

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique

Spécialité Instrumentation Biomédicale

présenté par

OUSSEINI SALATIKOYE Mamane Kabirou

&

MEKHLIF Ikram

Etude et Réalisation d'un Audiomètre Digital

Proposé par : Dr. CHENTIR Amina

Année Universitaire 2018-2019

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord et avant tout le bon DIEU qui nous a donné la force, la capacité et la volonté d'accomplir ce travail.

Nos censeurs remerciements à notre encadreur Dr. CHENTIR Amina pour la confiance qu'elle nous a donnée dans la réalisation de ce projet et pour tous les conseils qu'elle nous a fourni durant ce travail.

Nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre projet et de l'enrichir avec leurs propositions.

Avec Toute notre gratitude à l'entreprise SARL SERTINNOV du service d'impression 3D et Mr DJILALI du service de maintenance de l'hôpital France FANON pour leur aide et leur collaboration.

En fin on remercie nos très chers parents pour leurs soutiens et leur encouragement pendant tout notre cursus scolaire.

Résumé

L'audiomètre est l'un des appareils médicaux qui permet l'exploration de la fonction auditive. Il sert à mesurer de l'acuité auditive chez un patient. Notre projet consiste à la réalisation d'un audiomètre virtuel sur PC composé d'une interface graphique programmé sous LabVIEW et d'un casque audio fabriqué grâce à l'impression 3D. Cet audiomètre va générer des sons pour effectuer un test audiométrique par voie aérienne grâce à la carte son de l'ordinateur. Il permet ainsi de calculer le degré de surdité, d'afficher un audiogramme et de générer un rapport de test.

Le calibrage et l'évaluation de l'audiomètre a été réalisé au niveau de l'hôpital Frantz Fanon de Bida. Les résultats obtenus sont en corrélation avec ceux d'un audiomètre classique.

Mots clés : Surdité ; Audiomètre ; LabVIEW ; Audiogramme ; Carte son ; Impression 3D.

Abstract

The audiometer is a medical device which explores the function hearing. It is used to measure the hearing threshold of patient. Our project consists of the realization of a virtual audiometer on PC composed of a graphical interface programmed under LabVIEW and an audio headphones making by 3D printing. This audiometer will generate sounds to perform an audiometric test by air through the sound card of the computer. It allows you to calculate the degree of hearing loss, displaying an audiogram and generate a report of test.

Calibration and evaluation of the audiometer was carried out at the Frantz Fanon Hospital in Blida. The results obtained correlate with those of a classical audiometer.

Keywords: Deafness; Audiometer; LabVIEW; Audiogram; Soundcard; 3D printing.

ملخص

Tables des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	1
Chapitre I Anatomie et physiologie de l'appareil auditif	4
I.1 Introduction	5
I.2 Anatomie de l'appareil auditif	5
I.2.1 L'oreille externe	6
I.2.2 L'oreille moyenne	7
I.2.3 L'oreille interne	9
I.2.4 Les voies auditives	13
I.3 Physiologie de l'appareil auditif	14
I.3.1 Le son	15
I.3.2 Fonction de l'oreille externe.....	17
I.3.3 Fonction de l'oreille moyenne.....	17
I.3.4 Fonction de l'oreille interne	18
Conclusion	20
Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives ..	21
II.1 Introduction	22
II.2 Pathologies de l'audition	22
II.2.1 Otites	22
II.2.2 Acouphènes	22
II.2.3 L'otospongiose	22
II.2.4 Presbyacousie	22
II.2.5 Hyperacousie.....	23
II.2.6 Hypoacousie	23
II.3 Explorations fonctionnelles auditive	24
II.3.1 Les méthodes objectives	24

II.3.2	Les méthodes subjectives	29
II.3.3	Autres méthodes d'explorations fonctionnelles auditives.....	36
	Conclusion	36
Chapitre III	Réalisation de l'audiomètre	37
III.1	Introduction	38
III.2	Etat de l'art	38
III.3	Présentation de logiciel LabVIEW	39
III.3.1	Les fenêtres du programme.....	40
III.3.2	Les palettes :	41
III.4	Implémentation de l'audiomètre sur LabVIEW	43
III.4.1	Blocs de simulation des sons :	45
III.4.2	Blocs de génération de son audio	47
III.4.3	Affichage des résultats et génération de rapport de test	50
III.5	La fabrication numérique du casque audio	52
III.5.1	Modélisation tridimensionnelle du casque	52
III.5.2	Impression 3D du casque	53
III.6	Circuit électronique du casque audio	54
III.7	Calibration du casque audio	57
III.8	Résultats des tests effectués avec l'audiomètre.....	59
	Conclusion générale.....	61
	Bibliographie.....	63

Liste des figures

Figure I.1: Coupe frontale de l'oreille.	5
Figure I.2: Oreille externe.	6
Figure I.3: Le pavillon de l'oreille.....	6
Figure I.4: Tympan normal.	7
Figure I.5: Oreille moyenne.	7
Figure I.6: Schéma des osselets.....	8
Figure I.7: Oreille interne.....	9
Figure I.8: Labyrinthe osseux.....	10
Figure I.9: Le labyrinthe membraneux.....	11
Figure I.10: coupe de la cochlée.....	12
Figure I.11: Canal cochléaire	12
Figure I.12: Organe de Corti	13
Figure I.13 : Relais sur les voies auditives.....	14
Figure I.14: Echelle de niveau de bruit.	16
Figure I.15 : Représentation graphique du champ auditif humain.	16
Figure I.16: Représentation schématique de l'enveloppe des ondes propagées selon le modèle de von Békésy	19
Figure I.17: Organisation tonotopique de la cochlée.	19
Figure II.1: Principe de l'impédancemètre.....	25
Figure II.2: Tympanogrammes.....	26
Figure II.3: Principe de l'OEA.....	27
Figure II.4: Réponse OEA enregistré avec une latence de 5 ms (cas normal).	27
Figure II.5: Schéma de référence des voies auditives permettant de repérer le site anatomique des différentes ondes du PEA.....	28
Figure II.6: Principe et exemple d'un PEA.....	29
Figure II.7: Test de Weber.	30
Figure II.8: Test de Rinne.	31
Figure II.9: Casque TDH39 utilisée en audiométrie.	32
Figure II.10: vibreur pour la voie osseuse.	32
Figure II.11: Audiogramme tonal qui décrit une surdité moyenne du côté droit.....	34
Figure II.12: Surdité de transmission.	34
Figure II.13: Surdité mixte.	35

Figure II.14: Audiogrammes vocal	36
Figure III.1 : Interface développé par IUDEAN & al.	38
Figure III.2 : Fenêtre de tests audiométriques de l'interface développée par Benzaba & al....	39
Figure III.3: Le panneau avant.	40
Figure III.4 : La fenêtre diagramme.	40
Figure III.5: Les éléments de bloc diagramme.....	41
Figure III.6: Palette d'objets du panneau avant (Controls Palette).....	41
Figure III.7: Palette d'objets du diagramme (Fonctions Palette).....	42
Figure III.8 : Organigramme général de l'application développée.	43
Figure III.9 : Interface utilisateur programmé avec LabVIEW.....	45
Figure III.10: Block LabVIEW de Simulation de signal	45
Figure III.11: Fenêtre de configuration du block simulation de signal	46
Figure III.12: Blocs de simulation du signal sinusoïde.....	47
Figure III.13: Bloc de configuration de son	48
Figure III.14: Bloc d'écriture de son.....	48
Figure III.15: Diagramme complet de génération de son.....	49
Figure III.16: Diagramme de permutation des sons stéréo	49
Figure III.17: Bloc pour l'affichage graphique.....	50
Figure III.18: Programmation des différents cas de surdité.	50
Figure III.19: Diagramme de génération de rapport.....	51
Figure III.20: Exemple de rapport généré.	51
Figure III.21 : Modélisation du casque audio sur Fusion 360.....	52
Figure III.22 : Machine d'impression 3D.....	53
Figure III.23 : Pièces du casque audio imprimé.	54
Figure III.24 : Schéma développé du Circuit du casque audio.	55
Figure III.25 : Dessin avant projet du circuit imprimé dans EAGLE.	56
Figure III.26 : Carte électronique fini.	56
Figure III.27 : Casque audio monté avec la carte d'amplification intégrée.	57
Figure III.28 : Calibration de l'audiomètre virtuel.....	58
Figure III.29 : Résultat du patient 1 avec l'audiomètre classique de l'hôpital.....	59
Figure III.30 : Résultat du patient 1 avec l'audiomètre virtuel.	59
Figure III.31 : Résultat du patient 2 avec l'audiomètre classique de l'hôpital.....	60
Figure III.32 : Résultat du patient 2 avec l'audiomètre virtuel.	60

Liste des abréviations

CA Conduction Aérienne

CAO Conception Assistée par Ordinateur

CCE Cellule Ciliée Externe

CCI Cellule Ciliée Interne

CO Conduction Osseuse

dB décibel

dB HL decibel Hearing Level

dB SPL Sound Pressure Level

dB SIL Sound Intensity Level

MEA Méat Externe Auditif

OEA Oto-Emissions Acoustiques

PEA Potentiels Evoqués Auditifs

Introduction générale

Introduction générale

On parle de perte d'audition lorsqu'une personne n'est pas capable d'entendre aussi bien qu'une personne ayant une audition normale, le seuil étant de 25dB ou mieux dans les deux oreilles. La perte d'audition peut être légère, moyenne, sévère ou profonde. Elle peut toucher une oreille ou les deux et entraîner des difficultés pour suivre une conversation ou entendre les sons forts.

Au jour d'aujourd'hui, il y a une accélération de la perte d'audition, engendrée par divers facteurs tel que l'âge, les maladies auditives, l'exposition à des multiples bruits quotidiens créés par notre environnement. En effet selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 466 millions de personnes souffrent de déficience auditive incapacitante dans le monde, dont 34 millions d'enfants.

Le dépistage consiste à rechercher au sein d'une population, les individus présentant une déficience auditive. Pour cela, différents tests sont pratiqués nécessitant ou non l'intervention du sujet. L'intérêt de ces investigations est de préciser rapidement un diagnostic, c'est-à-dire l'identification d'une maladie. Par la suite, il est ainsi possible d'adapter une réhabilitation en fonction de la déficience auditive, l'âge ou encore d'éventuels troubles associés.

D'où, il existe différentes approches d'explorations fonctionnelles auditives qui permettent d'évaluer et de dépister les différents cas de surdité. Pour cela, plusieurs tests existent pour permettent d'évaluer la qualité de l'audition, de quantifier la possible déficience auditive et d'en identifier la cause.

L'audiométrie constitue l'un des examens la plus courante dans les centres de santé. Mais ce dernier, demande un matériel spécifique cher et la présence d'un manipulateur spécialisé, ce qui entraîne son indisponibilité dans certaines zones et défavorise aussi le suivi de certains patients.

Le but de ce projet est de réaliser un audiomètre virtuel sur ordinateur (PC), facile à manipuler par le médecin grâce à son interface graphique, qui permet de faire le test de l'audition par voie aérienne.

Cet audiomètre développé sous LabVIEW permet de produire des sons audiométriques à partir de la carte son de l'ordinateur et à travers un casque audio modélisé et imprimé pour cette application.

Au cours de ce travail, nous verrons dans un premier chapitre des notions sur l'anatomie et la physiologie de l'oreille. Le deuxième chapitre sera consacré à détailler les pathologies et les explorations fonctionnelles auditives.

Et dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes étapes que nous avons suivies pour la réalisation de l'audiomètre et les outils de développement utilisés.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire en présentant les résultats obtenus et quelques perspectives pour améliorer le dispositif développé.

Chapitre I

Anatomie et physiologie de

l'appareil auditif

I.1 Introduction

L'exploration fonctionnelle des organes humains par des systèmes biomédicaux demande une base de connaissance sur l'anatomie et la physiologie de l'organe à étudier.

Dans ce chapitre on va détailler des notions nécessaires pour appréhender le domaine de l'audition humaine, en détaillant dans un premier temps la structure anatomique de l'oreille humaine et dans un seconde temps on va étudier sa physiologie.

Nous verrons dans ce chapitre comment et avec quelles parties de l'oreille, cette dernière arrive à convertir les vibrations sonores en signaux électriques qui sont envoyés au cerveau pour être décodé et avoir un sens.

I.2 Anatomie de l'appareil auditif

L'appareil auditif est un organe de l'ouïe qui permet la détection des sons, c'est un organe neurosensoriel pair et symétrique placé sur la partie latérale du crâne dans le rocher (os du crâne situé dans l'os temporal).

Cet appareil est composé de trois parties essentielles (Figure I.1) :

- L'oreille externe
- L'oreille moyenne
- L'oreille interne.

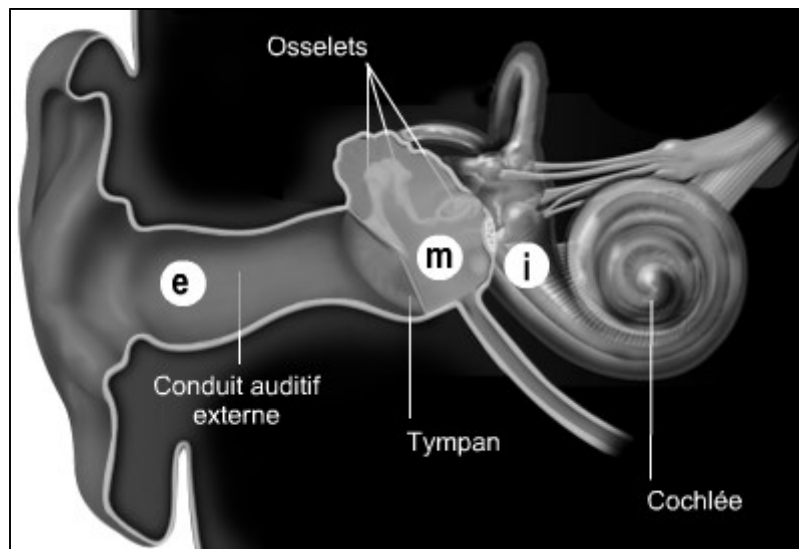


Figure I.1: Coupe frontale de l'oreille.

[e] oreille externe, [m] oreille moyenne, [i] oreille interne [1].

I.2.1 L'oreille externe

L'oreille externe est la partie visible de l'oreille qui comprend le pavillon et le conduit auditif externe (Figure I.2).

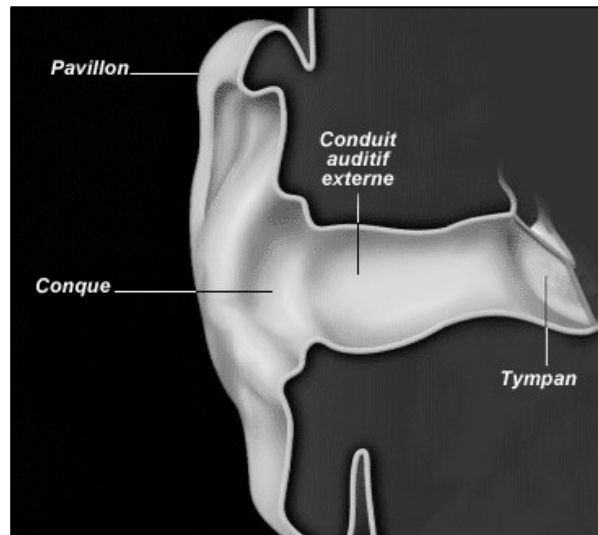


Figure I.2: Oreille externe [1].

a. Le pavillon

Le pavillon est l'expansion lamelleuse semi-rigide située à la face latérale du crâne [2]. C'est la partie externe et visible de l'oreille.

Il est formé par des reliefs et des creux d'origine cartilagineuse, et recouvert sur ses deux faces par la peau (Figure I.3).

- ✓ La face externe présente : la conque (l'endroit où s'ouvre le conduit auditif externe), le tragus, l'antitragus, l'anthélix, la gouttière de l'anthélix et l'hélix.
- ✓ La face interne séparée de la paroi crânienne par le sillon céphalo-auriculaire.

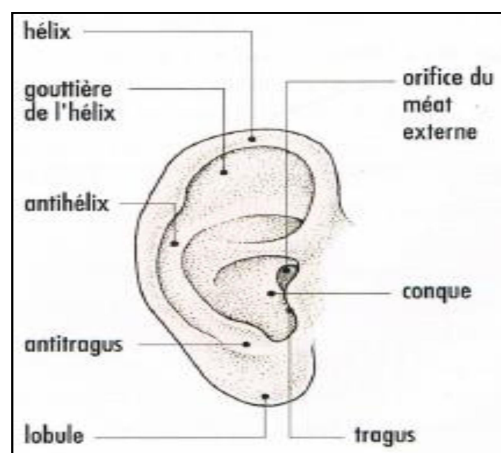


Figure I.3: Le pavillon de l'oreille

b. Le conduit auditif externe

Appelé aussi méat acoustique externe (MEA), il est étendu de la conque jusqu'au tympan sur une longueur d'environ 25 mm et de 8 à 9 mm de diamètre. Sa partie externe est constitué d'un tissu fibro-cartilagineux et sa partie interne d'un tissu osseux (Figure I.4).

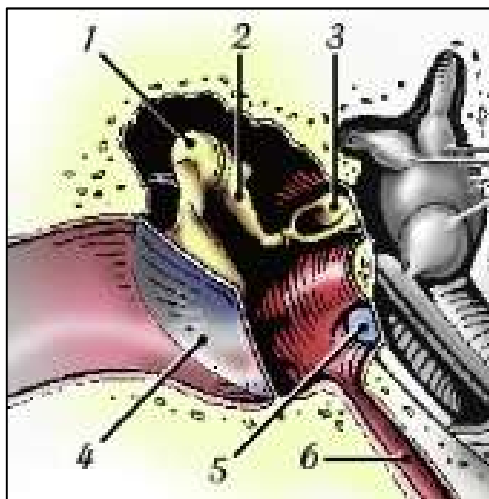
Le tympan est une fine membrane d'environ 1 cm² de surface. Il sépare l'oreille externe de l'oreille moyenne et transmet les vibrations aux osselets [2].



Figure I.4: Tympan normal [1].

I.2.2 L'oreille moyenne

C'est l'organe essentiel de transmission sonore. Il est constitué de 03 parties : La caisse du tympan, l'antre mastoïdien et la trompe d'Eustache (Figure I.5) [2].



Marteau(1) ; l'enclume(2) ;
l'étrier(3) ; Le tympan(4) ; la
trompe d'Eustache(6) ; La
fenêtre ovale, sur laquelle
s'applique la platine de
l'étrier(3) et la fenêtre ronde(5).

Figure I.5: Oreille moyenne [1].

a. La caisse du tympan

C'est une cavité cylindrique qui contient la chaîne des osselets et qui comprend 06 parois [2] :

- La paroi antérieure présente en haut l'orifice du canal du muscle de marteau, en bas l'orifice de la trompe d'eustache.
- La paroi inférieure, ou plancher, présente la région du golf de la jugulaire.
- la paroi postérieure ou mastoïdienne, marquée en haut par un orifice.
- La paroi interne ou labyrinthique sépare la caisse du tympan de l'oreille interne.
- La paroi externe ou tympanique visible par examen orthoscopique est formée essentiellement par la membrane tympanique qui est une membrane fibreuse.
- La paroi supérieure ou crânienne c'est le segment tympanique [2].

b. La chaîne des osselets

Au nombre de 03, ils sont maintenus entre elles par des articulations et des ligaments (Figure I.6) [2] :

- Le marteau : le plus volumineux et le plus externe présente un manche, un col, deux apophyses et une tête articulaire avec l'enclume. Il possède le muscle du marteau ou tenseur du tympan qui assourdi les bruits violents, innervé par une branche du nerf mandibulaire.
- L'enclume en arrière du marteau présente un corps et deux branches supérieure et inférieure qui se terminent par une apophyse lenticulaire.
- L'étrier comprend une tête, deux branches antérieure et postérieure, et 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 faciale [2].

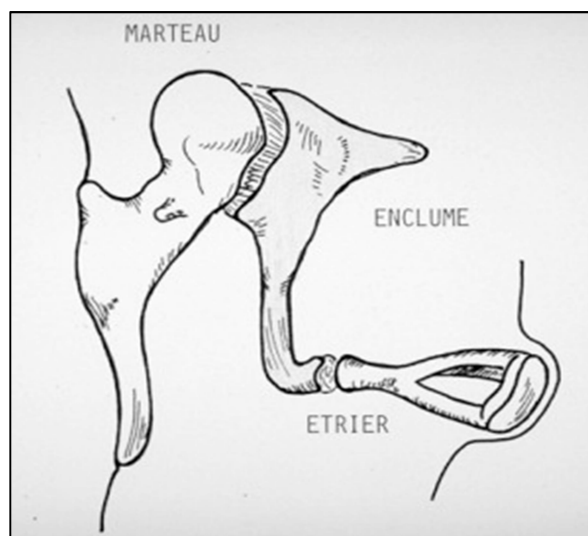


Figure I.6: Schéma des osselets [3].

c. Les cavités mastoïdiennes

Elles sont constituées de [2] :

- l'antre mastoïdien : cavité à plusieurs parois supérieure, postéro, interne, externe et antérieur.
- Les cellules mastoïdiennes: cavité de petites dimensions distinguées à 05 groupes [2].

d. La trompe d'Eustache

Canal de 35 à 45 mm de longueur oblique en avant, en bas et en dedans, fait communiquer la caisse du tympan avec le rhino-pharynx. Il est osseux dans son épaisseur des glandes 2/3 antérieurs tapissée à sa face profonde par une muqueuse pharyngée formant l'amygdale tubaire [2].

I.2.3 L'oreille interne

L'oreille interne est l'élément clé du système auditive, c'est l'organe de la perception des sons et de l'équilibration. Situé au niveau du rocher, Il présente une structure anatomique très complexe qui comprend trois(3) parties principales (Figure I.7):

- les cavités osseuses (appelé aussi labyrinthe osseux),
- les cavités fibreuses (ou labyrinthe membraneux) séparés avec le labyrinthe osseux avec un liquide appelée la périlymphe,
- le nerf auditif (composé du nerf cochléaire et des deux nerfs vestibulaires).

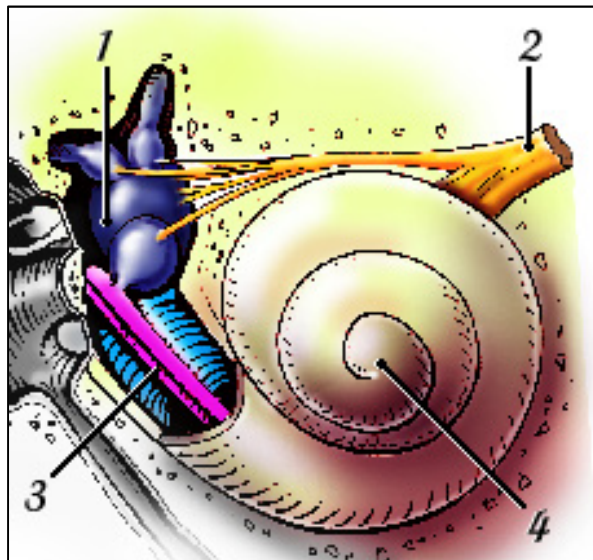


Figure I.7: Oreille interne.

Les organes vestibulaires (en bleu, 1) et le tour basal de la cochlée (3); l'apex de la cochlée (4). Les nerfs vestibulaires et cochléaires (jaune, 2) se rejoignent à l'entrée du système nerveux central, pour former le VIII ème nerf crânien [1].

a. Le labyrinthe osseux

Il est situé dans l'os du rocher et formé par trois (3) parties : le vestibule, les canaux semi-circulaires et la cochlée osseuse (Figure I.8) [2].

- Le vestibule, la partie centrale du labyrinthe composé de l'utricule et du saccule, permet de communiquer avec la caisse du tympan par la fenêtre ovale et relie aussi les trois canaux semi-circulaires à la cochlée.
- Les canaux semi-circulaires, trois tubes cylindriques en forme de fer à cheval, qui s'ouvrent dans le vestibule par deux orifices et protègent les conduits semi-circulaires membraneux.
- La cochlée osseuse ou limaçon osseuse : est un tube contourné en spirale situé en avant du vestibule et comprend :
 - La columelle : est l'axe osseux de la cochlée.
 - La lame des contours ou tube du limaçon : est un tube osseux enroulé autour de l'axe de la columelle.
 - La lame spirale : est une lamelle osseuse située à l'intérieur de la lame des contours.

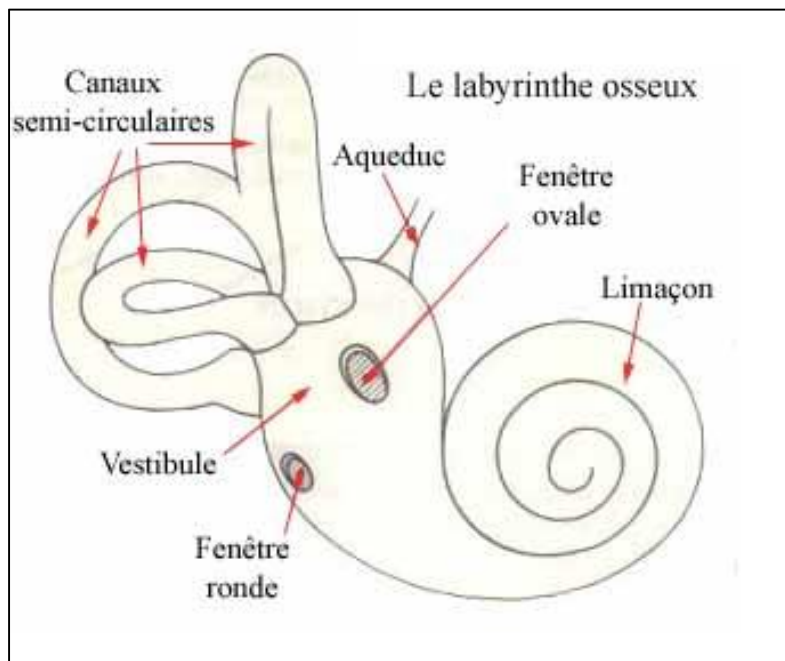


Figure I.8: Labyrinthe osseux [4].

b. Le labyrinthe membraneux

Il est situé à l'intérieur du labyrinthe osseux et il est rempli par l'endolymphe, un liquide aqueux. Le labyrinthe membraneux (Figure I.9) est constitué par [2] :

- Le vestibule membraneux : comprend 02 vésicules, l'une supérieure dite l'utricule et l'autre inférieure dite le saccule. De ces derniers naissent 02 canaux qui se fusionnent pour former le canal endolymphatique.
- Les canaux semi-circulaires membraneux qui sont implantés sur les parois de l'utricule et contenus dans les canaux semi-circulaires osseux.
- La cochlée membraneuse, tube spirale qui suit le trajet de la lame des contours.

Le labyrinthe membraneux donne naissance aux voies nerveuses cochléaires et vestibulaires qui se réunissent pour former la VIII^e paire crânienne.

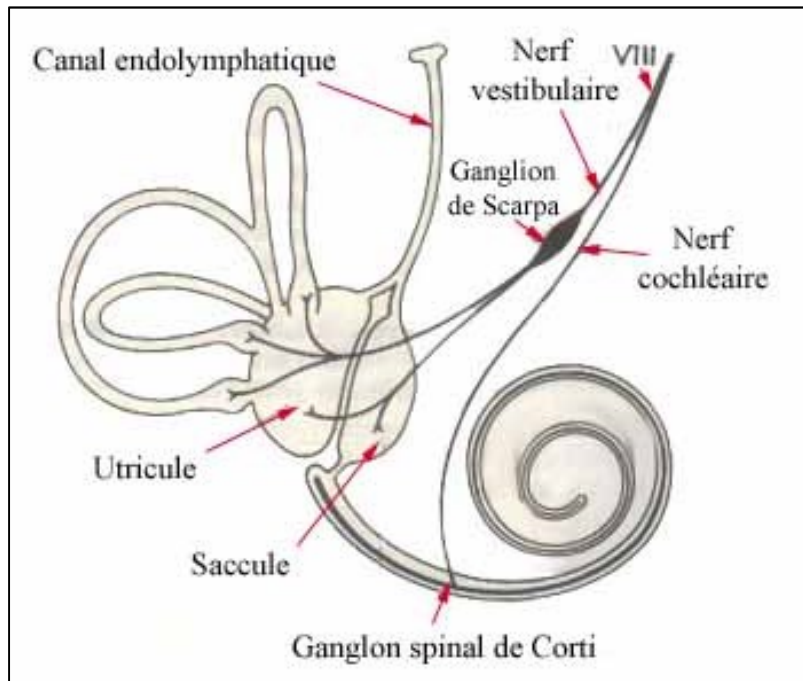


Figure I.9: Le labyrinthe membraneux [4].

c. La cochlée

Elle est constituée d'un ensemble de trois tubes enroulés en spirale sur deux tours et demi et remplis de liquides (Figure I.10) :

- les rampes tympanique et vestibulaire remplies par la périlymphe,
- le canal cochléaire (Figure I.11) rempli par l'endolymphe, et dans lequel se trouve l'organe sensoriel essentiel de l'audition : l'organe de Corti.

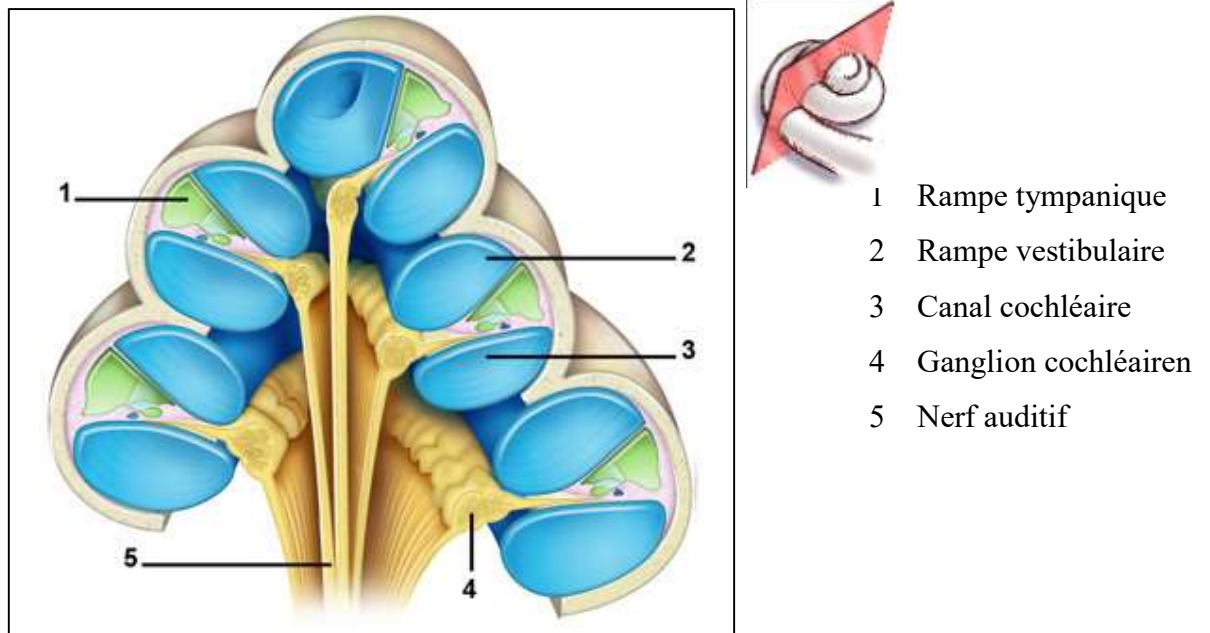


Figure I.10: coupe de la cochlée [3].

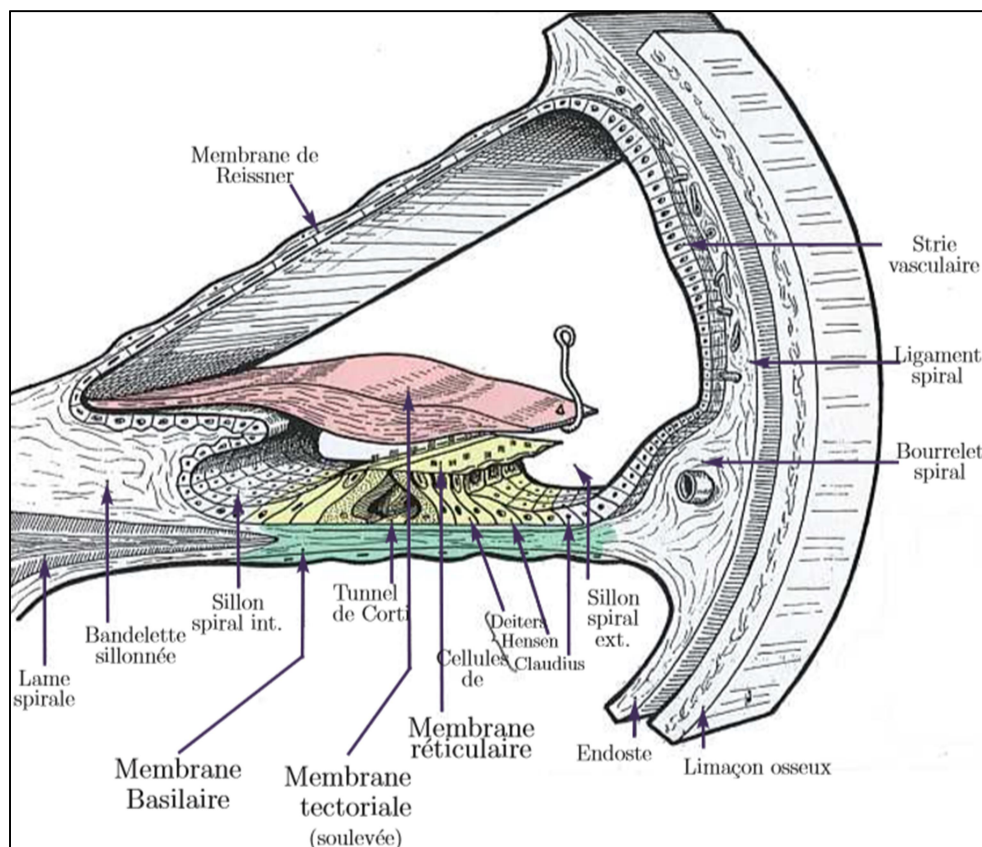


Figure I.11: Canal cochléaire [5]

d. L'organe de Corti

Il 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 connectés à des fibres nerveuses (Figure I.12).

Ils existent deux types des cellules ciliées :

- les cellules ciliées internes (CCI), environ 3500 ;
- les cellules ciliées externes (CCE) qui sont 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 [4].

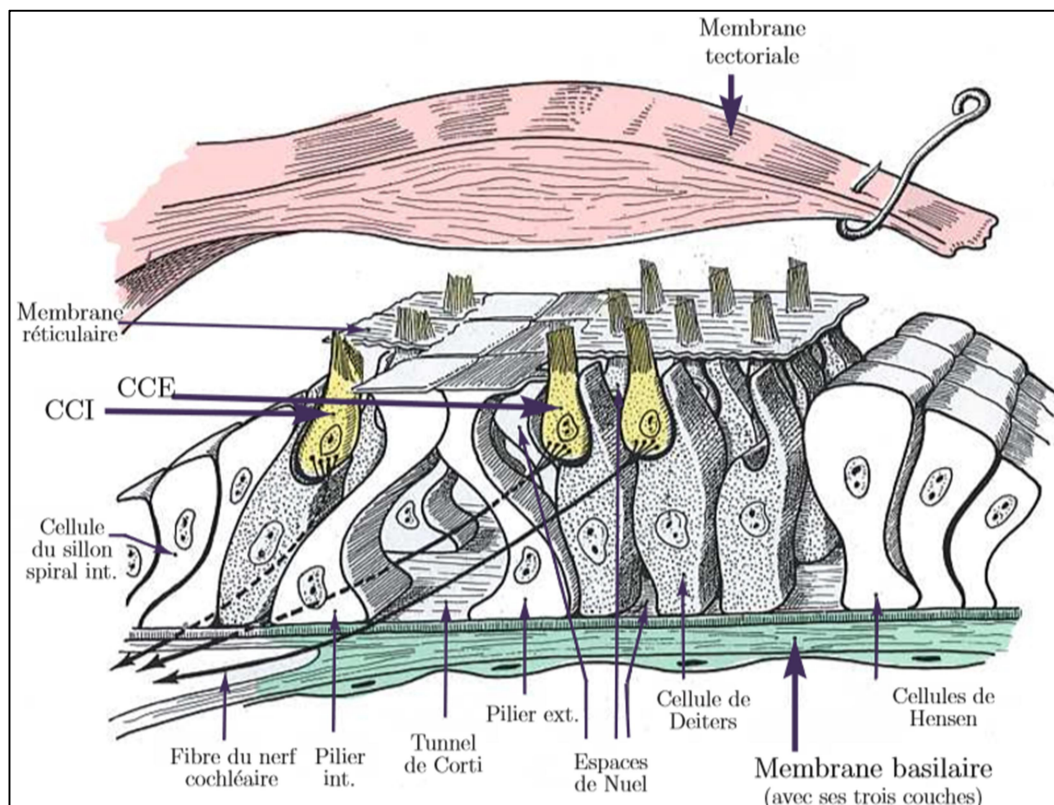


Figure I.12: Organe de Corti [5].

I.2.4 Les voies auditives

L'oreille interne communique avec l'intérieur du crâne par le conduit auditif interne, Le nerf auditif VIIIe chemine dans le conduit auditif interne et passe par plusieurs relais avant d'atteindre le cortex cérébral auditif.

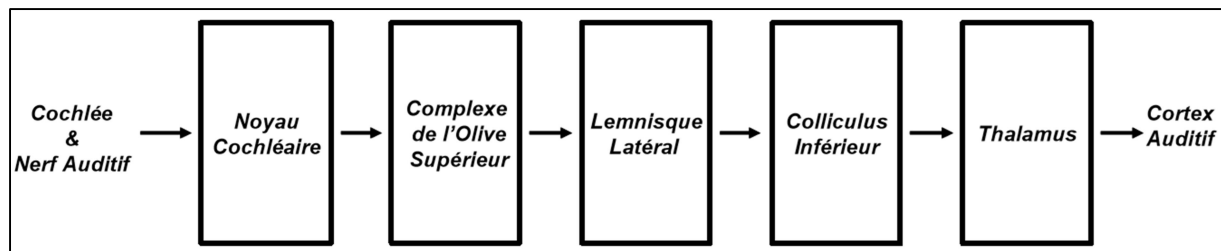


Figure I.13 : Relais sur les voies auditives [4].

À partir de la cochlée, les fibres afférentes qui constituent le nerf auditif arrivent au noyau cochléaire. Ce dernier, a, entre autres, le rôle de distribuer l'information aux centres nerveux supérieurs et d'améliorer par un phénomène d'inhibition les contrastes relatifs à l'intensité du son codé.

L'information auditive remonte ensuite jusqu'au complexe de l'olive supérieure. Ce relais, est le premier à recevoir des données convergentes des deux côtés (droite, gauche). À ce niveau sont analysées, les différences interaurales, d'intensité, de fréquence mais aussi temporelles. Le lemnisque latéral qui reçoit l'information joue un rôle dans la localisation spatiale du signal auditif.

C'est au niveau du Colliculus inférieur que des comparaisons sont effectuées entre plusieurs modalités sensorielles, notamment avec la vue. Il joue également un rôle d'analyse des sons en termes de niveau sonore, de variation de fréquence et de position dans l'espace. Et transmet de l'information à la fois aux niveaux supérieurs, mais aussi aux niveaux inférieurs.

Le thalamus est le dernier relais avant l'entrée dans le cortex pour à peu près toute l'information sensorielle, qu'elle soit auditive ou visuelle. Les différentes ramifications créées au cours de cette intégration gagnent enfin le cortex auditif primaire et les aires associatives où le son prend son sens [4].

I.3 Physiologie de l'appareil auditif

L'organe principal de l'ouïe est l'oreille, sa structure anatomique détaillée précédemment permet d'assurer le rôle de l'audition chez les êtres humains et aussi de participer à l'équilibration. Afin de comprendre le fonctionnement de l'audition, c'est-à-dire la traduction du signal acoustique en un signal organisé d'activité neurale qui permet le traitement central et la perception auditive [6], nous allons détailler les rôles des différentes parties suivantes: oreille externe, oreille moyenne et oreille interne. Mais avant tout une définition du son est indispensable pour bien comprendre le fonctionnement de l'audition humain.

I.3.1 Le son

Le son est une vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide. La vitesse de propagation du son dépend du milieu traversé et des conditions de températures et de pression.

Ainsi dans l'air, la célérité (la vitesse) du son est approximativement $c_{air} = 20\sqrt{T}$ (m/s) avec T en Kelvin, dans l'air ambiant ($T = 20^\circ\text{C}$) la vitesse du son est de 342 m/s [7].

Le son est caractérisé par trois paramètres : l'intensité, la hauteur (la fréquence) et le timbre, ces derniers permettent de le classer en trois (3) types :

- 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.

a. L'intensité du son

C'est l'amplitude de la vibration acoustique d'un son. Elle est liée directement à la pression acoustique provoquée par le son. Plus l'intensité est grande plus le son est fort, et plus l'intensité est petite plus le son est faible.

Un niveau sonore peut être exprimé en deux grandeurs (liées entre elles) : l'intensité acoustique, en watt par mètre carré (W/m^2) ou la pression acoustique, en Pascals (newton par mètre carré, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$). Ces deux grandeurs sont très souvent exprimées en décibel (dB), qui est une grandeur sans dimension qui permet de réduire l'échelle de ces dernières. Le dB SPL (Sound Pressure Level) pour le niveau de pression acoustique ou dB SIL (Sound Intensity Level) pour le niveau d'intensité acoustique [7] :

$$dB SPL = dB SIL = 20 \log\left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}}\right) = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ [dB]} \quad (I.1)$$

où

- $P_{ref} = 20\mu\text{Pa}$, la pression sonore de référence,
- P_{eff} est la valeur efficace mesurée,
- $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ l'intensité acoustique de référence
- I est l'intensité acoustique du son.

L'échelle de niveau de bruit en décibel (dB SPL) représenté dans la figure ci-dessous (Figure I.14) permet d'avoir une idée sur l'effet qu'elle a sur notre audition.

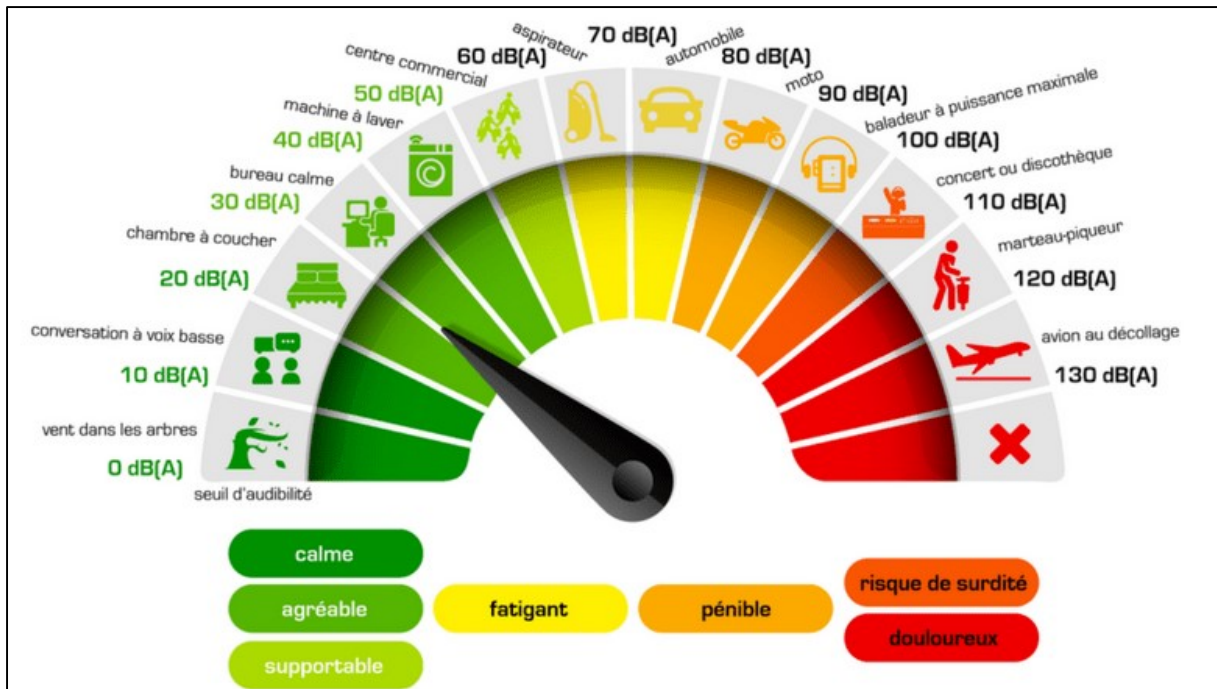


Figure I.14: Echelle de niveau de bruit [8].

b. La hauteur du son

C'est la fréquence du son, exprimée en Hertz (Hz). Elle représente le nombre de vibrations engendrées par le corps sonore en 1 seconde. Les physiologistes s'accordent à dire que l'oreille humaine moyenne ne perçoit les sons que dans une plage de fréquences allant d'environ 16 Hz pour les basses ou graves profondes et de 15 à 18 kHz pour les aiguës les plus fines et élevées.

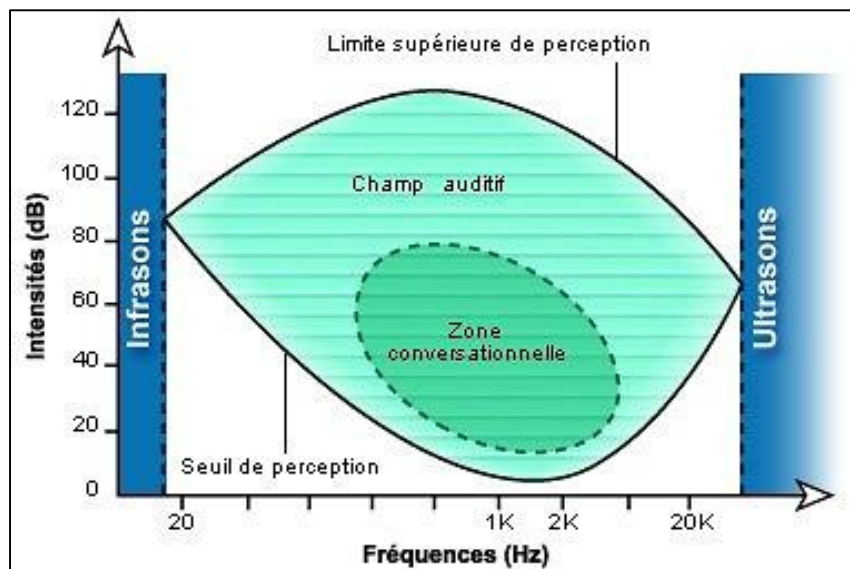


Figure I.15 : Représentation graphique du champ auditif humain [2].

c. Le timbre

Il permet d'identifier un son d'une façon unique. Deux sons peuvent avoir la même fréquence fondamentale et la même intensité, mais ne peuvent jamais avoir le même timbre.

C'est grâce au timbre qu'on distingue une même note jouée au piano ou au violon, mais aussi qu'on reconnaît la voix d'une personne.

I.3.2 Fonction de l'oreille externe

L'oreille externe a une double fonction à la fois protectrice de l'oreille moyenne et d'amplification. Elle agit comme une antenne acoustique qui permet de capter et de transmettre le son à l'oreille moyenne par le biais du conduit auditif et ensuite le son vient heurter la membrane de tampon. L'amplification maximale du son qui se fait au niveau du méat acoustique externe est de l'ordre de 20 décibels pour les fréquences comprises entre 2 et 3 kHz [6].

I.3.3 Fonction de l'oreille moyenne

Le rôle principal de l'oreille moyenne est de transformer les vibrations sonores aériennes, captées par l'oreille externe et arrivant contre la membrane tympanique, en variations de pressions dans les compartiments liquidiens de l'oreille interne. Cette transformation est rendue possible grâce à l'adaptation d'impédance entre le milieu interne et externe de l'oreille.

L'adaptation est réalisée en partie par un effet de levier mais surtout grâce au rapport de surface entre la surface du tympan et celle de la platine de l'étrier qui s'appuie sur la fenêtre ovale de la cochlée. Ce mécanisme permet de transformer les vibrations de basse pressions et grands déplacements de l'air en des vibrations de haute énergie avec de faibles déplacements permettant une conduction dans les liquides labyrinthiques [4].

L'oreille moyenne joue aussi un rôle protecteur de l'oreille interne en présence d'une forte intensité sonore (supérieure à 80 dB). La contraction du muscle de l'étrier va rigidifier le système tympano-ossiculaire, c'est le réflexe stapédien. Il s'agit d'un réflexe polysynaptique dont la voie afférente est le nerf auditif et la voie efférente le nerf facial. Ce réflexe est bilatéral, c'est-à-dire que la stimulation d'une oreille déclenche le réflexe stapédien des deux côtés. La latence de ce réflexe est d'au minimum 7 à 10 ms, justifiant l'existence des traumatismes sonores [6].

I.3.4 Fonction de l'oreille interne

Récemment nous avons vu que l'oreille interne présente une anatomie très complexe, en effet cela lui permet d'assurer une fonction complexe celle de traduire le signal acoustique en message nerveux.

Les pressions acoustiques transmises par l'étrier à travers la fenêtre ovale vont se propager le long de la membrane basilaire de la base à l'apex de la cochlée. La transduction des informations mécaniques en signaux électrochimiques est assurée par les cellules ciliées localisées au niveau de l'organe de Corti.

Il existe 2 types de cellules ciliées disposées de part et d'autre du tunnel de Corti: les Cellules Ciliées Externes (CCE) et les Cellules Ciliées Internes (CCI).

Les CCE ont pour rôle d'amplifier l'onde sonore et les CCI de traduire l'information sonore en message nerveux. Tandis que les stéréocils des cellules ciliées baignent dans l'endolymphe, leur corps cellulaire est localisé dans le compartiment périlymphatique.

En fait Le mouvement de cisaillement de la membrane tectoriale provoque la déflexion des stéréocils des CCE, implantés dans la membrane tectoriale. La déflexion de ces stéréocils entraîne la déflexion de l'ensemble des stéréocils grâce aux liens terminaux et liens transversaux. Le mouvement des stéréocils entraîne l'ouverture des canaux cationiques non spécifiques, situés à chaque extrémité des stéréocils, qui laissent entrer le potassium de l'endolymphe dans le CCE entraînant une double traduction mécanoélectrique (dépoliarisation de CCE) puis électromécanique (contraction de CCE), cela permettra une amplification locale des vibrations de la membrane basilaire donc du signal acoustique [7].

De la même façon que pour la CCE, la CCI correspondant à la fréquence de stimulation est activée en réponse à la déflexion de ses stéréocils. À la différence des CCE, les plus grands stéréocils des CCI ne sont pas ancrés à la membrane tectoriale : la déflexion des stéréocils des CCI est favorisée par le contact direct avec la bande de Hensen de la membrane tectoriale [6].

L'ouverture des canaux mécanosensibles entraîne l'entrée de potassium et par conséquent dépoliarise la CCI et ainsi la naissance d'un potentiel postsynaptique excitateur au niveau de l'extrémité dendritique de la fibre nerveuse du nerf cochléaire faisant synapse avec ces cellules.

Le son est codé en fréquence et en intensité par la cochlée et transporté sous forme de messages nerveux par les nerfs auditifs au niveau du cerveau afin que celui puisse l'interpréter.

Le codage en fréquence du son par la cochlée a été découvert par *Georges von Békésy* (prix Nobel 1961). Selon ce dernier, le mouvement vibratoire du son est transmis comme une onde qui se déplace de la base à l'apex de la membrane basilaire (Figure I.16) et la fréquence du stimulus produit une amplitude maximale en un point donné de la membrane [9]. En effet la cochlée présente une organisation tonotopique par lequel les hautes fréquences mettent en mouvement la base de la cochlée alors que les basses fréquences mobilisent l'extrémité (Figure I.17).

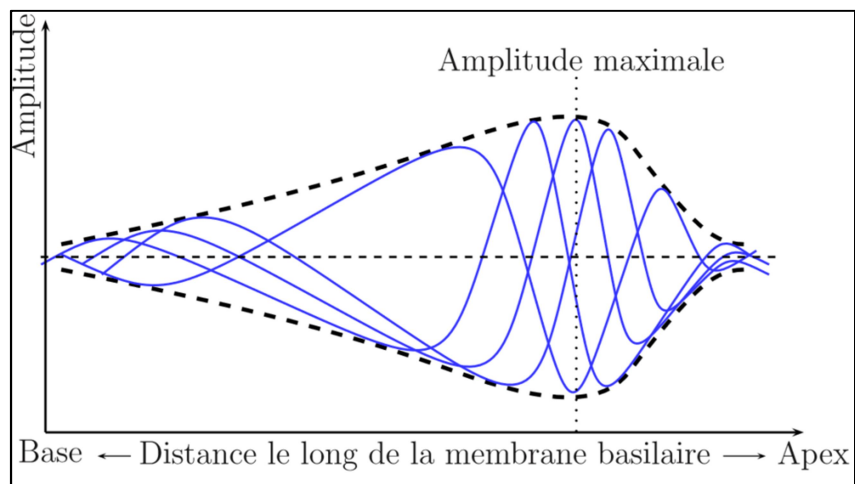


Figure I.16: Représentation schématique de l'enveloppe des ondes propagées selon le modèle de von Békésy [5].

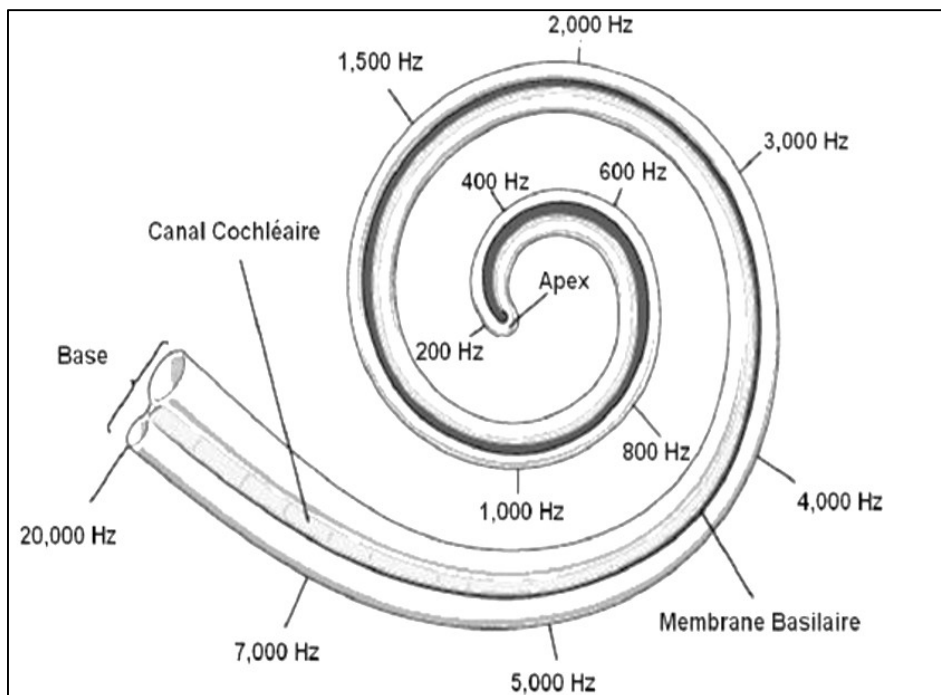


Figure I.17: Organisation tonotopique de la cochlée [4].

Grâce à cette propriété de la cochlée, un certain nombre des fibres nerveuses sont stimulées en fonction de la fréquence caractéristique du signal sonore qu'elles transportent.

Sur chaque CCI est liée une dizaine de fibres nerveuses. Chacune de ces fibres possède un seuil de déclenchement propre et son taux de décharges par seconde augmente avec l'intensité du stimulus jusqu'à saturation. Comme la dynamique de chaque fibre n'est pas suffisante pour couvrir celle de l'audition, l'information sur l'intensité repose sur le recrutement temporel (nombre de potentiels d'action) et le recrutement des nombres de CCI recrutées à proximité de la cellule de fréquence caractéristique du stimulus. Le cortex cérébral interprète alors ces informations en niveaux d'intensité perçue.

Conclusion

L'étude de l'anatomie et physiologie de l'appareil auditif nous montre que l'oreille mobilise beaucoup de structures pour assurer son rôle c'est-à-dire de la traduction des vibrations sonores en messages nerveux interprétable par le cerveau. Ces notions sur le fonctionnement de l'oreille vont nous servir par la suite à comprendre les différentes techniques d'exploration fonctionnelle utilisées pour évaluer et diagnostiquer une surdité.

Chapitre II

**Pathologie de l'audition &
explorations fonctionnelles
auditives**

II.1 Introduction

Comme tout organe de corps humain, l'oreille peut avoir des dysfonctionnements pouvant entraîner des pertes auditives. Dans ce chapitre on va étudier dans une première partie des pathologies qui peuvent affecter l'oreille et en seconde partie les différentes techniques d'explorations de l'audition parmi lesquels une qui constitue l'objet de ce projet.

II.2 Pathologies de l'audition

L'oreille humaine est vulnérable à des lésions et à des maladies spécifiques qui peuvent causer des inflammations et des pertes auditives. Parmi les nombreuses maladies touchant celui-ci on va citer quelques cas les plus répandus.

II.2.1 Otites

Ces sont des inflammations de peau ou muqueuse de l'oreille. On parle d'otite externe si elle touche le conduit auditif externe, d'otite moyenne dans le cas où la cavité tympanique est touchée, et d'otite interne qui est caractérisée par des infections au niveau du labyrinthe (Oreille interne).

A noter que l'otite peut engendrer dans certains cas des problèmes d'audition [10].

II.2.2 Acouphènes

Les acouphènes sont des sensations auditives durant lequel une personne entend des sons ressemblants à des bourdonnements ou sifflement mais qui ne sont pas réelles [10].

Ils sont souvent liés à une pathologie, aussi ils peuvent subvenir après une utilisation exagérée des casques audio.

II.2.3 L'otospongiose

Appelé aussi otosclérose, c'est une évolution pathologique des tissus osseux qui touche l'oreille interne et moyenne. C'est une maladie enzymatique d'origine génétique qui provoque progressivement la fixation de la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale due à un remodelage de l'os qui devient comme une éponge (d'où le nom d'otospongiose), et de sclérose de l'os (d'où le nom d'otosclérose). Cela provoque par la suite une diminution de l'audition [10].

II.2.4 Presbycousie

C'est une perte progressive de l'audition liée au vieillissement. Elle a pour cause le vieillissement naturel de l'oreille interne qui débute dès 25 ans. Différents facteurs,

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

essentiellement génétiques et liés à l'environnement (exposition au bruit) sont impliqués dans la presbyacousie.

II.2.5 Hyperacousie

C'est une pathologie qui se caractérise par un dysfonctionnement de l'audition provoquant des douleurs, des acouphènes et de diminution du seuil de tolérance aux bruits.

Les personnes atteintes perçoivent les intensités sonores plus fortes qu'elles les sont réellement.

II.2.6 Hypoacousie

Synonyme de surdité, est un état pathologique de l'audition caractérisé par une perte partielle ou totale de la perception auditive d'une ou de deux oreilles. On distingue deux types de surdité selon la localisation de l'atteinte et cinq degrés de surdité.

a. Types de surdités

En fonction de la localisation de l'altération à l'origine de la surdité, on distingue différentes types de surdité : de transmission, de perception et mixte:

- La surdité de transmission est due à un défaut de transmission de l'onde sonore entre sa source et la cochlée. L'atteinte si ge donc au niveau de l'oreille externe et/ou l'oreille moyenne. Elle peut être caus e par l'otospongiose, l'otite moyenne, ou syndrome de house qui est une pathologie rare due au blocage articulaire de la tête du marteau situé dans les osselets.
- La surdité de perception, appelée aussi surdité neurosensorielle, est la conséquence d'une atteinte de l'oreille interne (détérioration de certaines cellules ciliées) ou des centres auditifs.

On parle aussi de surdité mixte lorsque les deux cas sont mélangés.

b. Degré de surdité

Pour apprécier l'importance du handicap provoqué par une diminution de l'audition, le Bureau International d'Audio-Phonologie (BIAP) a classé, en fonction de la perte moyenne (c'est une moyenne des pertes pour les fréquences de 500, 1000 et 2 000 Hz mesurée en audiométrie), la surdité en cinq degrés [10]:

- Surdité normale : lorsque la perte moyenne est comprise entre 0 et 20 dB
- Surdité légère : la perte se situe entre 20 et 40 dB. la parole normale est perçue mais certains éléments phonétiques et la voix chuchotée échappent au patient.
- Surdité modérée : la perte se situe entre 40 et 70 dB. Le patient ne perçoit pas la parole que si elle est forte.

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

- Surdité severe : la perte se situe entre 70 et 90 dB. Le patient peut entendre les sons et la parole très forts mais avec des difficultés de compréhension.
- Surdité profonde : la perte est supérieure à 90 dB. Aucune perception des sons.

On parle aussi de surdité totale lorsque l'audition n'est pas mesurable.

II.3 Explorations fonctionnelles auditive

Les explorations de la fonction auditive ont pour objectifs d'affirmer l'existence d'une surdité, d'en préciser son degr e, son type à savoir la surdité de transmission, la surdité de perception ou la surdité mixte.

Les méthodes employées aident le médecin à poser un meilleur diagnostic devant un cas ayant des problèmes de surdité afin de trouver la cause de ce problème. Les explorations de la fonction auditive peuvent être classées en deux catégories :

- Les méthodes objectives : qui sont indépendantes du sujet et de l'observateur.
- Les méthodes subjectives : qui font appel à la coopération du patient et dont les résultats peuvent varier d'un observateur à l'autre.

II.3.1 Les méthodes objectives

Elles 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 [11].

Il existe plusieurs types de méthodes objectives parmi lesquels on peut citer : l'impédancemétrie, les Oto-Emissions Acoustiques (OEA), les Potentiels Evoqués Auditifs (PEA).

a. Impédancemétrie

L'impédance, est la force qui s'oppose au passage d'une vibration, quelle que soit sa nature ( lectrique, mécanique, acoustique etc...). C'est la résistance liée aux frottements + réactance liée à la masse et à la rigidité. Dans l'oreille les dysfonctionnements sont essentiellement régis par le facteur de rigidité [12].

En audiologie clinique, le système tympano-ossiculaire de l'oreille moyenne, qui joue le rôle d'adaptateur d'impédance, est évalué par l'impédancemètre à l'aide de différents tests (la tympanométrie et l'étude du réflexe stapédien) pour étudier son bon fonctionnement, sa souplesse et aussi sa rigidité.

Un impédancemètre est formé d'une sonde (Figure II.1), qu'on place dans le conduit auditif externe, composée de 3 canaux [11]:

- un relié à un haut-parleur qui produit le son de référence,
- un relié à un microphone qui recueille le son émis après absorption par la chaîne tympano-ossiculaire et les cavités de l'oreille moyenne,
- le dernier permet de faire varier la pression aérienne du conduit auditif externe.

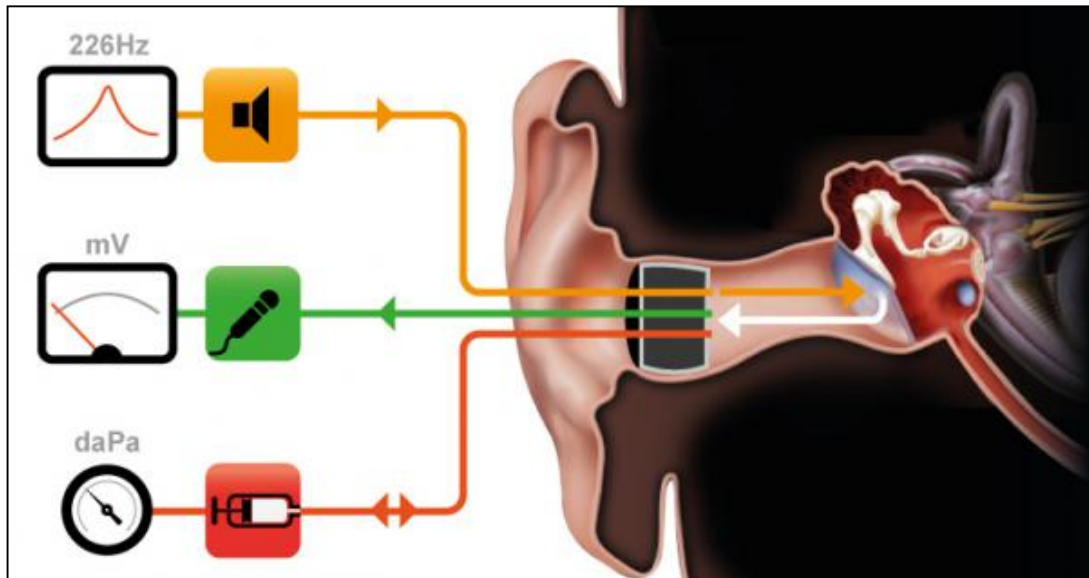


Figure II.1: Principe de l'impédancemètre [11].

- **La tympanométrie**

La tympanométrie fait partie des piliers inamovibles. Son principe et sa finalité consiste à évaluer la souplesse du tympan, donc sa compliance (l'inverse de la rigidité) [12].

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 (Figure II.2) [12] :

- le normal, en forme de Tour Eiffel (Figure II.2-a) : le pic de compliance est centré sur zéro ou presque, signifiant que la pression est la même en deçà et au-delà du tympan ;
- le tympanogramme en dépression (Figure II.2-b), où le pic se « politise » en se déplaçant vers la gauche (pressions négatives), montrant que la caisse est mal aérée par la trompe d'Eustache ;
- le tympanogramme en dôme ou plat (Figure II.2-c), qui traduit une immobilité du tympan. Il signe presque toujours la présence d'un épanchement dans l'oreille moyenne, le plus souvent dû à une otite séro-muqueuse.

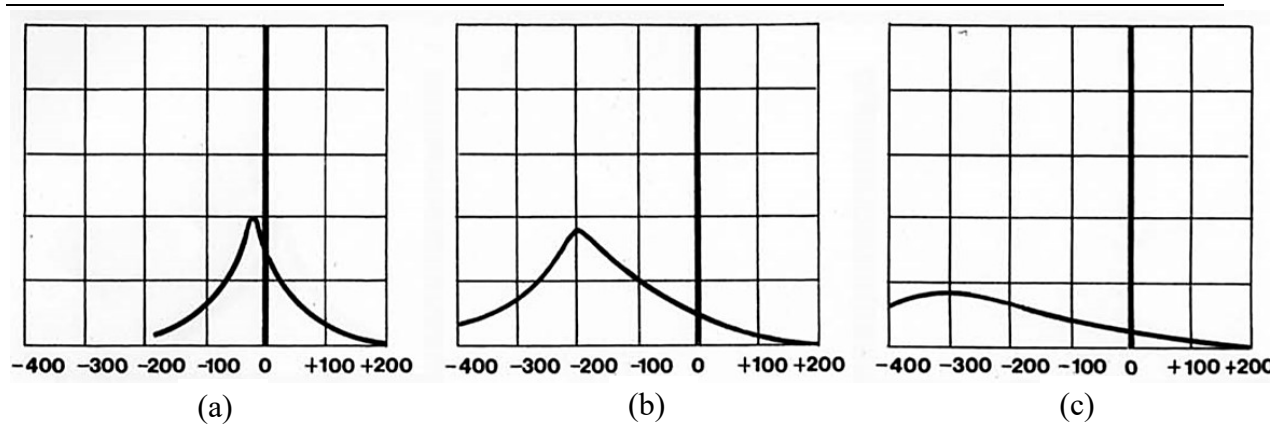


Figure II.2: Tympanogrammes [12].

- **L'étude du réflexe stapédien**

Lors d'une stimulation auditive supérieure à 80 dB HL (chez les sujets normo-entendants), le réflexe stapédien (RS) provoque une contraction du muscle stapédien entraînant une augmentation de la rigidité de la chaîne tympano-ossiculaire par basculement de l'étrier en arrière et en dehors [11]. Il est bilatéral c'est-à-dire que la stimulation d'une oreille entraîne une contraction du muscle stapédien de l'oreille opposée. C'est un réflexe qui se boucle dans le tronc cérébral, avec le nerf auditif pour voie afférente et le nerf facial (qui innerve le muscle de l'étrier) pour voie efférente [12].

En effet cet examen consiste à étudier comment le système auditif va se protéger pour éviter que ce son (80 dB) arrive trop fort au niveau de l'oreille interne.

Grâce à l'étude du réflexe stapédien, différentes applications cliniques peuvent être effectuées tels que : l'évaluation de la localisation d'une atteinte du nerf facial en cas de paralysie faciale ; détermination d'une hypoacousie de transmission ou de perception et aussi une surdité profonde.

- b. Les Oto-émissions Acoustiques :**

C'est un test objectif, simple et rapide qui permet de vérifier le bon fonctionnement des cellules ciliées externes c'est-à-dire leur mécanisme actif (amplification local du son au niveau de la cochlée).

Ils sont basés sur la capacité qu'à le CCE de se contracter et d'émettre un son en réponse à une stimulation sonore. En fait le principe de cet examen est basé sur une sonde placée dans le conduit auditif externe composé d'un hautparleur (Figure II.3) qui envoie un son stimulant et un microphone qui recueille le son émis par les CCEs [13].

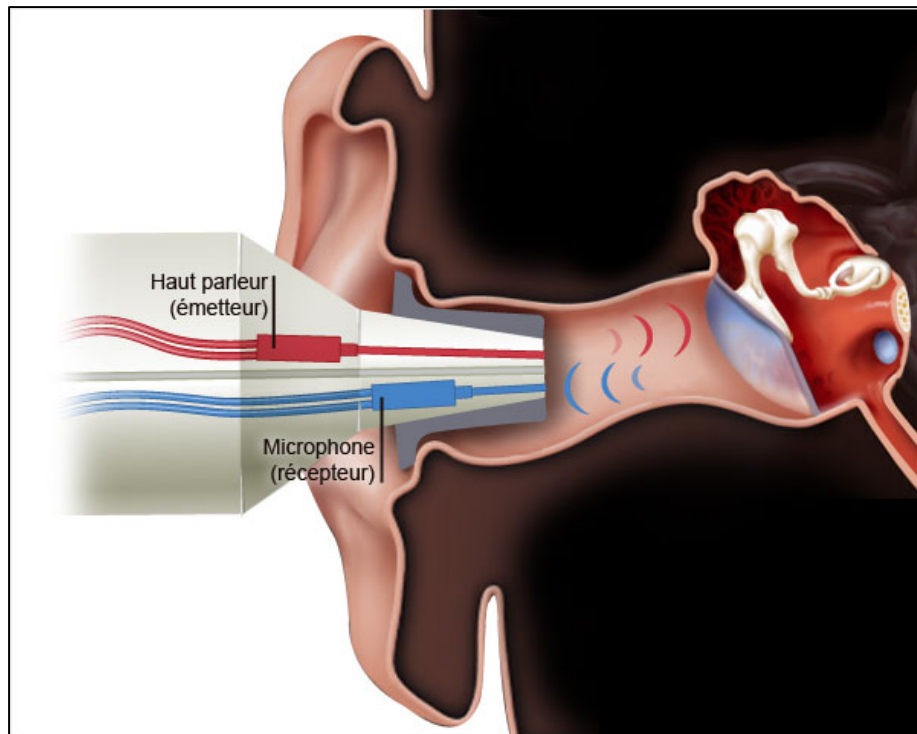


Figure II.3: Principe de l'OEA [13].

Le résultat de cet examen est présenté sous forme d'une courbe (Figure II.4) représentant l'enregistrement des variations d'amplitudes des ondes sonores dues aux oto-émissions acoustiques en fonction du temps.

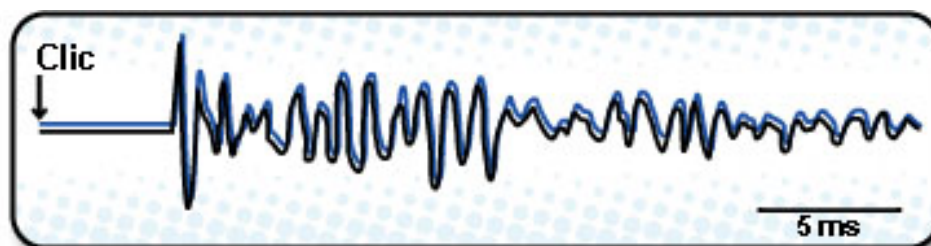


Figure II.4: Réponse OEA enregistré avec une latence de 5 ms (cas normal) [13].

c. Les potentiels évoqués auditifs (PEA)

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 afférente [12].

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 qui correspondent au résultat d'un PEA [2]:

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

- 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.

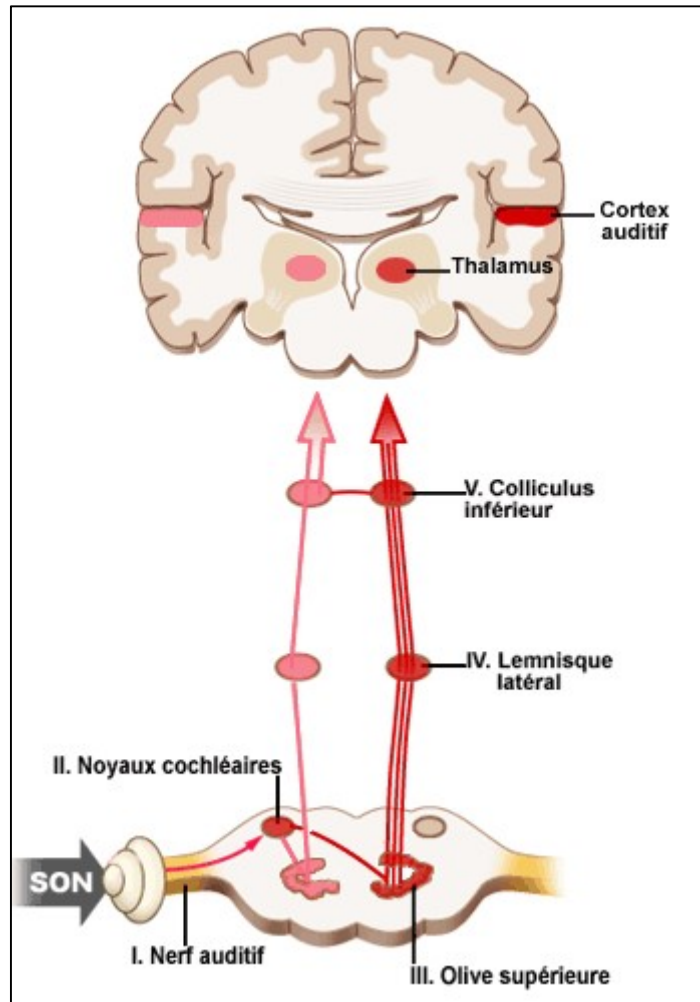


Figure II.5: Schéma de référence des voies auditives permettant de repérer le site anatomique des différentes ondes du PEA [11].

Le principe du PEA (Figure II.5) est basé sur une électrode active placée sur le crâne (vertex) permettant d'enregistrer les potentiels évoqués et des hautparleurs placés au niveau des oreilles permettant d'envoyer des stimulations sonores à des fréquences généralement aiguës (2000Hz 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 (Figure II.6).

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

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 diminuent.

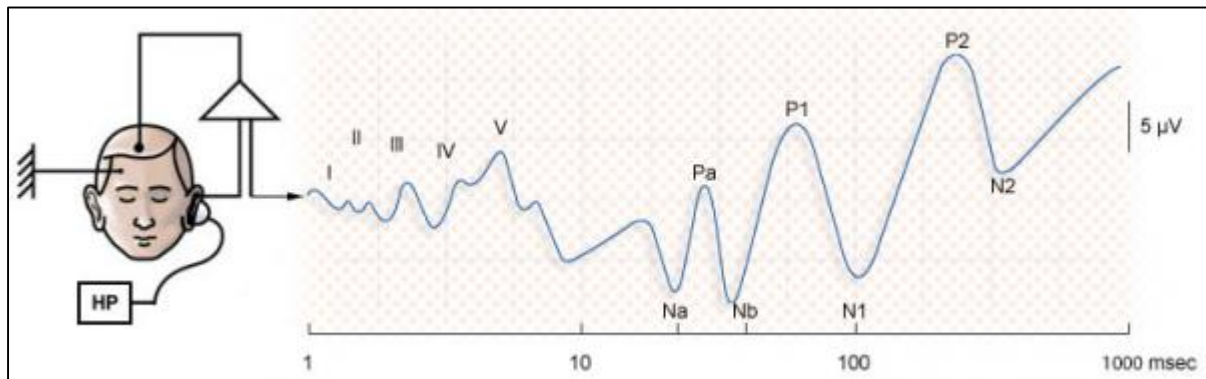


Figure II.6: Principe et exemple d'un PEA [12]

II.3.2 Les méthodes subjectives

Ces méthodes nécessitent la bonne coopération du sujet. Elles ont pour défaut de ne pouvoir être effectuées en cas de difficultés de compréhension des instructions et leurs résultats peuvent être manipulés par le sujet testé s'il le souhaite [13]. Elles incluent l'acoumétrie et l'audiométrie.

a. Acoumétrie

L'une de première méthode utilisée pour diagnostiquer la surdité, l'acoumétrie comprend l'acoumétrie phonique et l'acoumétrie instrumentale.

L'acoumétrie phonique est utilisé en dépistage simple, elle consiste à tester l'audition du patient en lui demandant de répéter certains mots, chuchotés et à voix normale, en s'éloignant de plus en plus de lui [10].

L'acoumétrie instrumentale est beaucoup plus utilisée. Elle se pratique avec un diapason et permet d'orienter vers le type de surdité [10]. Elle se compose de deux tests principaux : le test de Rinne et celui de Weber.

• Le test de Weber

Ce test se fait qu'en conduction osseuse. Il consiste à placer le diapason sur le vertex ou sur le front du patient et à lui demander où il entend le son produit (Figure II.7).

Trois réponses sont possibles :

- En cas d'audition normale, le son est entendu sur le crâne : on parle de Weber centré

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

- En cas de surdité de perception, le son est entendu seulement par la meilleure oreille. En effet, le stimulus partant du centre du crâne, il arrivera en même temps aux deux cochlées. La cochlée dominante (ayant le meilleur seuil auditif) donnera une perception auditive localisée de son côté [13]. C'est le Weber latéralisé côté sain.
- En cas de surdité de transmission, le son est perçu par l'oreille atteinte: le son ne peut s'échapper par la chaîne tympano-ossiculaire et l'atteinte de l'oreille moyenne protège l'oreille interne du bruit de fond de l'extérieur [13]. C'est le Weber latéralisé côté malade.

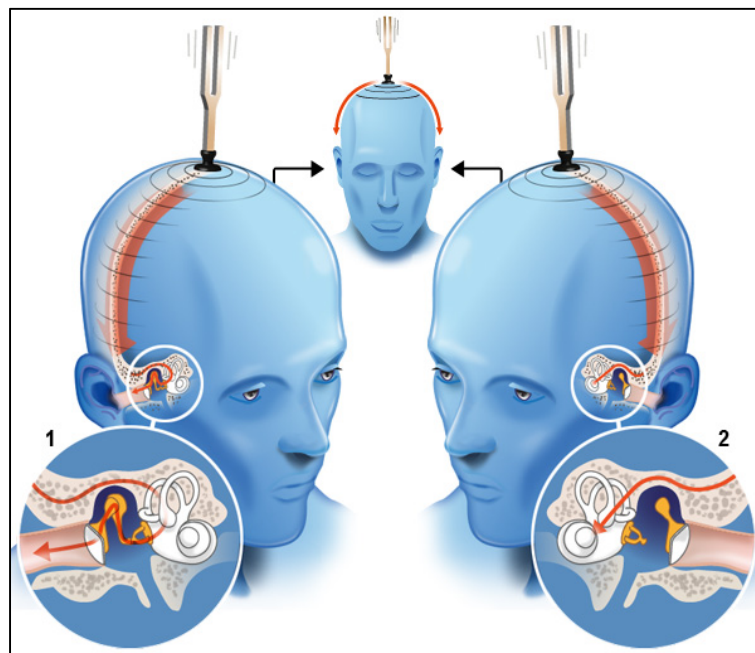


Figure II.7: Test de Weber [13].

- **Le test de Rinne**

Le test de Rinne consiste à comparer la conduction osseuse (le diapason mis en vibration sur la mastoïde) et la conduction aérienne (le diapason placé à quelques centimètres du pavillon en face du conduit auditif externe).

- Dans le cas d'une surdité de transmission du côté testé, le son est mieux perçu en CO qu'en CA. Le système tympano-ossiculaire a perdu son rôle amplificateur : on parle de Rinne négatif.
- Dans le cas d'une audition normale ou d'une surdité de perception, la CA est mieux perçue que la CO. Le système tympano-ossiculaire maintient son rôle amplificateur. on parle de Rinne positif [10].

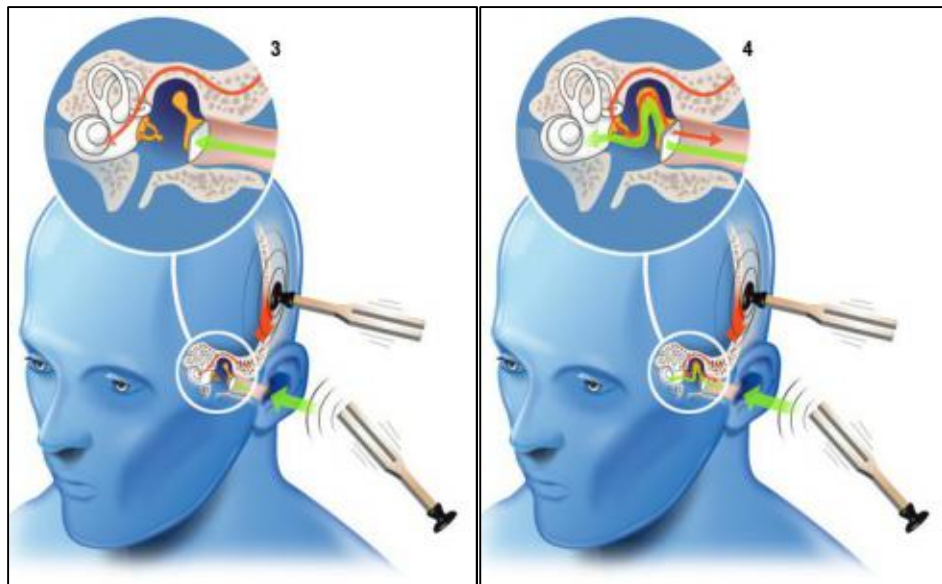


Figure II.8: Test de Rinne [13].

b. Audiométrie

L'audiométrie est une méthode d'examen universel utilisée pour mesurer l'audition. Elle utilise des instruments qui produisent des sons purs et des mots qu'on fait écouter au patient à travers un casque et dans une cabine insonorisée.

Ces sons ont une certaine fréquence et une intensité que l'on peut faire varier. L'audiométrie utilise aussi des listes de mots que le patient doit répéter. Cela permet de mesurer assez précisément le seuil d'audition pour les principales fréquences du spectre de l'audition humaine.

Les résultats obtenus sont inscrits sur une courbe appelée audiogramme. L'audiométrie est un test subjectif qui nécessite une étroite collaboration avec le patient. Elle ne peut généralement pas se pratiquer si le patient est âgé de moins de quatre ans [10].

Il existe deux principaux types de test audiométriques : l'audiométrie tonale et l'audiométrie vocale.

- **Audiométrie tonale**

C'est l'examen de base utilisé pour déterminer d'une part le degré de surdité d'un sujet et d'autre part le type de surdité. Ce test s'effectue sur deux voies de transmissions : la voie aérienne au moyen d'un casque audio posé sur l'oreille (Figure II.9) et la voie osseuse avec un vibreur placé sur la mastoïde (Figure II.10).



Figure II.9: Casque TDH39 utilisée en audiométrie [13].



Figure II.10: vibrateur pour la voie osseuse [13].

Le principe de l'audiométrie tonale est de déterminer les seuils en conduction aérienne et osseuse, pour les deux oreilles testées séparément. La recherche des seuils est effectuée en suivant les octaves, de 125 à 8000 Hz pour les fréquences. On fait un balayage d'intensité de -10 dB à 120 dB avec un pas de 5 dB pour déterminer le seuil minimum pour chaque fréquence.

Ainsi en conduction aérienne l'audiométrie permet de mesurer la conduction du son par le tampon et les osselets.

En conduction osseuse cet examen va permettre d'étudier la conduction du son à travers les os du crâne jusqu'à l'oreille interne. Un bon examen audiométrique doit tester les 2

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

voies de conceptions, cela permet d'avoir 2 courbes dont l'interprétation permet de mesurer le degré de surdité et le type de surdité.

➤ Masquage

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

➤ Exemples de résultats en audiométrie tonale

Les résultats de l'audiométrie permettent de mesurer le degré de surdité grâce à la perte totale moyenne calculé à partir de la conduction aérienne sur les fréquences 500Hz, 1000 Hz, 2000Hz et 4000Hz [12] :

$$\text{Perte totale moyenne} = (500 \text{ Hz} + 1000\text{Hz} + 2000 \text{ Hz} + 4000 \text{ Hz}) / 4$$

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 à la normale (<20 dB).

Certaines recommandations sont respectées pour la représentation graphique d'un audiogramme tonale, précisées dans le tableau suivant :

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

Tableau II-1 : Symboles utilisé en audiométrie.

Chapitre II Pathologie de l'audition & explorations fonctionnelles auditives

Les figures II.11, II.12 et II.13 décrivent l'audiogramme tonal obtenu à chaque fois qu'un cas de surdité est détecté.

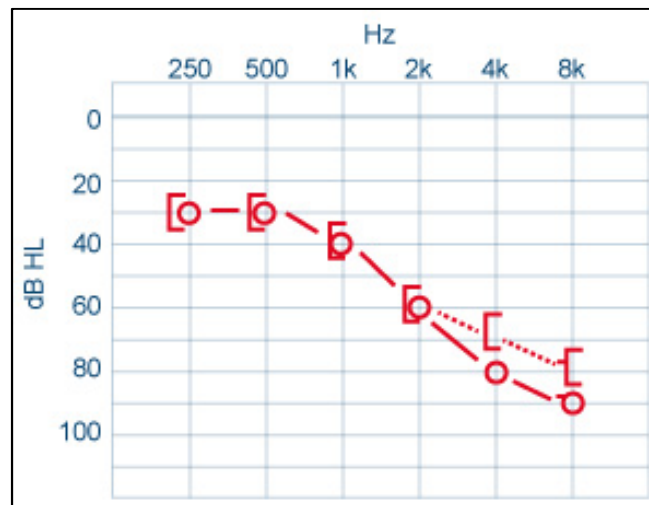


Figure II.11: Audiogramme tonal qui décrit une surdité moyenne du côté droit [13].

La courbe osseuse est superposée à la courbe aérienne : c'est une surdité de perception [13].

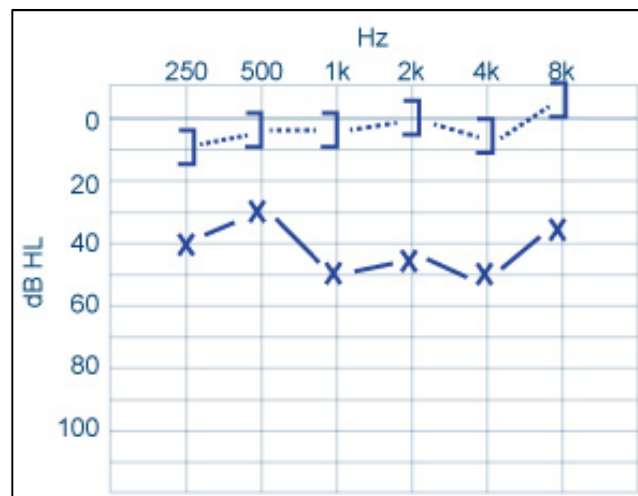


Figure II.12: Surdité de transmission [13].

Elle est caractérisée par un abaissement de la courbe aérienne et des seuils normaux (<20 dB HL) en conduction osseuse [13].

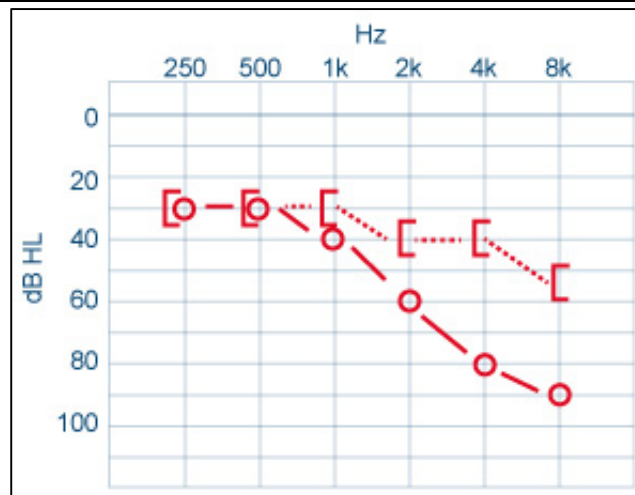


Figure II.13: Surdité mixte [13].

Les seuils aériens et osseux sont abaissés mais non superposés (oreille droite). La courbe aérienne est plus basse que la courbe osseuse [13]

- **Audiométrie vocale**

Elle 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 [10].

En audiométrie vocale (Figure II.14), les réponses correctes du patient (répétition exacte d'items entendus) sont notées en pourcentage (%) [13] :

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

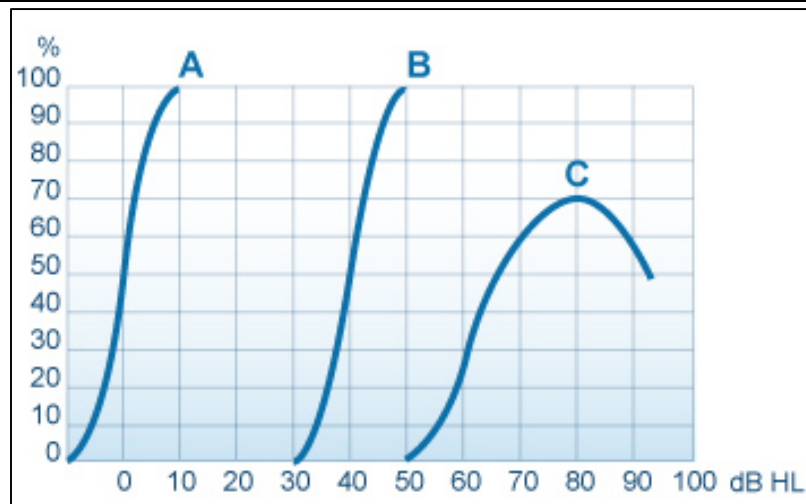


Figure II.14: Audiogrammes vocal [13]

II.3.3 Autres méthodes d'explorations fonctionnelles auditives

A part les méthodes subjectives et objectives, il existe d'autres méthodes cliniques qui permettent l'exploration de l'oreille, on a :

- L'otoscopie : qui est une méthode qui permet d'examiner les différentes structures de l'oreille visibles avec ou sans instrumentation spécifique. Elle permet l'exploration des parties superficielles et les parties profondes, c'est-à-dire les régions facilement accessibles (pavillon, conduit auditif externe, tympan, mastoïde, etc.) [10].
- La radiologie : où les techniques les plus employées actuellement sont le scanner (CT) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Le scanner est surtout utile pour examiner les structures et les parties osseuses de l'oreille comme la mastoïde ou les parois de l'oreille moyenne, dans le cadre d'otites chroniques notamment et L'IRM permet quant à elle d'examiner essentiellement les structures tissulaires comme le nerf auditif ou le contenu des cavités de l'oreille [10].

Conclusion

Dans cette partie nous avons vu que l'oreille peut être affectée par différents types de maladies et de surdités causant des problèmes d'audition. Nous avons aussi constaté que différentes méthodes d'exploration existent pour permettre aux médecins d'évaluer, de localiser leurs causes.

Chapitre III

Réalisation de l'audiomètre

III.1 Introduction

La réalisation de cet audiomètre virtuel qui va permettre de faire des tests par voie aérienne est divisée en deux parties. Une partie programmation sur le logiciel LabVIEW qui est un logiciel très utilisé pour les applications médicales ; et une partie qui consiste à fabriquer un casque audiométrique grâce à la modélisation et l'impression 3D.

III.2 Etat de l'art

Les premières techniques utilisées pour évaluer les problèmes d'auditions ont été l'utilisation des diapasons avec plusieurs méthodes des tests développés.

Avec l'évolution de l'électronique analogique beaucoup d'audiomètre ont été développé et commercialisé, comme l'audiomètre SIBELMED AC50.

Cependant indépendamment des dispositifs commercialisés, avec l'évolution de l'informatique beaucoup des audiomètres virtuels ont été développé comme :

- Dan IUDEAN, Radu MUNTEANU jr, Calin MURESAN et al. qui développé en 2014 un audiomètre digital sur PC basé sur la carte son grâce l'environnement de programmation LabVIEW. Cet audiomètre (Figure III.1) permet de réaliser un test audiométrique par voie aérienne [14].

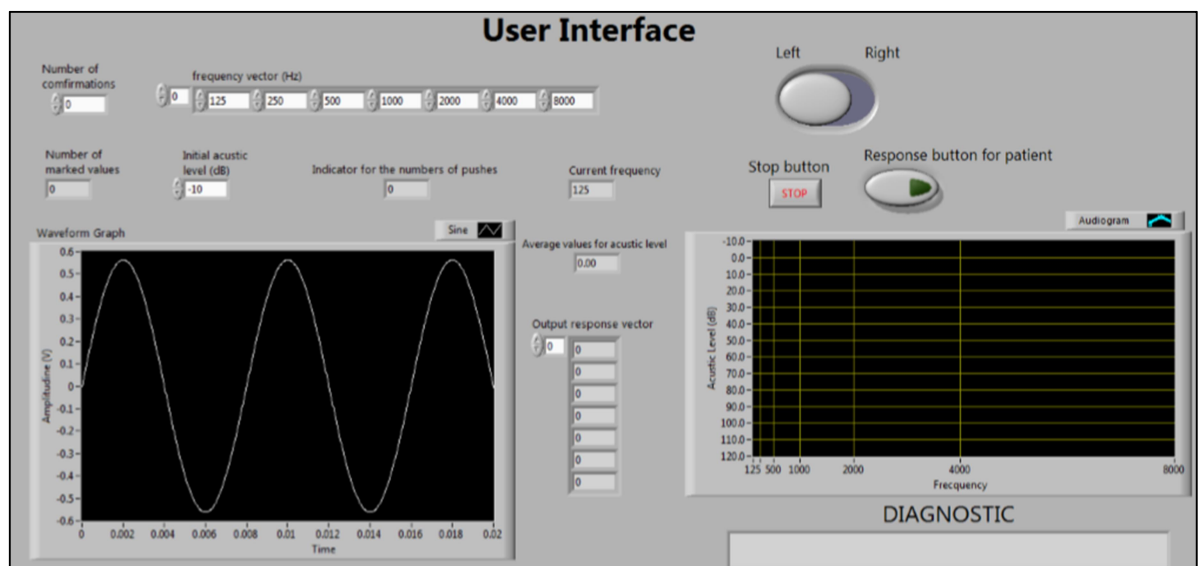


Figure III.1 : Interface développé par IUDEAN & al. [14].

- Mahalakshmi.A, Mohanavalli.M et Raja Sankari.V.M ont développé eux aussi à partir de LabVIEW un audiomètre sur PC capable de faire un test tonal et vocal par voie aérienne [15].

- Wahiba.Benzaba, Fayçal.Ykhlef, Ratiba.Boutaleb et al. ont travaillé en 2018 sur un audiomètre développé sur PC permettant de faire le dépistage des pertes auditives. L'audiomètre (Figure III.2) a été réalisé sous l'environnement Windows avec Delphi et permet grâce à la carte son du PC de faire des tests par voie aériennes et osseuses [16].

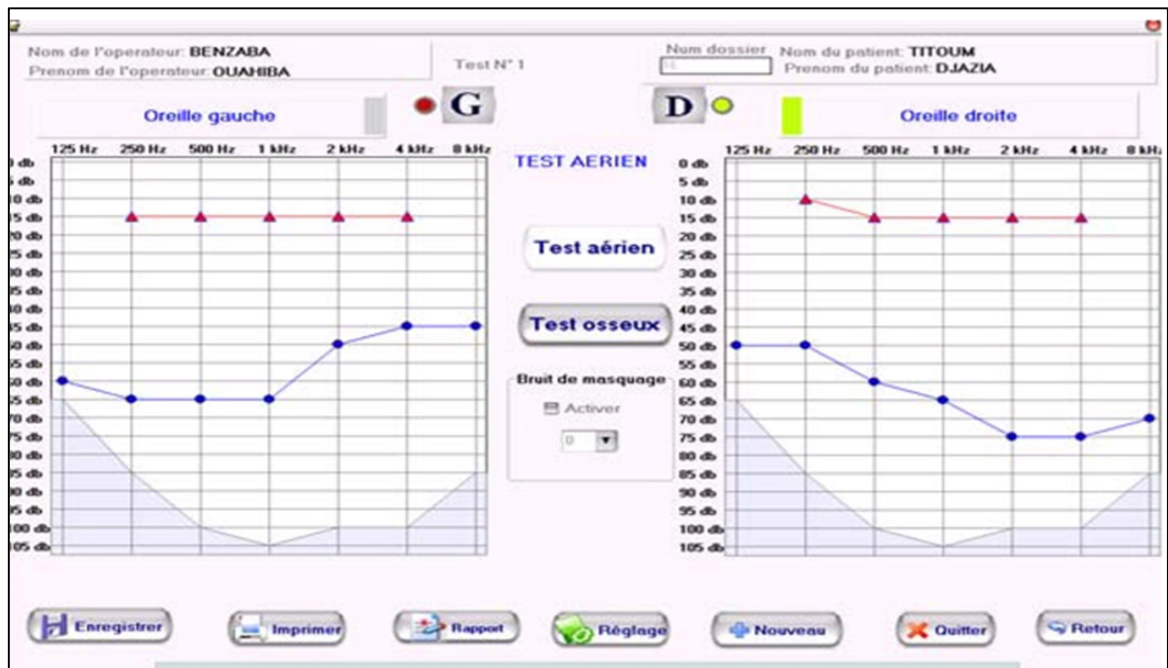


Figure III.2 : Fenêtre de tests audiométriques de l'interface développée par Benzaba & al. [16].

III.3 Présentation de logiciel LabVIEW

Le logiciel LabVIEW est une "Plate-forme Expérimentale d'Instruments Virtuels pour Laboratoire" (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). C'est un environnement de programmation disponible sur plusieurs systèmes d'exploitation Commercialisé par la société "National Instruments" et possédant un langage graphique, des bibliothèques de fonctions et de sous-programmes, ainsi que des outils de développement. Le langage de programmation employé par LabVIEW est le langage graphique G. Ce langage est assimilable aux langages orientés objet, tel le C++. Les icônes utilisées sont des Vis (Virtual Instrument) [17].

C'est un système de programmation à usage général grâce à son environnement à multiples fenêtres qui compte des bibliothèques de fonctions pour toute tâche de programmation : l'acquisition de données, le contrôle d'instruments, analyse, traitement et stockage de données [18]. Il permet aussi permet de réaliser et d'exécuter rapidement des

programmes simples, comparables aux fonctions d'un langage conventionnel, mais pouvant prendre à l'écran l'apparence d'un appareil de mesure [17].

III.3.1 Les fenêtres du programme

Un programme de LabVIEW comprend 02 fenêtres distinctes : le panneau avant servant d'interface avec l'utilisateur et le diagramme contenant le programme source en langage graphique G [17].

- Le panneau avant : Cette fenêtre (Figure III.3), où apparaissent des objets sous forme de commandes d'entrée ou de contrôleurs (Controls) ou d'indicateurs de sortie (Indicators), constitue l'interface interactive du programme. Le « panneau avant » vide apparaissant par défaut lors de la création d'un programme est indiqué sur la figure ci-dessous [17].

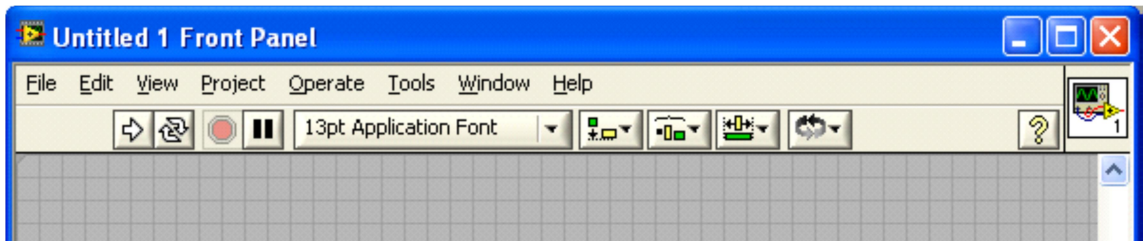


Figure III.3: Le panneau avant.

- Le diagramme : Cette fenêtre (Figure III.4) contient le code source graphique représentant le programme écrit en langage G. Le diagramme vide apparaissant par défaut lors de la création d'un programme est indiqué sur la figure ci-dessous [17].



Figure III.4 : La fenêtre diagramme.

La programmation sous LabVIEW consiste à relier dans le bloc diagramme (Figure III.5) les 03 éléments suivants : Les terminaisons, les fils et nœuds.

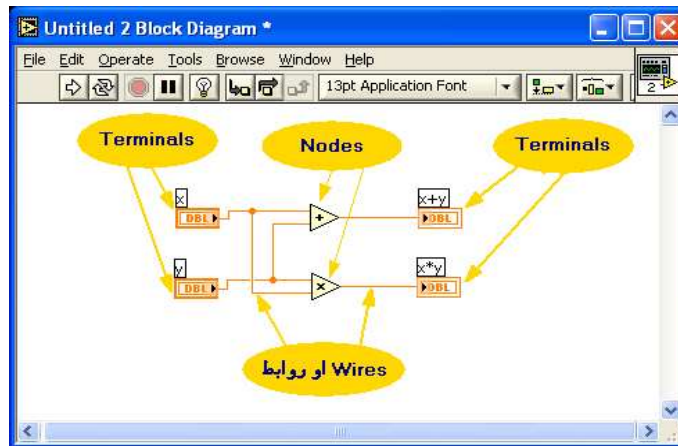


Figure III.5: Les éléments de bloc diagramme.

III.3.2 Les palettes :

Sous l'environnement LabVIEW, le programmeur dispose d'une palette d'outils et de deux palettes d'objets, apparaissant par défaut en fonction du contexte, selon qu'on travaille sur le « panneau avant » ou sur le diagramme [17].

- La palette d'objets du panneau avant (Controls Palette) : Elle apparait lorsqu'on clique sur le bouton droit de la souris au niveau de la fenêtre de la face avant (Figure III.6). Les principaux choix offerts par cette palette fournissent des objets permettant de construire une interface interactive.

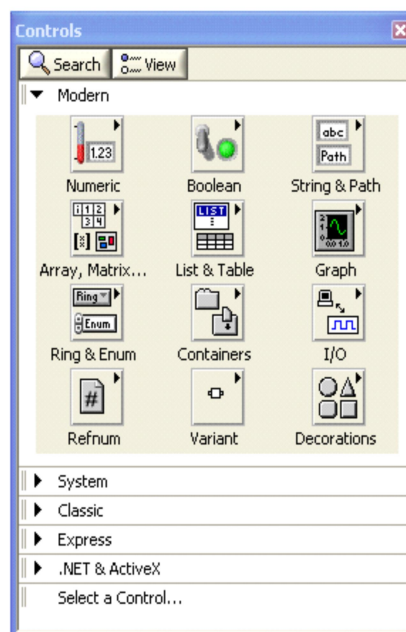


Figure III.6: Palette d'objets du panneau avant (Controls Palette).

- La palette d'objets du diagramme (Fonctions Palette) : Les principaux choix offerts par cette palette (Figure III.7) correspondent à des opérateurs ou des fonctions prédéfinies du langage [17].

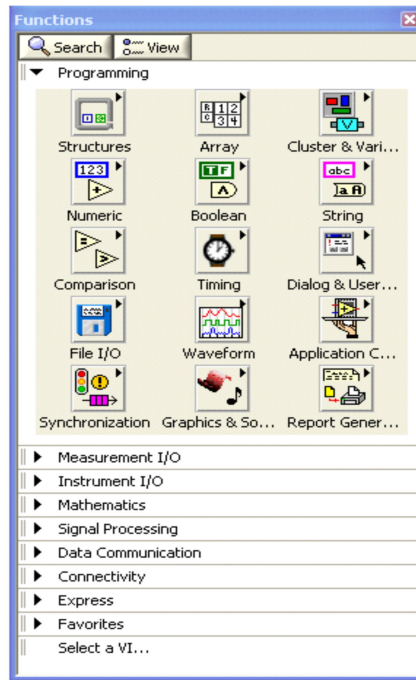


Figure III.7: Palette d'objets du diagramme (Fonctions Palette).

III.4 Implémentation de l'audiomètre sur LabVIEW

Cette partie présente l'implémentation de l'application dans l'environnement de programmation LABVIEW dans lequel nous allons recréer les fonctions et caractéristiques d'un audiomètre standard.

Cette application va permettre de générer des sons purs à fréquence et intensité variable pour le test, d'afficher les résultats de test et de générer un rapport à la fin.

Comme la programmation sous LabVIEW comporte deux parties, l'implémentation de notre application se divise en deux parties aussi :

- Une partie fonctionnelle développée dans la fenêtre diagramme (Diagram Block) de LabVIEW, qui va permettre de programmer les différentes fonctions de l'application.
- Une partie interface développée dans la fenêtre Face-avant (Front panel) de LabVIEW qui va permettre de désigner l'interface utilisateur.

La programmation fonctionnelle de l'application peut se résumer sur l'organigramme suivant (Figure III.8):

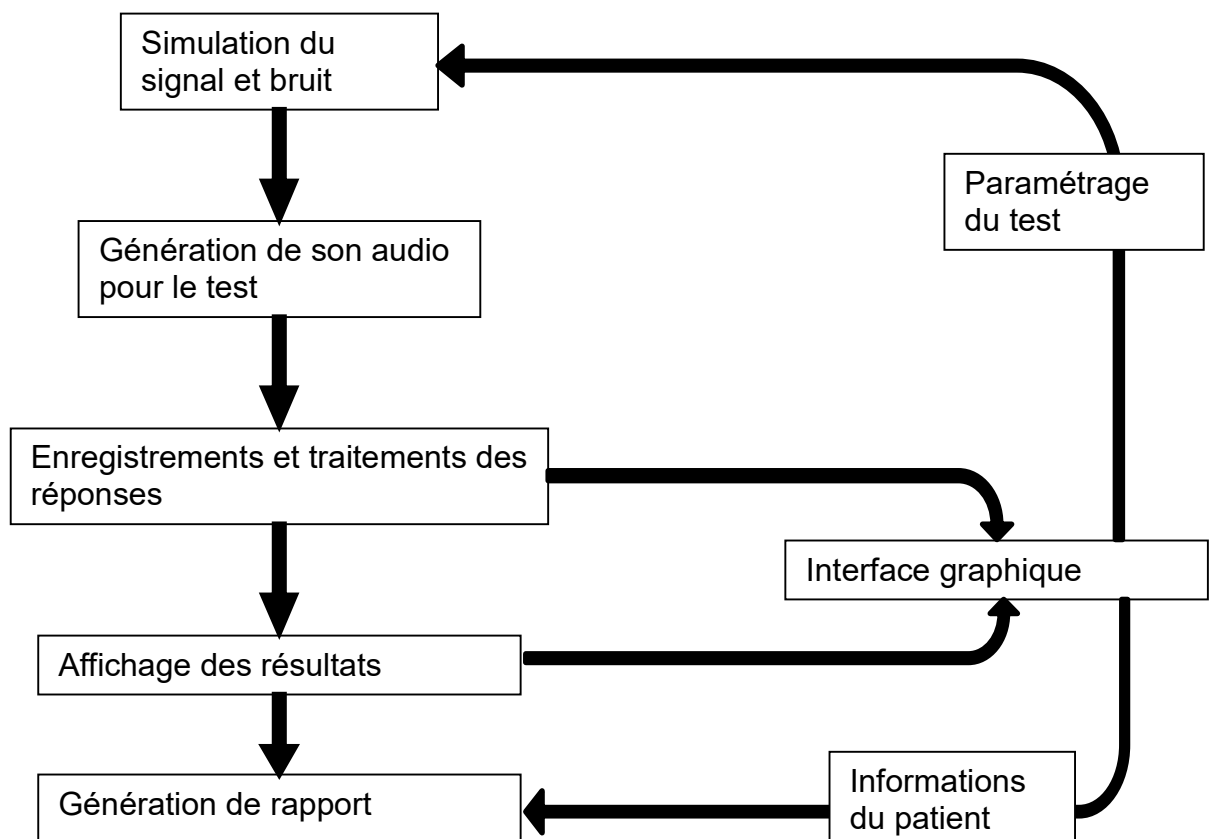
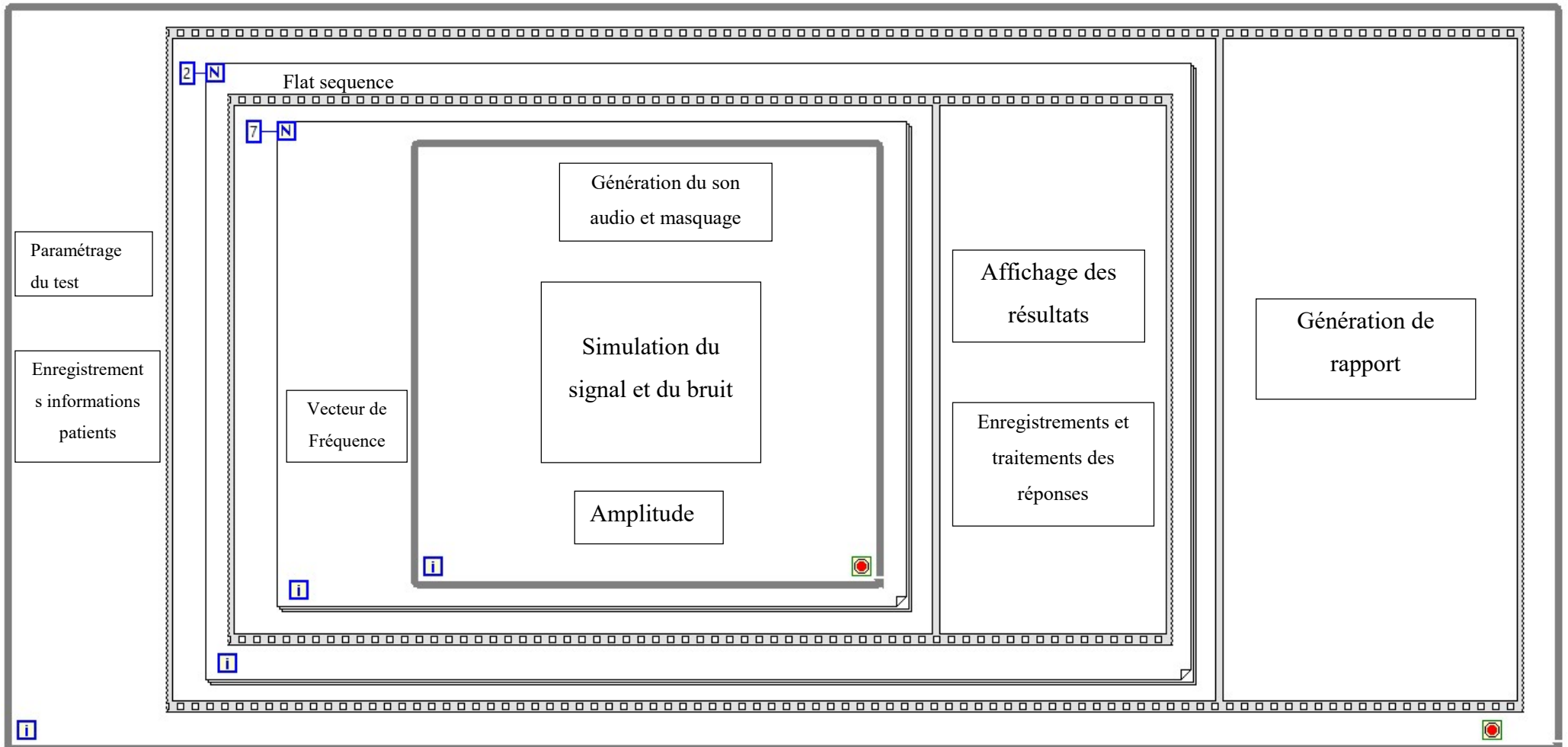


Figure III.8 : Organigramme général de l'application développée.

Ces différents blocs fonctionnels sont répartis de la manière suivante dans le programme (Diagram Block):



- L'application est subdivisée en plusieurs parties par des structures LabVIEW avec des boucles (WHILE et FOR), des structures séquentielles (Flat sequence) qui permettent d'exécuter séquentiellement les différents blocs fonctionnels.

La partie interface développée dans la fenêtre Face-avant (Front panel) de LabVIEW permet grâce à des boutons de lancer ou d'arrêter le test, d'afficher les résultats de l'examen et de saisir les informations du patient (Figure III.9).

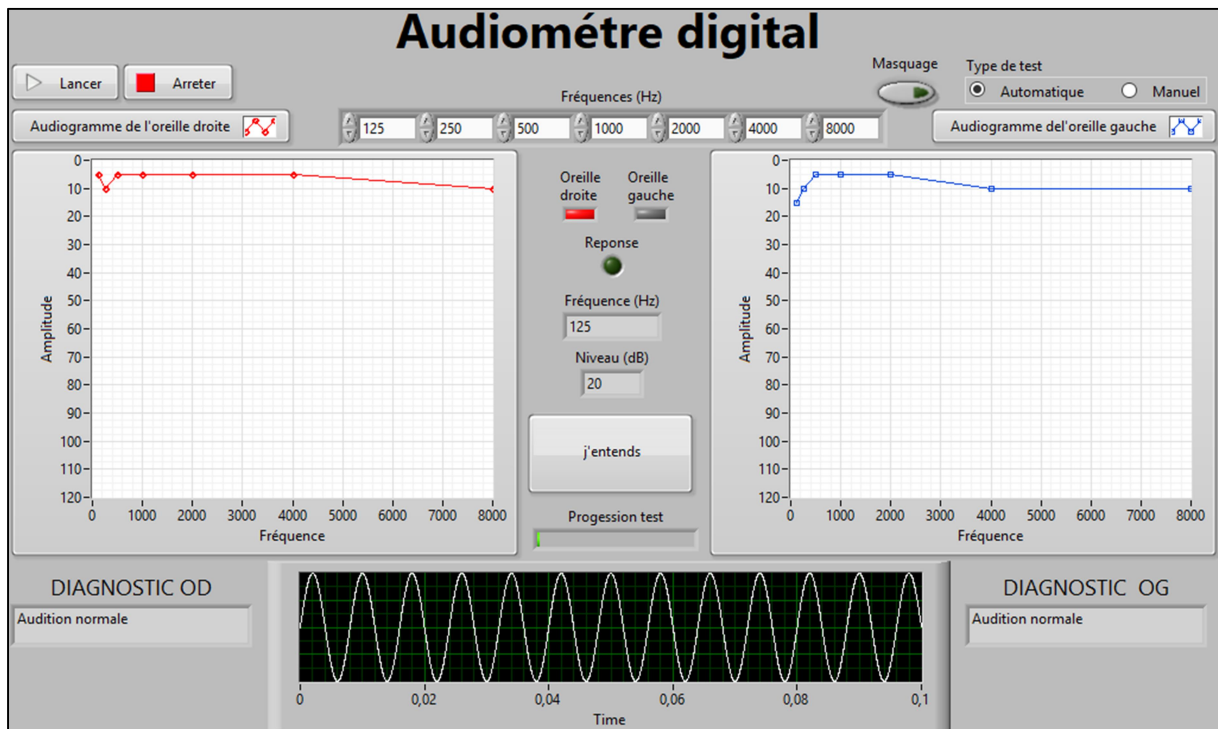


Figure III.9 : Interface utilisateur programmé avec LabVIEW.

III.4.1 Blocs de simulation des sons :

En audiométrie, les sons audio utilisés sont des tons purs sinusoïdaux avec des fréquences standard ou choisis par le médecin et aussi d'intensités variables. Afin de programmer cela dans LabVIEW nous avons utilisé un instrument virtuel de génération des signaux (Figure III.10) : Simulate Signal Express VI.

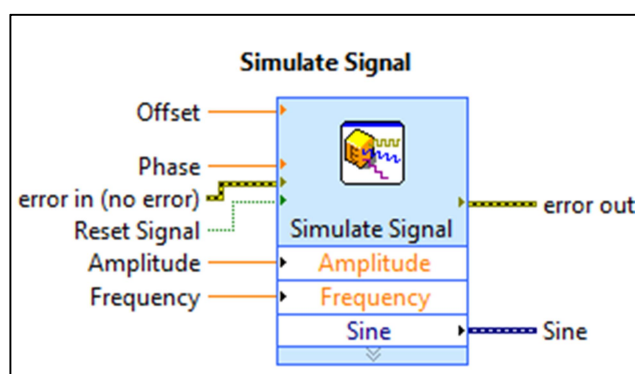


Figure III.10: Block LabVIEW de Simulation de signal

Ce block de la palette Input express VIs de LabVIEW permet de simuler des signaux sinusoïdaux, carrés, triangulaires, en dents de scies ou des signaux bruit tel que de bruit blanc uniforme, bruit Gaussien, bruit Binomial etc...

Plusieurs options de configuration de signal tel que le type de signal, l'échantillonnage, paramètres du signal (fréquence, amplitude, phase), nous ont permis de programmer le block de simulation de signal.

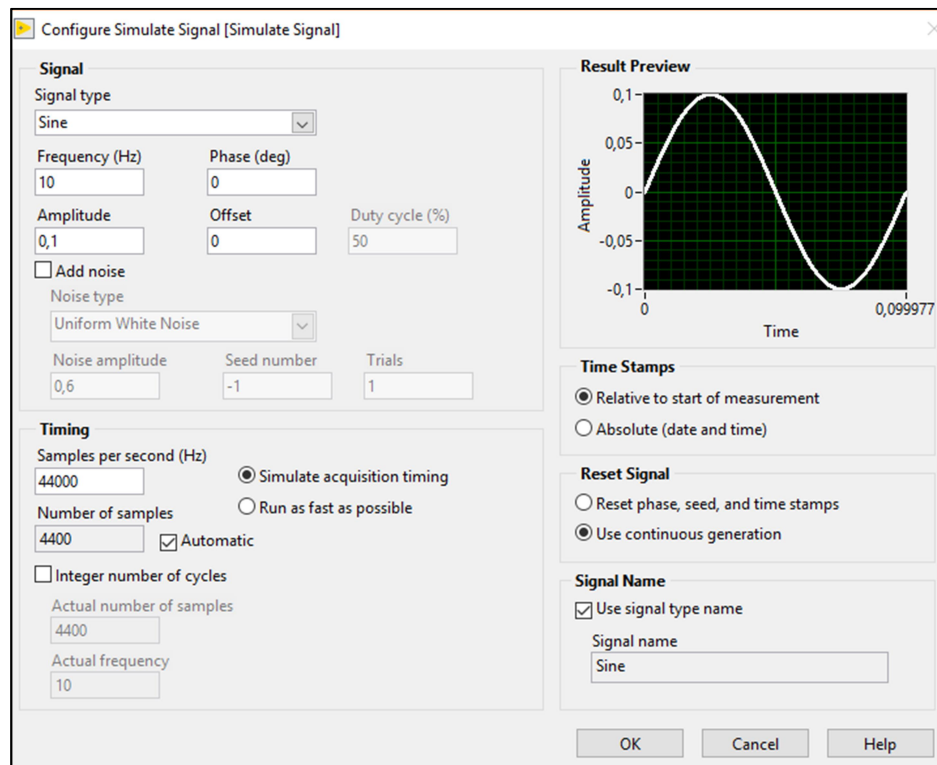


Figure III.11: Fenêtre de configuration du block simulation de signal

Pour simuler les sons utilisés par l'application pour faire les tests nous avons configuré ce bloc de la manière suivante :

- Type de Signal : sinus (Sine)
- Fréquence et amplitude piloté par un autre bloc
- Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 44000$ Hz.

Note : La fréquence maximale utilisée en audiométrie est de 8000 Hz donc le théorème de Shannon est respecté aussi : $F_e \geq 2 F_{max}$

Afin de contrôler la fréquence et l'amplitude du signal : nous avons programmé une boucle FOR qui parcourt un tableau des fréquences préenregistrées ou celle choisies par l'utilisateur et sélectionne une fréquence à chaque passage de la boucle et une boucle WHILE qui incrémente l'amplitude à pas de 5 dB.

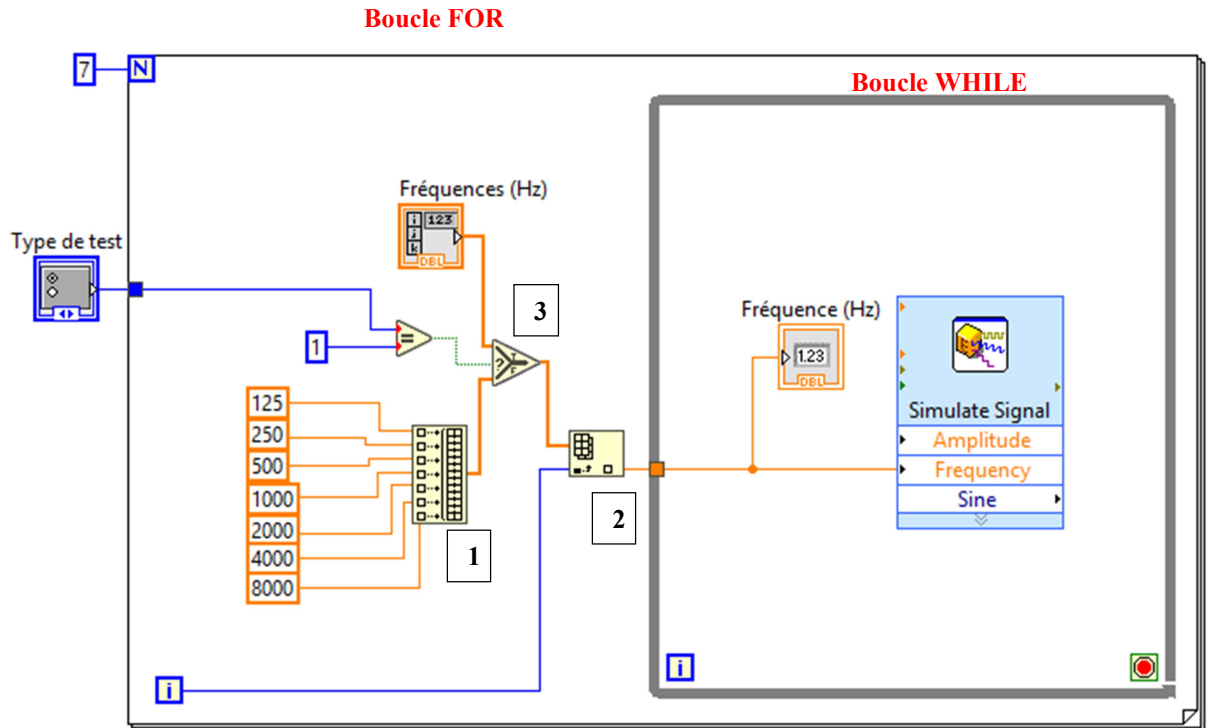


Figure III.12: Blocs de simulation du signal sinusoïde

Ce diagramme est composé de (Figure III.12) :

1. Un bloc qui permet de créer un tableau
 2. Un bloc qui permet de sélectionner une valeur dans le tableau à partir de son indice
 3. Un bloc qui permet la sélection entre les fréquences préenregistrées ou celle entrée par l'utilisateur.
- Bruit de Masquage : Pour le son de masquage on a ajouté un deuxième bloc de simulation de son configuré de la manière suivante :
- Un signal de type continu (DC) sur lequel on a ajouté un bruit blanc uniforme
 - Une fréquence d'échantillonnage $F_e = 44000$ Hz pour une meilleure qualité de son.

III.4.2 Blocs de génération de son audio

Dans cette partie de programme nous avons utilisé des blocs qui permettent d'interagir avec la carte son de l'ordinateur pour générer des sons sur le casque audio.

Grace aux différents blocs de la palette Sound Output VIs de LabVIEW, on peut écrire un signal sur le périphérique audio de l'ordinateur, pour cela on a (Figure III.13):

- Le bloc Sound output Configure qui permet de configurer le son sur la carte son, nous permet de paramétrer la génération du son de la manière suivante :

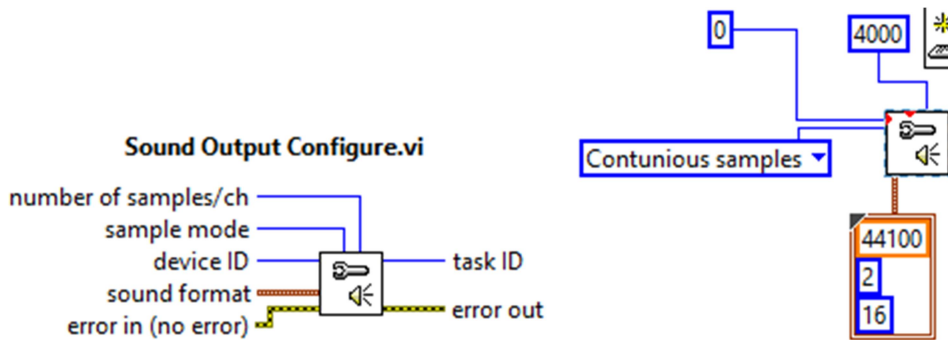


Figure III.13: Bloc de configuration de son

- Un son pulsé recommandé en audiométrie pour éviter la fatigue auditive : programmé en choisissant 4000 échantillons (number of samples/ch = 4000)
 - Un format de son avec une fréquence de lecture = 44100 Hz, nombre de canaux = 2 pour indiquer que le son est stéréo (un son différent sur chaque hautparleur du casque), nombre des bits = 16 bits pour avoir une bonne qualité du son.
 - Device ID : c'est le périphérique utilisé pour la génération du son. Ici ID = 0 qui représente le périphérique par défaut de la carte son.
 - Sample Mode : ce paramètre permet de choisir entre deux modes de lecture : le mode d'échantillon fini (finite samples) ou le mode d'échantillon continu (continuous samples). En mode fini le Sound output write génère le son jusqu'à ce que le nombre d'échantillon spécifié en nombre d'échantillon sera fini. Par contre en mode continu le son est généré plusieurs fois (en continu)
 - La ligne task ID et error out qui permet de relier d'autres blocs afin de transmettre la configuration.
- Le Bloc Sound output write qui permet de générer le signal (qu'on lui a fourni sur son entrée data) sur le périphérique audio de la carte son (Figure III.14).

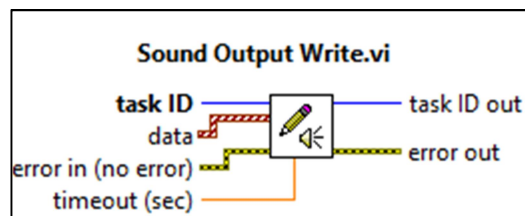


Figure III.14: Bloc d'écriture de son

- Le Bloc Sound output set volume qui permet d'ajuster le volume et le Sound output clear est utilisé pour arrêter le son sur périphérique et ramener la tâche à zéro (Figure III.15).

La liaison de ces 4 blocs avec un signal à l'entrée de Sound Output Writer permet de produire du son sur le périphérique audio de la carte son :

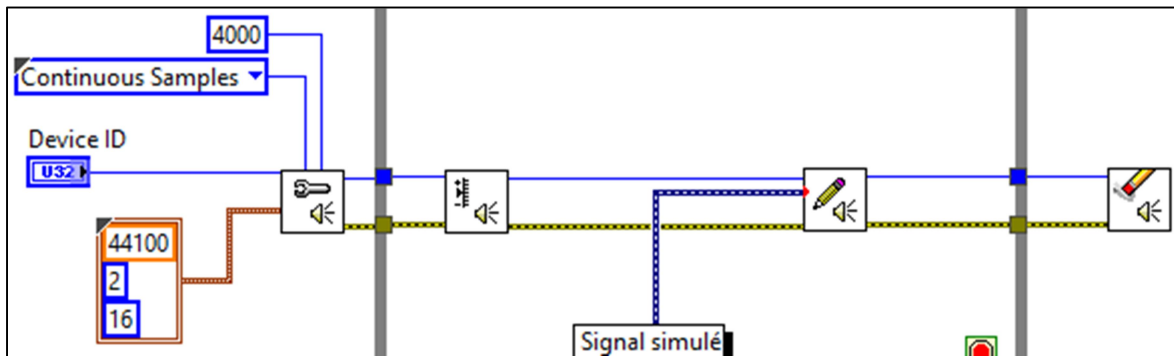


Figure III.15: Diagramme complet de génération de son

Afin de programmer le système qui permet de tester une oreille pendant qu'on masque l'autre c'est-à-dire jouer du son sinusoïdale dans l'un des haut-parleurs et le bruit blanc dans le second et aussi avec la possibilité de permuter les deux sons, nous avons ajouté programmé entre le bloc de simulation et de génération de son, le diagramme LabVIEW suivant (Figure III.16) :

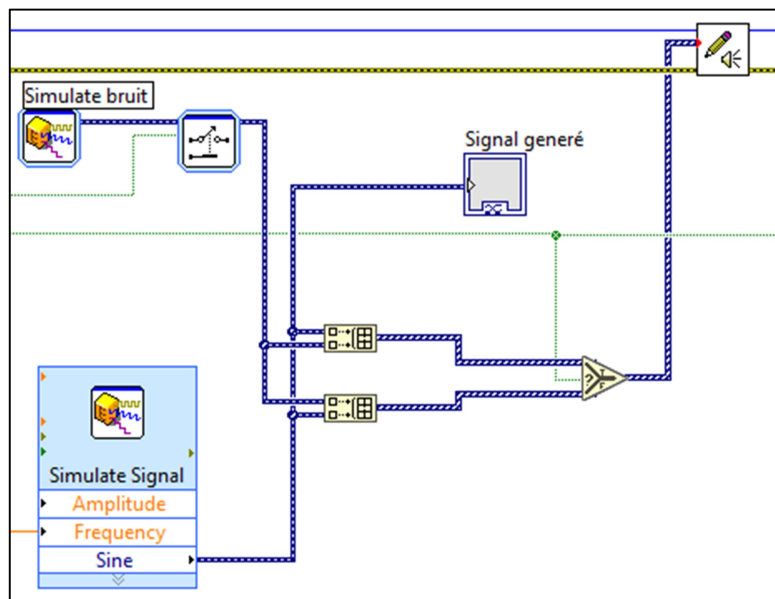


Figure III.16: Diagramme de permutation des sons stéréo

Grâce à deux constructeurs de tableau (Build Array), nous avons créé deux signaux stéréo, contenant chacun le signal sinusoïdal et le bruit de masquage généré, les deux signaux sont inversés l'un par rapport à l'autre. Cela permettra de choisir grâce à un multiplexeur le premier signal pour tester l'oreille gauche et masquer l'oreille droite, et le deuxième permettra de tester l'oreille droite et masquer l'oreille gauche.

III.4.3 Affichage des résultats et génération de rapport de test

A la fin du test deux audiogrammes sont tracés automatiquement sur deux graphes différents. Un pour l'oreille droite et l'autre pour l'oreille gauche, afin de permettre au médecin d'interpréter le résultat et de poser un diagnostic.

Pour cela nous avons sauvegardé dans des variables les réponses du patient et tracé avec le Bloc Graph de LabVIEW l'audiogramme de chaque oreille séparément affiché sur l'interface avec comme abscisse les fréquences en Hz utilisés et comme ordonné les intensités sonores en dB ((Figure III.17) :

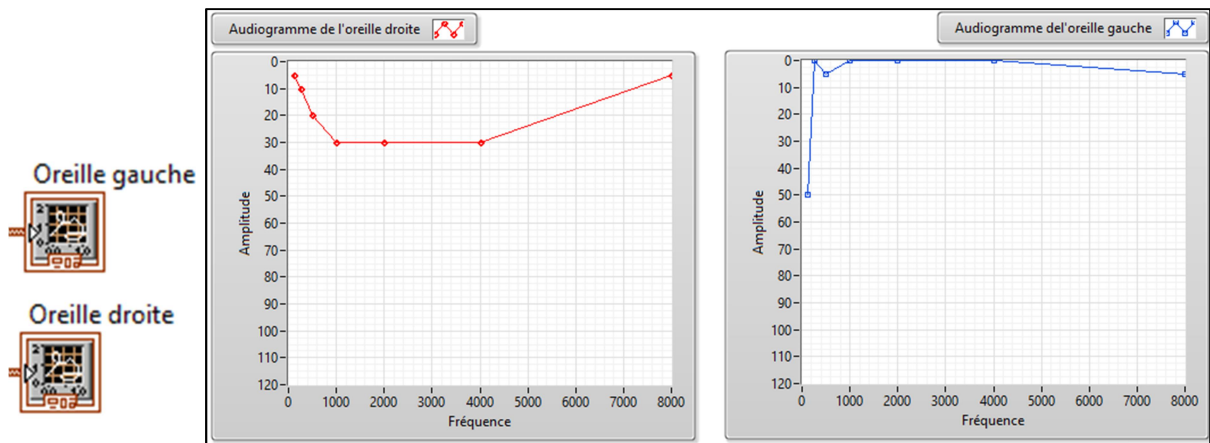


Figure III.17: Bloc pour l'affichage graphique

L'application permet aussi de calculer la perte moyenne totale et d'afficher le degré de surdité de chaque oreille. Cette partie de diagramme est programmée en calculant la moyenne de la perte auditive des fréquences 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz et 4000 Hz. Par la suite nous avons utilisé une structure conditionnelle (Figure III.18) pour calculer le degré de surdité en fonction de la valeur de la perte moyenne :

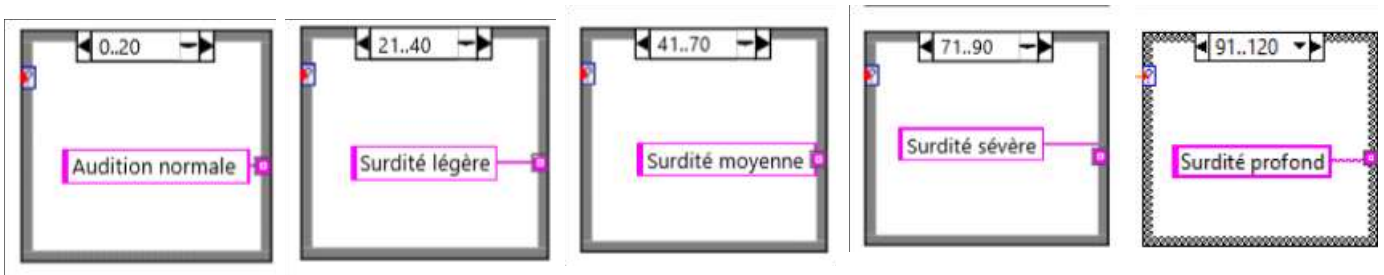


Figure III.18: Programmation des différents cas de surdité.

Différents Blocs du label « Word specific » de LabVIEW nous ont permis de pouvoir générer un rapport de test sous format Word. Il contient les informations personnelles du patient, la date et l'heure du test, un tableau contenant les fréquences et intensités du test des deux oreilles, un audiogramme, les degrés de surdité calculés (Figure III.19) :

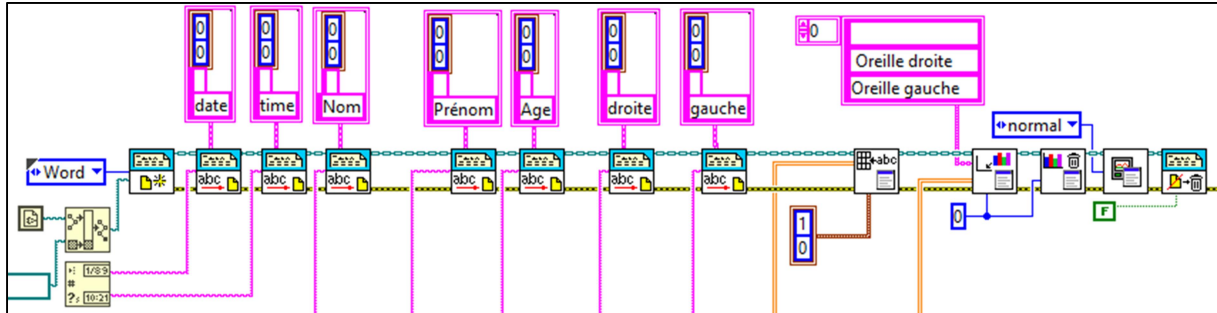


Figure III.19: Diagramme de génération de rapport

Le modèle de rapport généré par l'application est donné sous format Word (Figure III.20):

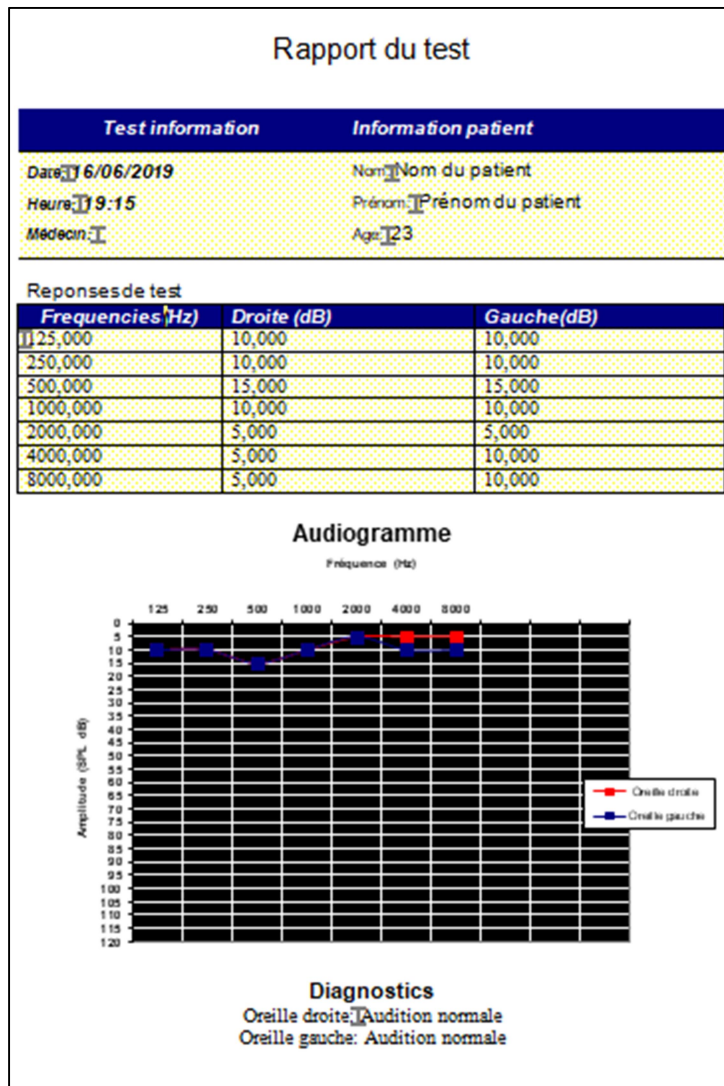


Figure III.20: Exemple de rapport généré.

III.5 La fabrication numérique du casque audio

L'application développée sous LabVIEW permet de générer des sons pour les tests à travers la carte qui les envoient à son tour sous forme des tensions à travers la sortie jack du PC. Donc on aura besoin d'un casque audio pour traduire non seulement les signaux en vibrations acoustiques mais aussi pour permettre de restituer les contenus sonores directement dans les oreilles.

Pour ces raisons nous avons choisi de fabriquer un casque audio avec des hautparleurs à caractéristiques (sensibilité, impédance, gamme de fréquence et puissance maximale) connues, cela va nous permettre de le calibrer, avec un boîtier modélisé et imprimé en 3D.

III.5.1 Modélisation tridimensionnelle du casque

La modélisation tridimensionnelle est l'étape en infographie tridimensionnelle qui consiste à créer, dans un logiciel de modélisation 3D, un objet en trois dimensions, par ajout, soustraction et modifications de ses constituants [19].

Ils existent plusieurs logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), certains avec des licences gratuites et d'autres payantes : Blender (version gratuite), Autodesk Maya (payant), Thinkercad (gratuit), Fusion 360 (version payante et gratuite), SolidWorks etc...

Dans notre projet nous avons utilisé le logiciel Fusion 360 pour modéliser le boîtier du casque audio grâce à une licence étudiant gratuite qu'offre ce dernier.

Le boîtier est composé des 3 types de pièces différentes : un arceau qui assure le maintien du casque sur la tête de l'utilisateur et les 2 autres pièces constituant l'écouteur qui doit contenir le hautparleur (Figure III.21).

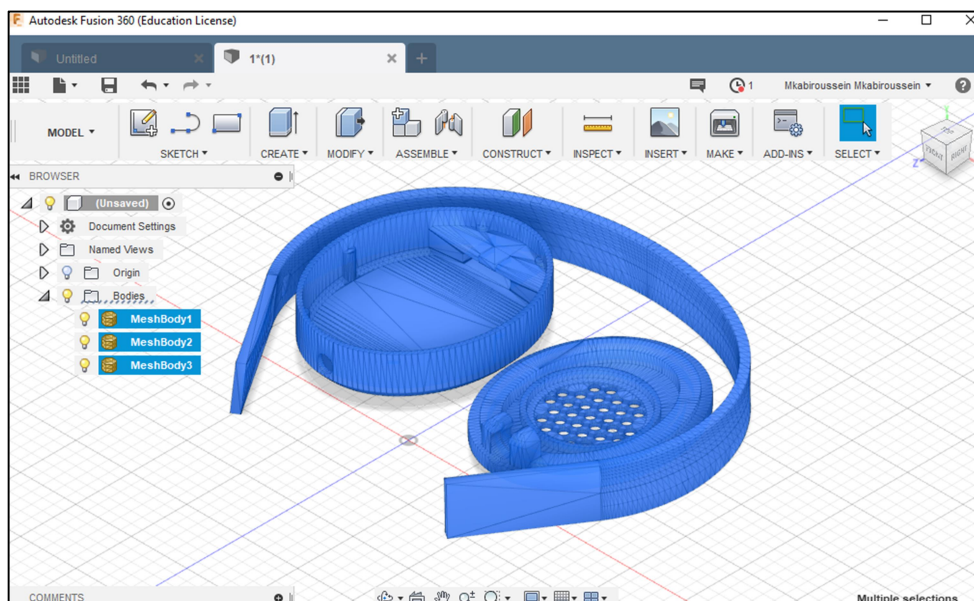


Figure III.21 : Modélisation du casque audio sur Fusion 360.

III.5.2 Impression 3D du casque

L'impression 3D ou impression tridimensionnelle est un procédé de fabrication des pièces en volume par ajout de matière. L'impression 3D permet de réaliser un objet réel à partir d'un modèle créé sur un logiciel de CAO.

Le fichier 3D obtenu est traité par un logiciel spécifique qui organise le découpage en tranches des différentes couches nécessaires à la réalisation de la pièce. Le découpage est envoyé à l'imprimante 3D qui dépose ou solidifie la matière couche par couche jusqu'à obtenir la pièce finale [20].

L'imprimante (Figure III.22) utilise plusieurs types de filaments en plastiques pour imprimer un objet tel que la résine, l'ABC, le PLA etc...



Figure III.22 : Machine d'impression 3D [20].

Pour l'impression du casque audio on a utilisé l'imprimante 3D de l'entreprise SARL SERTINNOV de Blida.



Figure III.23 : Pièces du casque audio imprimé.

III.6 Circuit électronique du casque audio

La génération des sons simulés par le logiciel à travers la carte son est assuré par un circuit électronique composé d'un bloc amplification et de 2 Hautparleurs.

L'amplification du signal va permettre d'augmenter la puissance sonore dans les hautparleurs. Le circuit d'amplification à pour composant principale, le LM386.

Le LM386 est un circuit intégré contenant un amplificateur de puissance audio basse tension. La puissance de sortie réelle dépendra de la tension d'alimentation et de l'impédance des Hautparleurs. Dans un circuit amplificateur, le LM386 prend un signal d'entrée audio et augmente son potentiel entre 20 et 200 fois [21].

Un hautparleur permet de transformer un signal électrique en vibration acoustique. Il est caractérisé par une impédance, une sensibilité et une puissance maximale.

Les hautparleurs utilisés dans le circuit du casque audio ont pour caractéristiques suivant :

- Sensibilité : $S = 108 \text{ dB/mW}$
- Impédance : $Z = 32 \text{ Ohm}$
- Puissance maximale : $P = 50 \text{ mW}$.

Le circuit complet (Figure III.23) est composé de 2 blocs d'amplificateur pour amplifier séparément le 2 hautparleurs du casque audio.

Nous avons utilisé le logiciel Eagle pour la création du circuit et du PCB du circuit électronique du casque audio.

On a utilisé des composants CMS dans le circuit pour miniaturisé la carte afin de la placée dans le boîtier du casque imprimé.

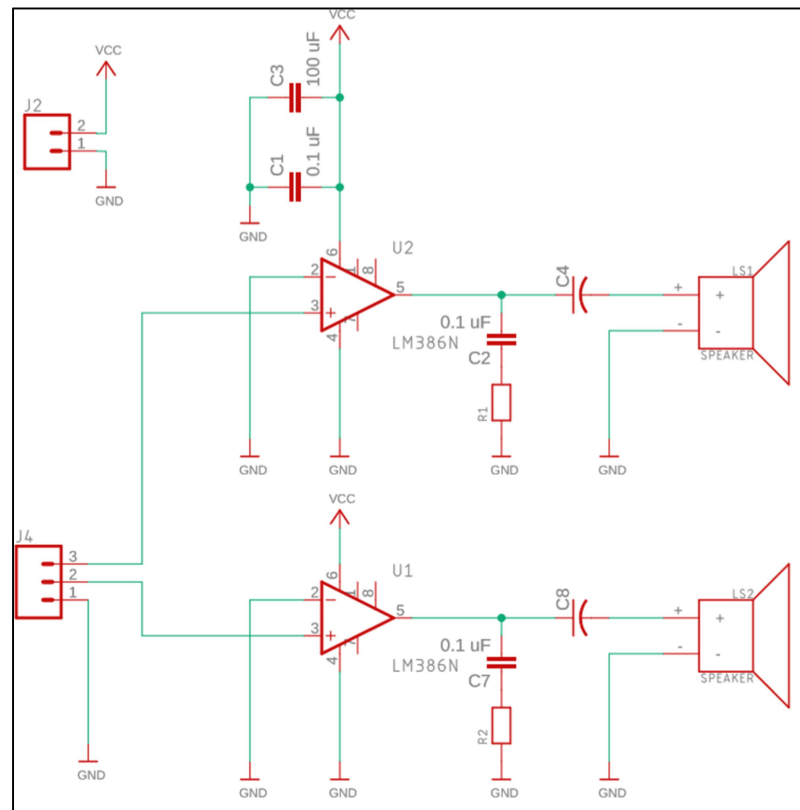


Figure III.24 : Schéma développé du Circuit du casque audio.

- Les condensateurs C1 (0.1 uF) et C3 (100 uF) connectés entre la borne positive et négative servent à découpler l'alimentation. C3 va filtrer les bruits de faible fréquence pendant que C1 filtrera les bruits de haute fréquence [21].
- Le pin 3 constitue l'entrée du signal venant de la carte son de l'ordinateur.
- Le LM386 fournit une amplification interne de gain = 20 avec cette configuration [21].
- Le circuit est alimenté en 5V par l'ordinateur (PC) à travers le port USB.

Le logiciel Eagle nous a permis par la suite de créer et générer le circuit imprimé (PCB) de la carte qui doit être de petite taille afin de la placer dans le casque.

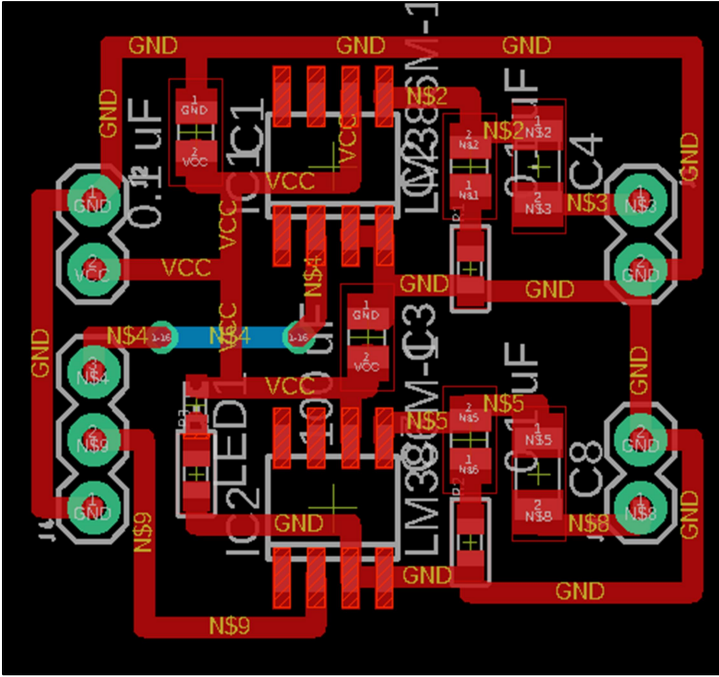


Figure III.25 : Dessin avant projet du circuit imprimé dans EAGLE.

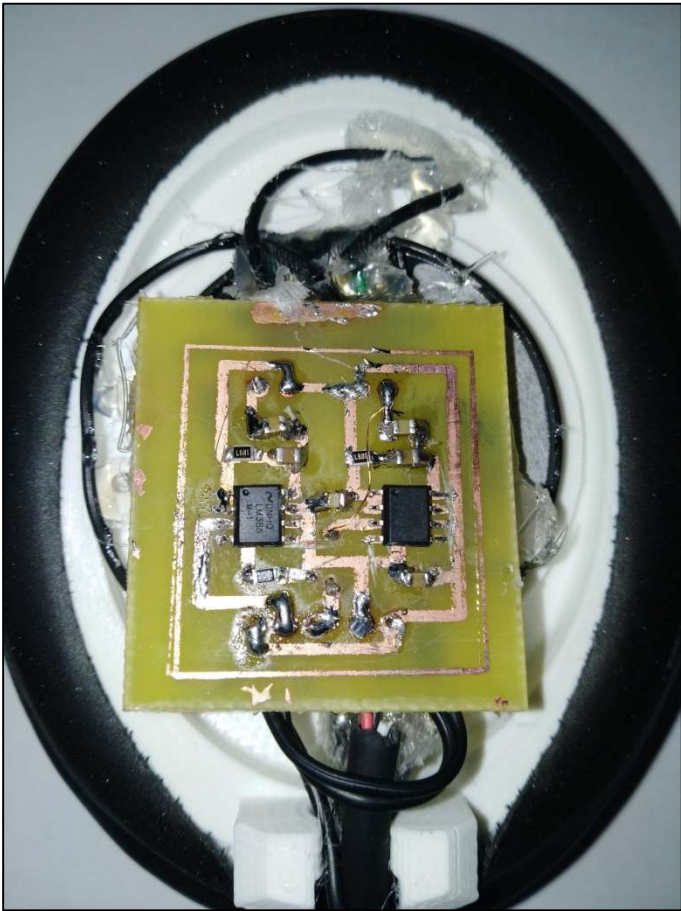


Figure III.26 : Carte électronique fini.



Figure III.27 : Casque audio monté avec la carte d'amplification intégrée.

III.7 Calibration du casque audio

Afin de calibrer notre casque audio pour qu'il puisse générer de manière fidèle les sons simulés par le logiciel, nous avons utilisé le sonomètre du laboratoire traitement de parole du département d'électronique et la chambre insonorisé du service O.R.L de l'Hôpital Frantz Fanon de Blida.

Ainsi on mesure avec le sonomètre l'intensité du son généré par la carte son et le casque audio sur différents fréquences et on le compare avec l'amplitude du son simulé dans le logiciel.

Fréquence du son (Hz)	Valeur mesure par sonomètre (dB)	Amplitude correspondante (A)
500	30	1.8
1000	40	5.65
2000	20	0.56

Tableau III-1 : correspondance entre valeurs mesurés et amplitudes.

Ces valeurs vont nous permettre par la suite de déduire les autres intensités par identification entre les décibels mesurées et les décibels calculés.

$$\text{On a } X(\text{dB}) = 20 \times \log\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

$$\text{Donc } A_0 = \frac{A}{10^{\frac{X(\text{dB})}{20}}}$$

Amplitudes (A)	Amplitude A ₀ calculé
1.8	0.0569
5.65	0.0560
0.56	0.0565

Tableau III-2 : Différentes valeurs de A₀.

$$\text{Moyenne (A}_0) = (0.0569 + 0.0560 + 0.0565) / 3 = 0.0564.$$

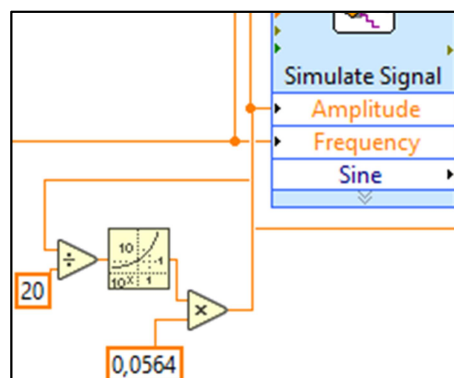


Figure III.28 : Calibration de l'audiomètre virtuel.

III.8 Résultats des tests effectués avec l'audiomètre

Ces mesures ont été effectuées par l'audiomètre du service O.R.L de l'Hôpital Frantz Fanon de Blida, et l'audiomètre virtuel réalisé dans ce projet, les résultats obtenus sont représentés par les figures ci-dessous :

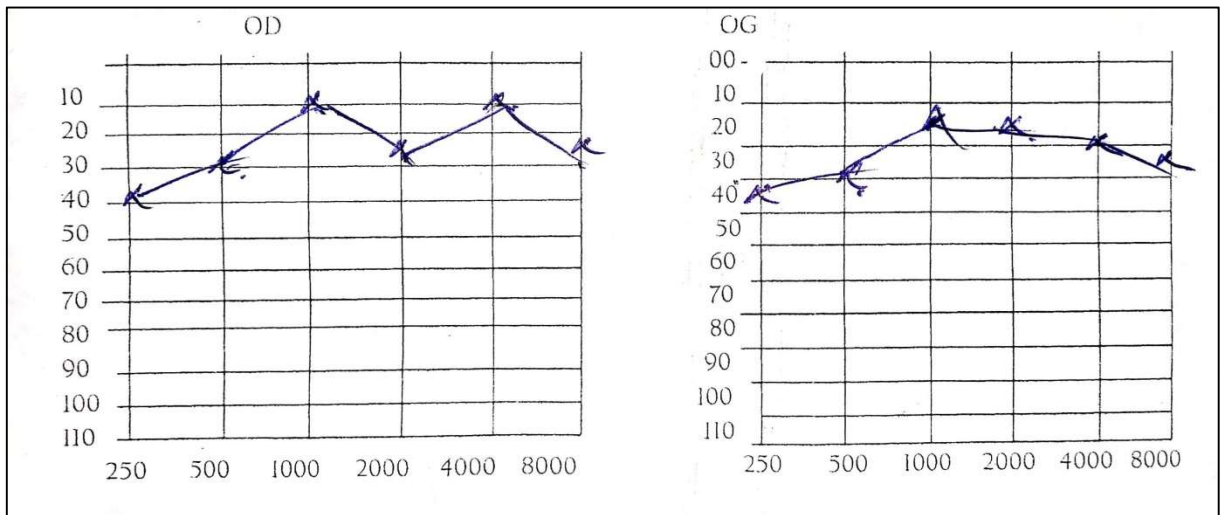


Figure III.29 : Résultat du patient 1 avec l'audiomètre classique de l'hôpital.

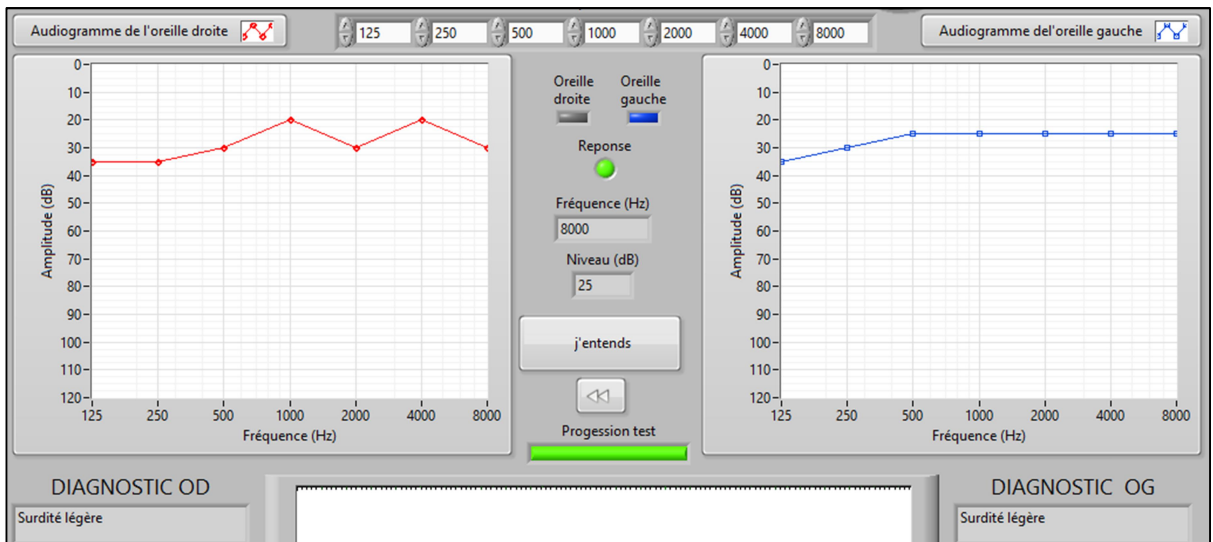


Figure III.30 : Résultat du patient 1 avec l'audiomètre virtuel.

Les audiogrammes (Figure III.23) et (Figure III.24) de 2 audiomètres montrent une surdité légère sur les deux oreilles du patient 1.

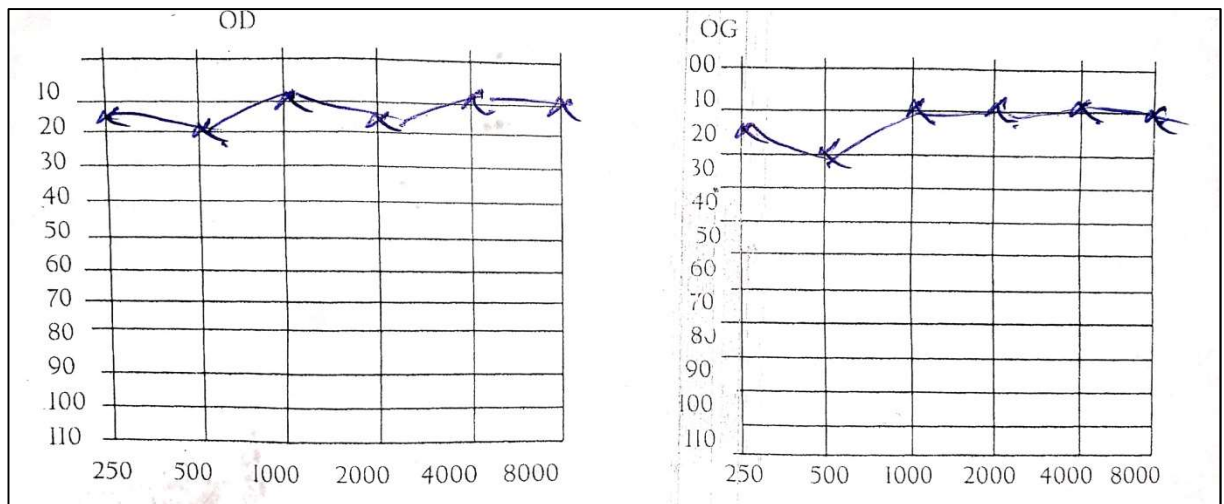


Figure III.31 : Résultat du patient 2 avec l'audiomètre classique de l'hôpital.

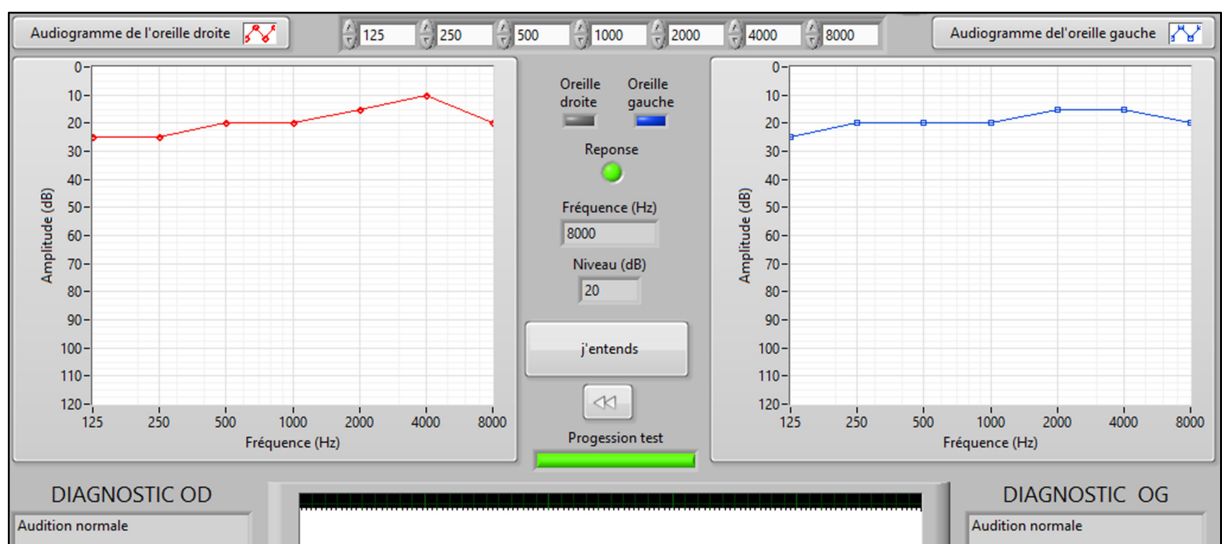


Figure III.32 : Résultat du patient 2 avec l'audiomètre virtuel.

Les audiogrammes (Figure III.23) et (Figure III.24) de 2 audiomètres montrent une audition normale sur les deux oreilles du patient 2.

N.B : Tous les tests ont été réalisés dans la chambre insonorisée du service O.R.L.

Conclusion générale

Conclusion générale

La mesure de la perte auditive et le diagnostic de surdité sont faits par le médecin spécialiste ORL selon diverses techniques. L'examen audiométrique de base est simple, rapide, et indolore ; les résultats figurent sur un audiogramme qui indique les valeurs de la perte auditive aux diverses fréquences. Les tests d'intelligibilité indiquent l'aptitude d'un patient à comprendre la parole. D'autres tests, tout aussi anodins mais plus complexes, sont appliqués aux bébés et aux enfants, permettant le diagnostic précoce.

Dans ce même contexte, notre projet a consisté à la réalisation d'un audiomètre virtuel sur PC capable d'effectuer des tests audiométriques par voies aériennes grâce à une interface graphique développée avec LabVIEW et un casque audio fabriqué par impression 3D.

Pour la réalisation de cet audiomètre, une étude sur les différentes techniques d'exploration auditive précédée d'une étude sur l'anatomie et physiologie de l'oreille a été effectuée. Cela, nous a permis par la suite d'avoir des notions sur l'audiométrie qui nous ont aidés dans le développement de cet audiomètre virtuel.

La partie développement de ce projet a débuté tout d'abord par une programmation des différentes fonctions d'un audiomètre sous LabVIEW qui a abouti à une interface graphique. Par la suite, une partie sur la modélisation et impression 3D a permis de fabriquer le casque audio, et enfin la dernière étape a été dédiée à la calibration de tous le système grâce à un audiomètre classique du service d'ORL de l'Hôpital Frantz Fanon.

Cet audiomètre nous a permis de faire des tests audiométriques sur des patients au niveau de l'hôpital. Bien que les résultats obtenus par voie aérienne soient comparables à ceux de l'audiomètre de service, une intégration des tests audiométriques par voie osseuses et vocales complètera cet audiomètre pour qu'il puisse effectuer un examen audiométrique plus complet.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R. Pujol, « Oreille », <http://www.cochlea.eu/oreille-generalites>, consulté le 01/05/2019.
- [2] P. Leveque, « Les surdités de l'adulte Etude de pratiques en Médecine Générale », Thèse pour le Doctorat en Médecine, Université Paris 5, 2012.
- [3] R. Pujol, « Cochlée : Généralités », <http://www.cochlea.eu/cochlee>, consulté le 01/05/2019.
- [4] M. MENARD, « Exploration objective de l'audition à partir des auditory steady-state responses et adaptation à l'implant cochléaire », Université Lyon 1, 2008.
- [5] T. FILLON, « Traitement Numérique du Signal Acoustique pour une Aide aux Malentendants », Thèse pour le Doctorat en traitement du signal, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 2004.
- [6] R. Nouvian, D. Malinvaud, T.V. Abbeele et al, « Physiologie de l'audition », Ed. Elsevier SAS, Paris, 2006.
- [7] « Son (Physique) ». [https://fr.wikipedia.org/wiki/Son_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Son_(physique)), consulté le 05/05/2019.
- [8] Diphone (Professional Sound Service), « Décibel et niveaux de bruit », <https://www.diphonevent.com/>, consulté le 05/05/2019.
- [9] Georg von Békésy, « Experiments in hearing », Ed. Mcgraw-hill Book Company, 1960. p. 403-535.
- [10] A. MUDRY, « Otologie », <https://www.oreillemudry.ch>, consulté le 10/05/2019.
- [11] B. Chaix, « Méthodes objectives », <http://www.cochlea.eu/exploration-fonctionnelle/methodes-objectives> consulté le 10/05/2019.
- [12] P. Avan, « L'audiométrie de diagnostic », Ed. Les cahiers de l'audition, Vol.18, N°4, 2005.
- [13] B. Chaix, « Méthodes subjectives », <http://www.cochlea.eu/exploration-fonctionnelle/methodes-subjectives>, consulté le 10/05/2019.
- [14] D. Iudean, R. Munteanu, C. Muresan et al, « Digital Medical Audiometer », Technical University of Cluj-Napoca, Mediamira Science Publisher, Acta Electro Technica China Academic Journal, Romania, 2014.
- [15] A.Mahalakshmi, M.Mohanavalli and R. Sankari « PC Based Audiometer using LabView », International Journal of Pure and Applied Mathematics, Inde, 2018.

- [16] W. Benzaba, F. Ykhlef, R. Boutaleb et al, « Développement d'un Audiomètre sur PC pour le dépistage des pertes auditives », Centre de Développement des Technologies Avances Alger, Algérie.
- [17] « Manuel d'initiation à LabVIEW », Université Paris Sud, <http://www.hebergement.u-psud.fr/projetsdephysiquestatistique>, consulté le 20/04/2019.
- [18] Y. Sahli, « Exploration fonctionnelle de l'audition : Audiométrie étude et évaluation de cas pratiques », Mémoire de master en Génie Biomédical, Université de Tlemcen, Algerie, 2018.
- [19] « Modélisation », https://fr.wikipedia.org/wiki/Modelisation_tridimensionnelle, consulté le 15/06/2019.
- [20] « Impression 3D », https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D, consulté le 15/06/2019.
- [21] A.Mahalakshmi, M.Mohanavalli and R. Sankari, « Pc based audiometer generating audiogram to assess acoustic threshold », International Journal of Pure and Applied Mathematics, Inde, 2018.