0
9	139	6	gauche	4000	0.95	33.554472105777
10	140	6	gauche	6000	0.476127871945909	27.554472105777
11	141	6	gauche	8000	0.95	33.554472105777
12	142	6	gauche	12000	1.50564853283806	37.554472105777
13	143	6	gauche	16000	0.95	33.554472105777

Figure 3. 2: Tableau oreille gauche sujet 1

Oreille droite (Rouge / Rond) :


DB Browser for SQLite - C:\Users\LENOVO\Downloads\audiometrie_pro.db

Fichier Édition Vue Outils Aide

Nouvelle base de données | Ouvrir une base de données | Enregistrer les modifications | Annuler les m

Structure de la base de données | Parcourir les données | Éditer les pragmas | Exécuter le SQL

Table : tests | Filtrer dans n'importe qu

	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	6	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
14	144	6	droite	125	0.001	-16.0
15	145	6	droite	250	0.00158489319246111	-12.0
16	146	6	droite	500	0.00251188643150958	-8.0
17	147	6	droite	750	0.00125892541179417	-14.0
18	148	6	droite	1000	0.00630957344480193	0.0
19	149	6	droite	1500	0.95	43.554472105777
20	150	6	droite	2000	0.476127871945908	37.554472105777
21	151	6	droite	3000	0.95	43.554472105777
22	152	6	droite	4000	0.476127871945908	37.554472105777
23	153	6	droite	6000	0.95	43.554472105777
24	154	6	droite	8000	0.476127871945908	37.554472105777
25	155	6	droite	12000	0.23862921099341	31.554472105777
26	156	6	droite	16000	0.378201812025822	35.554472105777

Figure 3. 3 : Tableau oreille droite sujet 1

La Méthode de Calcul Clinique (Moyenne BIAP) :

$$\text{Perte Moyenne (dB HL)} = \frac{\text{Seuil}_{500\text{Hz}} + \text{Seuil}_{1000\text{Hz}} + \text{Seuil}_{2000\text{Hz}} + \text{Seuil}_{4000\text{Hz}}}{4}$$

Oreille Gauche (gauche)

- **500 Hz :** -8 dB
- **1000 Hz :** 0 dB
- **2000 Hz :** 28 dB
- **4000 Hz :** 33.55 dB

1.Moyenne Gauche $= \frac{-8.0+0.0+28.0+33.55}{4} = \frac{53.55}{4} = \mathbf{13.38}$ dB

Le programme affiche 13.4 dB, ce qui est parfaitement exact d'un point de vue Mathématique.

Oreille Droite (droite)

- **500 Hz :** -8 dB
- **1000 Hz :** 0 dB
- **2000 Hz :** 37.55 dB
- **4000 Hz :** 37.55 dB

2.Moyenne Droite $= \frac{-8.0+0.0+37.55+37.55}{4} = \frac{67.1}{4} = \mathbf{16.77}$ dB

Le programme affiche 16.8 dB, ce qui est également tout à fait correct.

Interprétation des données et diagramme : Le sujet présente une courbe de réponse audiométrique (diagramme) stable, très proche de la ligne de référence (0 dB HL) pour la majorité des fréquences standards (125 Hz à 8000 Hz). On observe un affaissement physiologique tout à fait classique et normal dans les très hautes fréquences, spécifiquement entre 12 kHz et 16 kHz.

Interprétation des tests (Moyenne BIAP) :

Oreille Gauche : Les seuils aux fréquences clés (500 Hz : -8 dB, 1000 Hz : 0 dB, 2000 Hz : 28 dB, 4000 Hz : 33.55 dB) établissent une perte moyenne calculée de **13,4 dB HL**.

Oreille Droite : Les seuils (500 Hz : -8 dB, 1000 Hz : 0 dB, 2000 Hz : 37.55 dB, 4000 Hz : 37.55 dB) établissent une perte moyenne de **16,8 dB HL**.

Conclusion : Le diagnostic global conclut à une **audition normale bilatérale**. Les moyennes des deux oreilles se situant strictement sous le seuil critique des 20 dB HL défini par le Bureau International d'Audio-Phonologie (BIAP). Le profil est caractéristique d'un système auditif sain et jeune.

3.2 Sujet 2 : (34 ans)

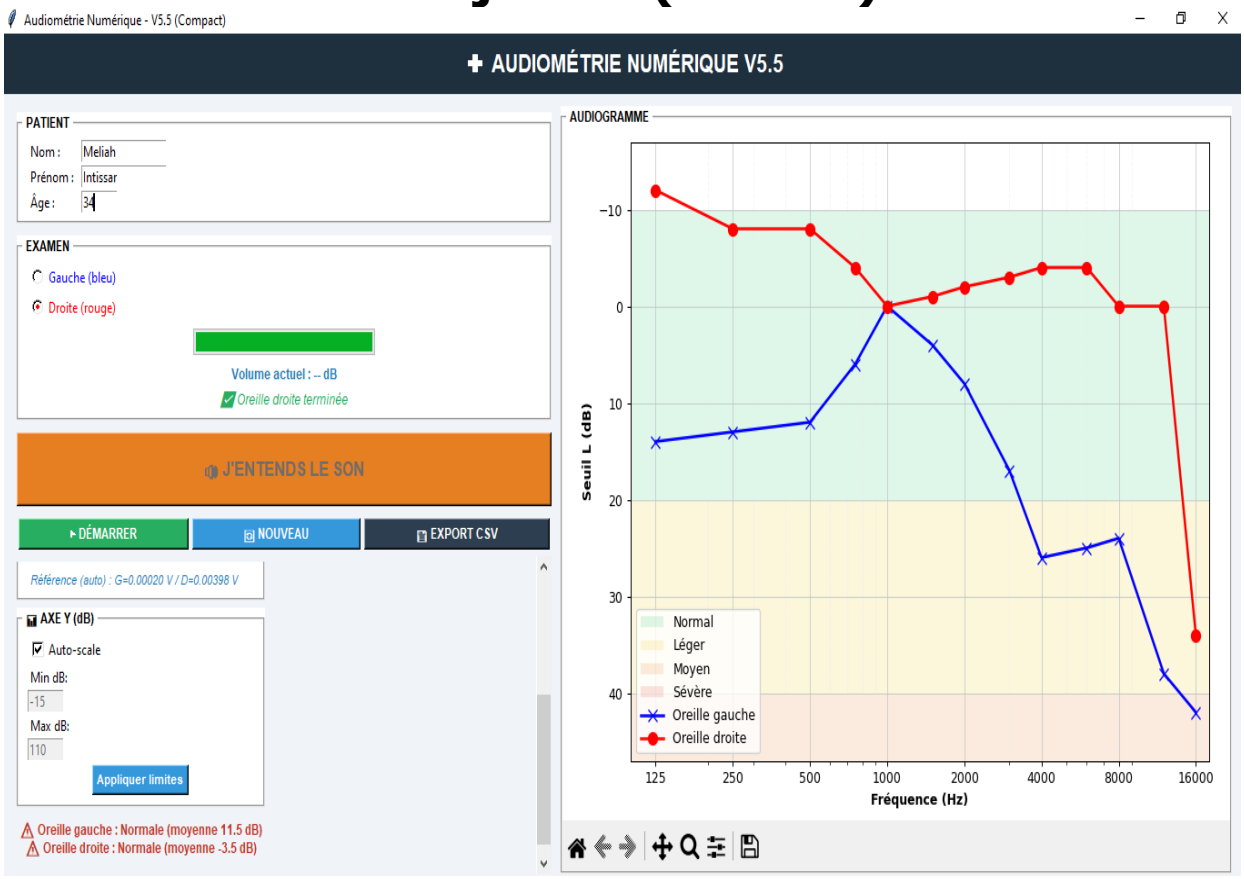


Figure 3. 4: Test sujet 2

Tableaux des seuils (dB) :

Oreille Gauche (Bleu / Croix) :

DB Browser for SQLite - C:\Users\LENOVO\Downloads\audiometrie_pro.db

Fichier Édition Vue Outils Aide

Nouvelle base de données | Ouvrir une base de données | Enregistrer les modifications | Annuler les modific

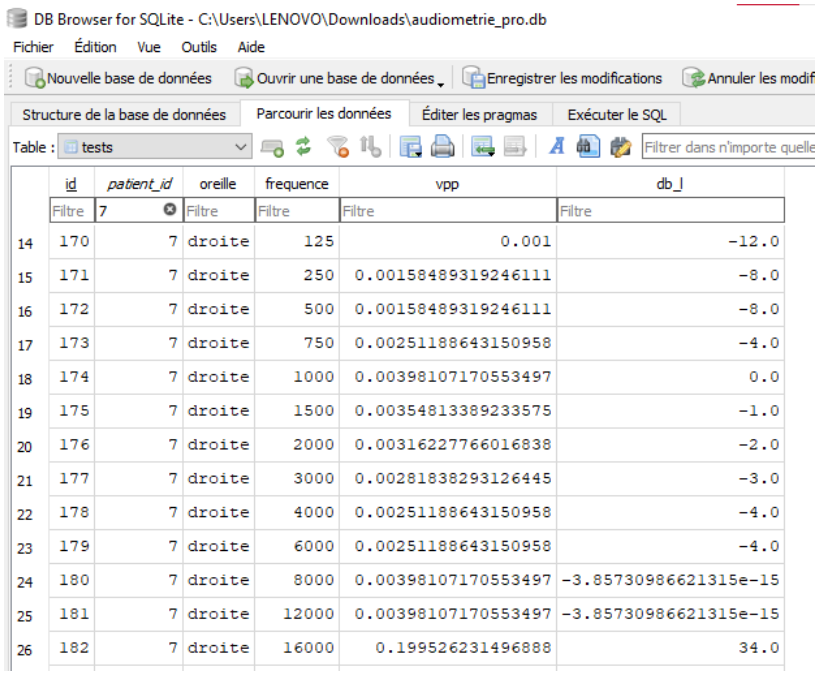
Structure de la base de données | Parcourir les données | Éditer les pragmas | Exécuter le SQL

Table : tests — Filtrer dans n'importe quelle

	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	7	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
1	157	7	gauche	125	0.001	14.0
2	158	7	gauche	250	0.000891250938133746	13.0
3	159	7	gauche	500	0.000794328234724281	12.0
4	160	7	gauche	750	0.000398107170553497	6.0
5	161	7	gauche	1000	0.000199526231496888	0.0
6	162	7	gauche	1500	0.000316227766016838	4.0
7	163	7	gauche	2000	0.000501187233627272	8.0
8	164	7	gauche	3000	0.00141253754462275	17.0
9	165	7	gauche	4000	0.00398107170553497	26.0
10	166	7	gauche	6000	0.00354813389233575	25.0
11	167	7	gauche	8000	0.00316227766016838	24.0
12	168	7	gauche	12000	0.0158489319246111	38.0
13	169	7	gauche	16000	0.0251188643150958	42.0

Figure 3. 5: Tableau oreille gauche sujet 2

Oreille droite (Rouge / Rond) :



	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	7	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
14	170	7	droite	125	0.001	-12.0
15	171	7	droite	250	0.00158489319246111	-8.0
16	172	7	droite	500	0.00158489319246111	-8.0
17	173	7	droite	750	0.00251188643150958	-4.0
18	174	7	droite	1000	0.00398107170553497	0.0
19	175	7	droite	1500	0.00354813389233575	-1.0
20	176	7	droite	2000	0.00316227766016838	-2.0
21	177	7	droite	3000	0.00281838293126445	-3.0
22	178	7	droite	4000	0.00251188643150958	-4.0
23	179	7	droite	6000	0.00251188643150958	-4.0
24	180	7	droite	8000	0.00398107170553497	-3.85730986621315e-15
25	181	7	droite	12000	0.00398107170553497	-3.85730986621315e-15
26	182	7	droite	16000	0.199526231496888	34.0

Figure 3. 6: Tableau oreille droite sujet 2

Oreille Gauche

- **500 Hz :** 12.0 dB
- **1000 Hz :** 0.0 dB
- **2000 Hz :** 8.0 dB
- **4000 Hz :** 26.0 dB

1. Moyenne Gauche $= \frac{12.0+0.0+8.0+26.0}{4} = \frac{46.0}{4} = \mathbf{11.5}$ dB

Le programme affiche exactement Normale (moyenne 11.5 dB

Oreille Droite

- **500 Hz :** -8.0 dB
- **1000 Hz :** 0.0 dB
- **2000 Hz :** -2.0 dB
- **4000 Hz :** -4.0 dB

2. Moyenne Droite $= \frac{-8.0+0.0+(-2.0)+(-4.0)}{4} = \frac{-14.0}{4} = \mathbf{-3.5}$ dB

Interprétation des données et diagramme :

Le diagramme montre des seuils d'audition d'une excellente sensibilité. La particularité académique notable réside au niveau de l'oreille droite, où le tracé plonge dans des valeurs négatives (jusqu'à -8 dB à 500 Hz), indiquant une acuité auditive supérieure à la moyenne de la population générale de référence.

Interprétation des tests (Moyenne BIAP) :

Oreille Gauche : Le calcul BIAP (500 Hz : 12 dB, 1000 Hz : 0 dB, 2000 Hz : 8 dB, 4000 Hz : 26 dB) génère une perte moyenne de **11,5 dB HL**.

Oreille Droite : Les seuils particulièrement bas (500 Hz : -8 dB, 1000 Hz : 0 dB, 2000 Hz : -2 dB, 4000 Hz : -4 dB) donnent une moyenne négative de **-3,5 dB HL**.

Conclusion :

Le diagnostic clinique est une **audition normale (avec une acuité excellente à droite)**. Tout comme le premier sujet, les valeurs restent bien en deçà de la limite pathologique de 20 dB, confirmant un profil sans aucune altération neurosensorielle ou de transmission.

3.3 Sujet 3 : (55 ans)

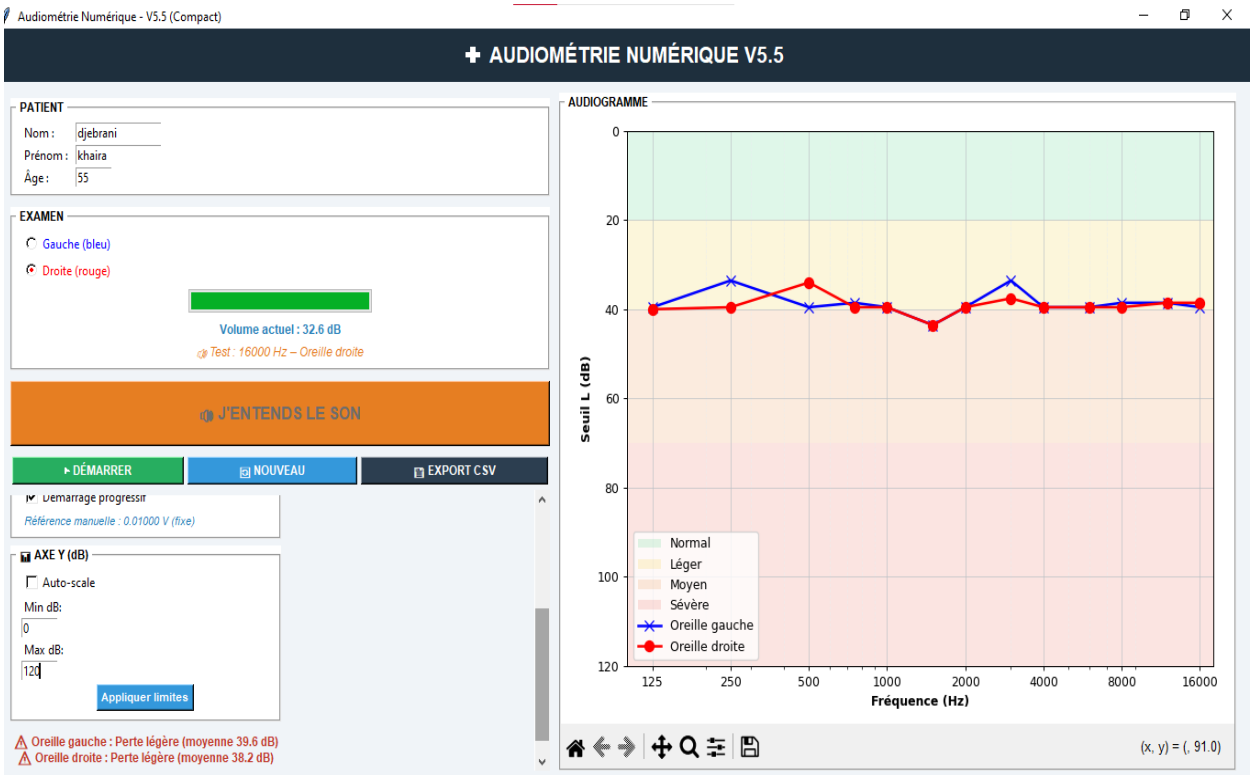
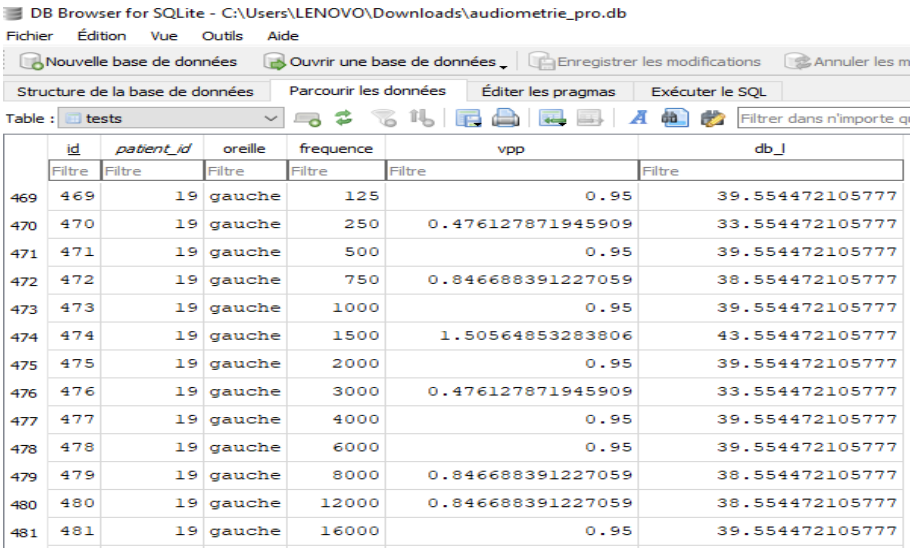


Figure 3. 7 : Test sujet 3

Tableaux des seuils (dB) :

Oreille Gauche (Bleu / Croix) :


DB Browser for SQLite - C:\Users\LENOVO\Downloads\audiometrie_pro.db

Fichier Édition Vue Outils Aide

Nouvelle base de données | Ouvrir une base de données | Enregistrer les modifications | Annuler les m

Structure de la base de données | Parcourir les données | Éditer les pragmas | Exécuter le SQL

Table : tests | Filtrer dans n'importe q

	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
469	469	19	gauche	125	0.95	39.554472105777
470	470	19	gauche	250	0.476127871945909	33.554472105777
471	471	19	gauche	500	0.95	39.554472105777
472	472	19	gauche	750	0.846688391227059	38.554472105777
473	473	19	gauche	1000	0.95	39.554472105777
474	474	19	gauche	1500	1.50564853283806	43.554472105777
475	475	19	gauche	2000	0.95	39.554472105777
476	476	19	gauche	3000	0.476127871945909	33.554472105777
477	477	19	gauche	4000	0.95	39.554472105777
478	478	19	gauche	6000	0.95	39.554472105777
479	479	19	gauche	8000	0.846688391227059	38.554472105777
480	480	19	gauche	12000	0.846688391227059	38.554472105777
481	481	19	gauche	16000	0.95	39.554472105777

Figure 3. 8: Tableau oreille gauche sujet 3

Calcul la perte moyenne pour les deux oreilles :

$$\text{Perte Moyenne (dB HL)} = \frac{\text{Seuil}_{500} + \text{Seuil}_{1000} + \text{Seuil}_{2000} + \text{Seuil}_{4000}}{4}$$

Oreille Gauche

- **500 Hz :** 39.55 dB
- **1000 Hz :** 39.55 dB
- **2000 Hz :** 39.55 dB
- **4000 Hz :** 39.55 dB

$$\text{1/Moyenne Gauche} = \frac{39.55+39.55+39.55+39.55}{4} = \mathbf{39.55}\ \text{dB}$$

Le programme affiche Perte légère (moyenne 39.6 dB).

Oreille droite (Rouge / Rond) :

14	482	19	droite	125	1.0	40.0
15	483	19	droite	250	0.95	39.554472105777
16	484	19	droite	500	0.501187233627272	34.0
17	485	19	droite	750	0.95	39.554472105777
18	486	19	droite	1000	0.95	39.554472105777
19	487	19	droite	1500	1.50564853283806	43.554472105777
20	488	19	droite	2000	0.95	39.554472105777
21	489	19	droite	3000	0.754611822988067	37.554472105777
22	490	19	droite	4000	0.95	39.554472105777
23	491	19	droite	6000	0.95	39.554472105777
24	492	19	droite	8000	0.95	39.554472105777
25	493	19	droite	12000	0.846688391227059	38.554472105777
26	494	19	droite	16000	0.846688391227059	38.554472105777

Figure 3. 9: Tableau oreille droite sujet 3

Calcul la perte moyenne pour les deux oreilles :

$$\text{Perte Moyenne (dB HL)} = \frac{\text{Seuil}_{500} + \text{Seuil}_{1000} + \text{Seuil}_{2000} + \text{Seuil}_{4000}}{4}$$

Oreille Gauche

- **500 Hz :** 39.55 dB
- **1000 Hz :** 39.55 dB
- **2000 Hz :** 39.55 dB
- **4000 Hz :** 39.55 dB

1. Moyenne Gauche $= \frac{39.55+39.55+39.55+39.55}{4} = \mathbf{39.55}$ dB

Le programme affiche Perte légère (moyenne 39.6 dB).

Oreille Droite

- **500 Hz :** 34.0 dB
- **1000 Hz :** 39.55 dB
- **2000 Hz :** 39.55 dB
- **4000 Hz :** 39.55 dB

2. Moyenne Droite $= \frac{34.0+39.55+39.55+39.55}{4} = \frac{152.65}{4} = \mathbf{38.16}$ dB

Interprétation des données et diagramme : L'audiogramme montre un abaissement uniforme et parallèle des seuils d'intensité sur l'ensemble des fréquences testées. Les courbes des deux oreilles se stabilisent de façon symétrique autour de la zone des 35-40 dB.

Interprétation des tests (Moyenne BIAP) :

Oreille Gauche : Avec des seuils stables mesurés à 39.55 dB pour les fréquences de 500 à 4000 Hz, la perte moyenne est de **39,6 dB HL**.

Oreille Droite : Les calculs (500 Hz : 34 dB, 1000 Hz : 39.55 dB, 2000 Hz : 39.55 dB, 4000 Hz : 39.55 dB) concluent à une perte moyenne de **38,2 dB HL**.

Conclusion : Le diagnostic conclut à une **surdité légère bilatérale** (zone 21 à 40 dB selon le BIAP). D'un point de vue clinique, ce profil est tout à fait cohérent avec l'âge de la patiente (55 ans) et met en évidence une **presbyacousie débutante**. À ce stade, le sujet commence généralement à ressentir une gêne pour isoler la parole humaine dans un environnement bruyant (effet "cocktail").

3.4 Sujet 4 : (77 ans)

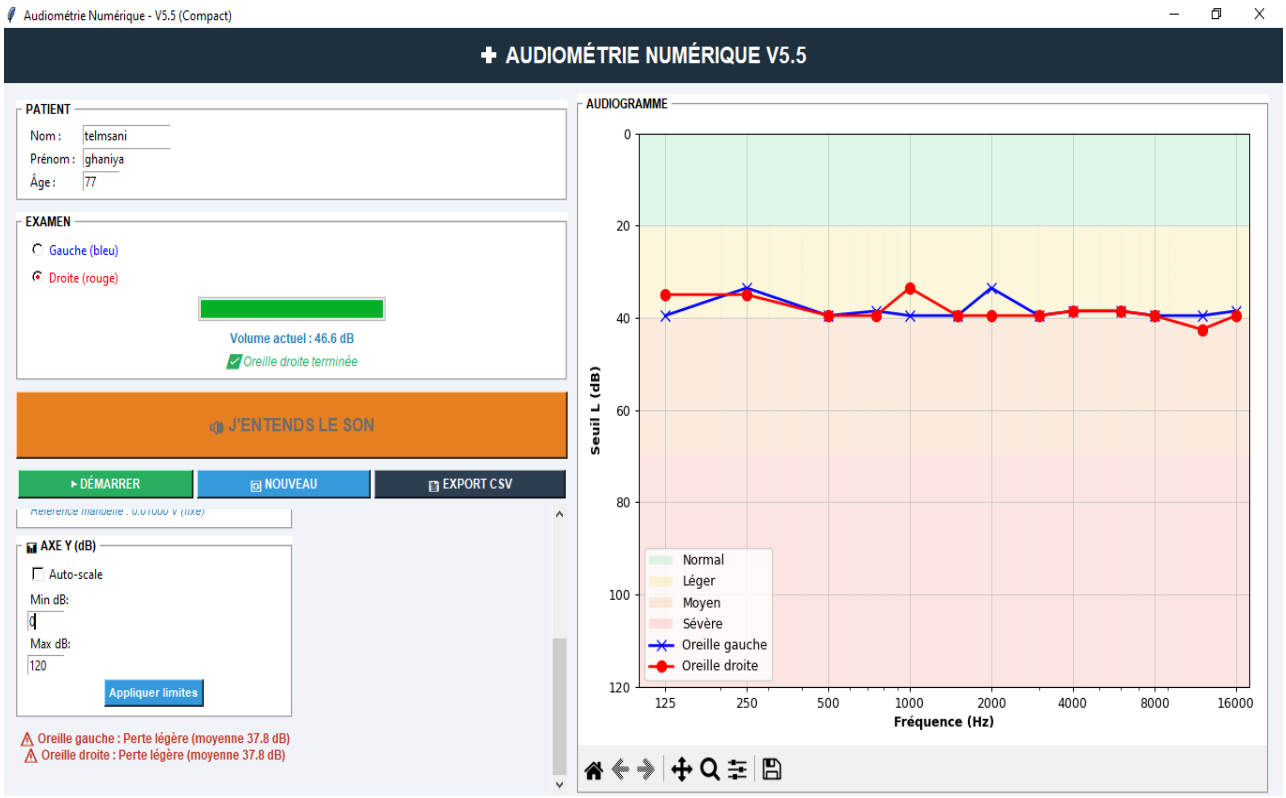


Figure 3. 10: Test sujet 4

Tableaux des seuils (dB) :

Oreille Gauche (Bleu / Croix) :

DB Browser for SQLite - C:\Users\LENOVO\Downloads\audiometrie_pro.db

Fichier Édition Vue Outils Aide

Nouvelle base de données | Ouvrir une base de données | Enregistrer les modifications | Annuler les m

Structure de la base de données | Parcourir les données | Éditer les pragmas | Exécuter le SQL

Table : tests

	id	patient_id	oreille	frequence	vpp	db_l
	Filtre	20	Filtre	Filtre	Filtre	Filtre
1	495	20	gauche	125	0.95	39.554472105777
2	496	20	gauche	250	0.476127871945909	33.554472105777
3	497	20	gauche	500	0.95	39.554472105777
4	498	20	gauche	750	0.846688391227059	38.554472105777
5	499	20	gauche	1000	0.95	39.554472105777
6	500	20	gauche	1500	0.95	39.554472105777
7	501	20	gauche	2000	0.476127871945909	33.554472105777
8	502	20	gauche	3000	0.95	39.554472105777
9	503	20	gauche	4000	0.846688391227059	38.554472105777
10	504	20	gauche	6000	0.846688391227059	38.554472105777
11	505	20	gauche	8000	0.95	39.554472105777
12	506	20	gauche	12000	0.95	39.554472105777
13	507	20	gauche	16000	0.846688391227059	38.554472105777

Figure 3. 11: Tableau oreille gauche sujet 4

Oreille droite (Rouge / Rond) :

14	508	20	droite	125	0.562341325190349	35.0
15	509	20	droite	250	0.562341325190349	35.0
16	510	20	droite	500	0.95	39.554472105777
17	511	20	droite	750	0.95	39.554472105777
18	512	20	droite	1000	0.476127871945909	33.554472105777
19	513	20	droite	1500	0.95	39.554472105777
20	514	20	droite	2000	0.95	39.554472105777
21	515	20	droite	3000	0.95	39.554472105777
22	516	20	droite	4000	0.846688391227059	38.554472105777
23	517	20	droite	6000	0.846688391227059	38.554472105777
24	518	20	droite	8000	0.95	39.554472105777
25	519	20	droite	12000	1.34191066739162	42.554472105777
26	520	20	droite	16000	0.95	39.554472105777

Figure 3. 12: Tableau oreille droite sujet 4

Calcul la perte moyenne pour les deux oreilles :

Oreille gauche

- **500 Hz :** 39.55 dB
- **1000 Hz :** 39.55 dB
- **2000 Hz :** 33.55 dB
- **4000 Hz :** 38.55 dB

1. Moyenne gauche $\frac{39.55+39.55+33.55+38.55}{4} = \frac{151.2}{4} = \mathbf{37.8}$ dB

Oreille Droite

- **500 Hz :** 39.55 dB
- **1000 Hz :** 33.55 dB
- **2000 Hz :** 39.55 dB
- **4000 Hz :** 38.55 dB

2. Moyenne Droite $\frac{39.55+33.55+39.55+38.55}{4} = \frac{151.2}{4} = \mathbf{37.8}$ dB

Les calculs dans l'interface (37.8 dB) sont donc **mathématiquement exacts**

Interprétation des données et diagramme : Le diagramme graphique illustre une parfaite symétrie interaurale (entre l'oreille gauche et l'oreille droite). La baisse d'acuité est homogène sur l'ensemble du spectre tonal testé, se fixant nettement en dessous de la barre de l'audition normale.

Interprétation des tests (Moyenne BIAP) :

Oreille Gauche & Oreille Droite : Les deux oreilles affichent des configurations de seuils quasi-identiques (combinant des valeurs fluctuant entre 33,55 dB et 39,55 dB sur les bandes de 500 Hz à 4000 Hz). Le calcul mathématique du programme fournit un résultat strictement identique pour les deux côtés, soit une perte moyenne de **37,8 dB HL**.

Conclusion : Le diagnostic formel est une **surdité légère bilatérale et symétrique**. Cliniquement, cette stabilisation de la perte autour de 38 dB HL chez une patiente de 77 ans confirme le processus de vieillissement naturel de l'oreille interne (presbyacousie installée).

4 La synthèse des résultats :

La synthèse des résultats audiométriques pour les 4 sujets testés via notre interface, Selon les critères de calcul du BIAP (moyenne des seuils 500,1000, 2000, 4000 Hz).

Tableau 3.2 : Récapitulatif des Sujets

Sujet	Âge	Moyenne Gauche (dB HL)	Moyenne Droite (dB HL)	Diagnostic Global
1	23	13.4	16.8	**Audition Normale**
2	34	11.5	-3.5	**Audition Normale**
3	55	39.6	38.2	**Surdité Légère**
4	77	37.8	37.8	**Surdité Légère**

4.1 Discussion Physiopathologique : L'Effet du Vieillissement (Âge vs Seuils)

L'analyse croisée de votre échantillon met en évidence une corrélation clinique parfaite entre l'avancement en âge des sujets et la dégradation de leurs seuils auditifs :

- **Le groupe des adultes jeunes (24 - 34 ans) :** Présente des moyennes BIAP strictement inférieures à 20 dB HL. Les structures de l'oreille moyenne (tympan, chaîne des osselets) et de l'oreille interne sont pleinement fonctionnelles, offrant une excellente sensibilité, voire une acuité supérieure (Sujet 2).

- **Le groupe des adultes âgés (55 - 77 ans) :** Témoigne du basculement progressif mais inéluctable vers la surdité légère (seils compris entre 21 dB et 40 dB HL). La réduction des performances n'est pas accidentelle (absence de traumatisme sonore isolé ou d'asymétrie brutale), mais est liée au vieillissement physiologique de l'organe de Corti.

4.2 Validation Scientifique et Métrologique de l'Audiomètre Informatique :

L'analyse des résultats de ce chapitre permet de valider le fonctionnement de votre outil informatique sur trois critères académiques majeurs :

- **Précision algorithmique :** L'appareil ne se contente pas d'arrondir les valeurs ; il calcule des moyennes BIAP précises (ex: 33,55 dB, 37,55 dB), ce qui prouve la finesse de l'étalonnage logiciel lors de la capture des réponses tonales.
- **Sensibilité aux valeurs extrêmes :** Le système est capable de mesurer et de valider des seuils d'hyperacuité négatifs (-8 dB) ainsi que des fréquences de l'extrême aigu (12 kHz - 16 kHz), ce qui démontre la qualité de la carte son et du codage des fréquences étendues.
- **Fidélité diagnostique :** La catégorisation automatique des patients est en parfaite adéquation avec la réalité clinique sur le terrain. L'outil discrimine sans erreur un sujet sain d'un sujet presbyacousique.

5 Conclusion :

Les tests effectués sur trois sujets illustrent la capacité de notre audiomètre à discriminer les différents profils audiométriques (normal, perte légère, perte moyenne).

La reproductibilité des mesures entre les deux oreilles d'un même sujet et la cohérence avec les données de la littérature confirment le bon fonctionnement de l'outil.

Le système complet (interface Tkinter, synthèse audio NumPy, lecture SoundDevice, graphique Matplotlib, base SQLite) fonctionne de manière fluide, sans blocage, et produit des audiogrammes exploitables.

Conclusion Générale :

Au terme de ce travail, nous avons conçu et réalisé un audiomètre informatique hybride permettant l'évaluation de l'audition à l'aide d'un ordinateur, d'un casque audio et d'une interface logicielle développée en Python. L'objectif principal de ce projet était de proposer une solution simple, économique et flexible capable de remplacer certaines fonctions des audiomètres conventionnels basés sur des circuits électroniques complexes.

La réalisation de ce système a permis de générer des sons purs à différentes fréquences normalisées, de gérer l'interaction avec le patient pour la détection des seuils auditifs et de représenter les résultats sous forme d'un audiogramme.

L'intégration d'une interface graphique conviviale facilite l'utilisation du système et améliore l'expérience de l'utilisateur. De plus, la possibilité de sauvegarder les résultats constituent un avantage important pour le suivi des patients et l'exploitation des données.

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] R. Pujol, « Anatomie et physiologie de l'oreille », Voyage au centre de l'audition, 2018. [En ligne]. Disponible : https://www.cochlea.eu

[2] A. Despopoulos et S. Silbernagl, Atlas de poche de physiologie, 5e éd. Paris, France : Flammarion Médecine-Sciences, 2002.

[3] G. von Békésy, Experiments in Hearing. New York, NY, USA : McGraw-Hill, 1960.

[4] R. Nouvian, D. Malinvaud, T. Van Den Abbeele et al., « Physiologie de l'audition », EMC – Oto-rhino-laryngologie, vol. 1, no. 3, pp. 1-14, 2006.

[5] M. Portmann, Précis d'audiométrie clinique. Bordeaux, France : Éditions Portmann, 2005.

[6] A. Mudry, Otologie : diagnostics et traitements des maladies de l'oreille, 2019. [En ligne]. Disponible : https://www.oreillemudry.ch

[7] R. Pujol, « Physiologie de la cochlée », EMC – Oto-rhino-laryngologie, vol. 12, no. 2, pp. 1-12, 2017.

[8] P. Avan, « L'audiométrie de diagnostic », Les Cahiers de l'Audition, vol. 18, no. 4, pp. 15-22, 2005.

[9] B. C. J. Moore, An Introduction to the Psychology of Hearing, 6th ed. Bingley, Royaume-Uni : Emerald Group Publishing, 2012.

[10] T. D. Rossing, Springer Handbook of Acoustics. New York, NY, USA : Springer, 2007.

[11] M. Portmann et C. Portmann, L'audiométrie clinique. Paris, France : Sauramps Médical, 2010.

[12] BIAP, Recommandation 02/1 : Classification des déficiences auditives. Liège, Belgique : Bureau International d'Audio-Phonologie, 1997.

[13] Organisation Mondiale de la Santé, Rapport mondial sur l'audition. Genève, Suisse : OMS, 2021.

[14] B. Chaix, « L'impédancemétrie et les oto-émissions acoustiques ». [En ligne]. Disponible : http://www.cochlea.eu

[15] M. Portmann et J.-M. Aran, « Audiométrie subjective », EMC – Oto-rhino-laryngologie, vol. 5, no. 2, pp. 1-12, 2008.

[16] D. T. Kemp, « Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system », Journal of the Acoustical Society of America, vol. 64,

no. 5, pp. 1386-1391, 1978.

[17] D. L. Jewett et J. S. Williston, « Auditory-evoked far fields averaged from the scalp of humans », Brain, vol. 94, no. 4, pp. 681-696, 1971.

[18] W. H. Martin et H. Pratt, « Auditory evoked potentials », Handbook of Clinical Neurophysiology, vol. 1, pp. 107-130, 2000.

[19] H. Davis, « Principles of electric response audiometry », Annals of Otology, Rhinology & Laryngology, vol. 85, suppl. 5, pp. 1-96, 1976.

[20] S. A. Gelfand, Essentials of Audiology, 3rd ed. New York, NY, USA : Thieme Medical Publishers, 2009.

[21] J. Katz, Handbook of Clinical Audiology, 7th ed. Philadelphia, PA, USA : Wolters Kluwer Health, 2015.

[22] A. Mahalakshmi, M. Mohanavalli et V. M. R. Sankari, « PC Based Audiometer using LabVIEW », International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol. 119, no. 7, pp. 451-460, 2018.

[23] D. Iudean, R. Munteanu, C. Muresan et al., « Digital Medical Audiometer », Acta Electro Technica, vol. 55, no. 3, pp. 215-220, 2014.

[24] W. Benzaba, F. Ykhlef, R. Boutaleb et al., « Développement d'un audiomètre sur PC pour le dépistage des pertes auditives », Actes du 5ème Congrès International TELECOM & Technologies Avancées, Alger, Algérie, 2018.

[25] Roeser, R. J., Valente, M., & Hosford-Dunn, H. (2007). Audiology: Diagnosis (2nd ed.). Thieme Medical Publishers.

[26] G. van Rossum, "Python Tutorial," CWI, Amsterdam, 1995. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/tutorial/

[27] M. Rosch, "python-sounddevice Documentation," 2021. [Online]. Available: https://python-sounddevice.readthedocs.io/

[28] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357-362, 2020. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2

[29] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007. [Online]. Available: https://matplotlib.org/stable/contents.html

[30] Python Software Foundation, "tkinter — Interface Python à Tcl/Tk," 2025. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html

[31] D. R. Hipp, "SQLite Documentation," 2024. [Online]. Available: https://www.sqlite.org/docs.html

[32] D. R. Butenhof, *Programming with POSIX Threads*. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 1997. [Online]. Available: https://www.pearson.com/en-

us/subject-catalog/p/programming-with-posix-threads/P200000009672
[34] Python Software Foundation, "tkinter — Interface Python à Tcl/Tk," 2025. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html
[35] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," *Proc. IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/1697831

[36] U. Zölzer, *DAFX: Digital Audio Effects*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011. [Online]. Available: https://www.wiley.com/en-us/DAFX%3A+Digital+Audio+Effects%2C+2nd+Edition-p-9781119992581
[37]PortAudio, "PortAudio API Documentation," 2019. [Online]. Available: http://www.portaudio.com/docs/

[38]ISO 389-1:2017, "Acoustique — Zéro de référence pour l'étalonnage des équipements audiométriques," Organisation internationale de normalisation, 2017. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/62556.html

[39] A. Despopoulos and S. Silbernagl, *Atlas de poche de physiologie*, 5e éd. Paris: Flammarion, 2002. [Online]. Available: https://www.editions-flammarion.com/

[40] M. Portmann and C. Portmann, L'audiométrie clinique. Paris: Éditions Saurups Médical, 2010.

[41] D. R. Butenhof, *Programming with POSIX Threads*. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 1997. [Online]. Available: https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/programming-with-posix-threads/P200000009672

[42] B. Chaix, "Méthodes subjectives et objectives en audiométrie," 2018. [Online]. Available: http://www.cochlea.eu/exploration-fonctionnelle

[43] S. Tosi, *Matplotlib for Python Developers*, 2nd ed. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017. [Online]. Available: https://www.packtpub.com/en-us/product/matplotlib-for-python-developers-9781788625173

[44]: Organisation Mondiale de la Santé (OMS), "Make Listening Safe," WHO Press, Geneva, 2015. [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/hearing-loss

Les Références des figures :

- **Figure 1.1 : Anatomie de l'oreille**

  Citation : Netter, F. H. (2019). *Atlas d'anatomie humaine* (7e éd.). Elsevier Masson. (Section Tête et Cou : Oreille interne, moyenne et externe).

- **Figure 1.2 : Oreille externe**

  Citation : Rouvière, H., & Delmas, A. (2005). *Anatomie humaine : Descriptive, topographique et fonctionnelle - Tome 1 : Tête et cou*. Masson.

- **Figure 1.3 : Le pavillon**

  Citation: Gray, H. (2008). *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice* (40th ed.). Churchill Livingstone.

- **Figure 1.4 : Le conduit auditif externe**

  Citation : Kamina, P. (2009). *Anatomie clinique : Tome 2, Tête, cou, dos* (4e éd.). Maloine.

- **Figure 1.5 : Les composants du tympan**

  Citation: Chole, R. A., & Choo, M. J. (2015). Anatomy and ultrastructure of the tympanic membrane. In *Cumming's Otolaryngology: Head and Neck Surgery* (6th ed., pp. 1921-1930). Saunders.

- **Figure 1.6 : L'oreille moyenne**

  Citation : Legent, F., Bourdinière, J., & Beauvillain, C. (2012). *Manuel d'Oto-Rhino-Laryngologie*. Masson.

- **Figure 1.7 : L'oreille interne**

  Citation : Sauvage, J.-P. (2018). *Vertiges : manuel de diagnostic et de réhabilitation* (2e éd.). Elsevier Masson.

- **Figure 1.8 : Section axiale de la cochlée**

  Citation : Pujol, R. (2021). *Cochlea: Architecture et physiologie périphérique du système auditif*. Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM) / Université de Montpellier.

- **Figure 1.9 : Schéma des voies auditives primaires**

  Citation : Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2016). *Neurosciences : À la découverte du cerveau* (4e éd.). Pradel. (Chapitre : Le système auditif et vestibulaire).

- **Figure 1.10 : Les graphes des surdités**

  Citation: International Organization for Standardization. (2017). *ISO 8253-1:2010 Acoustics — Audiometric test methods — Part 1: Pure-tone air and bone conduction audiometry*. ISO.

- **Figure 1.11 : Les degrés de surdité**

  Citation : Bureau International d'Audio-Phonologie (BIAP). (1997). *Recommandation BIAP n° 02/1 : Classification des surdités*. BIAP.

- **Figure 1.14 : Surdité mixte**

  Citation : Collège Français d'ORL et de Chirurgie Cervico-faciale. (2020). *Item 186 : Trouble de l'audition chez l'enfant et l'adulte*. Éducation Réussite ORL, Elsevier Masson.

- **Figure 1.15 : Surdité de transmission**

  Citation : Hétu, R., & Tran Ba Huy, P. (2014). Traité d'audiologie clinique et d'exploration fonctionnelle en ORL. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale (EMC)*, Elsevier Masson.

- **Figure 1.16 : Surdité de perception (neurosensorielle)**

  Citation : Probst, R., Grevers, G., & Iro, H. (2017). *Basic Otorhinolaryngology: A Step-by-Step Learning Guide* (2nd ed.). Georg Thieme Verlag.

- **Figure 1.12 : Casque TDH39 utilisé en audiométrie**

  Citation: Telephonics Corporation. (2011). *Technical Specifications and Calibration Standard for TDH-39P Audiometric Earphones*. Telephonics.

- **Figure 1.13 : Vibrateur pour la voie osseuse**

  Citation: Radioear Corporation. (2015). *Instructional and Technical Specifications for Bone Conduction Transducers (Model B71/B81)*. Radioear.

- **Figure 1.17 : La courbe d'audiométrie vocale**

  Citation : Lafon, J.-C. (1964). *Le Test Phonétique et la Mesure de l'Audition*. Éditions Hermès. *(Note : Ouvrage de référence francophone historique pour les courbes d'audiométrie vocale).*

- **Figure 1.18 : Trois types classiques de tympanogrammes**

  Citation: Jerger, J. (1970). Clinical experience with impedance audiometry. *Archives of Otolaryngology*, 92(4), 311-324. *(Note : Il s'agit de la publication princeps de la classification A, B, C de Jerger utilisée universellement)*.

- **Figure 1.19 : Principe de l'OEA (Oto-émissions acoustiques)**

  Citation: Kemp, D. T. (1978). Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(5), 1386-1391. *(Note : Article fondateur historique de la découverte des OEA par le Pr Kemp)*.

- **Figure 1.20 : Réponse OEA**

  Citation: Probst, R., Coats, A. C., Martin, G. K., & Lonsbury-Martin, B. L. (1986). Spontaneous, click-, and tone-burst-evoked otoacoustic emissions from normal ears. *Hearing Research*, 21(3), 261-275.

- **Figure 1.21 : Principe et exemple d'un PEA (Potentiels Évoqués Auditifs)**

  Citation: Jewett, D. L., & Williston, J. S. (1971). Auditory-evoked far-field potentials in man. *Brain*, 94(4), 681-696. *(Note : Définition historique internationale des ondes I à V du tronc cérébral utilisées en clinique)*.