République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté De Génie Electrique et d'Informatique

Département d'électronique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en

Génie Biomédical

Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Présenté par :

- DAMENE Manel
- MELLAK Ghiles

ETUDE ET REALISATION D'UN IMPLANT COCHLEAIRE AU SERVICE ORL BELLOUA-TIZI OUZOU AVEC L'IMPRESION 3D

Soutenu publiquement, le 25/09/ 2023, devant le jury composé de :

Dr KABRI Mohammed	MA	CHU TO	**Président**
Dr MEDDOUR Cherif	MAA	UMMTO	**Examinateur**
Dr HADDADOU Atika	MCB	UMMTO	**Promoteur**

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions « Allah » notre créateur le miséricordieux et le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la patience afin de mener à terme ce présent travail.

Nous adressons nos profonds remerciements à notre promotrice Mme Haddaddou Atika pour avoir accepté d'encadrer notre travail de recherche. Nous souhaitons la remercier pour sa précieuse assistance, sa disponibilité inestimable et la grande qualité de ses conseils tout au long de ce processus.

Nous remercions vivement le docteur KABRI maitre-assistant à l'unité CHU BELLOUA de TIZI OUZOU.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous présentons nos remerciements à tous les enseignants de la spécialité Instrumentation Biomédicale de l'université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, pour leurs enseignements.

Nos vifs remerciements vont aussi à nos familles, à nos amis ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration et à la finalisation de ce mémoire.

Dédicace

Au nom d'Allah, le très miséricordieux je dédie cet humble travail :

À ma mère

Affable, honorable, aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement. Tu n'as jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour ses enfants, en me guidant sur le bon chemin dans ma vie et mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

À mon père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eus pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation.

À ma famille

A mon cher et unique frère ***Nadjib*** *et ma petite sœur adorée* ***Cerina****, qui m'ont toujours soutenu et cru en moi, ainsi toute ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.*

À la mémoire de mes deux grands-parents

Jeddi Mamouh *et* ***jeddi Mouhsaid*** *où que vous soyez, je sais que votre lumière brille sur moi. Je chéris chaque instant passé à vos côtés, et vos souvenir resteront à jamais gravé dans ma mémoire.*

À mes chers amis

Ainsi qu'à tous mes amis ***Hassina****,* ***Katia****,* ***Yasmine****,* ***Katia, Masten*** *une personne spéciale à mes yeux, à qui je tiens énormément et à tous les autres que je n'ai pas pu citer avec qui j'ai vécu des moments inoubliables de joie de et de folie au cours de ces années. Votre complicité et votre amabilité ont été précieuses. Merci du fond du cœur.*

À mon binôme

Sans oublier mon binôme ***Ghiles*** *pour son soutien moral, sa présence et sa compréhension tout au long de ce projet.*

À toute la promotion « M2 Instrumentation biomédical »

À tous ceux qui m'aiment, à tous ceux que j'aime

Manel



Je dédie ce mémoire

À ma mère, *qui, depuis ma venue au monde, ne cesse de croire en moi. Toujours présente pour me rendre meilleur chaque jour, elle se donne corps et âme et me transmet toute sa force vitale. Je n'oublierai jamais ses invocations quotidiennes, demandant à Allah sa protection. Maman, tu es géniale, attentionnée, généreuse, bienveillante, forte et dévouée, une mère parfaite. Chaque jour passé à tes côtés sur cette terre est une bénédiction. Jusqu'à la fin des temps, tu seras la meilleure personne à mes yeux.*

À mon père, *qui a toujours été un modèle de force et de sagesse. Il m'a soutenu avec patience, inculqué des valeurs essentielles, et montré l'importance de la persévérance. Papa, tu es un pilier dans ma vie, toujours présent pour me conseiller et m'encourager. Je te suis profondément reconnaissant et te considère comme un guide irremplaçable.*

À ma grande sœur, *pour son soutien constant, ses précieux conseils et sa présence rassurante dans les moments de doute. Ta sagesse et ton écoute ont toujours été pour moi une source de réconfort.*

À mon petit frère, *dont l'énergie et la joie de vivre me rappellent l'importance de rester positif et persévérant. Merci à vous deux d'être là et de m'accompagner chaque jour dans cette aventure. Vous êtes des piliers importants dans ma vie.*

A la mémoire de tous les êtres chers de ma famille qui nous ont quittés. Vos présences lumineuses continuent de vivre à travers les souvenirs que nous chérissons. Vos vies, bien que trop courtes, ont marqué les nôtres par l'amour, la sagesse et les valeurs que vous avez laissées en héritage.

À Sarah Benelhadj, *ma meilleure amie, même partie à l'étranger, tu restes toujours présente dans mon cœur. Je sais que tu seras toujours là pour moi, peu importe la distance.*

À Fateh Mellahi*, mon unique meilleur ami, plus qu'un ami, un frère de cœur.*

À Kahina M allem, *qui est bien plus qu'une amie, elle fait partie de ma famille.*
À Safir Nawel*, une personne spéciale à mes yeux, à qui je tiens énormément pour ses encouragements et ses prières qui me portent chaque jour.*

À mon extraordinaire binôme Manel, *merci pour ton soutien indéfectible et ta complicité tout au long de cette aventure. Ta rigueur et ton engagement ont fait de ce parcours une expérience inoubliable.*

À toute la promotion « M2 Instrumentation biomédical »

À tous ceux qui m'aiment, à tous ceux que j'aime

Ghiles



Sommaire

Remerciement……..I
Dédicaces……II
Sommaire……IV
Liste des figures……VII
Liste des tableaux ……X
Liste des abréviations……XI
Introduction Générale ……XIII

Chapitre I : Système auditif.

I.1 Introduction……3
I.2 Anatomie de l'appareil auditif ……3
I.2.1 Structure et physiologie de l'oreille humaine ……3
I.3 Physiologie de l'audition……15
I.3.1 Définition de son……15
I.3.2 Les propriétés physiques du son……15
I.3.3 La perception auditive ……19
I.3.4 Transmission des ondes sonores ……19
I.4 La surdité……20
I.4.1 Définition de la surdité ……20
I.4.2 Les types de la surdité ……20
I.4.3 Les degrés de la surdité ……22
I.4.4 Les surdités de perception……24
I.4.5 Les principales maladies ……25
I.4.6 Remèdes et traitements……27

Chapitre II : Implant cochléaire.

I.5 Conclusion ……28
II.1 Introduction……29
II.2 Définition des implants cochléaires……29
II.3 Historique……30
II.4 Présentation de l'implant cochléaire……31

II.5 Fonctionnement de l'implant 34
II.6 Les Indications de l'implantation cochléaire 35
II.7 Limites de performance 36
II.8 COMBIEN COÛTE UN IMPLANT COCHLÉAIRE ? 37
II.9 Conclusion 37

Chapitre III : Généralités sur les biomatériaux.

III.1 Introduction 38
III.2 Définition de biomatériau 38
III.3 Matériaux composites 39
III.3.1 La matrice (la résine) 40
III.3.1.2 Le renfort 41
III.4 Les céramiques 43
III.5 Les métaux et alliages métalliques 45
III.6 Les polymères 46
III.7 Matériaux d'origine naturelle 48
III.8 Définition de la Biocompatibilité 49
III.9 Les propriétés des biomatériaux 50
III.10 Les champs d'application des biomatériaux 50
III.11 Matériaux utilisés dans la fabrication de l'implant cochléaire 51
III.12 Conclusion 54

Chapitre IV : Impression 3D.

IV.1 Introduction 56
IV.2 Définition de la trois dimension (3D) 56
IV.3 Définition de l'impression 3D 56
IV.4 Fonctionnement de l'impression 3D 57
IV.5 Matériaux utilisés pour l'impression 3D 58
IV.5.1 Les polymères 58
IV.5.2 Les métaux 60
IV.5.3 Autres matériaux 61
IV.6 Les technologies de l'impression 3d 63
IV.6.1 Impression à base de thermoplastiques et de composites 64
IV.6.2 Impression à base de résines 65
IV.6.3 Impressions à base de métaux 66

IV.6.4 Impression 3D en couleur 67
IV.7 Les champs d'application de l'impression 3D 67
IV.7.1 L'aéronautique l'aérospatiale 68
IV.7.2 L'automobile 68
IV.7.3 Architecture 69
IV.7.4 Le biomédical 70
IV.8 Les avantage de l'impression 3D 73
IV.9 Conclusion 74

Chapitre V : Partie expérimental et réalisation.

V.1 Introduction 75
V.2 Cadre et lieu de stage 75
V.3 Le cycle d'implantation cochléaire 76
V.4 Bilan de pré-implantation cochléaire 76
V.5 Chirurgie de l'implant cochléaire 83
V.6 Le suivi post-implantation cochléaire 89
V.7 Fabrication de l'implant avec l'impression 3D 90
V.8 Logiciel de simulation 90
V.8.1 Caractéristiques et Avantages 90
V.8.2 Utilisation dans l'industrie et l'enseignement 91
V.8.3 Communauté et mises à jour 91
V.8.4 Inconvénients et améliorations possibles 91
V.9 Utilisation de l'Alfawise U20 dans le cadre de ce projet 102
V.9.1 Caractéristiques techniques principales 102
V.9.2 Application dans le projet 103
V.10 Croquis de prototype 103
V.11 La réalisation en 3D 105
V.10 Conclusion 109
Conclusion générale 113
Annexe 118
BIBLIOGRAPHIE
Résume

Liste des figures

Figure 1 : Anatomie et physiologie du système auditif. 4
Figure 2 : Vue latérale du pavillon de l'oreille 4
Figure 3: Coupe frontale du conduit auditif externe 5
Figure 4 : Le tympan 6
Figure 5 : Caisse de tympan, vue schématique. 6
Figure 6 : Vue antérieure des osselets 7
Figure 7 : L'oreille interne. 8
Figure 8 : Système vestibulaire 9
Figure 9 : La membrane basilaire dans une cochlée déroulée et la tonotopie passive 10
Figure 10 : La cochlée. 10
Figure 11 : Le canal cochléaire 11
Figure 12 : L'organe de Corti 12
Figure 13 : Organe de corti 13
Figure 14 : Oreille interne montrant le nerf auditif 14
Figure 15 : Le système nerveux et l'audition 14
Figure 16 : Image d'un son pur 15
Figure 17 : Bande de fréquences. 16
Figure 18 : Représentation de l'amplitude d'une onde acoustique 17
Figure 19 : Représentation de la longueur d'onde 18
Figure 20 : Représentation schématique de l'impédance acoustique 19
Figure 21 : Transmission des ondes sonores 20
Figure 22 : La surdité 20
Figure 23 : Arbre décisionnel pour la classification des surdités 21
Figure 24: Les degrés de surdité 24
Figure 25 : IRM avec injection montrant tumeur de l'APC gauche évoquant un neurinome de l'acoustique 25
Figure 26 : Otite externe 26
Figure 27 : Otite moyenne 26
Figure 28 : Otite interne 27
Figure 29 : Implant cochléaire après sa sortie de la boite (image prise au CHU de Belloua) 30
Figure 30 : Implant cochléaire 32
Figure 31 : Partie interne de l'implant cochléaire. 33
Figure 32 : Partie externe de l'implant cochléaire. 33
Figure 33 : Le fonctionnement de l'implant cochléaire 34
Figure 34 : Les différentes catégories des biomatériaux. 39
Figure 35 : Fibre de carbone 42
Figure 36 : Fibre en verre 42
Figure 37 : Fibre d'aramide 43
Figure 38 : La prothèse totale de la hanche en céramique 44
Figure 39 : Marchés mondiaux des biomatériaux en 2002. 46
Figure 40 : La structure chimique d'un polymère appelé polystyrène. 47
Figure 41 : Le Jute et la fibre de jute. 49
Figure 42 : Le titane. 52
Figure 43 : Platine naturel pur. 53
Figure 44 : De l'or pur au bijou en or 18 carats 54
Figure 45 : Exemple d'une impression 3D. 56

Figure 46 : Les différentes étapes de l'impression 3D.....57
Figure 47 : Exemples d'objet en ABS. 58
Figure 48 : Exemples d'objet en PLA 58
Figure 49 : Exemple d'objet en polyamide.....59
Figure 50 : Exemples d'objet en PET.....60
Figure 51 : Des yeux artificiels imprimé en 3D.....60
Figure 52 : Exemple d'un objet en titane.....61
Figure 53 : Exemple d'objet en polyamide.....62
Figure 54 : Exemple d'objet en sable 62
Figure 55 : Exemple d'objet en bois.....63
Figure 56 : Représentation du FDM.....64
Figure 57 : Schématisation de procédé SLS 65
Figure 58 : Principe de fabrication par la Stéréolitographie 65
Figure 59 : Principe de fabrication par projection de gouttes 66
Figure 60 : Drone fabriqué en impression 3D.....68
Figure 61 : Prototype d'un moteur réalisé par une impression 3D.....69
Figure 62 : Maquette d'architecture réalisée par l'impression 3D 69
Figure 63 : Les médicaments de FabRx.....71
Figure 64 : Une oreille avec la bio-impression.....71
Figure 65 : Main articulée produite par impression 3D 72
Figure 66 : Unite BELLOUA CHU Nedir Mohammed de Tizi Ouzou.....75
Figure 67 : Le cycle d'implantation cochléaire.....76
Figure 68 : Potentiel Evoquée Auditif (PEA).....78
Figure 69 : Impedancemétrie.....78
Figure 70 : TDM des rochers.....79
Figure 71 : Compte rendu de la TDM. 80
Figure 72 : IRM cérébrales et rochers 81
Figure 73 : Compte rendu du l' IRM cérébrales et rochers. 82
Figure 74 : Préparation du personnel médical à l'acte chirurgical (photo prise au CHU de Belloua). 84
Figure 75 : Organisation des instruments (photo prise au CHU de Belloua). 84
Figure 76 : Le chirurgien qui commence à réaliser l'incision (photo prise au CHU de Belloua). 85
Figure 77 : Incision de l'oreille achevée (photo prise au CHU de Belloua). 85
Figure 78 : Fraisage d'une logette pour le recueil du processus (photo prise au CHU de Belloua).....86
Figure 79 : Repérage de la fenêtre ronde.....86
Figure 80 : Nettoyage de la rampe tympanique (photo prise au CHU de Belloua). 87
Figure 81 : Introduction des portes électrodes dans la rampe tympanique (photo prise au CHU de Belloua).....88
Figure 82 : Fixation du processeur dans sa logette. 88
Figure 83 : Vérification sur le logiciel.....89
Figure 84 : Fermeture.....89
Figure 85 : Logo du logiciel FreeCad.....90
Figure 86 : La boite de dialogue de personnalisation de l'interface. 94
Figure 87 : L'onglet Clavier.....95
Figure 88 : L'onglet Barres d'outils.....97
Figure 89 : L'onglet Macros. 100
Figure 90 : L'imprimante 3D Alfawise U20.....102
Figure 91 : Croquis du prototype (voir annexe 8).....104
Figure 92 : L'interface du logiciel. 105

Figure 93 : Création de la forme de l'implant. 105
Figure 94 : Créer une forme cylindrique en 3D. 106
Figure 95 : Ajustage de la forme cylindrique. 106
Figure 96 : Rajout de porte électrode. 107
Figure 97 : Premier prototype de l'implant. 107
Figure 98 : Deuxième prototype de l'implant. 108
Figure 99 : L'implant réel original et l'implant imprimé en 3D. 108

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des surdités 23
Tableau 2 : récapitulatif des différentes marques d'implant cochléaires 31
Tableau 3 : Les 24 bandes critiques identifiées dans le traitement fréquentiel chez les êtres humains..... **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 4 : Avantages Inconvénients des céramiques..... 45
Tableau 5 : Famille de polymères et leur utilisation. 47
Tableau 7 : Avantages et inconvénients des polymères. 48
Tableau 6 : Exemples de biomatériaux d'origine végétale..... 48
Tableau 8 : Exemples de biomatériaux d'origine animale. 49

Liste des abréviations

2D : Deux dimensions.

3D : Trois dimensions.

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène.

ATCD : Antécédent.

CA : Acétate de cellulose.

CAE : Conduit auditif externe.

CAO : Conception assistée par ordinateur

CCI : Cellules ciliées internes.

CCE : Cellules ciliées externes.

DMLS : Direct Metal Laser Sintering.

EBM : Electron Beam Malting.

FDA : Food and Drug Administration.

FDM : Fused Deposition Modeling (dépôt de matière fondue).

FFF : Fused Filament Fabrication.

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique.

NIH : National Institutes of Health.

OEA : Oto-émissions Acoustiques.

OI : Oreille Interne.

OMA : Otite Moyenne Aiguë.

ORL : Oto-rhino-laryngologiste.

PEA : Potentiels Évoqués Auditifs.

PET : Poly téréphtalate d'éthylène.

PLA : Acide polylactique.

PMMA : Poly méthacrylate de méthyle.

POM : Poly oxyméthylène.

PPO : Poly oxyphénylène.

SLA : Stéréolithographie.

SLS : Selective Laser Sintering (Frittage laser).

SUB : Surdité Unilatérale Brusque.

TDM : Tomodensitométrie.

UV : Ultra-violet.

Introduction Générale

Introduction Générale

L’être humain est un organisme vivant fascinant, il compte plusieurs capacités pour interpréter les signaux extérieurs et interagir avec le monde, comme les images, la sensation, le gout et le son. L’homme étant un être exposé constamment aux dangers présents dans la nature, il peut facilement perdre l’usage d’un membre, d’une fonction ou d’un sens. Faisant face à ce genre de problèmes, l’homme a su prendre des dispositions nécessaires afin de se préserver, en donnant vie à des créations révolutionnaires tels que les prothèses ou les implants.

En tant qu’étudiants en Génie Biomédicale, il est important pour nous de comprendre la physiologie et l’anatomie fonctionnelle des différentes parties du corps humain, pour relier la forme à la fonction.

L’oreille est l’organe de l’audition, également l’un des éléments essentiels pour assurer l’équilibre du corps. Le dysfonctionnement de cet appareil auditif peut entraîner différents types de surdités, certaines pouvant être traitées médicalement, tandis que d'autres nécessitent une aide auditive. Cependant, dans les cas les plus sévères, lorsque les solutions précédentes ne sont plus suffisantes, la solution réside dans une intervention chirurgicale, qui repose sur l'utilisation d'implants cochléaires.

Les implants cochléaires sont une technologie de pointe qui redonne le pouvoir de l'ouïe aux personnes souffrant de perte auditive sévère. Grâce à des microphones ultra-sensibles et des électrodes implantées chirurgicalement, les sons sont convertis en signaux électriques qui stimulent directement le nerf auditif.

Un enfant naissant sourd, un adulte qui perd sa capacité à entendre, imaginant que cette enfant puisse entendre un jour, imaginant que cet adulte retrouve son sens.

C’est dans ce cadre que s’inscrit notre projet de fin d’étude qui consiste à étudier et réaliser un implant cochléaire. Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons commencer par des généralités sur l’anatomie de l’oreille humaine, qui nous permettra de comprendre l’ouïe, de décrire dans un premier temps, les organes et les mécanismes physiologiques mis en jeu dans ce processus très complexe, ainsi que leurs rôles respectifs.

Dans le deuxième chapitre, nous expliquerons le fonctionnement des implants cochléaires et comment ils peuvent aider les personnes souffrant de troubles de l'audition.

Le troisième chapitre explore les biomatériaux de manière générale, en abordant les différents types disponibles et en se focalisant sur le choix des biomatériaux pour l'implant.

Le quatrième chapitre se concentre sur la technologie de l'impression 3D. Nous explorerons les principes de base de l'impression 3D et les matériaux utilisés.

Enfin le cinquième chapitre, la partie expérimentale, on partagera avec vous notre expérience de stage au service ORL à l'hôpital de BALOUA à TIZI OUZOU, où on a pu observer de près le processus d'implantation et bien sûr nous présenterons notre réalisation d'un prototype de cet implant en utilisant l'impression 3D, nous mettons les étapes clés du processus.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Système auditif

I.1 Introduction

L'oreille est l'organe responsable de l'audition chez l'être humain, il nous offre le don précieux de l'audition et nous aide à maintenir notre équilibre. Entendre et comprendre exigent trois éléments : le son, l'oreille et le cerveau. Le système auditif humain est un système de traitement des sons sophistiqué qui nous permet non seulement de détecter la présence et la localisation des sources sonores dans notre environnement, mais aussi de comprendre leur signification. Malheureusement, certaines personnes souffrent de déficiences auditives organiques ou fonctionnelles, ce qui peut constituer un handicap invisible mais ayant des conséquences majeures sur leur vie sociale et professionnelle. Dans ce premier chapitre, nous allons explorer l'anatomie et la physiologie de l'oreille dans le but de présenter d'une manière approfondie la structure complexe de cet organe sensoriel. Nous aborderons également le concept d'audition dans toute sa portée, tout en explorant les différentes formes de surdité qui peuvent affecter les individus.

I.2 Anatomie de l'appareil auditif

I.2.1 Structure et physiologie de l'oreille humaine

L'oreille humaine est un organe complexe et efficace qui convertit les vibrations de l'air, appelées sons, en signaux électriques interprétables par le système nerveux. Cette conversion est le résultat du travail coordonné de trois parties distinctes mais complémentaires de l'oreille (voir la figure 1). La première, l'oreille externe (composée du pavillon, du conduit auditif externe (CAE)), agit essentiellement comme un transmetteur des vibrations acoustiques, les adaptant au processus auditif. La deuxième, l'oreille moyenne (incluant les osselets, les muscles et la trompe d'Eustache), poursuit cette transmission en ajustant les vibrations. Enfin, la troisième partie, l'oreille interne, représente le cœur du système auditif, où les signaux sont finalement convertis en impulsions nerveuses pour interprétation par le cerveau.

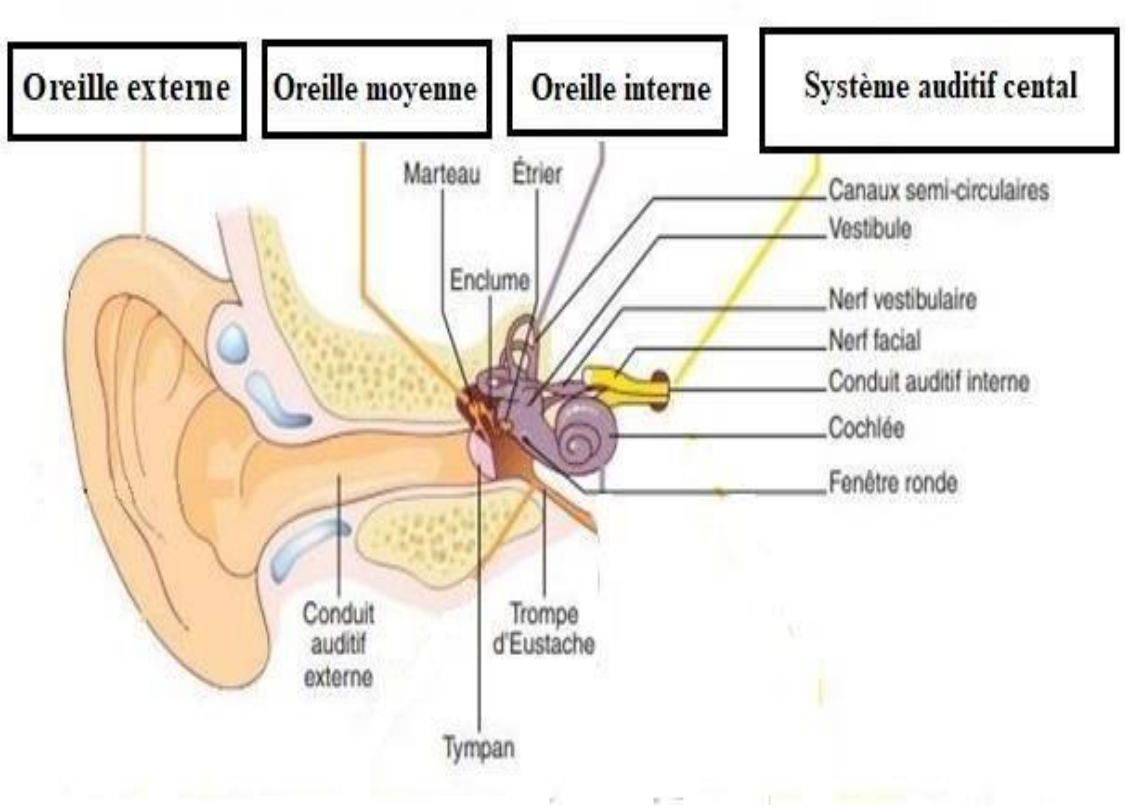


Figure 1 : Anatomie et physiologie du système auditif **[64]**.

I.2.1.1 L'oreille externe

L'oreille externe, composée du pavillon auriculaire et du conduit auditif, représente une double entité fonctionnelle et esthétique. Cet organe d'architecture complexe intervient en effet dans la localisation et la transmission de l'onde sonore, et participe à l'amplification de certaines fréquences.

A. Le pavillon

Le pavillon de l'oreille est un organe pair situé sur le côté du crâne, il est composé de reliefs et de creux formés de cartilage (voir figure 2). Son positionnement crée un angle d'environ 30 degrés par rapport au plan mastoïdien. Il focalise le son dans le conduit auditif **[1]**.

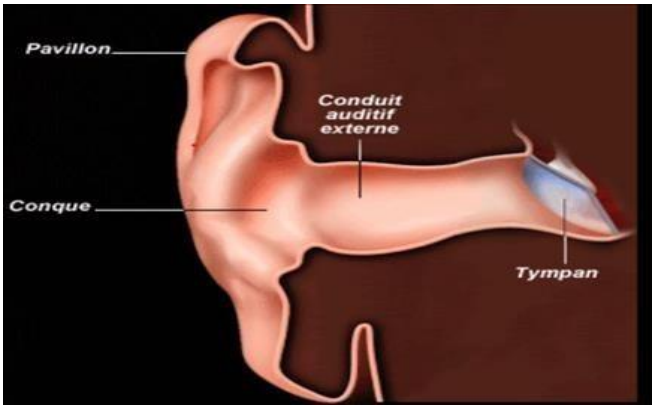


Figure 2 : Vue latérale du pavillon de l'oreille **[1].**

B. Le conduit auditif externe

C'est une structure tubulaire qui s'étend à partir du pavillon de l'oreille et se termine par le tympan. Il a une forme légèrement courbée vers l'avant et vers le haut, mesurant environ 3 cm de longueur et 7 mm de diamètre en moyenne, il est formé en dehors d'une portion cartilagineuse, en dedans d'une portion osseuse (Voir figure 3). Le conduit auditif externe permet la propagation des ondes sonores sous forme de flux laminaire, où les couches de fluides se déplacent les unes sur les autres sans échange de matière.

Du fait de sa géométrie, toutes les fréquences ne sont pas transmises de manière linéaire. Elle favorise les fréquences de 2kHz à 5kHz qui arrivent au tympan avec une intensité 2 fois supérieure à l'entrée du canal auditif **[2]**.

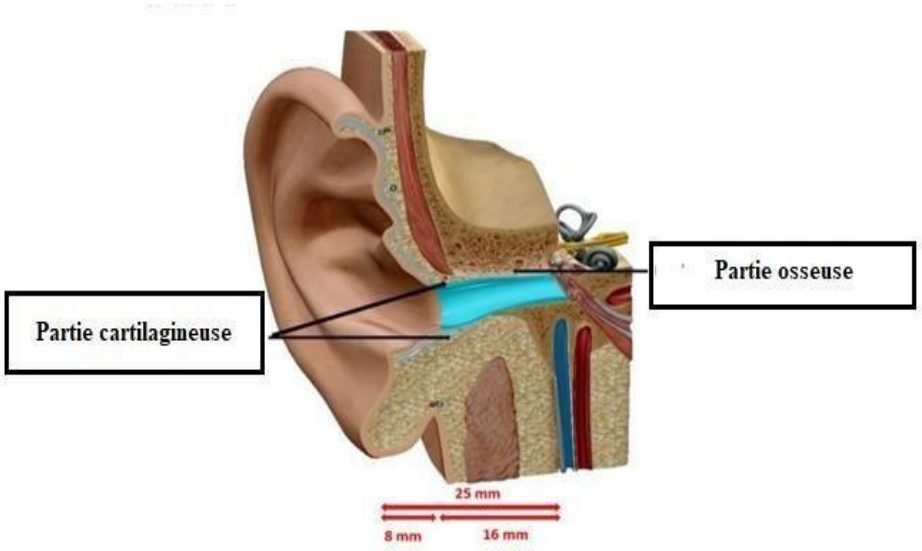


Figure 3: Coupe frontale du conduit auditif externe **[3]**.

I.2.1.2 L'oreille moyenne

L'oreille moyenne est une cavité aérienne tripartite interposée entre l'oreille externe et l'oreille interne. Elle permet la transmission des vibrations sonores du tympan à l'oreille interne. Elle est formée par trois parties : la caisse du tympan, la mastoïde et la trompe d'Eustache.

A. La caisse du tympan : Elle s'interpose entre l'oreille externe et l'oreille interne (voir figure 4), elle a la forme d'une lentille biconcave. Elle est traversée par une chaine d'osselets articulaires entre eux, et présente six parois.



Figure 4 : Le tympan **[4]**.

a) **Les parois :** La caisse du tympan est entourée de six parois, chacune ayant une structure et une fonction spécifiques comme il est illustré dans la figure ci-dessous.

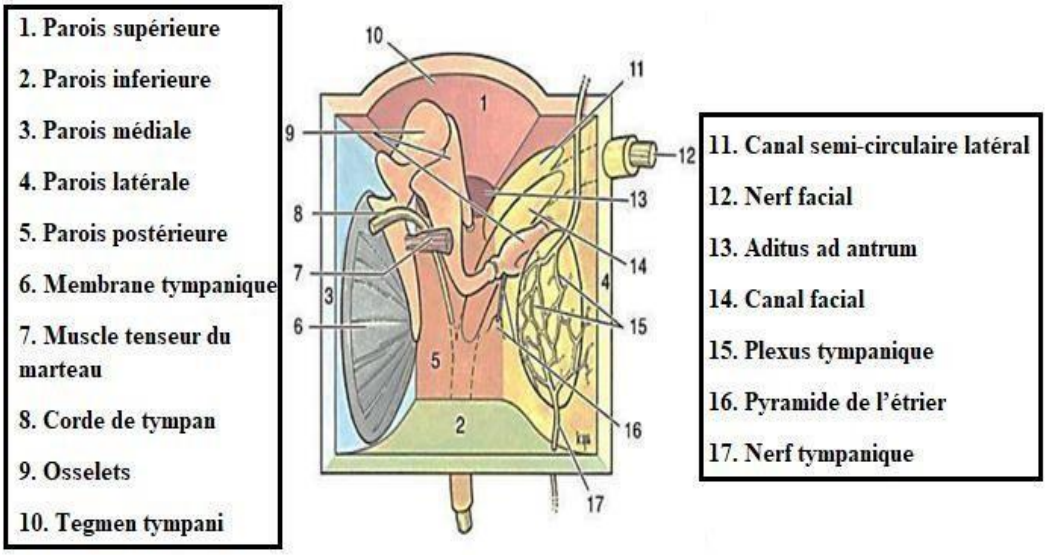


Figure 5 : Caisse de tympan, vue schématique**[4].**.

1. **La paroi latérale ou membraneuse :** Elle sépare le canal auditif externe de la caisse du tympan, elle est divisée en deux parties : une partie osseuse et une membraneuse.
2. **La paroi interne ou labyrinthique :** C'est une structure osseuse mince et fragile qui contient deux ouvertures importantes : la fenêtre ovale et la fenêtre ronde. La fenêtre ovale est recouverte par le stapes, qui est le dernier osselet de la chaîne ossiculaire dans l'oreille moyenne. Les vibrations sonores sont transmises à travers la chaîne ossiculaire jusqu'au stapes, qui se déplace ensuite dans la fenêtre ovale pour stimuler les liquides dans la cochlée et déclencher une réponse nerveuse. La fenêtre ronde,

quant à elle, agit comme une valve de pression pour l'oreille interne. Lorsque le stapes se déplace dans la fenêtre ovale, il crée une pression dans les liquides de la cochlée. La fenêtre ronde permet à cette pression de se dissiper en se déplaçant légèrement dans la direction opposée au stapes.

3. **La paroi antérieure ou carotidienne :** Cette paroi sépare la caisse de tympan de la partie antérieure de l'os temporal dans le crâne. Elle contient un canal appelé le canal semi-circulaire antérieur, qui fait partie du système vestibulaire de l'oreille interne et aide à maintenir l'équilibre.
4. **La paroi postérieure ou mastoïdienne :** Elle présente à sa partie supérieure un orifice « l'aditus ad antrum » qui fait communiquer le cavum avec l'antre mastoïdien.
5. **La paroi supérieure ou tegmentale :** Cette paroi sépare la caisse de tympan de la cavité crânienne. Elle est mince et fragile, et peut être endommagée en cas de traumatisme crânien.
6. **La paroi inférieure ou jugulaire :** Elle sépare la caisse de tympan de la cavité buccale. Elle est plus épaisse que la paroi supérieure et contient un canal appelé le conduit auditif externe.

b) **Contenue de la caisse :** La chaine ossiculaire est formée de 03 Os, de taille de l'ordre du mm (voir figure 6). Ces os, le marteau (malleus), l'enclume (incus) et l'étrier (stapes), sont reliés entre eux par des articulations et forment une chaîne qui amplifie les vibrations sonores.

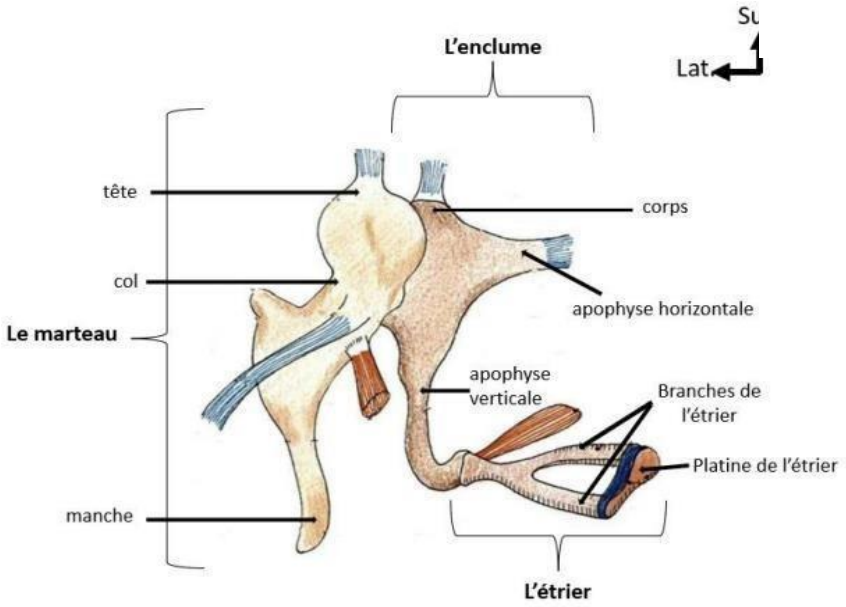


Figure 6 : Vue antérieure des osselets **[3]**.

B. La mastoïde

L'apophyse mastoïde est une structure osseuse située à la partie inférieure et postérieure de l'os temporal, juste derrière le conduit auditif externe et sous le pavillon de l'oreille. Elle contient principalement des cavités aériennes qui sont reliées à l'oreille moyenne. L'antre mastoïdien, la plus grande de ces cavités, est située à proximité de la caisse du tympan et communique avec elle par l'intermédiaire de l'aditus ad antrum. L'apophyse mastoïde est composée de nombreuses cellules aérées, dont l'antre mastoïdien est la plus volumineuse.

C. La trompe d'Eustache

La trompe d'Eustache est un conduit cartilagineux qui relie l'oreille moyenne à la partie postérieure du nasopharynx, la partie supérieure de la gorge, juste derrière les cavités nasales. Elle joue un rôle crucial dans l'équilibrage de la pression de l'air entre l'oreille moyenne et l'extérieur, ainsi que dans le drainage des fluides de l'oreille moyenne vers la gorge.

I.2.1.3 L'oreille interne

L'oreille interne ou labyrinthe est la partie la plus profonde de l'oreille, située dans l'os temporal du crâne. Elle est composée de deux parties principales (voir figure 7) :

1. Vestibule et canaux semi-circulaires : organes de l'équilibre.
2. Cochlée ou limaçon : organe de l'audition.

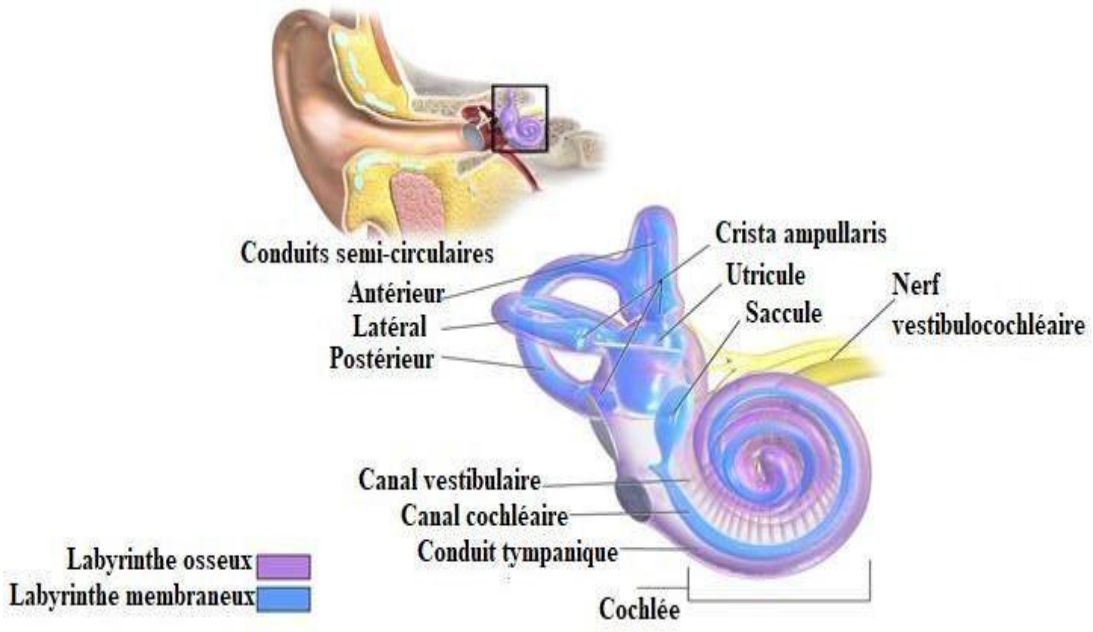


Figure 7 : L'oreille interne **[6].**.

I.2.1.3.1 Le vestibule

C'est l'organe de l'équilibre. Il est composé de trois canaux semi-circulaires et de deux sacs (utricule et saccule) remplis de liquide. Les canaux semi-circulaires sont sensibles aux

mouvements de rotation de la tête, tandis que les sacs sont sensibles aux mouvements linéaires. Les informations sur les mouvements de la tête sont transmises au cerveau via le nerf vestibulaire, qui permet de réguler l'équilibre et la posture (Voir figure 8).

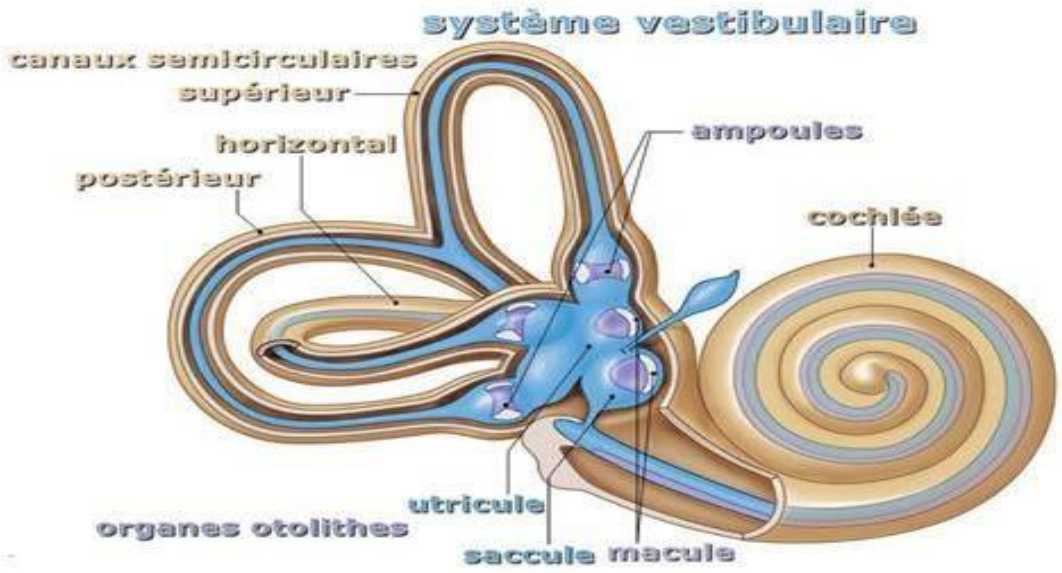


Figure 8 : Système vestibulaire **[6]**.

I.2.1.3.2 La cochlée

La cochlée est l'organe de l'audition situé dans l'oreille interne. Elle est composée d'une partie osseuse en forme de coquille d'escargot, appelée le limaçon, qui est enroulée sur deux tours et demi autour d'un cône virtuel creux appelé la columelle ou modiolus, à partir duquel émerge le nerf cochléaire. À l'intérieur du limaçon se trouve une lame osseuse spirale qui divise le tube en deux compartiments appelés rampes : la rampe vestibulaire en haut et la rampe tympanique en bas. Les deux rampes sont remplies de périlymphe et communiquent entre elles par une petite ouverture appelée hélicotrème, située à l'apex de la cochlée. Entre les deux rampes se trouve le canal cochléaire, un compartiment clos de forme triangulaire, limité en haut par la membrane de Reissner et en bas par la membrane basale, qui s'insère sur le bord libre de la lame spirale. La rampe vestibulaire est fermée à sa base par la platine de l'étrier, tandis que la rampe tympanique aboutit à la fenêtre ronde, fermée par une membrane élastique ou le tympan secondaire, qui sert d'échappement de pression **[5]**. Ainsi se trouve délimités 3 canaux :

1. Antérieur : rampe vestibulaire,
2. Postérieur : rampe tympanique,
3. Intermédiaire : canal cochléaire.

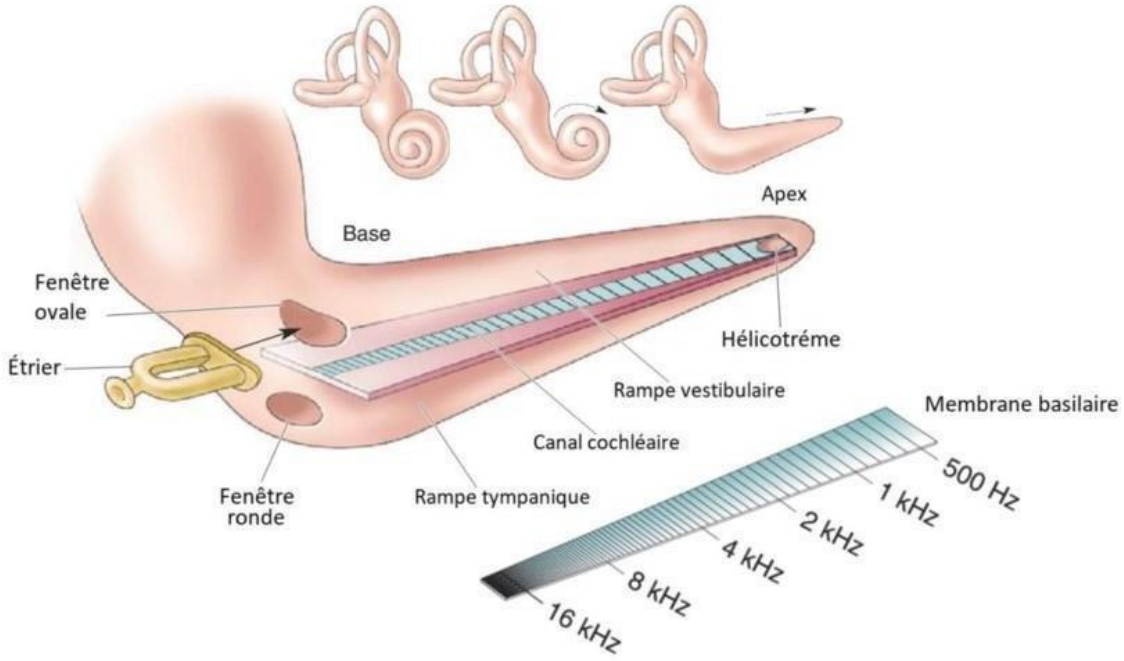


Figure 9 : La membrane basilaire dans une cochlée déroulée et la tonotopie passive**[6]**.

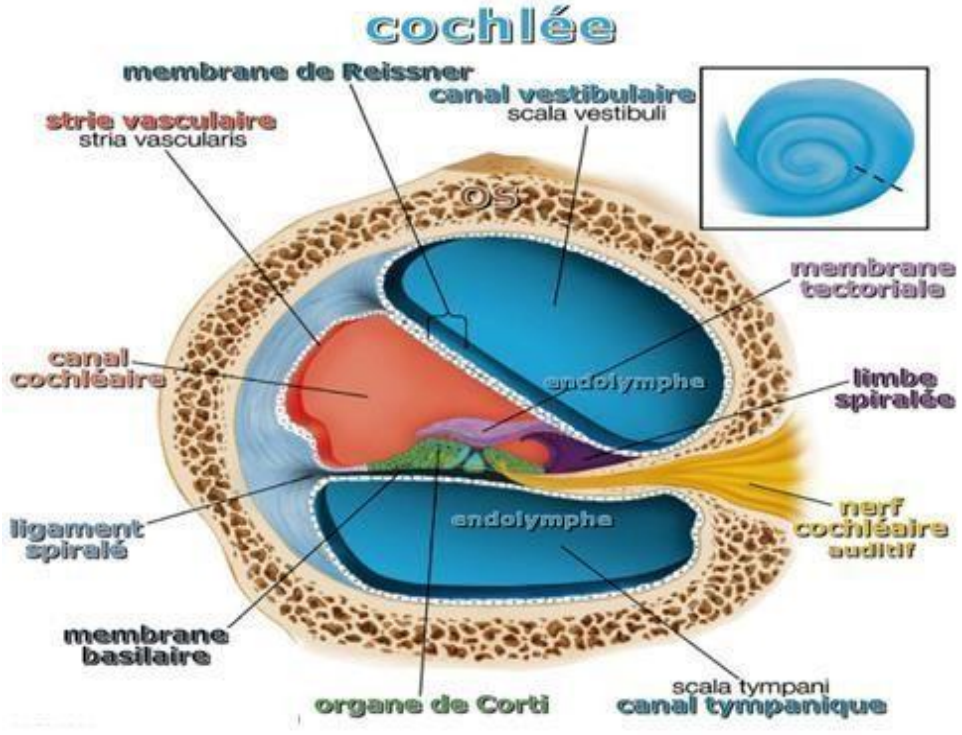


Figure 10 : La cochlée **[65]**.

a. Le canal cochléaire

Le canal cochléaire est un tube de 30 mm de long de section triangulaire, a parois conjonctives comme il est représenté dans la figure 11.

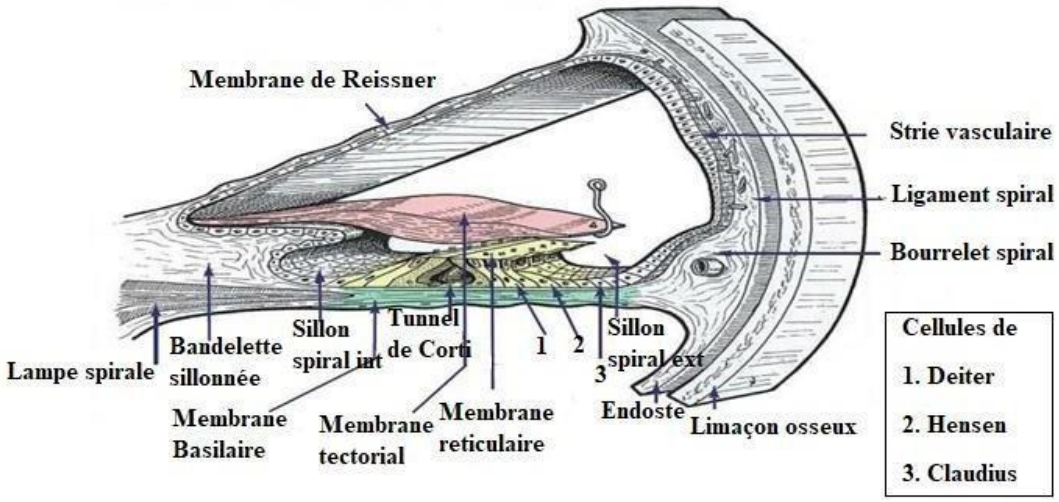


Figure 11 : Le canal cochléaire**[7]**.

1. Paroi antérieure ou vestibulaire ou membrane vestibulaire de Reissner.
2. Paroi externe : Elle est formée par le ligament spiral. Celui-ci représente une zone d'adhérence entre le canal cochléaire et l'endoste du limaçon. À ce niveau existe une trame fibreuse conjonctive constituant une véritable éponge imprégnée de périlymphe de haut en bas. La face interne du ligament spiral est marquée par quatre reliefs : La crête où s'insère la membrane de Reissner ; la strie vasculaire, seul épithélium vascularisé de l'organisme constitué par un épaississement de la paroi latérale lié à la présence de nombreux vaisseaux. Ce serait le lien principal supposé de la sécrétion d'endolymphe ; le bourrelet spiral soulevé par un canal veineux ; la crête basilaire où s'insère la membrane basilaire. Entre le bourrelet spiral et la membrane basilaire il y a une dépression c'est le sillon spiral externe.
3. Paroi inférieure : Elle sépare le canal cochléaire de la rampe tympanique. Elle est Constituée par la membrane basilaire tendue entre la lame spirale osseuse et la crête basilaire du ligament spiral. Sur la membrane basilaire se pose l'organe de Corti **[7]**.

b. Organe de Corti

L'organe de Corti est une structure cellulaire complexe disposée le long de la membrane basilaire (voir figure 12). Il est constitué par des cellules sensorielles non renouvelables surmontées de microvillosités (stéréocils) et des cellules de soutien **[5]**.

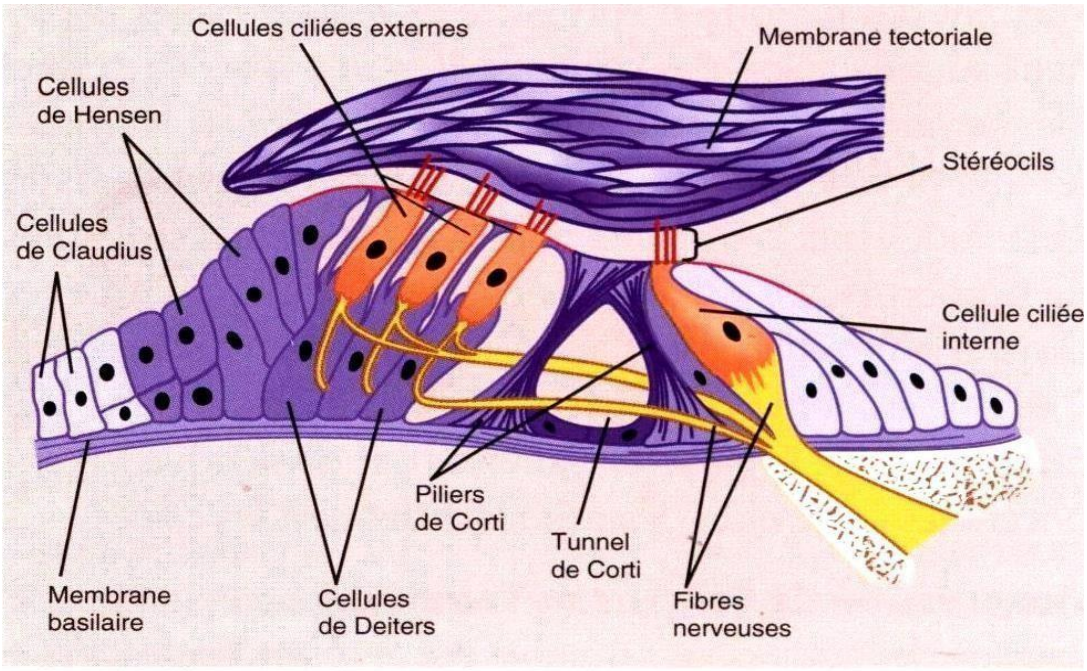


Figure 12 : L'organe de Corti **[6]**.

- **Les cellules sensorielles :** Elles comprennent trois rangées de cellules ciliées externes (CCE) et une rangée de cellules ciliées internes (CCI) (voir figure 11). Les CCE sont disposées en forme de W et ont des propriétés contractiles qui permettent de moduler la tension entre la lame basilaire et la membrane tectoriale, assurant ainsi la sélectivité fréquentielle. Les CCI, quant à elles, sont responsables de la transduction mécano-électrique, c'est-à-dire qu'elles convertissent les vibrations sonores en signaux électriques qui sont ensuite transmis au cerveau. En somme, les CCE jouent un rôle dans l'ajustement de la fréquence sonore, tandis que les CCI sont les véritables cellules sensorielles qui transmettent les signaux sonores au cerveau **[5]**.
- **Les cellules de soutien** (voir figure 13) **:** entourent complètement les cellules ciliées internes et sont constituées de : Cellules de Deiters et les cellules de Hensen (voir figure 10). Les cellules de Deiters sont situées sur la membrane basilaire et leur pôle supérieur déprimé en cupule reçoit et ancre solidement la base des cellules ciliées externes. Leur apex émet un prolongement (phalange) dont l'extrémité supérieure s'élargit en plateau et comble les espaces en "haltère" séparant les cellules ciliées. Les cellules de Hensen, quant à elles, sont placées en dehors des cellules de Deiters et tapissent la lèvre interne du sillon spiral externe **[5]**.
- **La membrane tectoriale :** Membrane qui a un rôle important dans la physiologie de l'audition, solidement fixée en dedans sur la bandelette sillonnée.

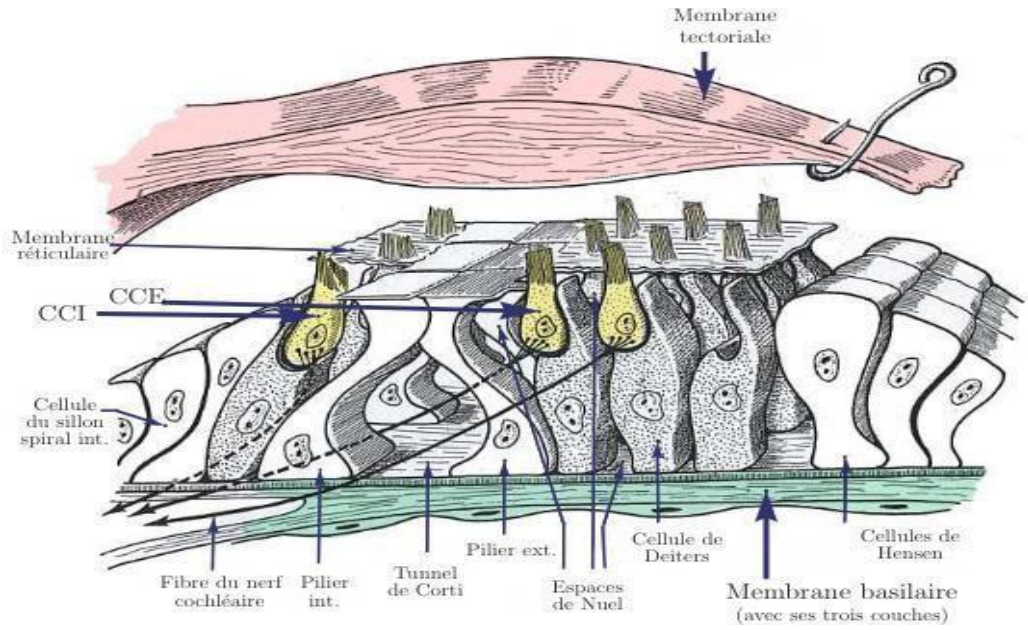


Figure 13 : Organe de corti [**8]**.

- **Les fibres nerveuses :** Ce sont des prolongements de neurones qui permettent de transmettre des signaux à travers le corps. Elles se rassemblent dans le nerf cochléaire rejoignant le nerf vestibulaire pour former le nerf auditif (nerf de perception VIII).

c. Le nerf auditif

Le nerf auditif est un nerf sensoriel formé de deux parties comme le montre la figure 14. Ce dernier est constitué de deux branches :

1. **Le nerf cochléaire :** Il recueille dans l'oreille interne les informations auditives. Il est composé d'approximativement 30 000 fibres nerveuses. La partie cochléaire du nerf auditif est chargée de transmettre les signaux correspondant aux ondes sonores de l'oreille interne au cerveau.
2. **Le nerf vestibulaire :** Il reçoit les informations concernant le maintien de l'équilibre. La partie cochléaire du nerf auditif est chargée de transmettre les signaux correspondant aux ondes sonores de l'oreille interne au cerveau **[9]**.

Ces deux branches sont constituées de fibres nerveuses qui acheminent les signaux électriques produits par les cellules sensorielles de l'oreille interne vers le tronc cérébral. Le cerveau les interprète ensuite pour que nous puissions entendre et garder l'équilibre.

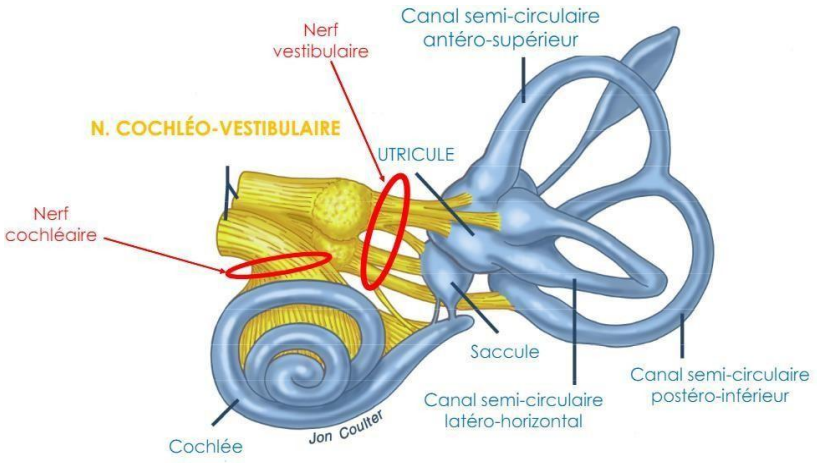


Figure 14 : Oreille interne montrant le nerf auditif **[10]**.

d. Les centres nerveux

Les impulsions électriques sont transmises au cerveau par le nerf auditif à partir des informations reçues, le cerveau nous donne la sensation d'entendre puis progressivement identifie les bruits et la parole à conditions d'avoir appris à les connaître.

Il faut également savoir que le stock de cellules ciliées est acquis pour chaque être humain avant la naissance et disparaîtra progressivement avec l'âge, aucune régénération n'est possible **[2]**.

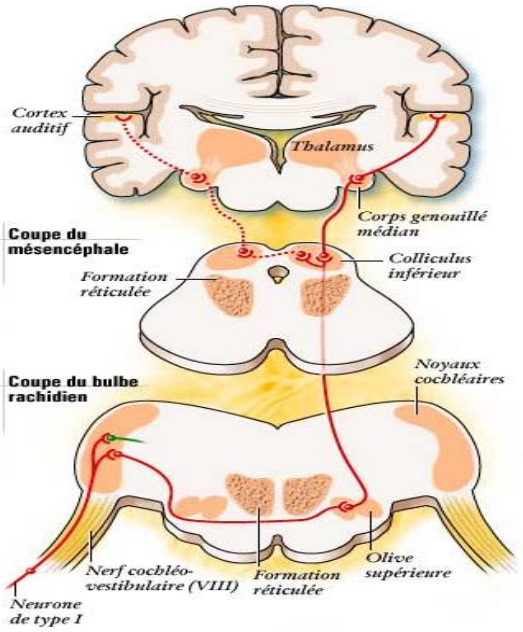


Figure 15 : Le système nerveux et l'audition **[2]**.

Les signaux électriques créent par les cellules ciliées stimule le nerf auditif qui enverra un message nerveux au cerveau, ce message est réceptionné dans le cortex auditif (zone orangée du schéma). L'audition utilise plusieurs voies (primaires et secondaires) pour décoder le message électrique envoyé par la cochlée, ce message passe tout d'abord par le nerf cochléaire puis passe par différents neurones qui le décodent et l'interprète succinctement puis il est envoyé au thalamus puis enfin au cortex auditif **[2]**.

I.3 Physiologie de l'audition

I.3.1 Définition de son

Le son (voir figure 16) est une onde acoustique qui résulte d'une vibration mécanique d'un milieu environnant, qu'il soit solide, liquide ou gazeux. Cette vibration se propage grâce à l'élasticité du milieu sous forme d'onde longitudinale, avec une période P et une intensité I. Les variations de pression associées à cette onde sont appelées pression acoustique et sont perçues par l'oreille humaine, qui les interprète comme un son. Le son représente la partie audible du spectre des vibrations acoustiques.

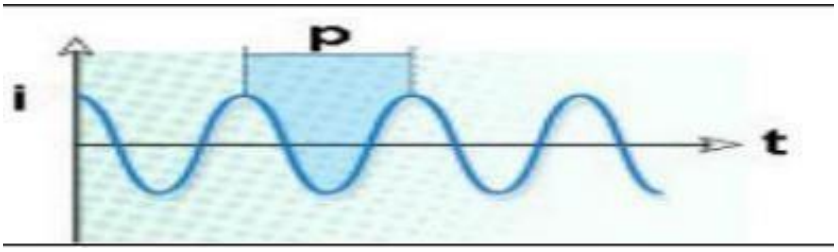


Figure 16 : Image d'un son pur **[11]**.

I.3.2 Les propriétés physiques du son

Une onde sonore est caractérisée par les données physiques suivantes :

a. **La fréquence :** La fréquence d'une onde correspond au nombre de cycles qu'elle va effectuer en une seconde, c'est-à-dire le nombre de fois où le mouvement se reproduit identique à lui-même pendant une seconde. Elle est mesurée en Hertz (Hz), où 1 Hz = 1 cycle par seconde. Un cycle complet correspondant à la durée entière d'une vibration est appelé période (T). Elle correspond à l'inverse de la fréquence :

$$F = \frac{1}{T} \qquad (1)$$

L'oreille humaine est sensible aux sons dont la fréquence est comprise entre 20 et 20 000 Hz, en dessous de 20Hz ce sont des infrasons perçus non plus comme des sons mais comme des vibrations, au-delà de 20 000 Hz ce sont des ultrasons.

- De 20 à 200 Hz ce sont les fréquences graves.
- De 200 à 2000 Hz ce sont les fréquences moyennes ou medium.
- De 2000 à 20 000 Hz ce sont les fréquences aiguës.

Remarque : Plus un son est aigu, plus sa fréquence est élevée et plus un son est grave, plus sa fréquence est faible comme il montre la figure 17 **[9]**.



Figure 17 : Bande de fréquences **[9]**.

b. L'intensité : Le niveau d'intensité, ou sonie, correspond à l'énergie transmise à l'oreille par la vibration aérienne, elle pourrait être exprimée en puissance par unité de surface (Watts/m^2 ou cm^2) ou en pression vibratoire(Pascal). En pratique, ce niveau est exprimé en décibels (dB).

$$F = 10.\log \frac{I}{I_0}(dB) \qquad (2)$$

Avec :

$I_0 = 10^{-12}$W/m2 : intensité du seuil d'audibilité

L : l'intensité exprimé en Décibel (dB) **[11]**.

c. La célérité : La vitesse (v) d'une onde est appelée célérité. Elle s'exprime en mètre par seconde. Elle dépend de la nature de l'onde, et des caractéristiques physiques du milieu où elle se propage. Le son se déplace à 340 m/s dans l'air (1 224 Km/h), 1 500 m/s dans l'eau. Plus le milieu est dense, plus cette vitesse est grande **[11]**.

Dans un gaz réel, la vitesse de son est présenté par la formule de Laplace (1749-1827) qui permet de calculer la célérité d'un son dans un gaz réel :

$$C = \frac{1}{\sqrt{x.P}} \qquad (3)$$

Avec :

P est la pression et x est le coefficient adiabatique d'un gaz.

La célérité c d'un gaz réel dépend donc de sa pression P.

d. L'amplitude : Elle détermine la puissance du son, c'est l'élongation maximum de l'onde sonore. Plus l'amplitude est grande plus le son est fort. Notons que l'amplitude de la vibration décroît avec la distance, car l'énergie de l'onde se répartit dans un volume qui s'accroît.

On définit l'octave comme l'intervalle entre deux sons purs dont le rapport des fréquences est de 2 (équation 4). Dans ces conditions, si H1 et H2 correspondent à deux sensations de hauteur produites par deux sons purs distants d'une octave, on a :

$$H_1 - H_2 = 1000.\log\frac{2.f}{f} = 301 \qquad (4)$$

Il existe donc 301 sensations de hauteur différentes dans une octave. Un sujet normal peut distinguer des hauteurs sonores au sein d'environ 5 octaves, soit environ 1500 niveaux sonores distincts **[21]**.

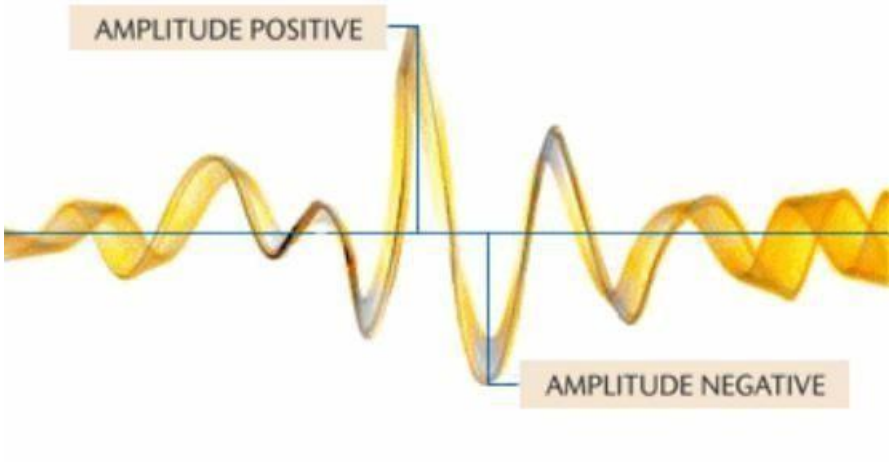


Figure 18 : Représentation de l'amplitude d'une onde acoustique**[20]**.

e. Timbre : Le timbre est constitué de toutes les fréquences du son sauf sa fréquence fondamentale. Il permet d'identifier un son d'une façon unique. Deux sons peuvent

avoir la même fréquence fondamentale et la même intensité mais deux timbres différents. C'est grâce à cette différence de timbre qu'on distingue une même note jouée au piano et au violon. C'est aussi au timbre qu'on reconnaît la voix d'une personne.

f. **Longueur d'onde :** La longueur d'onde est la distance séparant deux molécules successives dans le même état vibratoire (même pression et vitesse acoustique) ou encore la distance parcourue par l'onde pendant une période. (Figure 19)

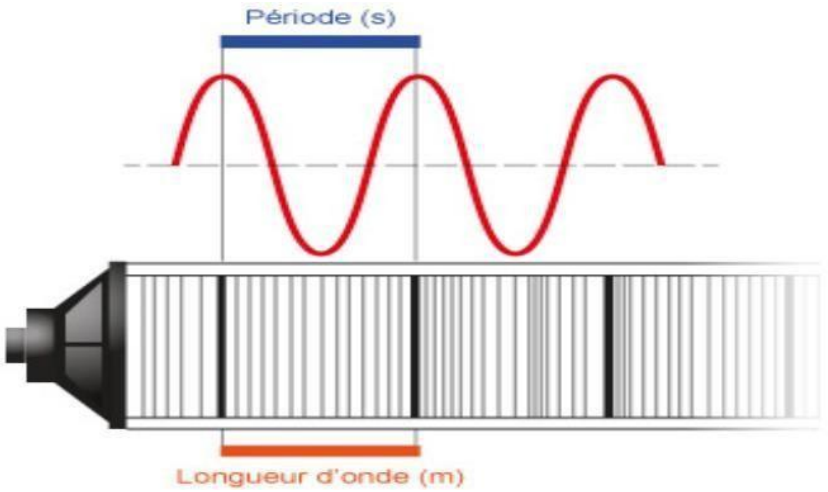


Figure 19 : Représentation de la longueur d'onde **[20]**.

g. **L'impédance acoustique :** Chaque milieu est caractérisé par une résistance au passage du son appelée impédance acoustique. Dans le cas général, elle correspond au rapport entre la pression acoustique en ce point (attention il ne s'agit pas de la célérité du son). Dans le cas d'une onde plane, il est possible d'estimer une valeur de l'impédance par la formule :

$$Z = \rho.c \qquad (5)$$

Où : Z est l'impédance acoustique caractéristique du milieu ($kg.m^{-2}.s\text{-}^{1}$),

ρ la masse volumique du milieu ($kg.m^{-3}$) et c la célérité du son ($m.s^{-1}$).

Ainsi, l'impédance de l'air est d'environ 444 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ et celle de l'eau de 1,5.106 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ soit un rapport de 3,4.103. Cette notion est importante pour comprendre la réaction d'une onde sonore se propageant d'un milieu aérien vers un milieu liquidien. Au contact du milieu d'impédance élevée une partie importante de l'onde sera réfléchie **[20]**.

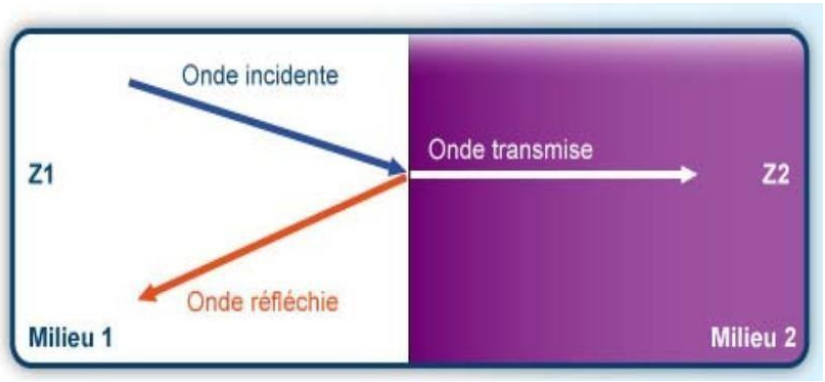


Figure 20 : Représentation schématique de l'impédance acoustique **[20]**.

I.3.3 La perception auditive

L'audition est le sens qui permet de capter les vibrations sonores émises dans l'environnement sous forme d'ondes se propageant dans l'air. Chez l'être humain, l'audition joue un rôle essentiel dans les échanges sociaux et la communication grâce au développement de la parole. L'audition résulte de la collaboration entre l'oreille et le cerveau auditif. Sans oreille, il est impossible de percevoir les sons, tandis qu'une oreille sans cerveau est comme un microphone déconnecté. La parole est le moyen de communication privilégié et l'oreille joue un rôle crucial dans son contrôle tout au long de la vie. En cas de perte auditive, les personnes malentendantes ont tendance à élever la voix et dans les cas de surdité profonde, la parole peut être absente ou altérée en raison de l'absence de contrôle auditif.

I.3.4 Transmission des ondes sonores

Lorsqu'une onde mécanique, telle qu'une onde sonore, atteint l'oreille, elle est transformée en onde électrique grâce à un processus complexe impliquant plusieurs parties de l'oreille. Tout d'abord, l'onde sonore pénètre dans l'oreille externe et se dirige vers le tympan, qui se met à vibrer sous l'effet de l'onde. Ces vibrations sont ensuite transmises à l'oreille moyenne, où elles sont amplifiées par les osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier). Ensuite, les vibrations atteignent l'oreille interne, où elles sont transformées en signaux électriques par les cellules ciliées de la cochlée. Ces cellules ciliées sont des cellules sensorielles spécialisées qui contiennent des stéréocils, des structures en forme de poils qui se déplacent sous l'effet des vibrations. Lorsque les stéréocils se déplacent, ils stimulent les cellules ciliées, qui transmettent alors des signaux électriques au nerf auditif. Le nerf auditif transmet ensuite ces signaux électriques au cerveau, où ils sont traités et interprétés comme des sons. Ce processus de transformation d'une onde mécanique en onde électrique est essentiel pour l'audition et permet de percevoir les sons de l'environnement (voir la figure 21).

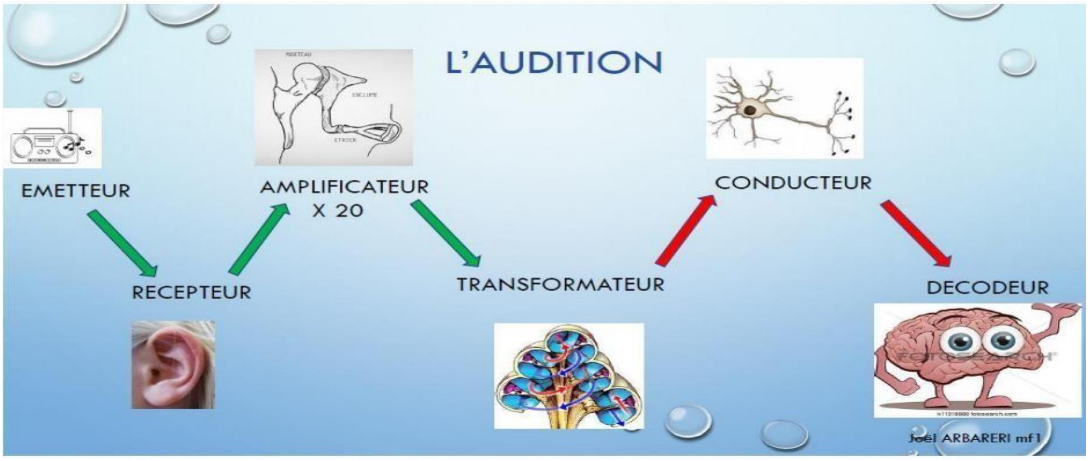


Figure 21 : Transmission des ondes sonores **[12]**.

I.4 La surdité

I.4.1 Définition de la surdité



Figure 22 : La surdité **[10]**.

La surdité, étant le handicap sensoriel le plus fréquent, est largement étudié pour comprendre ses mécanismes et ses origines. Dans de nombreux cas, son étiologie est attribuée à des facteurs génétiques. Cette connexion génétique est complexe car elle implique une multitude de gènes, chacun contribuant d'une manière spécifique aux diverses formes de surdité. Ces gènes peuvent être impliqués dans le développement des structures auditives dès la période prélinguale (avant l'acquisition du langage) ou postlinguale (après l'acquisition du langage). Ils jouent un rôle de crucial dans la formation et le fonctionnement des cellules ciliées de l'oreille interne, la transmission des signaux auditifs le long du nerf auditif et leur traitement dans le cerveau. En raison de cette diversité génétique, il existe des formes surdité isolée où la perte auditive est le seul symptôme apparent, sans être associée à d'autres troubles de santé **[13]**.

I.4.2 Les types de la surdité

La surdité est une condition complexe qui se manifeste sous différentes formes, chacune étant définie par plusieurs critères tels que l'origine de la lésion, le niveau de perte auditive, la présence unilatérale ou bilatérale, le moment où elle apparaît, ainsi que son étiologie.

La Figure 23 représente schématiquement ces critères dans une perspective de prise en charge.

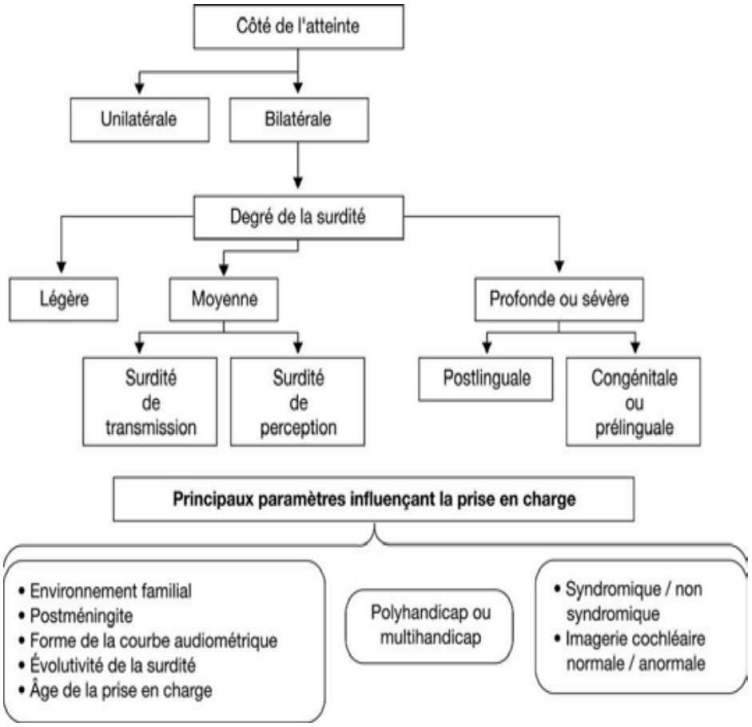


Figure 23 : Arbre décisionnel pour la classification des surdités **[20]**.

1) Surdité de transmission

Les déficiences auditives de transmission résultent d'une atteinte de l'oreille externe et/ou moyenne, entraînant une perte auditive due à une défaillance de la stimulation mécanique qui n'atteint pas la cochlée. Ce type de déficience peut être causé par un bouchon de cérumen, une malformation de l'oreille externe ou des osselets, ainsi que par des otites. L'oreille interne reste intacte et perçoit les vibrations sonores transmises par voie osseuse (la mesure de l'audition révèle une diminution de la conduction aérienne, tandis que la conduction osseuse est normale). La perte auditive peut varier de 20 décibels pour un bouchon de cérumen à 60 décibels pour une malformation de l'oreille externe ou moyenne. Les patients peuvent être traités par des méthodes médicamenteuses ou chirurgicales, et la déficience est généralement réversible **[14]**.

2) La surdité neurosensorielle ou de perception

Elle est liée à une atteinte de l'oreille interne, et parfois du nerf auditif qui relie l'oreille interne au cerveau. Cette déficience est d'ordinaire permanente et nécessite une rééducation, avec une prothèse auditive. Les déficiences auditives de perception sont dues à une mauvaise perception du son au niveau de l'oreille interne, causée par des lésions de la cochlée (souvent des cellules ciliées de l'organe de Corti) ou du nerf auditif. Bien que l'oreille externe et moyenne fonctionnent normalement et transmettent correctement les vibrations sonores vers

l'oreille interne, celle-ci est incapable de convertir ces vibrations en impulsions électriques, empêchant ainsi leur transmission au cerveau où elles devraient être traitées. Ce type de déficience peut être causé par une anomalie génétique, une maladie contractée pendant la grossesse (rubéole, toxoplasmose, cytomégalovirus), des complications lors de l'accouchement (prématurité, anoxie), des méningites, des oreillons, un traumatisme acoustique, ou certains médicaments ototoxiques (aminosides). La déficience de perception se caractérise par une perte d'intensité (de 20 dB à plus de 100 dB) et une perte de définition du son (problèmes de distorsion et de discrimination). Ce type de déficience est irréversible et est traité à l'aide d'appareillages auditifs. Cependant, comme le soulignent plusieurs auteurs, les effets de distorsion de la sensation auditive limitent l'efficacité des appareillages audioprothétiques, qui ne parviennent jamais à restituer une audition normale **[15].**

3) La surdité mixte

La surdité mixte est une forme de déficience auditive qui combine une surdité de transmission et une surdité de perception. Elle résulte d'une atteinte simultanée de l'oreille externe et/ou moyenne (surdité de transmission) et de l'oreille interne (surdité de perception). Cette condition peut être causée par des facteurs comme des otites chroniques, des malformations de l'oreille, des traumatismes crâniens, ou des maladies qui affectent à la fois les structures mécaniques et nerveuses de l'oreille **[17]**.

I.4.3 Les degrés de la surdité

L'audiométrie permet de classer les surdités en évaluant l'acuité auditive. Cette classification repose sur la diminution quantitative de l'audition, sans prendre en compte les altérations qualitatives de la perception auditive, telles que la distorsion des sons. La sévérité des troubles auditifs varie de légères difficultés de perception de la parole (une perte de sensibilité de 41 à 55 dB entre 500 et 2000 Hz) à une incapacité totale d'entendre (une chute de 90 dB entre 500 et 2000 Hz). Cette évaluation aide à comprendre l'impact de la surdité sur la communication orale. Par exemple, les surdités congénitales et prélinguales, lorsqu'elles sont bilatérales et de niveau sévère à profond, entravent le développement linguistique. Elles limitent l'accès aux codes linguistiques, empêchent la catégorisation du discours, entravent le feedback auditif, et réduisent l'exposition aux modèles linguistiques de l'environnement **[18]**. Le tableau résume la classification générale des surdités et des effets provoqués par ces dernières sur l'audition.

Degrés de surdité	Les pertes	Les effets
Surdité normal ou subnormal	< 20 dB	Eventuellement atteinte tonale légère sans incidence.
Surdité légère	21 dB – 41 dB	La parole est perçue a voix normale, elle est difficilement perçue à voix basse et lointaine.
Surdité moyenne	41dB – 70dB	La parole est perçue si on augmente la voix. Le sujet comprend mieux en regardant les mouvements du locuteur.
Surdité sévère - 1er degré - 2eme degré	 - 71 dB – 80 dB - 81 dB – 90 dB	- La parole est perçue à voix forte près de l'oreille. - Les bruits forts sont perçus.
Surdité profonde	> 90 dB	Aucune perception de la parole. Seuls les bruits très puissants sont perçus.

Tableau 1 : Classification des surdités **[17]**.

Nous présentons les degrés de surdité sur un audiogramme (voir figure 24).

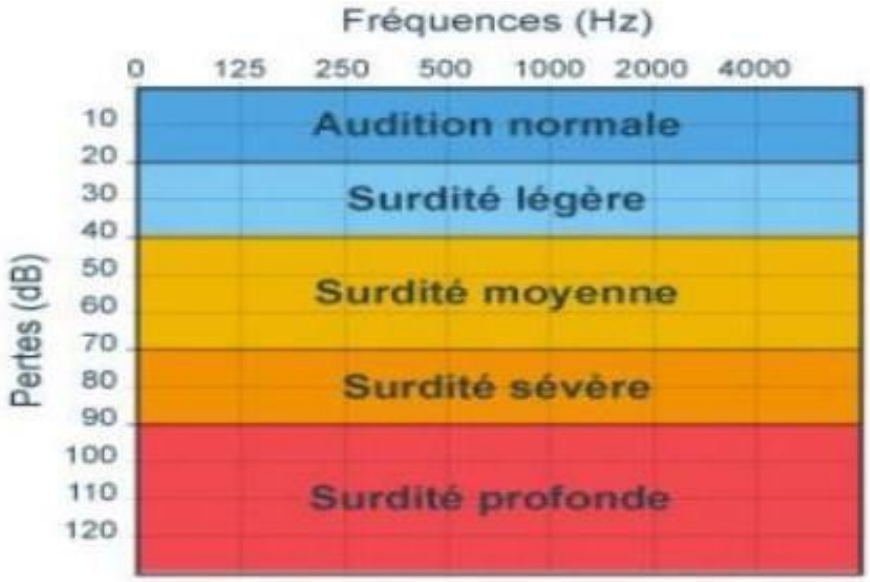


Figure 24: Les degrés de surdité **[12]**.

I.4.4 Les surdités de perception

L'affection touche la cochlée ou le nerf auditif. Ce type de surdité nécessite souvent des appareils auditifs ; et une prothèse devra être installée chez le patient le plus tôt possible afin qu'on stimule son système auditif durant cette période cruciale d'acquisition du langage, on distingue :

I.4.4.1 Les surdités endocochléaires

La surdité unilatérale brusque (SUB) : Ce sont des surdités brutales, surviennent de façon isolée, quelquefois des bourdonnements, voir une plénitude de l'oreille précède la surdité le tympan reste normal, les épreuves audiométriques confirment l'atteinte de l'OI prédominant sur les aigus, le recrutement est net.

1. **Les surdités Toxiques :** Ce sont avant tout les intoxications médicamenteuses par les ATB, de la famille des amino-glucosiques entrainent des surdités bilatérales. D'autres médicaments sont incriminés mais moins fréquents : Quinines et certains dérivés salicylés.
2. **La presbyacousie :** C'est une altération physiologique bilatérale de l'audition qui apparait vers 50 à 60 ans et qui s'aggrave ensuite progressivement.
3. **La maladie de Ménière :** Elles sont dues à un hydrops -labyrinthique et donne une surdité de perception et de grandes crises vertigineuses typiques précédées d'acouphènes annonçant le vertige rotatoire. L'évolution se fera par crise.
4. **Les surdités de perception infectieuses et inflammatoires :** Les labyrinthes toxiques aigues ou séreuses, en rapport avec un foyer inflammatoire ou infectieux de voisinage.

Les labyrinthites aigues suppurées traduisant l'envahissement bactérien de l'oreille interne, les OMCC en sont l'une des principales causes.

5. **Les surdités de perceptions virales :** Les labyrinthites virales se voient après les oreillons, certaines infections des VADS, mononucléose infectieuse, rubéole.
6. **Les surdités de perceptions traumatiques :** Les traumatismes accidentels, les traumatismes chirurgicaux.
7. **Les surdités génétiques :** Elles représentent environ 35% des surdités de l'enfant. Les surdités génétiques syndromiques et non syndromiques.

I.4.4.2 Les surdités Retro Cochléaires

1. **Les tumeurs de l'angle pontocérébelleux :** le neurinome de l'acoustique : Domine cette atteinte retro cochléaire, le diagnostic est évoqué devant toute surdité de perception unilatérale, parfois d'acouphènes unilatérales. L'IRM pose facilement le diagnostic **[18]**.

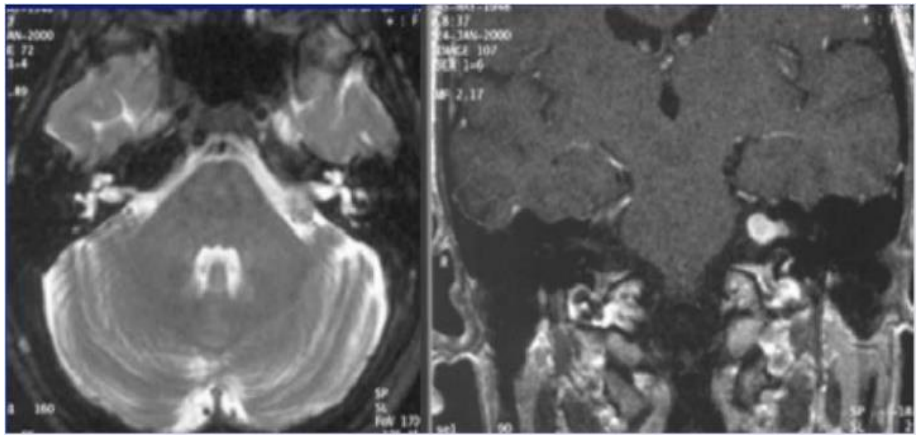


Figure 25 : IRM avec injection montrant tumeur de l'APC gauche évoquant un neurinome de l'acoustique [**14]**.

I.4.5 Les principales maladies

L'oreille peut être touchée par différentes maladies, cela au niveau de ses trois parties, la plus touchée étant l'oreille moyenne. La maladie de l'oreille la plus fréquente est l'otite. Ce terme englobe toutes les infections de l'oreille, même si l'otite peut atteindre séparément les trois parties de l'oreille et avoir des images cliniques complètement différentes. Il est important de bien différencier ces otites pour mieux les comprendre et les traiter.

A. Otite externe : C'est une infection aiguë et le plus souvent bactérienne de la peau du conduit auditif externe, le tympan ne participant pas ou peu à cette maladie. Pour

qu‘une otite externe se déclare, la peau du conduit auditif doit avoir été modifiée par un facteur extérieur, car normalement elle est capable de se défendre toute seule.

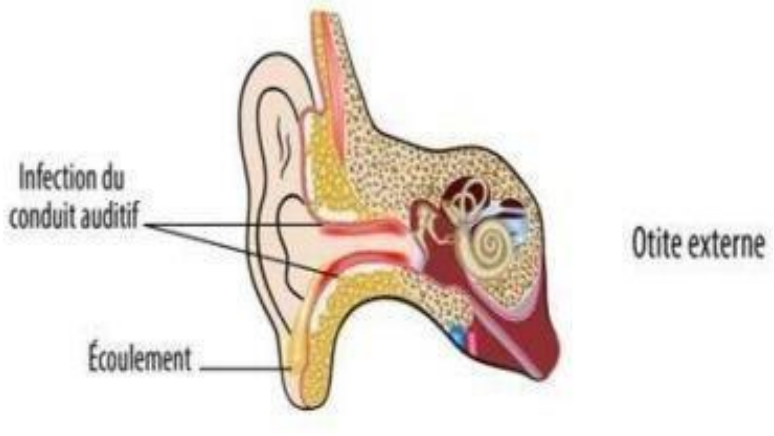


Figure 26 : Otite externe **[9]**.

B. Otite moyenne : L‘OMA est une infection aiguë, généralement d‘origine bactérienne, de la muqueuse de l‘oreille moyenne et des cavités qui l’entourent. Elle a une histoire naturelle favorable dans la majorité des cas.

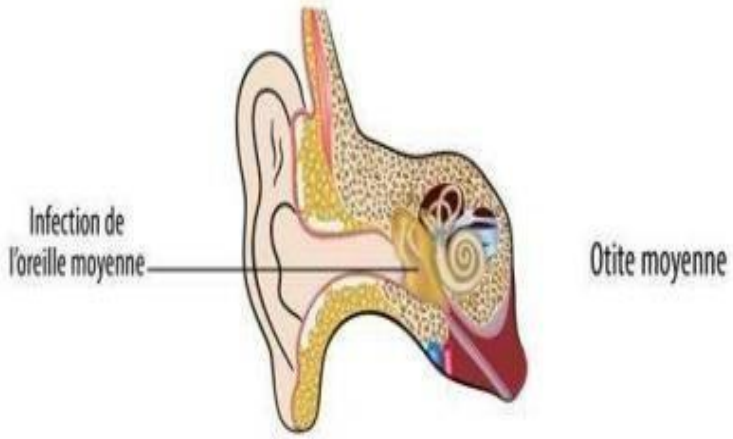


Figure 27 : Otite moyenne **[9]**.

C. Otite interne : C’est une infection rare et redoutée de l‘oreille interne, car elle provoque souvent des dégâts irréversibles se manifestant par une perte de l‘audition plus ou moins importante.

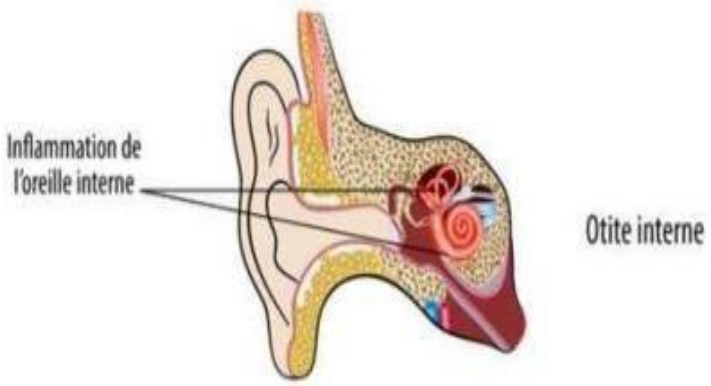


Figure 28 : Otite interne **[10]**.

I.4.6 Remèdes et traitements

Il existe différents types de surdité : certaines peuvent être traitées avec des médicaments, d'autres nécessitent une chirurgie, et d'autres encore ont besoin d'une aide auditive.

Toutes les surdités doivent être accompagnées d'une rééducation orthophonique adaptée.

Il est également important de prévenir les nuisances sonores et d'utiliser des aides pour faciliter la vie quotidienne des personnes malentendantes.

1. Traitements médicaux

Certains types de surdité, comme celles causées par des otites, nécessitent des antibiotiques et des anti-inflammatoires. Il est crucial d'utiliser certains médicaments et gouttes pour les oreilles avec précaution et uniquement sur ordonnance médicale, car certains peuvent être nocifs pour l'oreille.

2. Traitements chirurgicaux

Les traitements sont principalement indiqués pour les surdités de transmission :

- **Aérateurs tympaniques (yoyo)** : utilisés pour drainer l'oreille moyenne en cas d'otite séreuse, rétablissant la pression des deux côtés du tympan pour qu'il vibre correctement.
- **Greffe de tympan :** nécessaire quand le tympan est perforé.
- **Reconstruction des osselets :** pour réparer la chaîne de petits os dans l'oreille. Pour les surdités de perception, la chirurgie est seulement possible pour enlever une tumeur

sur le nerf auditif (neurinome acoustique). Les autres surdités de perception ne peuvent pas être traitées médicalement ou chirurgicalement. Seules les prothèses auditives ou les implants cochléaires sont des solutions efficaces.

I.5 Conclusion

L'audition humaine est un processus complexe qui dépend à la fois de la physique acoustique et de la médecine, en particulier de l'anatomie et de la physiologie de l'oreille. Malheureusement, ce système délicat peut être facilement endommagé, ce qui peut entraîner une perte auditive ou une surdité. Heureusement, il existe des technologies de pointe qui ont considérablement progressé, notamment grâce à la numérisation et à la miniaturisation. Dans le prochain chapitre, nous allons examiner de plus près l'une de ces technologies : les implants cochléaires.

Chapitre II

Implant cochléaire

II.1 Introduction

Le silence n'est pas toujours doré. Pour des millions de personnes dans le monde atteintes de surdité sévère à profonde, le silence est une réalité quotidienne, une barrière entre eux et le monde sonore qui les entoure. Mais grâce aux avancées de la technologie médicale, une lueur d'espoir perce désormais à travers cette obscurité auditive : les implants cochléaires. Les implants cochléaires, souvent décrits comme des "oreilles électroniques", sont des dispositifs révolutionnaires conçus pour restaurer partiellement l'audition chez les personnes souffrant de surdité sévère à profonde. Ces petites merveilles de la technologie sont bien plus que de simples appareils ; ils représentent un pont entre le silence et le son, offrant une nouvelle perspective sensorielle à ceux qui ont longtemps vécu dans un monde silencieux. Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur le fonctionnement des implants cochléaires, leur histoire fascinante. En plongeant dans ce domaine émergent de la médecine et de la technologie, nous découvrirons comment les implants cochléaires changent la vie de millions de personnes à travers le monde, en redéfinissant ce que signifie réellement entendre et écouter.

II.2 Définition des implants cochléaires

L'implant cochléaire est un dispositif électronique qui transforme l'énergie sonore en un signal électrique codé, transmis directement aux ganglions spiraux, court-circuitant ainsi les cellules cochléaires absentes ou non fonctionnelles. Ce signal est ensuite transmis par les voies auditives jusqu'au cortex auditif à l'aide de fines électrodes, ce qui permet au sujet de percevoir les sons. La mise en place des électrodes dans la cochlée et l'oreille interne, à travers le crâne, nécessite une intervention chirurgicale sous anesthésie **[22]**. L’intervention dure entre 90 et 120 minutes et nécessite quelques jours d’hospitalisation.

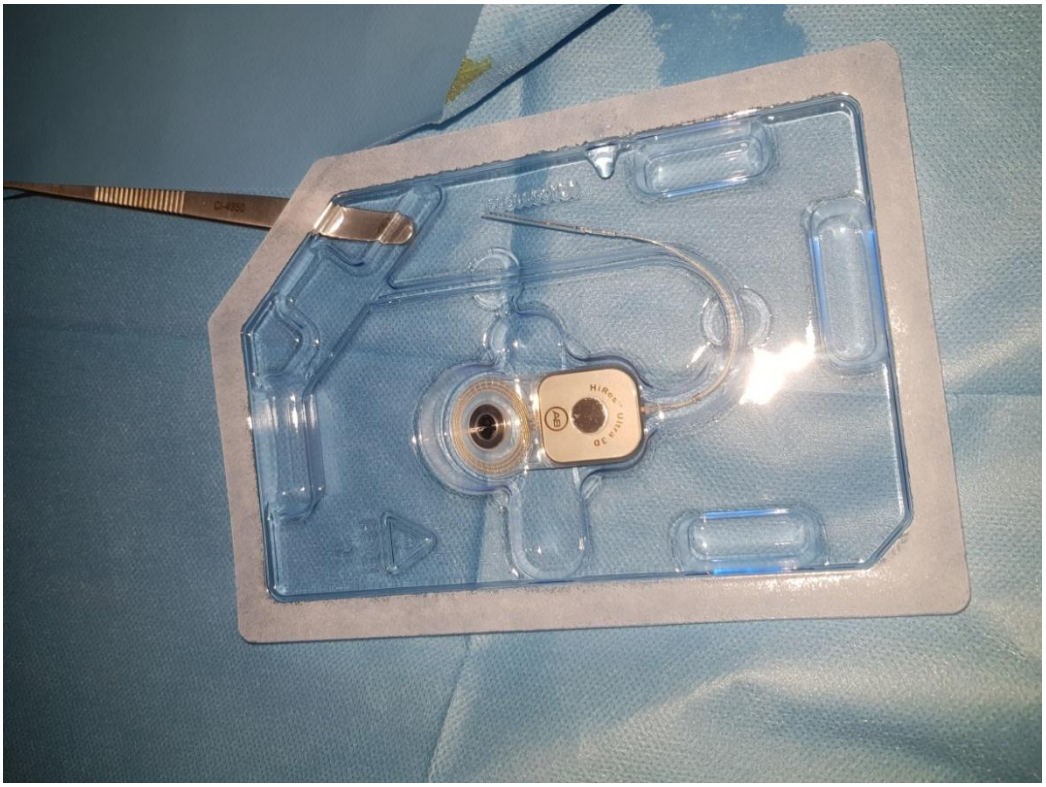


Figure 29 : Implant cochléaire après sa sortie de la boite (image prise à l'unité Belloua CHU Nedir Mohammed Tizi Ouzou).

II.3 Historique

En 1957 à Paris, Charles Eyriès et André Djourno réalisent les premières expérimentations d'implant cochléaire sur un patient sourd bilatéral. Malgré des résultats initialement prometteurs, des problèmes d'étanchéité provoquent l'échec de l'appareil.

Par la suite, W. House reprend les recherches en proposant une méthode d'implantation améliorée utilisant une électrode de stimulation placée par la fenêtre ronde. Bien que cette innovation ait permis à de nombreux patients de recouvrer partiellement l'audition, la discrimination précise des sons demeurait initialement limitée.

Des progrès significatifs dans le développement de l'implant cochléaire ont été réalisés après que les premières tentatives d'implantation par W. House se soient révélées incapables de fournir une compréhension claire de la parole. Les recherches ont alors été axées sur la stimulation sélective des nerfs auditifs pour permettre une meilleure discrimination sonore. L'équipe de B. Simmons à San Francisco a réussi à obtenir des réponses différentes en stimulant le nerf auditif à différents endroits, tandis que l'équipe de Merzenich a démontré que

la stimulation par plusieurs électrodes produisait des réponses différenciées dans les zones auditives corticales chez les macaques. Michelson a résolu le problème de la diffusion de l'influx nerveux en stimulant quatre endroits différents avec des électrodes de longueurs variées. En isolant les électrodes les unes des autres, Chouard et Mac Leod ont permis une reconnaissance améliorée des mots après l'implantation et la rééducation orthophonique. Le premier implant cochléaire multi-électrode a été posé le 22 septembre 1976 à l'hôpital Saint-Antoine.

Après, l'implant cochléaire a été amélioré, en particulier en termes de miniaturisation, grâce à la recherche menée dans plusieurs pays tels que l'Australie, l'Autriche, la France et les États-Unis. Les Australiens ont développé un implant capable de coder le voisement et les premiers et deuxièmes formants des voyelles. En 1984, la Food and Drug Administration américaine a approuvé cet implant pour une utilisation chez les adultes **[23]**.

En Algérie, le premier implant cochléaire a été réussi en 2003 à Alger par le Pr. Djenoui au CHU Mustapha Pacha. Puis, en 2007, un programme national de lutte contre la surdité a été initié par les pouvoirs publics. Depuis, et chaque année, beaucoup d'enfants bénéficient d'implants cochléaires **[5]**.

Le tableau ci-dessous présente les quatre marques (dans le monde) d'implant cochléaire qui existe de nos jours :

Marque	**Nation**
Cochlear	Australie
Medel	Autriche
MXM Neurelec	France
Advanced bionics	USA

Tableau 2 : Récapitulatif des différentes marques d'implant cochléaires **[23]**.

II.4 Présentation de l'implant cochléaire

Le système d'un implant cochléaire est composé de deux parties (voir figure 30). Une partie interne A qui se compose d'un récepteur chirurgicalement implanté sous la peau, près de l'os temporal, ainsi qu'un réseau d'électrodes positionné à l'intérieur de l'oreille interne et

une partie externe B sous forme d'appareillage auditif externe maintenu en place par un système magnétique en face de l'implant positionné à l'arrière de l'oreille.

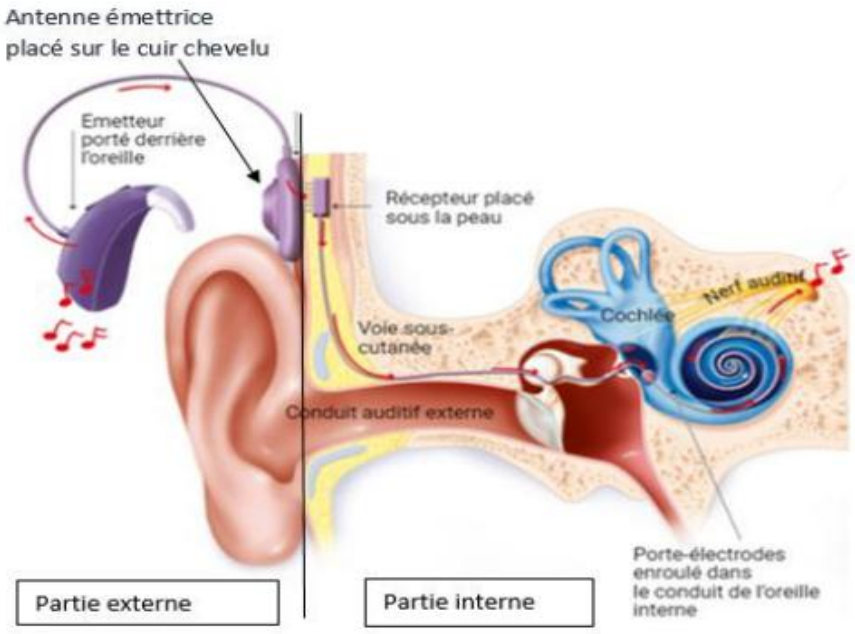


Figure 30 : Schéma montrant le fonctionnement de l'implant cochléaire **[11]**.

1. La partie interne

Le récepteur sous-cutané est implanté près de l'os mastoïdien, dans une poche créée par le chirurgien. Ce récepteur capte les signaux à travers la peau et les transmet au faisceau d'électrodes. Ce faisceau d'électrodes est placé dans un câble inséré dans la rampe tympanique de la cochlée, avec son extrémité habituellement positionnée entre 20 et 25 millimètres de profondeur (voir figure3). Tous les modèles d'implants actuels permettent de réaliser des tests électro physiologiques pendant l'opération et ultérieurement lors des ajustements. Ces tests évaluent la réponse nerveuse directement provoquée par la stimulation électrique **[5]**.

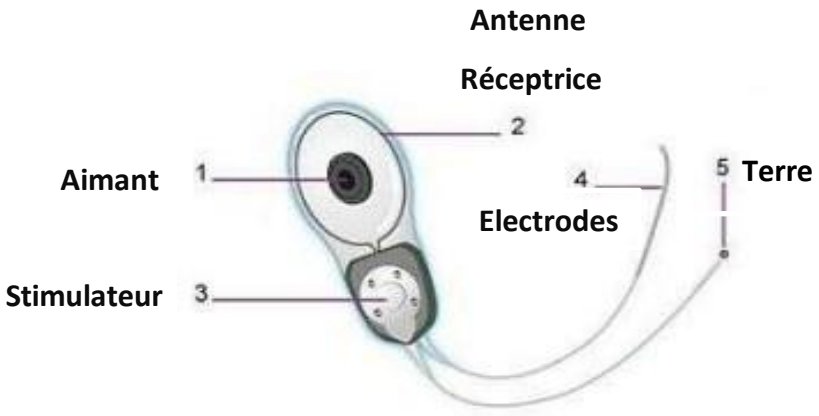


Figure 31 : Partie interne de l'implant cochléaire.

2. La partie externe

L'explant, également connu sous le nom de processeur, est un dispositif externe tel qu'un contour d'oreille ou un petit boîtier portatif un peu plus volumineux qu'une aide auditive conventionnelle. Il traite les sons ambiants captés par un microphone situé sur le pavillon de l'oreille. Le traitement du signal sonore est entièrement numérique et effectué par un microprocesseur. Ensuite, la stimulation est transmise à l'implant par radiofréquence, traversant la barrière cutanée par induction électromagnétique via une antenne dissimulée dans les cheveux. Pour son alimentation, le processeur externe utilise un bloc accumulateur rechargeable ou des piles zinc-air, selon le modèle. L'antenne externe émettrice est maintenue en place en face du récepteur implanté grâce à un aimant à force réglable **[24]**.

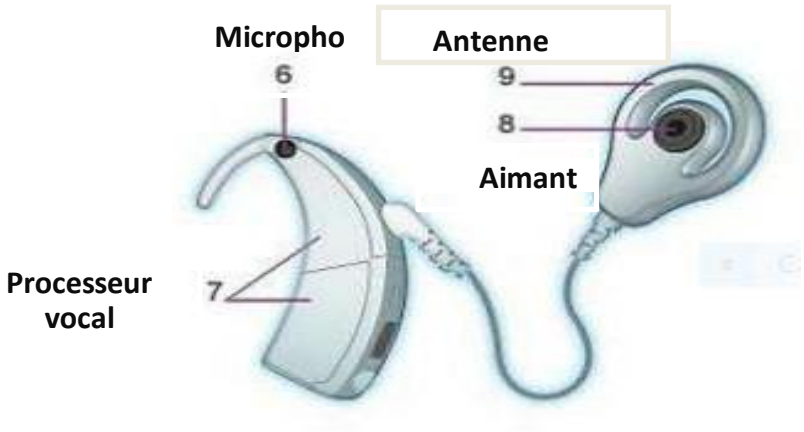


Figure 32 : Partie externe de l'implant cochléaire.

II.5 Fonctionnement de l'implant

L'implant cochléaire supplée la fonction d'une cochlée détruite en transformant le signal acoustique en un signal électrique qui va stimuler directement le nerf auditif. Voici une description des étapes du fonctionnement d'un implant boîtier (voir la figure 33).

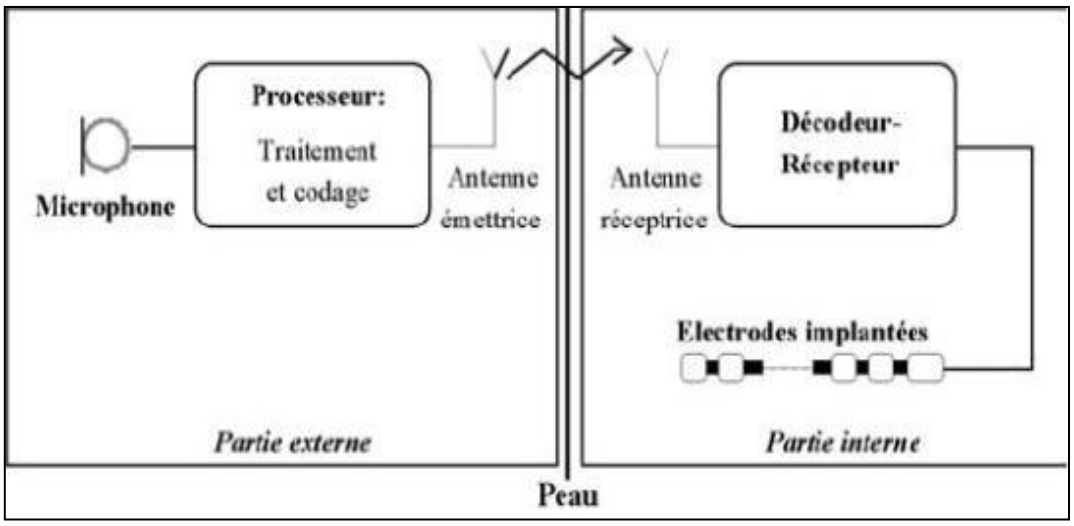


Figure 33 : Schéma montrant le fonctionnement de l'implant cochléaire **[11]**.

Le principe de fonctionnement de l'implant passe par les étapes suivantes :

1. Le message sonore est capté par un microphone miniaturisé placé au niveau du pavillon de l'oreille qui ressemble à un contour d'oreille.
2. Le son est transmis à un microprocesseur contenu dans un boîtier. Dans ce processeur, le son subit un codage aboutissant à la transformation du message sonore en message électrique.

Le codage c'est la transformation du signal acoustique en signal électrique. L'implant ne restitue pas l'ensemble des fréquences audibles sur l'ensemble des intensités. Il est nécessaire d'éliminer tous les sons nuisibles ou inutiles et de ne garder que ceux qui peuvent servir efficacement à la restitution de l'environnement sonore et de la parole. Pour cela, une première étape d'amplification-compression-filtrage est nécessaire. Alors qu'une oreille normale a une dynamique de 120 dB, une oreille sourde stimulée a une dynamique de 5 à 40 dB. Le but de la compression par l'implant est de permettre d'entendre les sons faibles et de tolérer les sons forts.

3. Le processeur de son convertit le signal électrique en un code spécifique déterminé comme étant le plus approprié pour la compréhension du son et de la parole.
4. Après ce traitement, le signal codé électriquement est renvoyé à une antenne plaquée dans les cheveux de la région rétro-auriculaire. Cette antenne adhère de façon électromagnétique à un récepteur implanté dans l'os temporal et le message est transmis à ce récepteur par onde radio à travers la peau.
5. Le récepteur-stimulateur décode les signaux et envoie des trains d'ondes électriques aux faisceaux d'électrodes.
6. Les contacts des électrodes stimulent directement les fibres nerveuses dans la cochlée sans utiliser les cellules ciliées endommagées. La stimulation nerveuse peut se faire soit par des ondes sinusoïdales, soit par des impulsions (pulses). Dans les systèmes multicanaux intra-cochléaires, les signaux codant pour les fréquences graves sont délivrés aux électrodes de l'apex et les signaux codant pour les fréquences aiguës aux électrodes de la base : c'est le principe de la tonotopie cochléaire.
7. La stimulation des fibres nerveuses provoque des impulsions électriques transmises au cerveau où elles sont interprétées en tant que son. L'ensemble du processus (de la réception des sons jusqu'à leur traitement par le cerveau) se déroule si rapidement que l'utilisateur entend les sons instantanément **[11]**.

II.6 Les Indications de l'implantation cochléaire

Les implants cochléaires sont indiqués en cas de surdité neurosensorielle sévère à profonde bilatérale. L'implantation est le plus souvent unilatérale, mais une implantation bilatérale peut être indiquée.

1. Chez l'enfant

Age de l'implantation

- Chez les sourds prélinguaux, l'implantation doit être la plus précoce possible. Une implantation précoce donne des résultats meilleurs et plus rapides en termes de compréhension et de production du langage qu'une implantation tardive.
- Au-delà de 5 ans, en cas de surdité congénitale profonde ou totale non évolutive, il n'y a d'indication (sauf cas particuliers) que si l'enfant a développé une appétence à la communication orale.

- Si l'enfant est entré dans une communication orale, il peut bénéficier d'une implantation quel que soit son âge. Les adultes jeunes sourds congénitaux peuvent être implantés.

Indications audiométriques de l'implantation

- Dans le cas d'une surdité profonde, l'implantation cochléaire est indiquée lorsque le gain prothétique ne permet pas le développement du langage.
- Dans le cas d'une surdité sévère, l'implantation cochléaire est indiquée lorsque la discrimination est inférieure ou égale à 50 % lors de la réalisation de tests d'audiométrie vocale adaptés à l'âge de l'enfant. Les tests doivent être pratiqués à 60 dB, en champ libre, avec des prothèses bien adaptées.
- En cas de fluctuations, une implantation cochléaire est indiquée lorsque les critères suscités sont atteints plusieurs fois par mois et/ou lorsque les fluctuations retentissent sur le langage de l'enfant **[5]**.

2. Particularité de l'adulte

Il n'existe pas de limite d'âge supérieure pour la réalisation d'une implantation cochléaire chez l'adulte, à condition qu'un bilan neuropsychologique soit effectué et qu'aucune démence avérée ne soit présente. Si la discrimination vocale est inférieure ou égale à 50 % lors de tests d'audiométrie vocale utilisant la liste de Fournier (ou un équivalent), et en cas de fluctuations avec un impact majeur sur la communication, une implantation cochléaire est recommandée.

II.7 Limites de performance

Les performances des implants cochléaires varient selon les utilisateurs. Certains obtiennent des résultats proches de l'audition normale en reconnaissant des mots et des phrases dans un environnement calme, tandis que d'autres ont des scores plus faibles. Les implants peuvent être moins efficaces dans des contextes comme la reconnaissance vocale en milieu bruyant et l'appréciation de la musique. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces variations, notamment les limites du traitement sonore, la faible résolution du courant de stimulation, les dommages lors de l'insertion des électrodes, et la dégénérescence du nerf auditif. Les discussions se concentrent sur les facteurs liés à la distribution du courant dans la cochlée, en particulier l'étendue de l'activation, qui inclut la propagation de l'excitation et le positionnement des électrodes. Le courant de stimulation d'une électrode, entourée de tissu conducteur dans la cochlée, se diffuse et active une grande population de neurones, un

phénomène appelé propagation de l'excitation. Par conséquent, les activations des électrodes voisines se chevauchent, ce qui entraîne des interférences et réduit le nombre réel de canaux indépendants.

II.8 Coût d'un implant cochléaire

Le prix d'un implant cochléaire est de l'ordre de 22 000€ par oreille, pour le seul matériel. Depuis 2009, l'implant cochléaire et l'acte chirurgical sont intégralement pris en charge par la Sécurité sociale, tout comme les frais d'hospitalisation. Les assurances garantissant l'implant restent à la charge du patient, ainsi qu'une partie des frais d'entretien (entre 300 et 400€ par an environ, partiellement pris en charge). Certes, c'est onéreux, mais, ramené aux bénéfices de l'implantation, le reste à charge demeure raisonnable.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence la description de l'implant cochléaire, son fonctionnement avec les parties externes (audio processeur, microphone) et internes (récepteur, électrodes) ainsi les indications de l'implantation cochléaire.

L'implant cochléaire nécessite une grande connaissance dans le domaine anatomique et physiologique vu en chapitre précèdent, mais aussi une connaissance en biomatériaux.

Le chapitre suivant va porter sur des généralités des biomatériaux et en particulier sur les biomatériaux utilisés dans les implants cochléaires.

Chapitre III

Généralités sur les biomatériaux

III.1 Introduction

Les biomatériaux sont des matériaux innovants utilisés en médecine pour des traitements et diagnostics. Ils comprennent des métaux, céramiques, polymères et composites. Ces matériaux jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la vie des patients en servant à fabriquer des implants cochléaires, des appareils dentaires, des systèmes de libération de médicaments et des substituts de tissus. Leur développement continu permet d'améliorer les soins médicaux et de proposer de nouvelles solutions thérapeutiques.

Les propriétés exceptionnelles des biomatériaux découlent de leur capacité à imiter les fonctions des tissus biologiques, tout en présentant une compatibilité avec le corps humain. Par exemple, les métaux comme le titane sont largement utilisés pour leur résistance mécanique et leur biocompatibilité, tandis que les céramiques offrent une résistance exceptionnelle à l'usure et à la corrosion. Les polymères, quant à eux, se distinguent par leur flexibilité et leur capacité à être modifiés pour des applications spécifiques, telles que les dispositifs de libération contrôlée de médicaments.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes catégories de biomatériaux, leurs propriétés spécifiques, et leurs applications dans le domaine médical.

III.2 Définition de biomatériau

Les biomatériaux comprennent tous les matériaux qui interagissent avec des entités biologiques. Selon le National Institutes of Heath (NIH), un biomatériau est défini comme « toute substance (autre qu'un médicament) ou combinaison de substances d'origine synthétique ou naturelle, pouvant être utilisée pendant une certaine période, en tant que partie ou totalité d'un système qui traite, améliore ou remplace un tissu, un organe ou une fonction du corps ». Initialement limitée aux dispositifs médicaux, la définition des biomatériaux s'est élargie pour inclure des matériaux synthétiques et naturels qui favorisent la santé humaine. Un biomatériau est choisi pour sa compatibilité avec le tissu hôte et son intégrité structurelle durant sa durée de vie prévue. Les applications des biomatériaux vont des prothèses (comme les implants de hanche et les valves cardiaques artificielles) à la régénération tissulaire, aux dispositifs médicaux et à l'administration de médicaments. En fonction de leurs propriétés et de l'application envisagée, les biomatériaux se classent en quatre grandes catégories :

- Métaux
- Céramiques
- Polymères

- Composites

La figure 34 ci-dessous illustre ces catégories et leurs propriétés respectives **[33].**

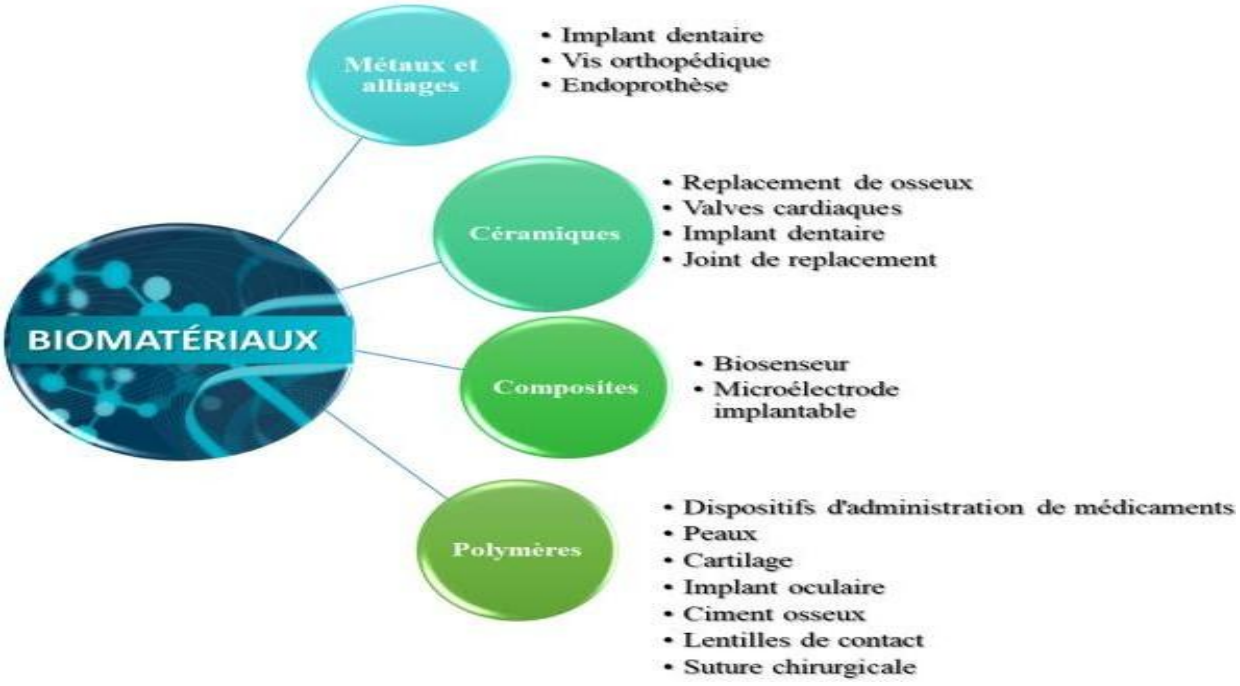


Figure 34 : Les différentes catégories des biomatériaux **[33]**.

III.3 Matériaux composites

Les matériaux qui contiennent deux ou plusieurs constituants ou phases distincts, à une échelle microscopique ou macroscopique, sont appelés composites. Les matériaux composites sont divisés en deux phases : la matrice, qui constitue la phase continue principale, et le renforcement, qui est la phase non continue et est généralement formée de matériaux possédant des propriétés mécaniques ou thermiques supérieures, selon les exigences de l'application.

L'os est un parfait exemple de composite naturel. Les minéraux y sont incorporés comme éléments de renforcement, tandis que le collagène sert de matrice. Dans le domaine biomédical, les applications les plus réussies des composites en tant que biomatériaux se trouvent dans le domaine dentaire, où ils sont largement utilisés comme matériaux de restauration ou ciments dentaires. On les trouve également dans les membres prothétiques, où la combinaison de matériaux à faible densité/poids et à haute résistance les rend idéaux pour de telles applications. Cependant, en raison du manque de constance dans la fabrication des

composites, ces matériaux présentent encore quelques problèmes de conception et de réalisation **[34]**.

III.3.1 La matrice (la résine)

La matrice a pour rôle principal de transmettre les efforts mécaniques au renfort et de le protéger contre les conditions environnementales comme la corrosion, l'oxydation, et le vieillissement humide. Dans les composites renforcés de polymères (CMO), divers polymères peuvent servir de matrices. Ces résines synthétiques sont obtenues par réticulation d'une macromolécule sous l'effet de la chaleur ou d'un catalyseur. On distingue trois catégories principales de ces matières plastiques : les polymères thermoplastiques (cristallins, semi-cristallins ou amorphes), les polymères thermodurcissables (amorphes), et les élastomères (amorphes) **[35]**.

III.3.1.1 Les divers types de résines

On peut citer trois types de résines :

a. Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des polymères aux chaînes linéaires ou ramifiées, monodirectionnelles ou bidirectionnelles. Elles peuvent fondre et se dissoudre, ce qui permet de les ramollir avec la chaleur et de les durcir en refroidissant, facilitant ainsi leur moulage et leur recyclage. Utilisées près de leur température de transition vitreuse ou de fusion, elles servent souvent de matrice dans les composites "structuraux". Parmi les résines thermoplastiques utilisées dans les composites aéronautiques on peut citer le polyéther-imide (PEI), le polyphénylsulfure (PPS), le polyéther-éther-cétone (PEEK), le polyéther-cétone-cétone (PEKK). **[36]**.

b. Les élastomères

Les élastomères sont des polymères, naturels ou synthétiques, qui possèdent une structure particulière leur donnant une grande élasticité (jusqu'à 500 % d'allongement par rapport à leur taille initiale). Par exemple, les élastomères incluent les silicones, les polyuréthanes, le néoprène, et le latex **[36]**.

c. Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont les plus couramment utilisées comme matrice dans les matériaux composites "structuraux". Elles sont souvent combinées avec des fibres

longues. À l'état liquide ou visqueux, elles durcissent de façon irréversible sous l'effet de la chaleur, d'un catalyseur et d'un durcisseur, formant un produit infusible et insoluble **[36]**.

III.3.1.2 Le renfort

Le renfort dans un matériau composite est l'élément principal qui supporte la majorité des efforts mécaniques. Il peut se présenter sous différentes formes :

- **Particulaire :** sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre
- **Fibres courtes :** utilisées pour les renforts en surface comme les mats.
- **Micro ou nanoparticulaire.**
- **Fibres continues :** utilisées pour les renforts texturés tels que les tissus (taffetas, sergé, satin) ou les nappes unidirectionnelles.

Les architectures fibreuses peuvent être complexes et multidirectionnelles (2D, 3D, voire 4D). Le type de tissu est choisi en fonction de sa capacité à s'adapter à la forme de la pièce sans plis (drapabilité) et des contraintes mécaniques que la pièce subira **[32]**.

Parmi les fibres les plus employées, on peut citer :

1. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone sont utilisées pour des applications structurales. Elles sont fabriquées en pyrolysant un précurseur organique dans une atmosphère contrôlée. Le PolyAcryloNitrile (PAN) est le précurseur le plus couramment utilisé. Il est d'abord oxydé entre 200 et 300°C à l'air libre, puis carbonisé entre 800 et 1500°C sous atmosphère d'azote, ne laissant que la structure en couches hexagonales d'atomes de carbone **[32]**.



Figure 35 : Fibre de carbone**[37]**.

2. Fibre en verre

Les fibres de verre, apparues dans les années 1940, sont les plus anciennes et les moins coûteuses du marché (environ 1 euro/kg), avec la production la plus élevée en tonnage. Leur fabrication implique l'extrusion de verre à travers des filières avec des trous de 1 à 2 mm de diamètre, puis l'étirage jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15 mm, avant d'être enduites et bobinées. Il existe plusieurs variétés (E, R, S) selon la composition en SiO_2, Al_2O_3, B_2O_3, CaO, etc **[38]**.



Figure 36 : Fibre en verre **[39]**.

3. Les fibres d'aramide

Les fibres d'aramide, mieux connues sous des noms commerciaux comme Kevlar®, Twaron®, Technora® et Nomex®, sont utilisées pour des applications très spécifiques. Par exemple, elles sont couramment employées dans les gilets pare-balles pour la protection balistique et dans les réservoirs souples de carburant **[38]**.



Figure 37 : Fibre d'aramide [**40]**.

4. Les fibres végétales

Les fibres végétales, comme celles de chanvre, de lin ou de bambou, sont écologiques car elles proviennent de sources naturelles. Elles sont peu coûteuses et de plus en plus utilisées pour fabriquer des composites « d'entrée de gamme » **[38]**.

III.4 Les céramiques

Les céramiques sont des matériaux inorganiques non métalliques avec une gamme limitée de formulations. Leur microstructure dépend fortement du procédé de fabrication appliqué et, par conséquent, de leurs propriétés mécaniques et biologiques. Bien qu'elles soient utilisées moins largement que les métaux ou les polymères, elles possèdent des propriétés remarquables : grande résistance et rigidité ; haute résistance à la corrosion et à l'usure ; et faible densité et dureté. Cependant, les composants en céramique tendent à échouer prématurément en raison de leur faible ténacité à la fracture et de leur sensibilité à la présence de fissures ou d'autres défauts. Une des premières applications des céramiques comme biomatériaux a consisté à remplacer les têtes fémorales métalliques traditionnelles des prothèses de hanche par de l'alumine de haute densité et de grande pureté (Boutin 1972). Depuis lors, d'importants efforts ont été faits pour améliorer le traitement et la conception des matériaux. De nos jours, les céramiques se trouvent dans plusieurs domaines biomédicaux comme la dentisterie, l'orthopédie et même la médecine générale, en tant que capteurs médicaux. Les céramiques les plus populaires sont le carbone, l'alumine et la zircone –

Avantages	Inconvénients
Bonnes résistances mécaniques	L'adhésion des protéines ou des cellules en surface
Hautes résistances à l'usure et au	Peu résistante à l'abrasion

bioinertes (ne causant pas de réaction lorsqu'elles sont en contact avec l'hôte biologique) – ainsi que les verres bioactifs **[41]**.



Figure 38 : La prothèse totale de la hanche en céramique **[42]**.

frottement	
Très haute résistance à toutes les formes de corrosion	La durabilité
Résistant aux coupures et aux rayures	La résistance à la fracture
Biocompatibilité (en particulier avec l'os), le fait d'être inerte	Le fait d'être cassant

Tableau 3 : Avantages Inconvénients des céramiques **[43]**.

III.5 Les métaux et alliages métalliques

Ce sont en quelque sorte les "ancêtres" des biomatériaux puisque ce sont les premiers à avoir été utilisés pour faire des implants. Le plus important par les volumes est sans doute l'acier inoxydable, largement utilisé en chirurgie orthopédique. L'intérêt de l'acier inoxydable dans ce domaine réside dans ses propriétés mécaniques. Il faut également mentionner particulièrement le titane, qui est utilisé principalement en chirurgie orthopédique et pour réaliser des implants dentaires. On le trouve également dans les stimulateurs cardiaques et les pompes implantables. L'un des avantages principaux du titane est sa bonne biocompatibilité : l'os adhère spontanément au titane. Les alliages à mémoire de forme sont une variante intéressante de cette catégorie. On utilise également des alliages cobalt, chrome, molybdène, tantale, etc **[44]**.

- **Avantages**
- Les métaux utilisés comme biomatériaux ont des limites d'élasticité et des résistances à la rupture élevée.
- Ils sont conçus pour résister à la corrosion.
- Leur usage est très répandu en orthopédie : articulations de remplacement au niveau de la hanche ou du genou.
- Les implants réduisent la douleur et permettent une récupération de la fonction des articulations dans lesquelles les cartilages naturels ont été endommagés.
- Des plaques et vis métalliques sont largement utilisées pour maintenir en place des os fracturés (peuvent être enlevés ou laissés en place après guérison selon les cas).
- **Inconvénients**

- Le point faible des métaux est leur susceptibilité à la corrosion qui a mené à la sélection d'alliages (Titane, Cobalt-Chrome).
- La corrosion électrochimique et la durabilité, effet l'in oxydabilité d'un matériau n'est pas absolue.
- Réactions immunitaires et d'hypersensibilité.
- Adaptation des propriétés mécaniques.
- Frottements et problèmes de débris.

III.6 Les polymères

Les polymères constituent une classe polyvalente de biomatériaux grâce à leur flexibilité inhérente à être synthétisés ou modifiés pour correspondre aux propriétés physiques et mécaniques de divers tissus et organes humains. L'application de polymères d'origine naturelle en médecine remonte à des milliers d'années, tandis que l'utilisation de polymères synthétiques est relativement récente. La première tentative a eu lieu dans les années 1940, en utilisant un polymère synthétique biostable, le poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA), comme substitut cornéen artificiel. Depuis lors, les polymères ont occupé une place importante parmi les biomatériaux, devenant les matériaux les plus largement utilisés dans les applications biomédicales (Figure 39) **[45]**.

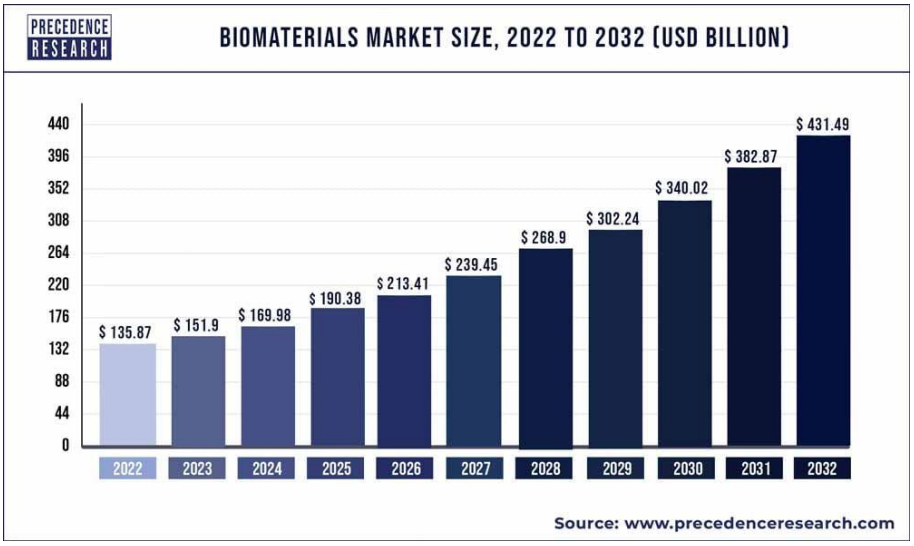


Figure 39 : Prévision des marchés mondiaux des biomatériaux de 2022 jusqu'à 2032 **[46]**.

Les polymères sont des macromolécules formées de longues chaînes composées de nombreuses unités répétées (monomères). Leurs principales propriétés incluent une flexibilité unique, une légèreté, une fabrication facile, une bonne résistance aux attaques biochimiques et une bonne biocompatibilité. Ils sont principalement utilisés lorsque des formes complexes et

une grande flexibilité sont nécessaires. De nos jours, une grande variété de polymères est disponible sur le marché : acryliques vinyles, polystyrène, époxydes, polycarbonates, silicones, polyéthers, polysulfures et acides polyacryliques, pour n'en nommer que quelques-uns. Ces polymères sont utilisés dans la construction de dispositifs prothétiques, de dents artificielles, de couronnes temporaires, de ciments et autres applications **[47]**.

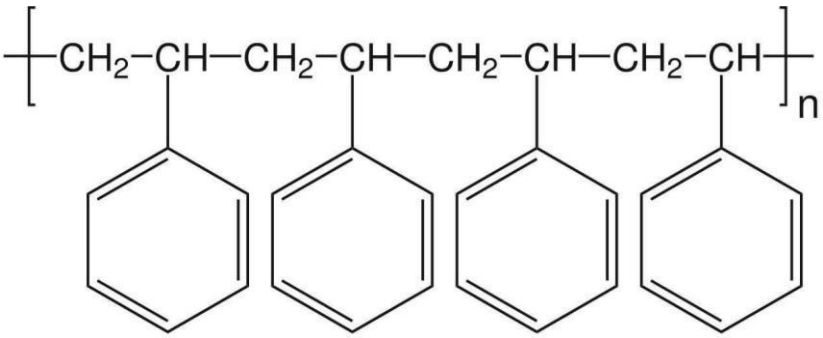


Figure 40 : La structure chimique d'un polymère appelé polystyrène.

Familles de polymères	**Utilisations**
Elastomères:Caoutchoucs naturels, silicones.	Ventricules artificiels, lentilles de contact, Encapsulation cardiaques.
Polyesters : Poly (téréphtalate d'éthylène), Polyesters insaturés UP, Polycarbonate PC.	Greffes vasculaires, matériel prothétique.
Cellulosiques : Acétate de cellulose CA, acétobutyrate de cellulose.	Montures de lunettes.
Polyépoxydes.	Montures de lunettes, stimulateurs cardiaques, matériel d'assistance.
Polyéthers :Poly(oxyméthyléne) POM, Poly (oxyphényléne) PPO.	Valves cardiaques.

Tableau 4 : Famille de polymères et leur utilisation.

Avantages	**Inconvénients**
Légèreté	Vieillissement et dégradation

Résistance à la corrosion	Recyclage des polymères peut être complexe et coûteux
Flexibilité et élasticité	Fragiles à basse température, peuvent fondre ou se déformer à haute température
Facilité de fabrication	Propriétés mécaniques limitées
Isolation électrique et thermique	Pose des problèmes environnementaux liés à leur accumulation dans les décharges et les océans
Variété de propriétés	

Tableau 5 : Avantages et inconvénients des polymères.

III.7 Matériaux d'origine naturelle

La recherche de biocompatibilité a conduit les scientifiques à privilégier des matériaux naturellement compatibles avec le corps humain. Ces biomatériaux sont d'origine végétale ou animale. Les tableaux 2 et 3 illustrent divers exemples de ces biomatériaux ainsi que leurs applications **[48]**.

Biomatériaux d'origine végétale	**Utilisation**
Les fucanes : polysaccharides extraits des algues marines. Les alginates de sodium	Anticoagulants, anti complémentaires.
La cellulose : dérivée des parois cellulaires.	Utilisée pour les membranes de dialyse ou comme ciment de prothèse de hanche.
Les dextranes : préparés par transformation de saccharose par des bactéries.	Agroalimentaire.
Les alginates de sodium.	Ingénierie tissulaire, agroalimentaire.

Tableau 6 : Exemples de biomatériaux d'origine végétale **[48]**.



Figure 41 : Le Jute et la fibre de jute **[66]**.

Biomatériaux d'origine animale	Utilisations
La chitine : polysaccharide extrait des carapaces de crustacés.	Utilisée pour les fils de suture, la chirurgie reconstructive et la peau artificielle.
Le corail : extrait des madréporaires.	Utilisé en chirurgie orthopédie et maxillo-faciale.
Le collagène : extrait de la peau ou du placenta humain	- La cosmétologie et la chirurgie esthétique. - Les pansements et éponges hémostatiques. - Les implants oculaires et pansements ophtalmologiques. - La reconstitution de tissus mous et durs à l'aide de mélanges collagène. - Facteurs de croissance. - hydroxyapatite.

Tableau 7 : Exemples de biomatériaux d'origine animale.

III.8 Définition de la Biocompatibilité

La biocompatibilité est la capacité d'un matériau à provoquer une réponse appropriée de l'hôte dans une application spécifique. Elle englobe tous les phénomènes se produisant dans un environnement biologique, notamment l'absence de toxicité du matériau pour l'organisme et l'absence de dégradation du matériau par l'organisme. Un matériau biocompatible ne doit ni provoquer de réactions locales ou systémiques néfastes (comme la toxicité ou la carcinogénicité) ni être altéré par les tissus ou fluides physiologiques (comme les urines) du receveur, ce qui pourrait nuire à ses propriétés intrinsèques ou générer des produits de dégradation toxiques. Plus la relation matériau-tissu est prolongée, plus ces

exigences doivent être strictement respectées, résumées par l'expression : « travail sous contrainte biologique ». Atteindre une biocompatibilité idéale est toujours complexe, et il faut viser un compromis cliniquement acceptable **[49]**.

III.9 Les propriétés des biomatériaux

Les biomatériaux doivent posséder des caractéristiques spécifiques pour bien remplacer ou interagir avec les organes du corps. Ces caractéristiques se regroupent en trois catégories principales :

a. Propriétés mécaniques

Les biomatériaux doivent avoir des propriétés mécaniques (comme l'élasticité, la dureté, la résistance à la compression) semblables à celles de l'organe qu'ils remplacent. Ces propriétés doivent rester stables après l'implantation **[50]**.

b. Propriétés physico-chimiques

Les biomatériaux doivent avoir des propriétés physico-chimiques (comme la forme, la taille, la température de traitement, la composition chimique) adaptées à la stérilisation. Ils ne doivent pas être toxiques ni provoquer de réactions négatives dans le corps, comme des réactions immunitaires ou des rejets. Le choix de la méthode de stérilisation (chaleur, agents chimiques, etc.) dépend de ces propriétés **[50]**.

c. Propriétés biologiques

Les biomatériaux doivent être compatibles avec les tissus vivants et ne pas favoriser la croissance de microbes. Ils ne doivent pas encourager la prolifération des bactéries, ce qui pourrait entraîner des infections. Ces critères sont essentiels pour garantir la sécurité et l'efficacité des biomatériaux utilisés dans des applications médicales **[51]**.

III.10 Les champs d'application des biomatériaux

La chirurgie réparatrice et celle visant à restaurer des fonctions sont les principaux domaines d'utilisation des biomatériaux. D'autres spécialités médicales utilisent également des outils endoscopiques, qui nécessitent des matériaux compatibles avec le corps humain.

- **Ophtalmologie :** Lentilles, Implants, Coussinets de récupération, Produits visqueux de chambre postérieure.

- **Odontologie stomatologie :** Matériaux de restauration et comblement dentaire et osseux, Traitements prophylactiques, Orthodontie, Traitement du parodonte et de la pulpe, Implants. Reconstruction maxillo-faciale.
- **Chirurgie orthopédique :** Prothèses articulaires (hanche, coude, genou, poignet,). Orthèses, Ligaments et tendons artificiels, Cartilage, Remplacement osseux pour tumeur ou traumatisme, Chirurgie du rachis, Réparation de fractures (vis, plaques, clous, broches). Matériaux de comblement osseux injectable.
- **Cardiovasculaire :** Valves cardiaques, Matériel pour circulation extracorporelle (oxygénateurs, tubulures, pompes). Cœur artificiel. Assistance ventriculaire, Stimulateurs cardiaques, Prothèses vasculaires.
- **Urologie/néphrologie :** Dialyseurs, Poches, cathéters et tubulures pour dialyse péritonéale, Rein artificiel portable, Prothèses de pénis, Matériaux pour traitement de l'incontinence.
- **Endocrinologie-chronothérapie :** Pancréas artificiel, Pompes portables et implantables, Systèmes de libération contrôlée de médicaments, Biocapteurs.
- **Chirurgie esthétique :** Matériaux et implants pour chirurgie esthétique.
- **Chirurgie générale et divers :** Drains de chirurgie, Colles tissulaires, Peau artificielle, Produits de contraste, Produits pour embolisation, Produits pour radiologie interventionnelle **[52]**.

III.11 Matériaux utilisés dans la fabrication de l'implant cochléaire

1. Le titane

Le titane est un métal de transition reconnu pour sa légèreté, sa grande résistance mécanique, et sa résistance exceptionnelle à la corrosion. Il est représenté par le symbole chimique Ti et occupe la 22e place dans le tableau périodique des éléments. Ses propriétés uniques en font un matériau de choix dans divers secteurs industriels. Par exemple, le titane est largement utilisé dans l'industrie aérospatiale pour la fabrication de pièces structurales et de moteurs en raison de son rapport résistance/poids élevé. De plus, il trouve des applications importantes dans le domaine médical pour la fabrication d'implants orthopédiques et dentaires, grâce à sa biocompatibilité exceptionnelle **[53]**.

Le titane a été découvert en 1789, par le révérend William Gregor un minéralogiste britannique. En analysant des sables de la rivière Helford en Cornouailles, il isola ce qu'il nomma du sable noir, connu aujourd'hui sous le nom d'ilménite. Suite à plusieurs

manipulations physico-chimiques (extraction du fer par des procédés magnétiques et traitement du résidu par de l'acide chlorhydrique), il produisit un oxyde impur qu'il nomma menachanite **[54]**.

Ce métal a été Utilisé pour la conception du boîtier du récepteur-stimulateur en raison de sa biocompatibilité et de sa résistance à la corrosion.

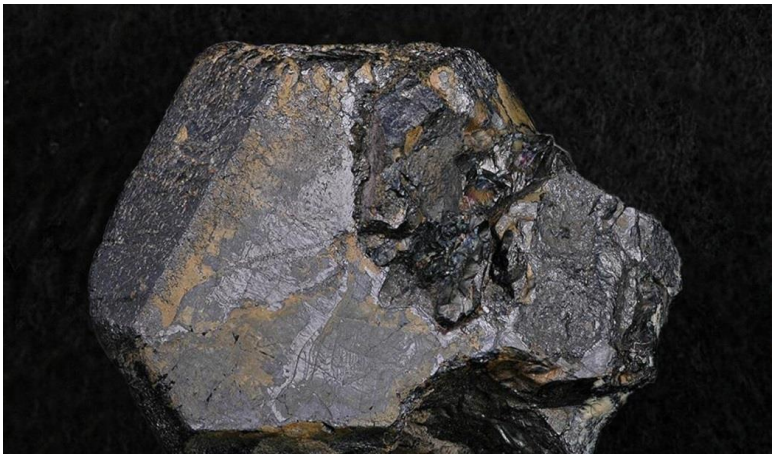


Figure 42 : Le titane **[55]**.

2. Les silicones

Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères inorganiques largement utilisés dans divers domaines en raison de leurs propriétés uniques. Ces matériaux se distinguent par leur structure chimique composée d'une chaîne principale de silicium et d'oxygène, avec des groupes organiques attachés au silicium. Selon Kim et al. (2017), cette structure confère aux silicones une grande flexibilité, une stabilité thermique exceptionnelle, ainsi qu'une résistance remarquable à l'oxydation et à la dégradation par les rayons ultraviolets **[56]**.

Dans le domaine biomédical, les silicones sont particulièrement prisées pour leur biocompatibilité et leur inertie chimique, ce qui les rend idéaux pour les implants médicaux, les dispositifs de délivrance de médicaments et les prothèses. Par exemple, selon une étude de Jones et Smith (2018), les implants mammaires en silicone sont largement utilisés en chirurgie esthétique et reconstructive en raison de leur texture et de leur durabilité, tout en minimisant le risque de réactions inflammatoires **[56]**.

La silicone est Utilisée pour l'enveloppe de l'électrode pour assurer sa flexibilité et minimiser les risques de rejet par le corps.

3. Le platine

Le platine, symbolisé par Pt avec le numéro atomique 78, est un métal de transition rare et précieux de couleur gris-blanc, reconnu pour ses propriétés physiques et chimiques exceptionnelles. Il se distingue par sa haute résistance à la corrosion et à l'oxydation, ainsi que par son excellente conductivité électrique et thermique. De plus, il est très dense **[57]**.

Ce métal joue un rôle essentiel dans de nombreuses industries. Par exemple, il est couramment utilisé dans les catalyseurs automobiles pour réduire les émissions de gaz toxiques. Les catalyseurs à base de platine sont indispensables pour transformer les émissions nocives comme les oxydes d'azote (NOx) et le monoxyde de carbone (CO) en substances moins nocives telles que l'azote et le dioxyde de carbone. En médecine, le platine est également précieux, notamment dans les traitements contre le cancer, sous forme de composés comme le cisplatine, qui interagissent avec l'ADN des cellules cancéreuses pour empêcher leur division **[58]**.

Il est utilisé pour la fabrication des électrodes elles-mêmes grâce à sa conductivité et sa biocompatibilité.



Figure 43 : Platine naturel pur **[59]**.

4. L'or

L'or, élément chimique de symbole Au et de numéro atomique 79, est un métal précieux célèbre pour sa couleur jaune distinctive et ses propriétés uniques. Selon Johnson (2018), l'or

est un métal de transition doté d'une excellente conductivité électrique et thermique, d'une grande malléabilité, et d'une résistance exceptionnelle à la corrosion et à l'oxydation **[60]**.

Historiquement, l'or a été utilisé par les civilisations humaines depuis au moins 6000 ans, jouant un rôle central dans l'économie, la culture, et la technologie. Les Égyptiens de l'Antiquité l'utilisaient non seulement comme monnaie et ornement, mais aussi dans divers rites religieux. Au fil des siècles, l'or a continué à être un symbole de richesse et de pouvoir, influençant des événements majeurs tels que la ruée vers l'or en Californie au milieu du XIXe siècle, qui a profondément marqué l'histoire économique et sociale des États-Unis **[61]**.



Figure 44 : De l'or pur au bijou en or 18 carats **[62]**.

En termes d'utilisation contemporaine, l'or est crucial dans divers secteurs industriels. Par exemple, il est largement employé en électronique pour les contacts électriques et les connexions en raison de sa conductivité et de sa résistance à la corrosion. De plus, l'or joue un rôle important en médecine, notamment en dentisterie et dans le traitement de certaines conditions médicales grâce à ses propriétés biocompatibles. Il est utilisé pour certains contacts en raison de sa conductivité et de sa résistance à la corrosion pour l'implant cochléaire **[63]**.

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les divers types de biomatériaux, en mettant en lumière leurs propriétés et caractéristiques. Nous avons également examiné les matériaux spécifiques utilisés dans la fabrication des implants cochléaires.

Pour résumer, les biomatériaux sont très importants en médecine car ils peuvent imiter les fonctions des tissus du corps tout en étant sûrs à utiliser. Qu'ils soient faits de métaux comme le titane, de céramiques résistantes ou de plastiques flexibles, ils offrent des solutions adaptées aux besoins médicaux spécifiques, comme la chirurgie et les traitements médicamenteux. L'avenir des biomatériaux promet encore plus d'innovations pour améliorer les soins médicaux et aider les patients.

Le chapitre suivant va porter sur l'impression 3D, et les diverses techniques utilisées dans cette technologie révolutionnaire.

Chapitre III

Impression 3D

IV.1 Introduction

L'arrivée de l'impression 3D a profondément bouleversé le paysage de la fabrication et de la conception, ouvrant la voie à des réalisations autrefois impensables. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'application de cette technologie de pointe dans un domaine spécifique la conception d'un implant cochléaire. En explorant les principes fondamentaux de l'impression 3D, ses avantages et ses défis, nous verrons comment elle peut contribuer à améliorer la vie des personnes souffrant de perte auditive en repoussant les frontières de l'innovation médicale.

IV.2 Définition de la trois dimension (3D)

La trois dimension, ou 3D, désigne la représentation et la perception d'objets ou d'espaces dans un système de coordonnées comportant trois axes perpendiculaires : la largeur (axe X), la profondeur (axe Y) et la hauteur (axe Z). Cette représentation tridimensionnelle permet de refléter fidèlement la réalité en prenant en compte les formes, les volumes et les positions relatives des éléments dans l'espace. La 3D est largement utilisée dans divers domaines, tels que l'infographie, l'animation, la conception assistée par ordinateur (CAO), l'impression 3D et la réalité virtuelle ou augmentée.

IV.3 Définition de l'impression 3D

L'impression 3D est une technique de fabrication additive automatisée qui consiste à créer un modèle physique à partir de données numériques 3D. Parmi les diverses technologies d'impression 3D, la plus couramment utilisée est la FFF (Fused Filament Fabrication) qui fonctionne de manière simple : un objet est construit couche par couche en faisant fondre un filament de plastique. Pour mieux comprendre, imaginez que vous découpiez un objet 3D en tranches fines, comme une pomme de terre en chips. Ensuite, à l'aide d'un pistolet à colle, vous traceriez chaque couche avec de la colle chaude. C'est essentiellement de cette façon que les objets sont imprimés en 3D, en ajoutant progressivement de la matière. Cette méthode additive s'oppose ainsi à la méthode



Figure 45 : Exemple d'une impression 3D **[26]**.

soustractive, qui consiste à usiner ou sculpter un objet à partir d'un bloc de matière existant (voir figure 45) **[25]**.

IV.4 Fonctionnement de l'impression 3D

Le processus d'impression 3D commence par l'utilisation d'un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour créer un modèle 3D. De nombreux logiciels sont disponibles à cette fin. Une fois le modèle 3D prêt, il est transmis à l'imprimante 3D pour la suite des opérations.

Lors de la deuxième étape, l'imprimante 3D traite le modèle 3D en suivant la logique de fabrication additive, c'est-à-dire en découpant le modèle en couches 2D à l'aide d'un logiciel adapté. En plus de ces deux fonctions principales, d'autres logiciels et matériels électroniques sont intégrés pour garantir une communication efficace entre l'imprimante et les ordinateurs. Ainsi, l'imprimante 3D reçoit une série d'instructions qu'elle traduit en objets 3D (voir la figure 2). Il existe différentes technologies pour convertir les couches 2D en un objet 3D.

Deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets :

- Le matériau utilisé peut être amené à un état fondu, ce qui permet de lui donner la forme souhaitée en refroidissant légèrement (par exemple, les polymères).
- Les matériaux peuvent également être durcis par l'application de chaleur ou de lumière laser (par exemple, la résine ou les alliages de titane).

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D "travaille" couche par couche (Formes 3D). Chacune de ces approches implique des qualités spécifiques qui entrent en jeu au fil du temps d'où la nécessité d'obtenir un objet a ayant une limite à sa taille **[27]**.

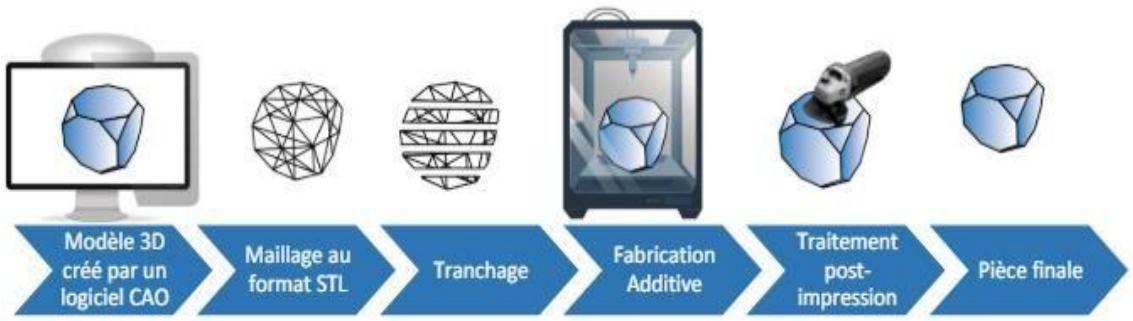


Figure 46 : Les différentes étapes de l'impression 3D **[28]**.

IV.5 Matériaux utilisés pour l'impression 3D

L'impression 3D utilise une variété de matériaux pour créer des objets tridimensionnels. Les matériaux utilisés ont des propriétés différentes, ce qui permet de créer des objets avec des caractéristiques spécifiques. Les progrès de la technologie d'impression 3D ont élargi la gamme de matériaux disponibles, offrant de nouvelles possibilités de fabrication.

IV.5.1 Les polymères

1. Les thermoplastiques

a. ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) : (voir figure 47)

L'ABS est un thermoplastique amorphe composé de trois monomères : l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène. Bien qu'il ne soit pas biodégradable, l'ABS peut être réutilisé. Cependant, il libère des gaz nocifs pour la santé lorsqu'il est fondu. En termes de propriétés mécaniques, les pièces en ABS ont une bonne résistance mécanique et une résistance aux températures extrêmes, allant de -20 °C à 80 °C environ. Elles sont également ténaces, dures, rigides et résistantes à l'abrasion chimique, mais pas aux rayons UV. Enfin, l'ABS est soluble dans l'acétone.



Figure 47 : Exemples d'objet en ABS **[29]**.

b. PLA (Acide Polylactique) : (voir figure 48)

L'acide polylactique (PLA) est un produit intermédiaire résultant de la fermentation de sucre ou d'amidon, comme celui de la betterave ou du maïs, par des bactéries de l'acide lactique. Le PLA est ensuite obtenu en polymérisant l'acide lactique par un nouveau procédé fermentation. Ce matériau transparent et biodégradable ressemble aux produits synthétiques thermoplastiques couramment utilisés, en termes de



Figure 48 : Exemples d'objet en

propriétés mécaniques et thermiques. De plus, le PLA peut être transformé sur les installations existantes pour fabriquer des films, des pièces moulées, des gobelets, etc **[29]**.

c. Polyamide

Le polyamide est un type de plastique couramment utilisé dans l'impression 3D, généralement sous forme de poudre fine, blanche et granuleuse, pour les technologies de frittage laser (SLS). Cependant, certaines variétés de ce matériau, comme le nylon, peuvent également être utilisées sous forme de filament avec le procédé FDM. Le polyamide est apprécié pour ses nombreuses qualités, telles que sa stabilité, sa rigidité, sa flexibilité et sa résistance exceptionnelle aux chocs. Sa couleur finale est naturellement blanche, mate et opaque, avec une surface légèrement poreuse **[29]**.



Figure 49 : Exemple d'objet en polyamide **[29]**.

d. PET (Polytéréphtalate d'éthylène)

Le PET (polyéthylène téréphtalate) est le thermoplastique polyester amorphe le plus répandu et il est principalement utilisé pour la fabrication de bouteilles d'eau gazeuse en raison de ses nombreux avantages. En effet, il est léger, transparent, extrêmement solide et étanche à divers gaz, dont le CO2. De plus, il ne dégage pas de gaz lors de l'impression 3D. En termes de propriétés mécaniques, le PET est un matériau assez rigide, mais très léger et résistant aux chocs. Il possède une résistance exceptionnelle qui en fait l'un des filaments les plus solides du marché. Cependant, sa rigidité et sa résistance à la chaleur sont modérées. Le PET est également un bon isolant électrique, ce qui en fait un choix judicieux pour diverses applications dans l'industrie électrique et électronique **[26]**.



Figure 50 : Exemples d'objet en PET **[29]**.

2. Les résines

L'impression 3D avec de la résine utilise un polymère liquide sensible à la lumière dans les procédés SLA et Poly Jet. Cette méthode implique le dépôt de couches successives qui sont instantanément durcies par une exposition aux rayons UV. Cela donne à la pièce finale une apparence rigide et lisse, semblable à du plastique (voir la figure 51). Selon une étude menée en Corée du Sud, la commercialisation d'un premier œil artificiel imprimé en 3D devrait bientôt débuter (en 2020). Cet œil est fabriqué grâce à un processus de photopolymérisation, où un laser laser UV est projeté sur une résine liquide photosensible, ce qui la fait durcir au contact de la lumière. La pièce est ainsi créée couche par couche, selon la forme désirée **[29]**.



Figure 51 : Des yeux artificiels imprimé en 3D **[29]**.

IV.5.2 Les métaux

a. L'aluminium

L'aluminium est un matériau couramment utilisé dans l'impression 3D en raison de sa légèreté, de sa résistance et de sa durabilité. Les alliages d'aluminium les plus courants sont l'AlSi10Mg et l'AlSi7Mg0,6, qui offrent une excellente résistance à la traction, à la fatigue et à la corrosion. L'impression 3D avec de l'aluminium implique la fusion de poudre d'aluminium couche par couche à l'aide d'un laser ou d'une source de chaleur pour créer une pièce solide. Bien que l'impression 3D avec de l'aluminium puisse être plus difficile que celle

avec d'autres matériaux, les progrès technologiques ont permis de surmonter ces difficultés et de produire des pièces en aluminium de haute qualité.

b. L'acier inoxydable

Également connu sous le nom d'inox, était le premier métal disponible sur le marché pour l'impression 3D. Sa dénomination indique sa forte résistance à la corrosion, ce qui en fait un choix idéal pour les pièces soumises à des environnements difficiles. En outre, l'acier inoxydable possède d'excellentes propriétés mécaniques, ce qui le rend adapté à une grande variété d'applications. Il peut également être combiné avec des métaux précieux tels que l'os ou l'argent pour créer des pièces uniques et esthétiques **[9]**.

c. Le titane

Le titane est un matériau très apprécié pour l'impression 3D en raison de sa résistance élevée, de son rapport résistance/poids élevé et de sa biocompatibilité. Les alliages de titane les plus couramment utilisés sont le Ti-6Al-4V et le Ti-6Al-7Nb, qui offrent tous deux une excellente résistance à la traction, à la fatigue et à la corrosion. L'impression 3D avec du titane implique la fusion de poudre de titane couche par couche à l'aide d'un laser ou d'une source de chaleur pour créer une pièce solide (voir figure 52). Bien que l'impression 3D avec du titane puisse être plus difficile que celle avec d'autres matériaux en raison de sa forte réactivité avec l'oxygène, les progrès technologiques ont permis de surmonter ces difficultés et de produire des pièces en titane de haute qualité.



Figure 52 : Exemple d'un objet en titane **[29]**.

IV.5.3 Autres matériaux

A. Céramique

La céramique est de plus en plus utilisée dans l'impression 3D, notamment dans les domaines médical, sanitaire et industriel. Les objets en céramique peuvent être fabriqués à l'aide de la technique de frittage sélectif par laser (SLS), qui utilise une poudre sèche

préalablement comprimée, ou par solidification du matériau à l'état liquide, un processus similaire à la technique FDM avec une tête d'impression modifiée **[29]**.



Figure 53 : Exemple d'objet en polyamide **[29]**.

B. Le sable

Le sable est un matériau naturel abondant et polyvalent, composé de petites particules rocheuses. Il est largement utilisé dans diverses applications, telles que la construction, la fabrication de verre et de céramique, ainsi que dans des processus industriels tels que la fonderie. Dans l'impression 3D, le sable peut être utilisé pour créer des moules temporaires pour des pièces métalliques aux formes complexes, ainsi que comme matériau d'impression 3D en lui-même. Les imprimantes 3D en sable utilisent généralement un liant pour solidifier les particules de sable et créer des objets solides. Cette technique est souvent utilisée pour créer des modèles architecturaux et des sculptures (voir figure 10). L'utilisation du sable dans l'impression 3D offre des avantages tels que la réduction des coûts et des délais de production, ainsi que la possibilité de créer des formes complexes et personnalisées.



Figure 54 : Exemple d'objet en sable **[29]**.

C. Le bois

Le bois composite, également connu sous le nom de WPC (Wood-plastic composite), est un matériau utilisé dans de nombreuses technologies d'impression 3D sous forme de filament. Il est composé de fibres de bois et de résine de polymère, ce qui le rend souple et facile à utiliser. Le bois composite est souvent utilisé pour l'habillage et l'isolation de bâtiments et de mobilier extérieur, car il résiste aux intempéries, au soleil et ne pourrit pas avec le temps. De plus, il ne nécessite pas d'entretien particulier, contrairement au bois brut. Ces avantages font du bois composite une matière première intéressante pour imprimer des objets à l'aspect du bois, mais sans ses inconvénients. La température d'impression, comprise entre 185 et 230°C, permet d'obtenir une couleur claire ou foncée à partir d'un bois standard, ce qui permet de nuancer et d'apporter une touche personnelle sans couche additive **[29]**.

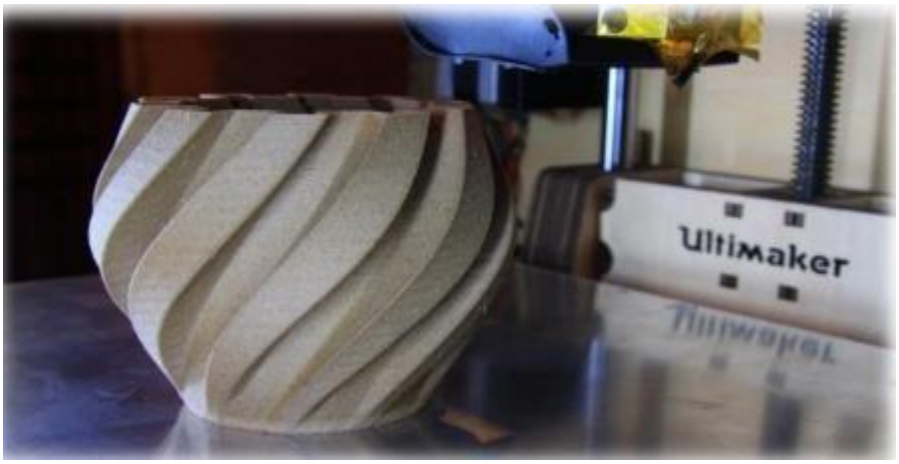


Figure 55 : Exemple d'objet en bois **[29]**.

Des études approfondies sont actuellement menées sur le potentiel de l'impression 3D dans le domaine des matériaux biologiques. Les chercheurs s'intéressent notamment à l'impression de tissus vivants, dans le but de développer des applications médicales innovantes. Parmi les possibilités envisagées, on peut citer l'impression de tissus externes pour les personnes souffrant de brûlures ou de plaies importantes, ainsi que l'impression d'organes humains pour des transplantations. Ces recherches ouvrent des perspectives prometteuses dans le domaine de la médecine régénératrice et de la biologie, et pourraient révolutionner la prise en charge des patients atteints de maladies graves **[31].**

IV.6 Les technologies de l'impression 3d

Il existe un large éventail de technologies d'impression 3D sur le marché, et plusieurs autres sont en phase de développement. Chacune de ces technologies nécessite un type spécifique de matériau d'impression, qui peut être un filament plastique en bobine (comme le

PLA, l'ABS, etc.), une résine liquide photosensible, ou encore une poudre (métallique, plastique, etc.). Chaque technologie d'impression 3D a ses propres avantages et est particulièrement adaptée à des applications spécifiques. Voici un aperçu des principaux types d'impression :

IV.6.1 Impression à base de thermoplastiques et de composites

a. Dépôt de matière fondue (FDM)

La technologie FDM (Fused Deposition Modeling) utilise une bobine de fil polymère qui est alimentée dans un moteur. Le fil est ensuite acheminé vers une buse chauffée, dont la température varie entre 120 et 220 degrés, en fonction du type de polymère utilisé. Lorsque la matière atteint la buse, elle atteint sa température de transition vitreuse, ce qui la rend malléable et permet son extrusion. La matière fondue est alors déposée couche par couche sur un plateau, qui peut être chauffé ou non, pour former l'objet désiré **[29]**. (Figure 56)

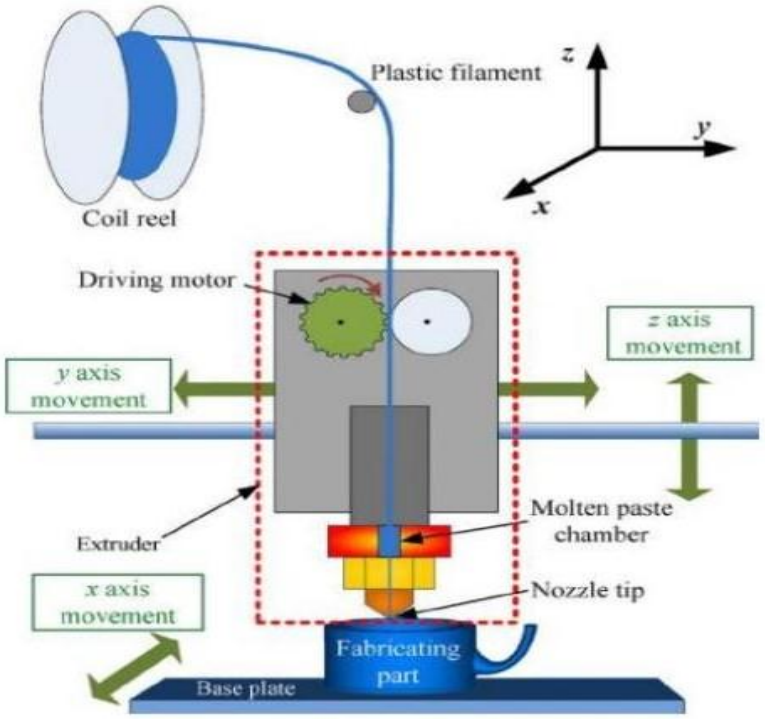


Figure 56 : Représentation du FDM **[26]**.

b. Le frittage laser (SLS)

Cette technologie est similaire à la stéréolithographie, mais au lieu d'utiliser une cuve remplie de polymère, elle utilise des matières dures sous forme de poudre, telles que le polystyrène, le verre, le nylon, certains métaux (comme le titane, l'acier et l'argent) ou encore de la céramique. Un laser est utilisé pour frapper sélectivement la poudre, ce qui la fait fondre

et se solidifier pour former l'objet désiré. La poudre qui n'a pas été touchée par le laser peut être réutilisée pour les impressions suivantes, ce qui réduit les déchets **[31]**. (Figure 13)

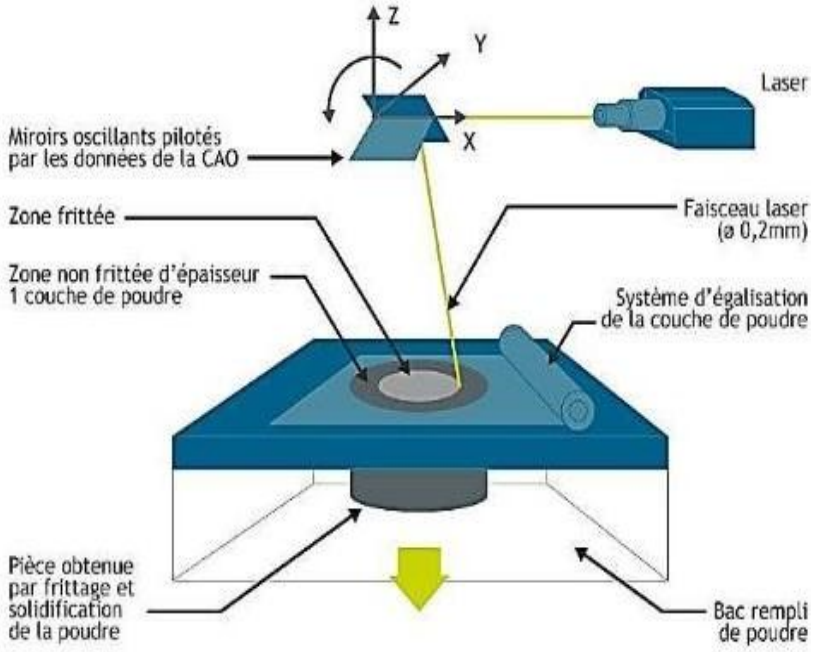


Figure 57 : Schématisation de procédé SLS**[31]**.

IV.6.2 Impression à base de résines

a. La stéréolithographie (SLA)

La technique d'impression 3D appelée stéréolithographie (SLA) repose sur l'utilisation d'une résine liquide qui se solidifie lorsqu'elle est exposée à la lumière ultraviolette (UV). Avec une source lumineuse précise, la résine est durcie de manière sélective, couche après couche, pour former des objets en trois dimensions détaillés et aux surfaces lisses.

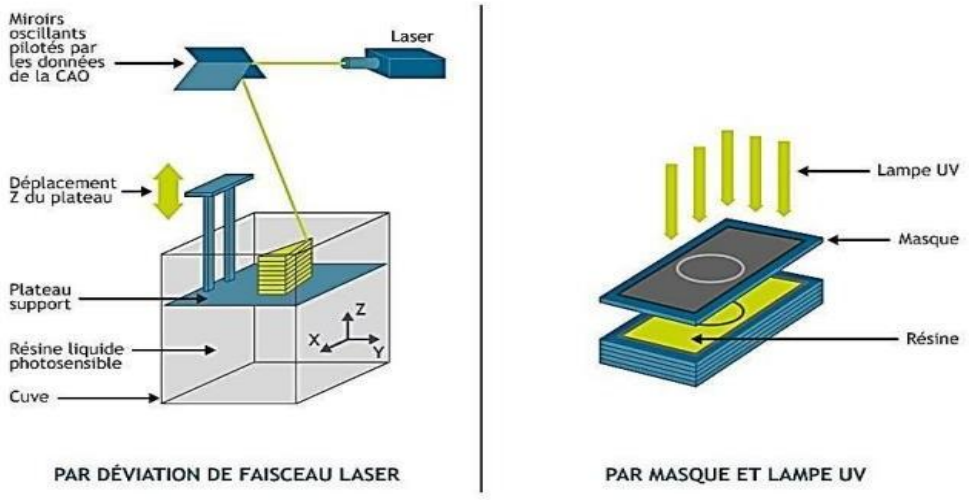


Figure 58 : Principe de fabrication par la Stéréolitographie **[31]**.

La projection de matière est une technique d'impression 3D qui repose sur la projection de gouttelettes de matériau pour créer des objets en trois dimensions. Cette méthode de fabrication additive permet de déposer de manière sélective et précise les gouttelettes, qui se solidifient rapidement pour former les différentes couches de l'objet **[29]**.

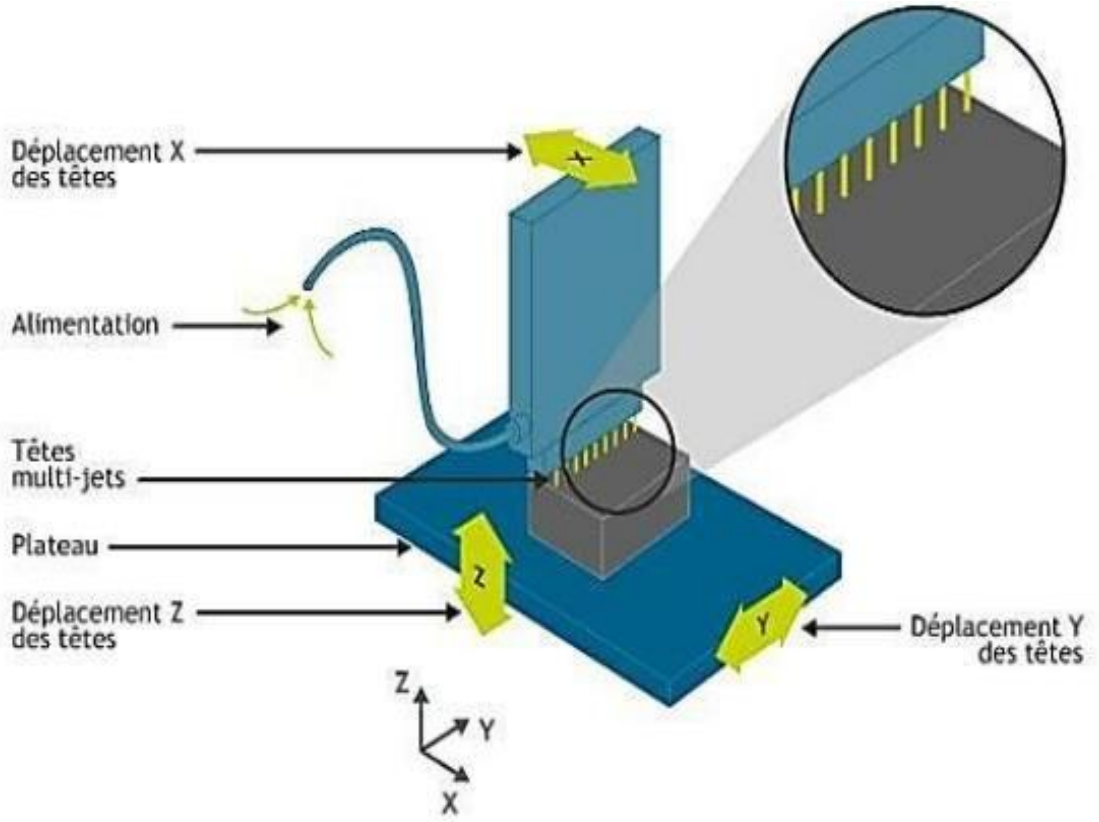


Figure 59 : Principe de fabrication par projection de gouttes**[31]**.

IV.6.3 Impressions à base de métaux

a. Le frittage laser de métal (DMLS)

Le DMLS (Direct Metal Laser Sintering) est une technologie de frittage spécifiquement conçue pour les alliages métalliques. Cette méthode présente l'avantage de produire des objets métalliques dépourvus de contraintes résiduelles et de défauts internes, contrairement aux pièces fabriquées par des procédés traditionnels. Toutefois, son coût élevé limite son utilisation à des applications de pointe, telles que la fabrication de composants pour l'industrie aérospatiale **[31]**.

b. La fusion par faisceau d'électrons (EBM)

Le procédé de fabrication additive EBM (Electron Beam Malting) dans lequel l'énergie thermique focalisée sert à faire fondre les matériaux au fur et à mesure qu'ils se déposent **[29]**.

IV.6.4 Impression 3D en couleur

a. Le procédé de projection de liant

Procédé de fabrication additive dans lequel un agent de liaison liquide est déposé de manière sélective pour lier/agglutiner des matériaux en poudre **[29]**.

b. Le laminage par dépôt sélectif

Procédé de fabrication additive dans lequel des couches de matériau sont liées entre elles pour former un objet **[29]**.

IV.7 Les champs d'application de l'impression 3D

De nos jours, la fabrication additive est une technologie de pointe qui transforme la façon dont nous concevons et fabriquons des objets. C'est une magie qui permet de créer des formes complexes, des structures légères et des pièces personnalisées, le tout en réduisant les déchets et en économisant du temps et des ressources. Que ce soit pour fabriquer une prothèse sur mesure qui change une vie, un prototype innovant qui révolutionne une industrie, ou une pièce de rechange qui sauve la journée…On cite, dans ce qui suit, les principaux domaines d'application de la fabrication additive.

IV.7.1 L'aéronautique l'aérospatiale

Le secteur aéronautique a été l'une des premières industries à adopter l'impression 3D. Initialement utilisée pour le prototypage rapide, la fabrication additive est de plus en plus employée pour produire des pièces d'utilisation finale. Et ce, pour des raisons évidentes. La technologie permet de créer des pièces aux géométries complexes, plus légères et plus solides, une nécessité dans le secteur aéronautique où la résistance et la légèreté sont primordiales. Afin d'illustrer l'importance de l'impression 3D dans le domaine aéronautique, nous avons sélectionné certaines des applications les plus récentes du secteur **[32]**.



Figure 60 : Drone fabriqué en impression 3D.

IV.7.2 L'automobile

L'automobile a été l'un des premiers secteurs à adopter la fabrication d'additifs, intégrant les systèmes d'impression 3D dans le prototypage rapide des moteurs et des composants de moteurs, des boîtiers de transmission et plus encore. En effet, la chaine de production représente l'un des grands freins aux concepteurs dans l'industrie automobile : la fabrication des pièces est standardisée et tout changement implique évidemment d'importants Chapitre I : Rappels bibliographiques 19 investissements. Pour cette raison, les concepteurs en ce secteur ont eu recours à l'impression 3D pour prototyper et fabriquer plus rapidement **[29]**.

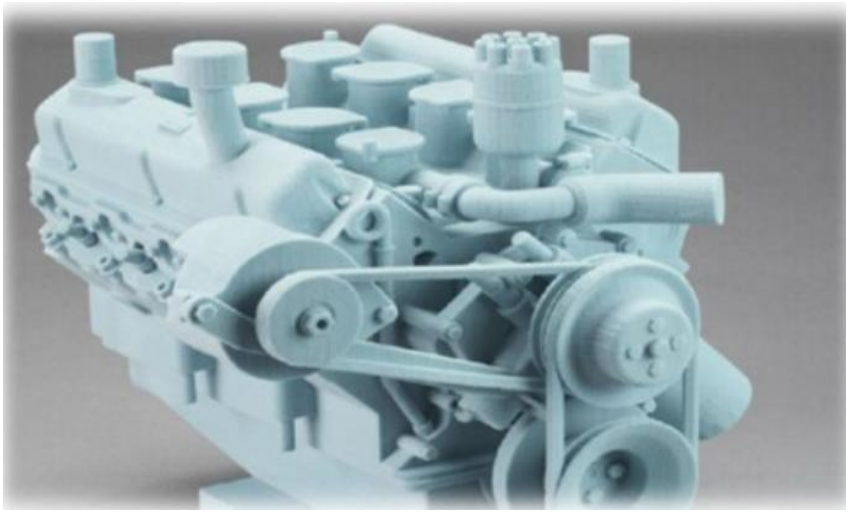


Figure 61 : Prototype d'un moteur réalisé par une impression 3D **[29]**.

IV.7.3 Architecture

L'imprimante 3D permet aux cabinets d'architecture, aux bureaux d'études ou studios de design d'avancer rapidement en créant des modèles résistants et complexes à partir de données CAO issues d'un logiciel d'architecture ou de design. Les modèles d'impression 3D sont lisses et donnent des maquettes détaillées dans une large gamme de matériaux dont les photopolymères, y compris ceux rigides prêts pour la peinture. L'application de la fabrication additive dans ce domaine permet de réduire considérablement le temps et les dépenses de production des maquettes qui nécessitent souvent des détails très précis imprimées en 3D et qui sont également plus résistantes que les modèles traditionnels **[29]**.

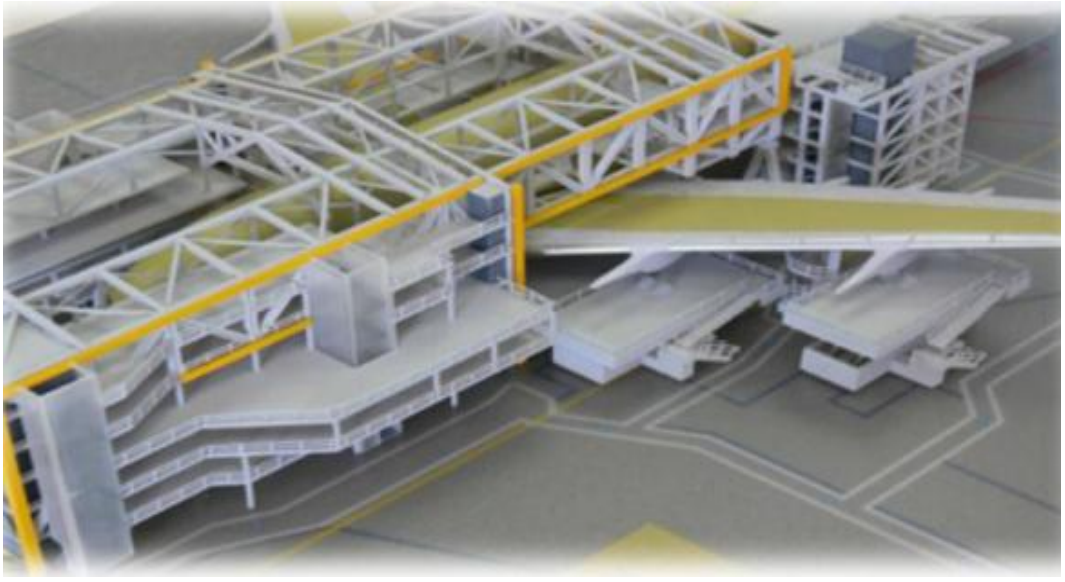


Figure 62 : Maquette d'architecture réalisée par l'impression 3D **[29]**.

IV.7.4 Le biomédical

On considère le secteur médical comme l'un des adeptes phares de l'impression 3D, qui offre à cette technologie un énorme potentiel de croissance en raison des options de personnalisation et de l'amélioration de la vie des gens au fur et à mesure que ces procédés sont actualisés et que les matériaux sont développés.

Les technologies d'impression 3D sont utilisées pour diverses applications. En plus de la création de prototypes dans le secteur médical et dentaire, ces technologies sont utilisées pour créer des moules de couronnes dentaires et des outils pour réaliser des bagues orthodontiques ; et pour fabriquer des appareils médicaux sur mesure tels que les prothèses auditives, les semelles orthopédiques, les prothèses personnalisées et les implants uniques. Les développements de cette technologie ont permis également l'impression 3D de peau, d'os, de tissu, de médicaments et même d'organes humains. Néanmoins, ces technologies sont encore largement éloignées de la commercialisation **[30]**.

A. La fabrication de médicament

En 2015, le premier médicament imprimé en 3D, le Spritam® (levetiracetam), a été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA). En pratique, le principe actif est dispensé en pharmacie sous forme d'une poudre, l'impression est ensuite réalisée par le patient lui-même à son domicile.

Les techniques d'impression appliquées à la production de médicaments sont nombreuses. On peut citer comme exemple l'impression par jet de matière ou encore par extrusion de matière. Différents matériaux peuvent être utilisés (alcool polyvinylique, acide polylactique, polycaprolactone) en fonction de la biodisponibilité souhaitée. Enfin, l'impression 3D a également un intérêt en phase pré-clinique du développement d'un 27 médicament. Différents dosages d'un principe actif peuvent être formulés rapidement et testés pour en évaluer la toxicité voir (la figure 16).



Figure 63 : Les médicaments de FabRx **[9]**.

B. La bio-impression

Selon Guillemot la bio-impression est définie comme « l'utilisation de technologies d'impression assistées par ordinateur permettant l'arrangement et l'assemblage de structures vivantes ou non, avec une organisation en deux ou trois dimensions, afin de produire des structures composites qui pourront être utilisées pour des applications en médecine régénératrice, pour des études pharmacocinétiques ou bien pour des travaux fondamentaux de biologie cellulaire ». La bio-impression est donc l'impression de tissus biologiques vivants, comprenant des cellules, des facteurs de croissance, des composants de la matrice extracellulaire, associés à des biomatériaux comme montre ci-dessous **[9]**.



Figure 64 : Une oreille avec la bio-impression **[9]**.

C. La production de dispositifs médicaux

La fabrication de dispositifs médicaux par impression 3D est le secteur où cette technologie semble actuellement le plus avancé. En chirurgie dentaire, cette technologie est utilisée depuis plus de vingt ans pour la production de moules et d'implants dentaires. De

nombreux cabinets dentaires se sont équipés d'imprimantes 3D et les utilisent dans leur pratique courante 30. Avec l'arrivée sur le marché d'imprimantes 3D à bas coûts, le grand public a également pu s'équiper et de nombreuses applications concernant des dispositifs médicaux ont été relayées dans la presse. On peut citer comme exemple la fabrication de dispositifs d'immobilisation des membres ou encore l'impression d'une main articulée (figure 21) **[30]**.

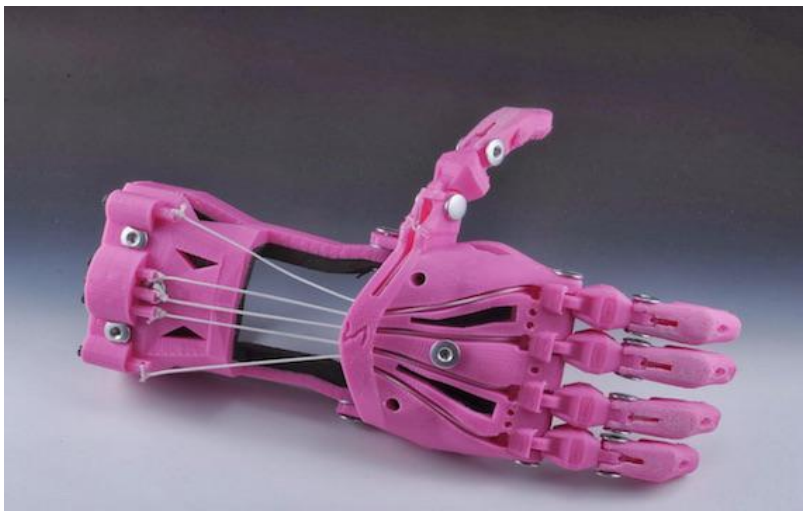


Figure 65 : Main articulée produite par impression 3D **[30]**.

Le secteur hospitalier a également été impacté par cette innovation, et plus particulièrement la chirurgie, où de nombreuses applications ont vu le jour. On peut distinguer trois types de dispositifs conçus par impression 3D en chirurgie :

- **Les modèles anatomiques :** ils peuvent être utilisés en préopératoire pour la préparation de l'intervention, pour l'information du patient ou encore pour la conformation des implants crâniens. Ils sont également un outil utile pendant l'intervention pour aider le chirurgien à garder ses repères anatomiques au cours d'une intervention complexe.
- **Les guides chirurgicaux :** ces guides sont utilisés quasiment exclusivement en chirurgie osseuse pour guider le chirurgien lors des ostéotomies ou pour obtenir un bon alignement des vis lors d'une ostéosynthèse.
- **Les implants personnalisés pour un patient :** ce sont principalement des implants 29 pour la chirurgie maxillofaciale, mais la littérature rapporte également la production de vertèbres, de prothèse de hanche ou encore d'une prothèse trachéo-bronchique **[30].**

IV.8 Les avantage de l'impression 3D

En plus de l'avantage de cette technologie dans le prototypage 3D, elle est de plus en plus utilisée pour créer des produits finis. Les raisons d'utilisations sont multiples, à savoir :

- **La rapidité :** L'impression 3D permet d'éviter la création de moules d'injection de plastiques ou de moules pour pièces en métal, particulièrement couteuse et longue (4 à 6 semaines), il est évidemment plus facile et rapide de produire un fichier 3D qu'un moule.
- **La maîtrise des coûts :** Avec l'impression 3D la perte des matériaux est beaucoup moins importante que dans les techniques traditionnelles dites soustractives. A titre d'exemple, la perte de matière dans la fonderie métallique est de l'ordre de 50% alors qu'elle est nulle via les techniques d'impression 3D d'un métal par fusion laser.
- **La personnalisation :** Il est aisé de personnaliser un produit en modifiant le fichier 3D, alors qu'avec un moule toute personnalisation du produit est impossible à moins de produire un nouveau moule. La notion de Mass customisation (ou customisation de masse) est au cœur de la réflexion des projets de l'impression 3D.
- **La précision avec la qualité de la haute résolution :** Une impression 3D haute résolution est désormais possible grâce aux techniques de laser. La précision est de l'ordre du micro dans l'impression 3D par fusion laser. Ces performances permettent de produire des objets à haute valeur ajoutée et avec une grande résolution.
- **La Gestion du stock :** Dans les industries de pointe initiatrices de l'impression 3D, la notion de « Spare part on demand », ou pièces détachées à la demande, est d'une importance capitale. Plusieurs raisons à cela : limiter la dépendance à son fournisseur ; donner vie à des pièces qui ne sont plus sourçables ; éviter les rayonnages de pièces, encombrants et couteux. L'impression 3D est là aussi une réponse adaptée pour obtenir des pièces imprimées pas chères et rapidement.
- **La relocalisation :** L'impression 3D permet aujourd'hui de produire des milliers de pièces avec une nationalité économique à la demande. Cela n'était pas le cas il y encore quelques années. C'est clairement une opportunité pour les entreprises des pays industrialisés pour rapatrier des projets qui ont parti auparavant vers les ateliers du monde comme la Chine ou l'Inde. En outre, les pays émergents comme le nôtre peuvent en bénéficier pour produire les pièces de rechange des machines industrielles **[30]**.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons approfondit nos connaissances concernant l'impression 3D, les matériaux utilisés dans l'impression 3D comme la PLA, des divers techniques de cette dernière tels que la méthode de dépôt de matière fondu (FDM), grâce à cette technique nous avons pu réaliser un prototype d'un implant cochléaire.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la partie expérimentale qui a était faite sous forme d'un stage au service ORL Belloua de Tizi-Ouzou et réalisation d'un prototype avec l'impression 3D.

Partie expérimentale et réalisation

V.1 Introduction

Aujourd'hui, l'implantation cochléaire est une intervention maîtrisée qui a permis d'améliorer la qualité de vie des milliers de personnes dans le monde.

Après avoir éclairé les différentes notions théoriques, relatives au thème étudié à travers une présentation structurée en quatre chapitres, nous mettons en pratique les acquis de cette partie théorique. Ce chapitre est consacré à la partie pratique de notre travail qui a pour but de montrer les étapes de l'implantation cochléaire au sein de service ORL BELLOUA de Tizi-Ouzou ainsi que la partie de réalisation d'un prototype de cet implant cochléaire avec l'impression 3D.

Partie I : Implantation cochléaire CHU Belloua-Tizi OUZOU

V.2 Cadre et lieu de stage

Notre stage a été effectués au sein de service ORL à L'unité de BELLOUA à Tizi-Ouzou. Ce dernier est composé de plusieurs services, le service de consultation, le bloc opératoire et service d'audiomètre.



Figure 66 : Unité BELLOUA CHU Nedir Mohammed de Tizi

L'unité Belloua est un ancien sanatorium construit au début des années 1950 sur les hauteurs nord de la ville de Tizi Ouzou et sur le flanc sud du mont Redjaouna. À l'époque, le sanatorium accueillait des patients atteints de tuberculose et d'autres maladies respiratoires.

Dans les années 1970, le sanatorium a été transformé en hôpital public pour répondre aux besoins croissants de la population locale en matière de soins de santé. Depuis lors, l'hôpital a connu plusieurs rénovations et extensions pour améliorer ses infrastructures et ses équipements médicaux.

Le service d'ORL de l'unité Belloua centre hospitalo-universitaire-NEDIR Mohammed de Tizi-Ouzou est un centre de référence dans la chirurgie de l'implantation cochléaire en Algérie.

V.3 Le cycle d'implantation cochléaire

D'abord on va voir les étapes à suivre par le patient pour bénéficier d'un implant cochléaire (voir la figure 67).

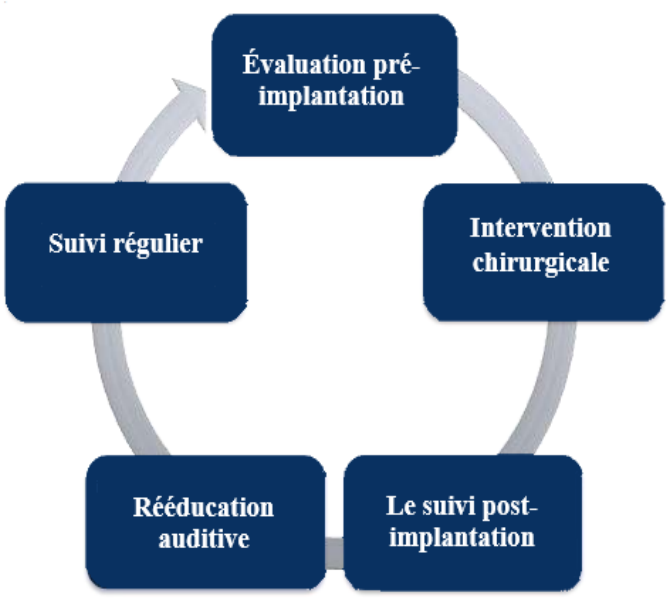


Figure 67 : Le cycle d'implantation cochléaire.

V.4 Bilan de pré-implantation cochléaire

Le patient est du sexe masculin nommé [redacted] âgé de 3 ans. Il a été admis au CHU Belloua pour une prise en charge en raison d'une hypoacousie associée à un retard de développement du langage.

1. Examen clinique

Antécédents (ATCD)

- **Personnels :** Adénectomie réalisée il y a 4 mois.
- **Familiaux :** Fratrie, avec une grande sœur présentant une hypoacousie et appareillée.
  Histoire de la maladie (HDA) : Les premiers signes ont été notés vers l'âge de un an, lorsque les parents ont observé une absence de réaction aux bruits environnants ainsi qu'une non-réponse aux appels, ce qui a conduit à des suspicions de perte auditive. **Examens et explorations audiologiques**
- **Otoscopie :** Aucune anomalie notable, tympans légèrement bleutés des deux côtés.
- **IRM cérébrale et rochers :** Normale, sans anomalie décelée.

- **TDM des rochers :** Normale, absence de toute anomalie structurelle.
- **Impedancemétrie :** Légère déviation des pressions négatives avec absence de réflexe stapédien.
- **ASSR (Potentiels Évoqués Auditifs)** (Octobre 2023) **:** Résultats indiquant une surdité profonde bilatérale, avec aucune réponse détectée à 90 dB dans les deux oreilles.
- **PEA (Potentiels Évoqués Auditifs)** (Avant 2023) :

Oreille droite : Seuil auditif moyen fixé à 70 dB sur 8000 Hz, absence de réponse à 90 dB sur les autres fréquences.

Oreille gauche : Aucune réponse détectée entre 70 et 90 dB sur toutes les fréquences testées.

Conclusion

- Diagnostic : Surdité profonde bilatérale confirmée chez le patient [redacted] nécessitant une prise en charge adaptée pour améliorer sa perception auditive.

2. Bilan audiologique

- **Tests Audiométriques**

Audiométrie en Champ Libre : L'enfant est encouragé à répondre à des sons en jouant avec des jouets ou en regardant des images. Cela permet d'évaluer sa capacité à détecter les sons dans un environnement naturel.

Audiométrie Conditionnée par le Jeu : L'enfant est entraîné à effectuer une action simple (comme mettre un bloc dans une boîte) en réponse à des sons. Ce test est plus précis que l'audiométrie en champ libre.

- **Tests Objectifs**

Potentiel Evoquée Auditif (PEA) : Les PEA permettent de mesurer la réponse de la voie auditive jusqu'au tronc cérébral en réponse à un stimulus sonore. Chez un enfant de 3 ans avec une surdité profonde, les PEA sont souvent absents ou montrent une réponse très diminuée, indiquant une transmission sonore inefficace.

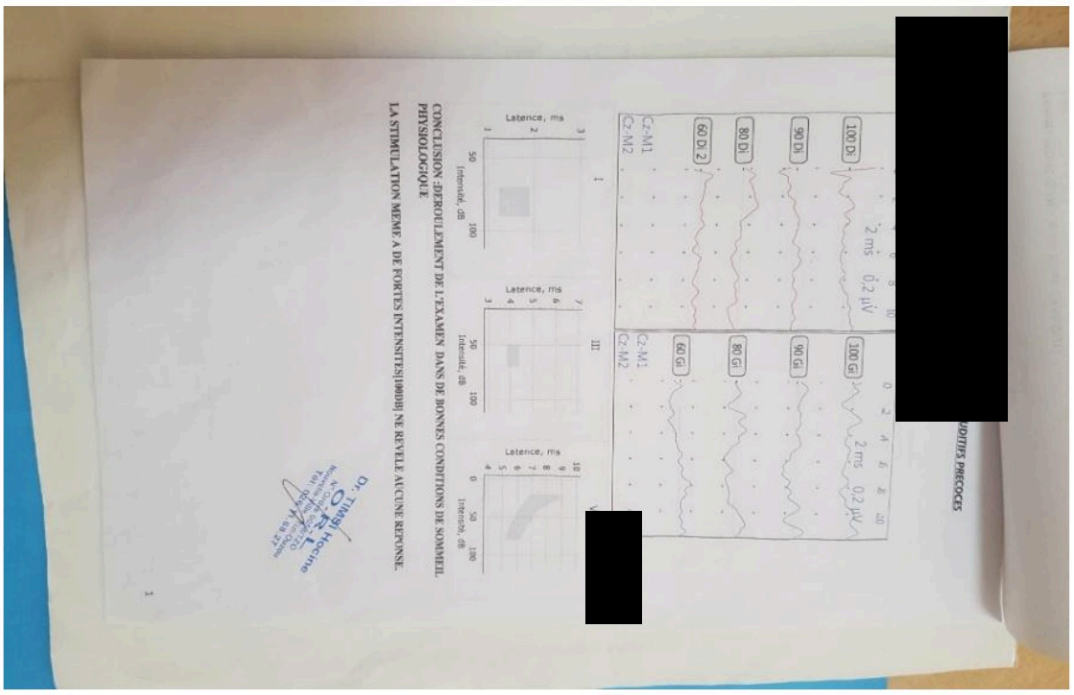


Figure 68 : Potentiel Evoquée Auditif (PEA) (voir annexe 1).

- **Impedancemétrie**

Cet examen évalue la fonction de l'oreille moyenne. En cas de surdité cochléaire profonde, le réflexe stapédien est souvent absent, ce qui confirme une dysfonction auditive au-delà de l'oreille moyenne.

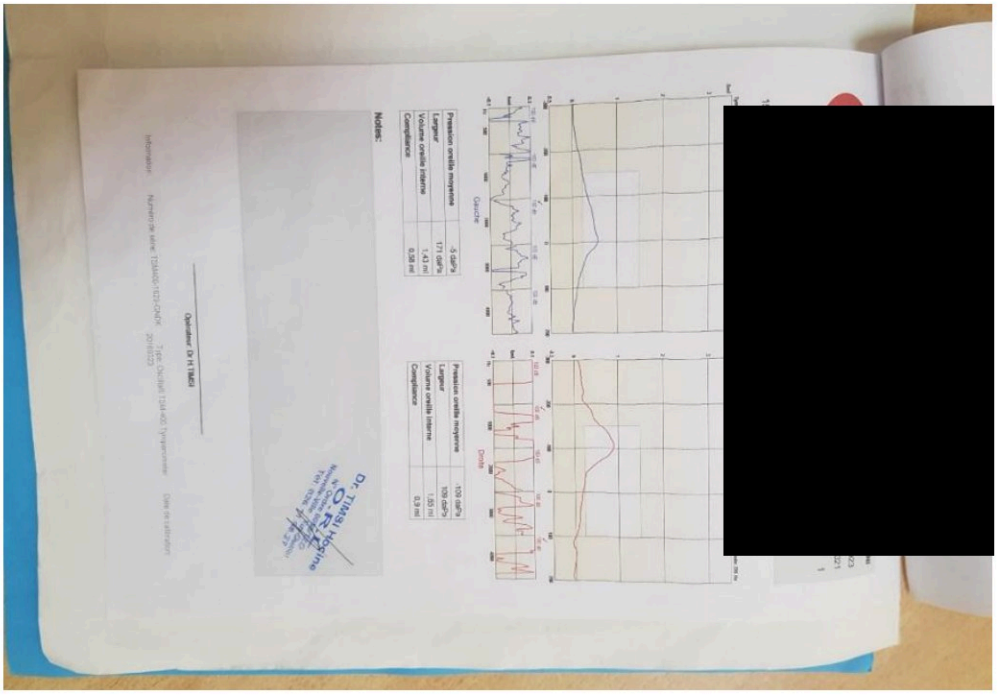


Figure 69 : Impedancemétrie (voir annexe 2).

- **Oto-émissions Acoustiques (OEA) :** Évaluent la fonction des cellules ciliées externes de la cochlée. Ce test est rapide et non invasif.

3. Bilan radiologique

[redacted] a été soumis à plusieurs examens radiologiques afin de mieux comprendre l'étiologie de sa surdité et d'évaluer son éligibilité à un implant cochléaire.

- **Tomodensitométrie (TDM) des rochers**

La TDM des rochers permet d'évaluer la structure osseuse de l'oreille interne, notamment la cochlée, les osselets et l'ensemble des structures auditives internes.

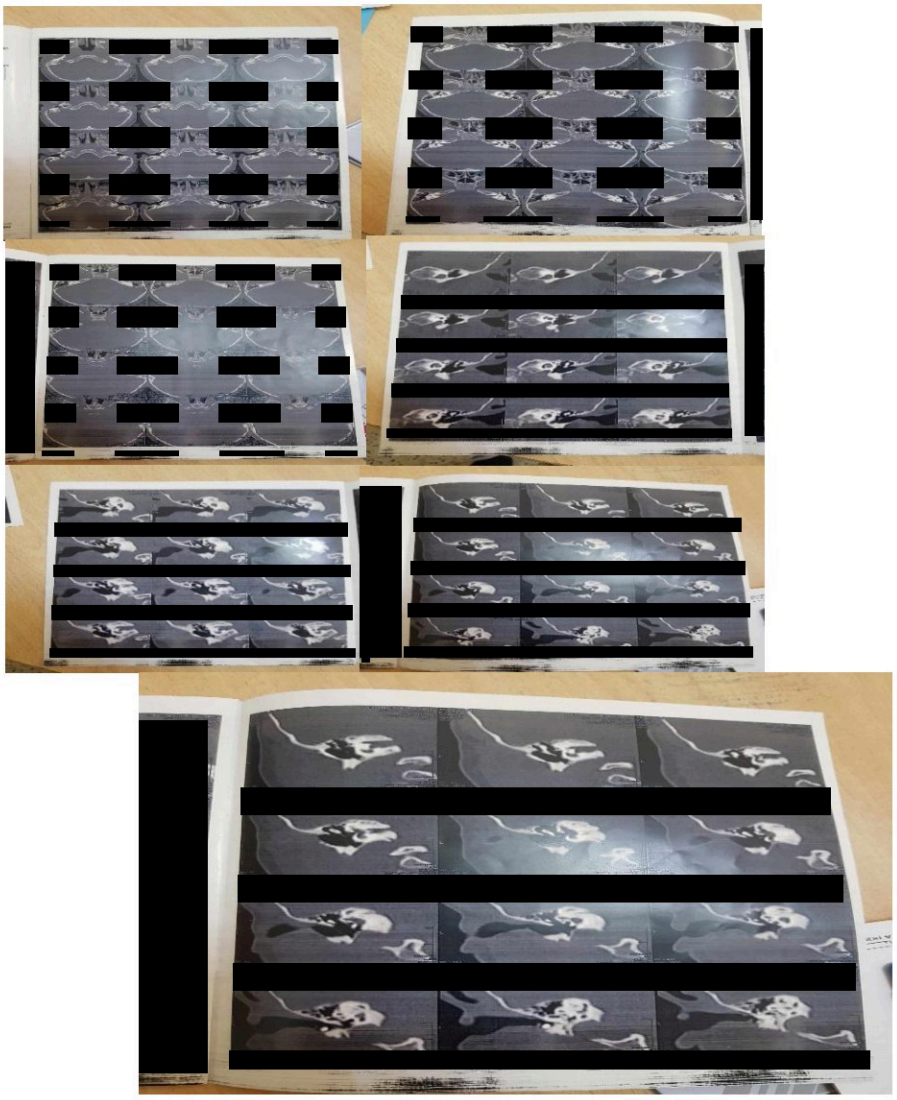
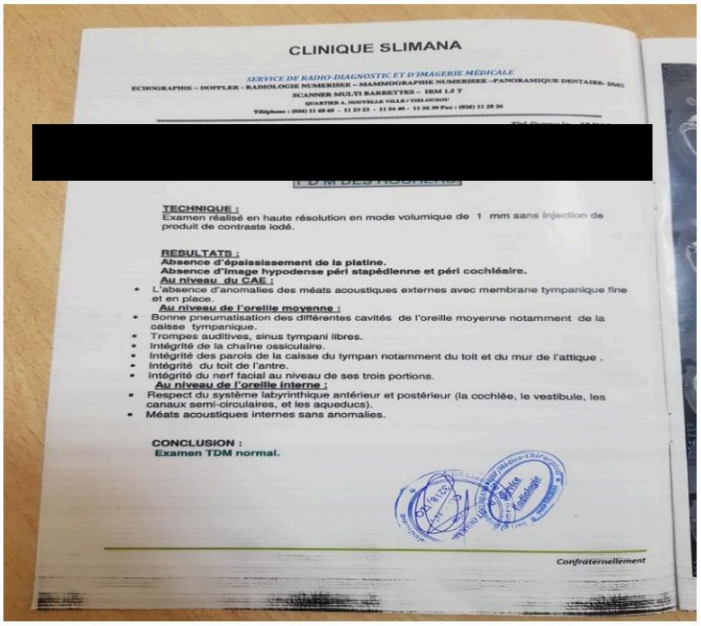


Figure 70 : TDM des rochers.

Résultats :

- La structure osseuse des rochers est normale sans signe de malformation osseuse ou anomalie congénitale.
- La cochlée est bien formée et il n'y a pas de calcifications ni de fractures visibles. Les osselets sont également normaux.
- Ces résultats indiquent que les structures osseuses sont adaptées à la pose d'un implant cochléaire (voir annexe 3).



CLINIQUE SLIMANA

SERVICE DE RADIO-DIAGNOSTIC ET D'IMAGERIE MÉDICALE

ECHOGRAPHIE – DOPPLER - RADIOLOGIE NUMERISEE – MAMMOGRAPHIE NUMERISEE –PANORAMIQUE DENTAIRE- DMO

SCANNER MULTI BARRETTES – IRM 1,5 T

[redacted]

TDM DES ROCHERS

TECHNIQUE :
Examen réalisé en haute résolution en mode volumique de 1 mm sans injection de produit de contraste iodé.

RESULTATS :
Absence d'épaississement de la platine.
Absence d'image hypodense péri stapédienne et péri cochléaire.
Au niveau du CAE :
- L'absence d'anomalies des méats acoustiques externes avec membrane tympanique fine et en place.

Au niveau de l'oreille moyenne :
- Bonne pneumatisation des différentes cavités de l'oreille moyenne notamment de la caisse tympanique.
- Trompes auditives, sinus tympani libres.
- Intégrité de la chaîne ossiculaire.
- Intégrité des parois de la caisse du tympan notamment du toit et du mur de l'attique .
- Intégrité du toit de l'antre.
- Intégrité du nerf facial au niveau de ses trois portions.

Au niveau de l'oreille interne :
- Respect du système labyrinthique antérieur et postérieur (la cochlée, le vestibule, les canaux semi-circulaires, et les aqueducs).
- Méats acoustiques internes sans anomalies.

CONCLUSION :
Examen TDM normal.

Confraternellement

Figure 71 : Compte rendu de la TDM.

- **Imagerie par résonance magnétique (IRM) cérébrale et des rochers**

L'IRM cérébrale et des rochers a été réalisée pour visualiser les structures nerveuses et identifier d'éventuelles anomalies au niveau du système auditif, notamment les nerfs auditifs, ainsi que pour exclure des pathologies intracrâniennes associées.

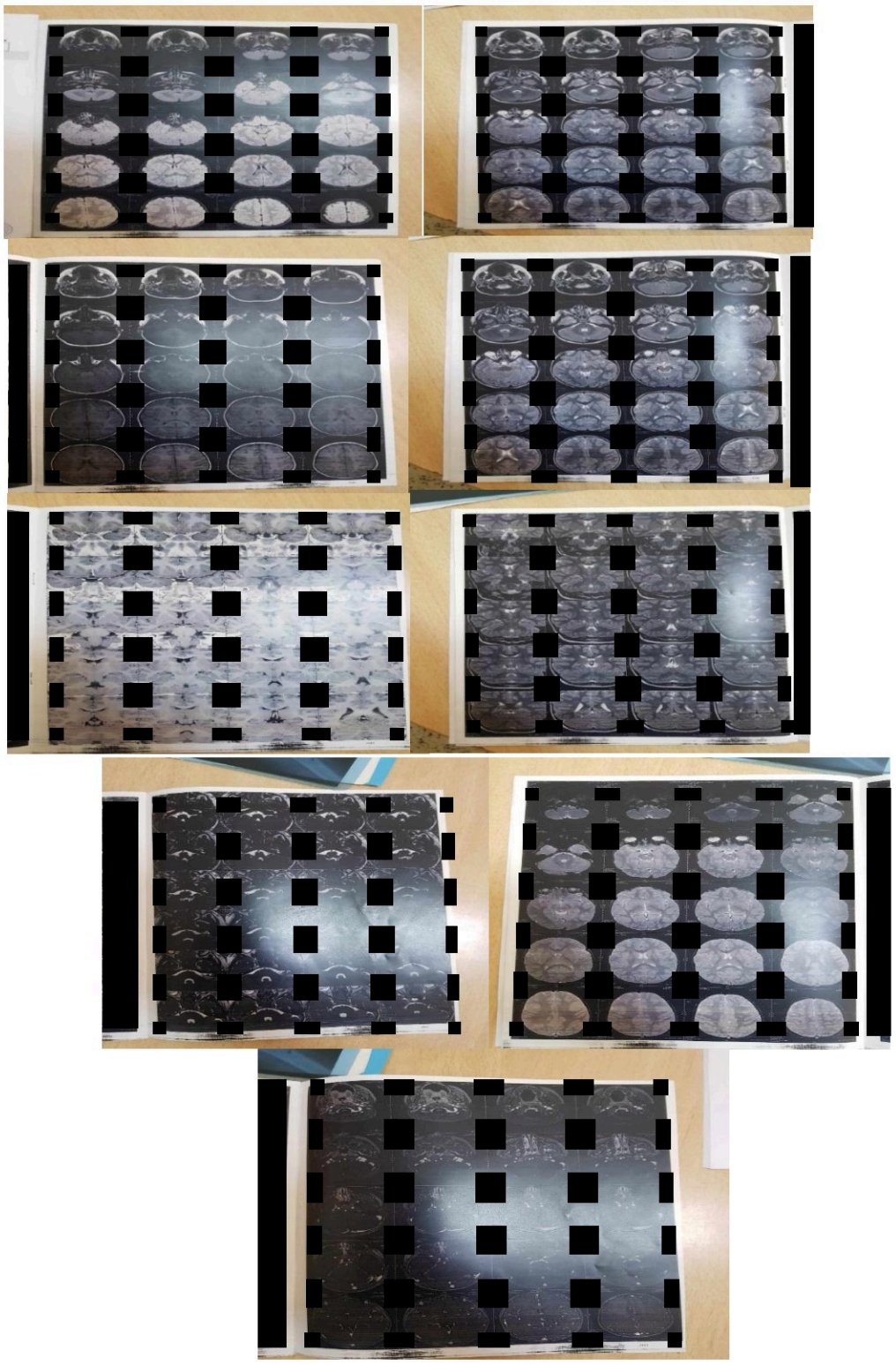
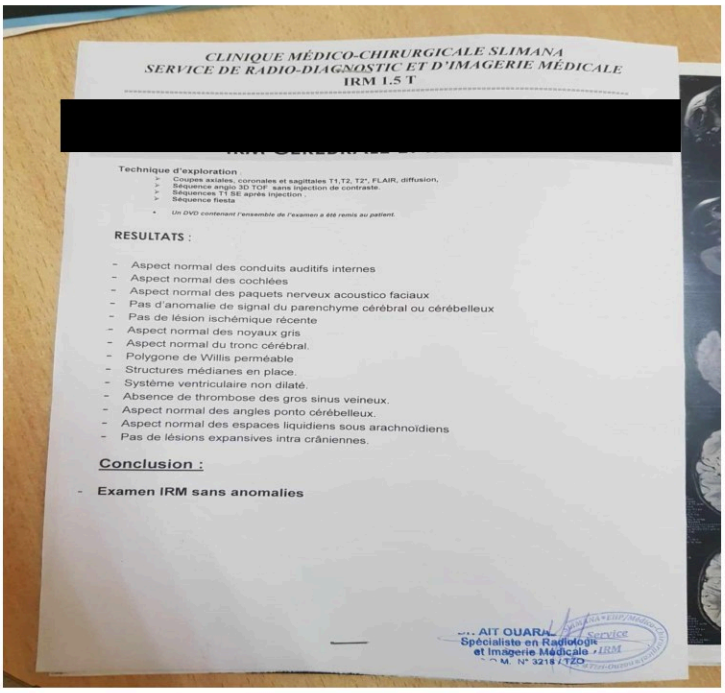


Figure 72 : IRM cérébrales et rochers (voir annexe 4).

Résultats :

- IRM cérébrale : Aucune anomalie n'a été détectée au niveau du système nerveux central, excluant la présence de lésions ou de tumeurs.

- IRM des rochers : Les nerfs auditifs sont bien visibles et ne présentent aucune compression ou dégénérescence. Il n'y a aucune malformation identifiable de la cochlée ou des autres structures de l'oreille interne.
- Ces résultats confirment l'absence d'anomalies structurelles au niveau des nerfs auditifs et des voies auditives centrales, rendant le patient potentiellement éligible à une implantation cochléaire (voir annexe 5).



CLINIQUE MÉDICO-CHIRURGICALE SLIMANA
SERVICE DE RADIO-DIAGNOSTIC ET D'IMAGERIE MÉDICALE
IRM 1.5 T

[redacted]

Technique d'exploration :
- Coupes axiales, coronales et sagittales T1,T2, T2*, FLAIR, diffusion,
- Séquence angio 3D TOF sans injection de contraste.
- Séquences T1 SE après injection :
- Séquence fiesta

* Un DVD contenant l'ensemble de l'examen a été remis au patient.

RESULTATS :

- Aspect normal des conduits auditifs internes
- Aspect normal des cochlées
- Aspect normal des paquets nerveux acoustico faciaux
- Pas d'anomalie de signal du parenchyme cérébral ou cérébelleux
- Pas de lésion ischémique récente
- Aspect normal des noyaux gris
- Aspect normal du tronc cérébral.
- Polygone de Willis perméable
- Structures médianes en place.
- Système ventriculaire non dilaté.
- Absence de thrombose des gros sinus veineux.
- Aspect normal des angles ponto cérébelleux.
- Aspect normal des espaces liquidiens sous arachnoïdiens
- Pas de lésions expansives intra crâniennes.

Conclusion :

- Examen IRM sans anomalies

... AIT OUARA
Spécialiste en Radiologie
et Imagerie Médicale / IRM
M. N° 3218 / TZO

Figure 73 : Compte rendu du l' IRM cérébrales et rochers.

- **Conclusion du bilan radiologique**

Les examens radiologiques réalisés, incluant la TDM des rochers, l'IRM cérébrale et des rochers, ne révèlent aucune anomalie significative. Ces résultats confirment que le patient présent des structures auditives et nerveuses normales et est donc un bon candidat pour l'implantation cochléaire.

4. Bilan orthophonique

[redacted] âgé de 3 ans, présente une **surdité profonde bilatérale**, confirmée par des tests audiologiques. Ce bilan orthophonique a pour objectif d'évaluer ses compétences linguistiques et communicatives, en vue d'une rééducation orthophonique après la mise en place de l'implant cochléaire.

- **Conclusion du bilan orthophonique**

Le bilan orthophonique confirme un retard sévère du développement du langage, directement lié à la surdité profonde bilatérale du patient. Le manque de perception auditive a fortement limité l'acquisition des compétences linguistiques verbales. Cependant, le patient montre des signes de communication non-verbale adaptés à son environnement, et un intérêt pour les interactions sociales, ce qui suggère un bon potentiel pour le développement du langage après l'implantation cochléaire.

5. Bilan psychologique

L'entretien psychologique pré-implantation vise à comprendre les attentes et la motivation de la famille, ainsi qu'à évaluer le développement global et psychoaffectif de l'enfant. Cet entretien permet d'examiner la relation de l'enfant avec les autres, son désir de communiquer, ses capacités d'adaptation, son potentiel affectif et cognitif, ainsi que sa motivation à bénéficier d'une prothèse cochléaire.

- **Conclusion du bilan psychologique**

Le bilan psychologique révèle un développement cognitif et émotionnel normal pour l'âge du patient, en dehors des défis liés à la surdité. L'enfant montre des signes de compensation visuelle efficace et un bon potentiel d'adaptation sociale et émotionnelle. Bien que l'absence de langage et de perception auditive ait limité certains aspects de son développement, son comportement global est stable et sa capacité à interagir socialement reste intacte.

V.5 Chirurgie de l'implant cochléaire

La préparation avant la chirurgie de l'implant cochléaire est une étape très importante, surtout pour un enfant de 3 ans. Voici comment cela se déroule :

1. L'équipe médicale organise minutieusement les instruments requis et se prépare avec rigueur pour l'intervention chirurgicale.



Figure 74 : Préparation du personnel médical à l'acte chirurgical (photo prise au CHU de Belloua).



Figure 75 : Organisation des instruments (photo prise au CHU de Belloua).

2. Le garçon a été placé sous anesthésie générale et a été installé sur le dos, la tête tournée du côté gauche opposé à l'oreille à opérer. Le chirurgien a ensuite procédé à la désinfection de la zone chirurgicale et a installé les champs stériles, le chirurgien commence en faisant une petite coupure derrière l'oreille à l'aide d'un bistouri. Cette coupure permet d'accéder à l'os situé derrière l'oreille, appelé l'os mastoïde.

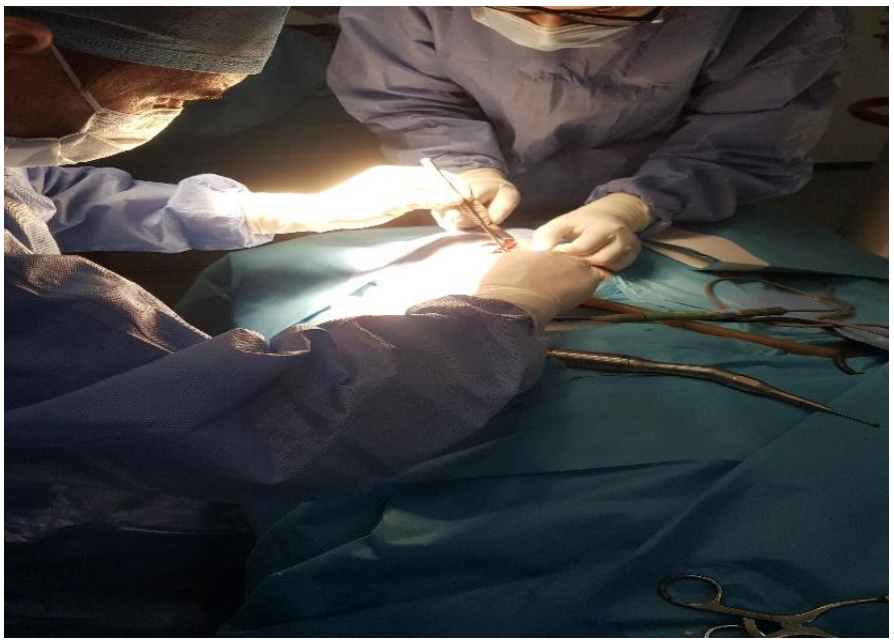


Figure 76 : Le chirurgien qui commence à réaliser l'incision (photo prise au CHU de Belloua).



Figure 77 : Incision de l'oreille achevée (photo prise au CHU de Belloua).

3. Après avoir fait l'incision, le chirurgien creuse une petite cavité dans l'os derrière l'oreille, appelée logette. Cette cavité est faite avec un outil spécial pour créer un espace où sera placé le récepteur de l'implant cochléaire, qui capte les sons et les envoie à l'oreille interne. Cette étape est importante pour que le récepteur soit bien protégé et reste en place sous la peau sans gêner l'enfant. Le chirurgien s'assure que la logette est bien ajustée pour éviter toute pression sur les tissus environnants.

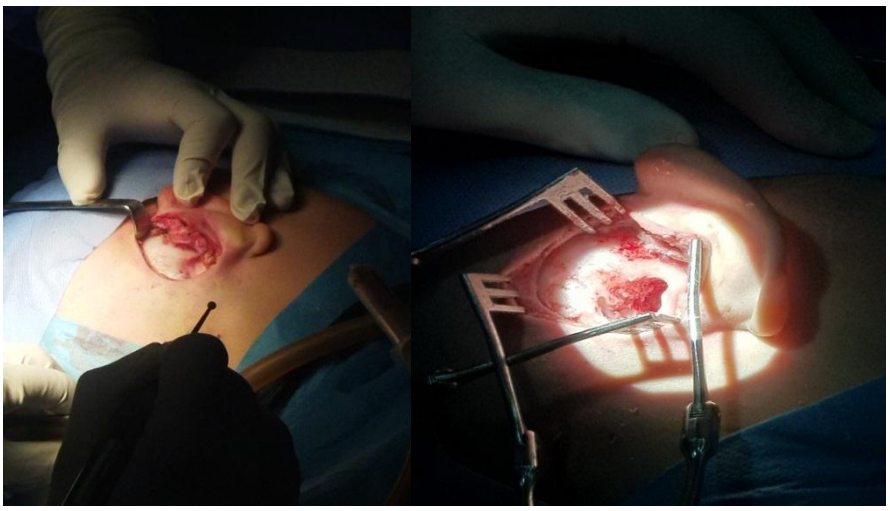


Figure 78 : Fraisage d'une logette pour le recueil du processus (photo prise au CHU de Belloua).

4. Après avoir préparé l'emplacement pour le récepteur de l'implant, le chirurgien localise la fenêtre ronde, une petite ouverture dans l'oreille interne, située dans la cochlée. Cette zone est importante car c'est par là que l'électrode de l'implant sera insérée pour transmettre les sons à l'oreille. Le chirurgien utilise un microscope pour voir cette zone avec précision, car il doit être très minutieux pour s'assurer que l'électrode est bien placée sans abîmer les structures délicates de l'oreille interne.

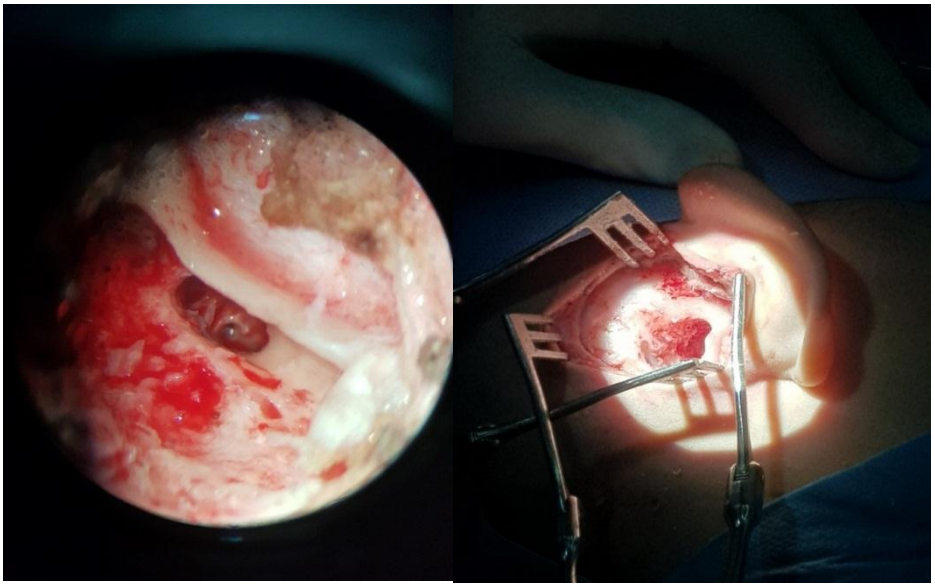


Figure 79 : Repérage de la fenêtre ronde.

5. Une fois la fenêtre ronde repérée, le chirurgien procède au nettoyage de la rampe tympanique, qui est une partie de l'oreille interne juste à côté de la fenêtre ronde. Ce

nettoyage est fait pour enlever délicatement les petites membranes ou tissus qui pourraient bloquer l'accès à la cochlée. Cette étape permet de préparer un passage propre et dégagé pour l'insertion de l'électrode de l'implant cochléaire, assurant ainsi une bonne transmission des sons. Le chirurgien travaille avec beaucoup de précision pour ne pas endommager les structures fragiles de l'oreille interne.



Figure 80 : Nettoyage de la rampe tympanique (photo prise au CHU de Belloua).

6. Après avoir nettoyé la rampe tympanique, le chirurgien introduit le porte-électrodes, qui contient les électrodes de l'implant cochléaire. Avec des mouvements précis, il guide doucement ce porte-électrodes à travers la fenêtre ronde et dans la rampe tympanique. Cette étape est très importante, car il faut s'assurer que les électrodes sont bien placées pour stimuler correctement les cellules nerveuses de l'oreille interne. Cela permettra à l'enfant de mieux entendre.

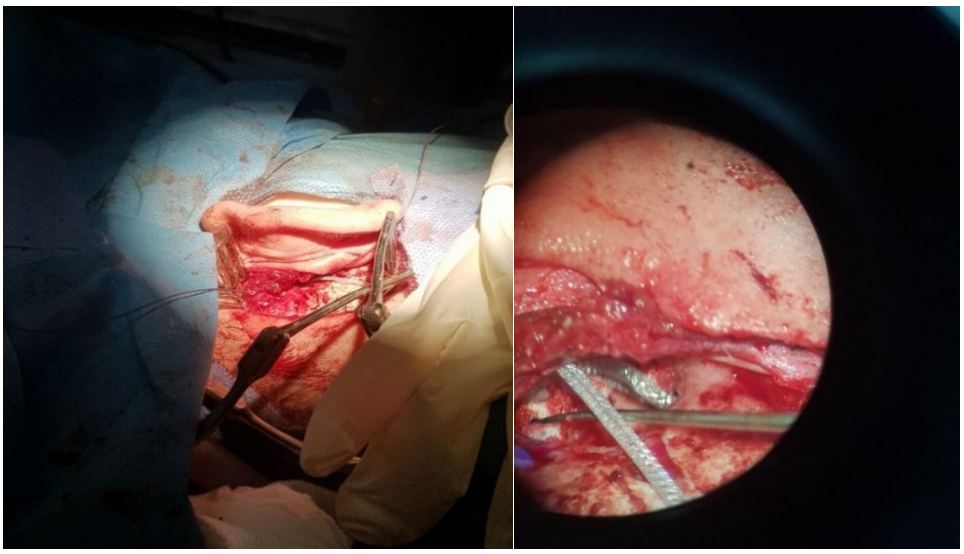


Figure 81 : Introduction des portes électrodes dans la rampe tympanique (photo prise au CHU de Belloua).

7. Une fois le porte-électrodes en place, le chirurgien place le processeur dans la logette qu'il a préparée. Cette étape consiste à bien installer le processeur, qui capte les sons et les transforme en signaux électriques. Le chirurgien vérifie que le processeur est bien fixé pour qu'il ne bouge pas sous la peau. Cela permet de s'assurer qu'il fonctionnera correctement.

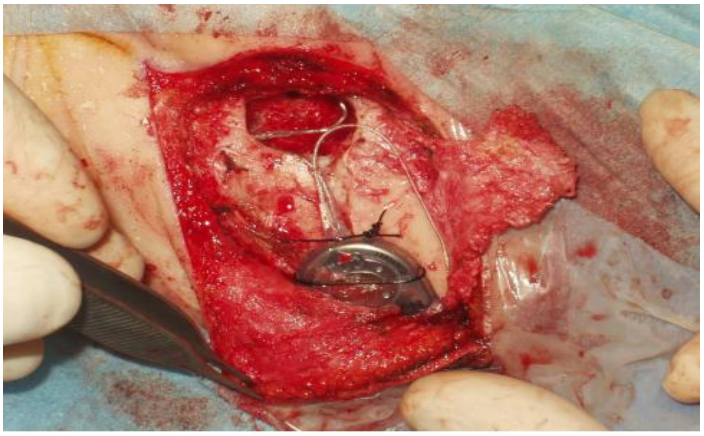


Figure 82 : Fixation du processeur dans sa logette.

8. Avant de fermer l'incision, un ingénieur en audiologie ou en dispositifs médicaux effectue une vérification du fonctionnement du processeur avec un logiciel spécialisé. Il teste les signaux émis par le processeur pour s'assurer qu'ils sont correctement captés par les électrodes implantées. Cela permet de confirmer que l'implant cochléaire fonctionne bien et qu'il est prêt à être utilisé.

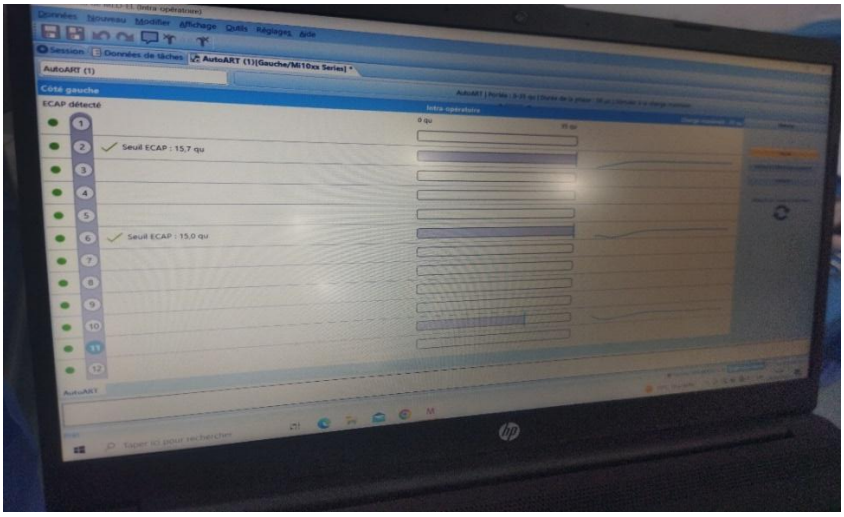


Figure 83 : Vérification sur le logiciel.

9. Une fois que tout est validé par l'ingénieur, le chirurgien peut alors procéder à la fermeture de l'incision, en s'assurant que tout est en ordre pour la récupération de l'enfant. Il commence par suturer les tissus sous la peau pour bien les remettre en place. Ensuite, il referme la peau avec des points de suture, en veillant à minimiser les cicatrices visibles. Une fois la fermeture terminée, le chirurgien nettoie à nouveau la zone pour s'assurer qu'elle est propre. Enfin, des pansements sont appliqués pour protéger l'endroit opéré.

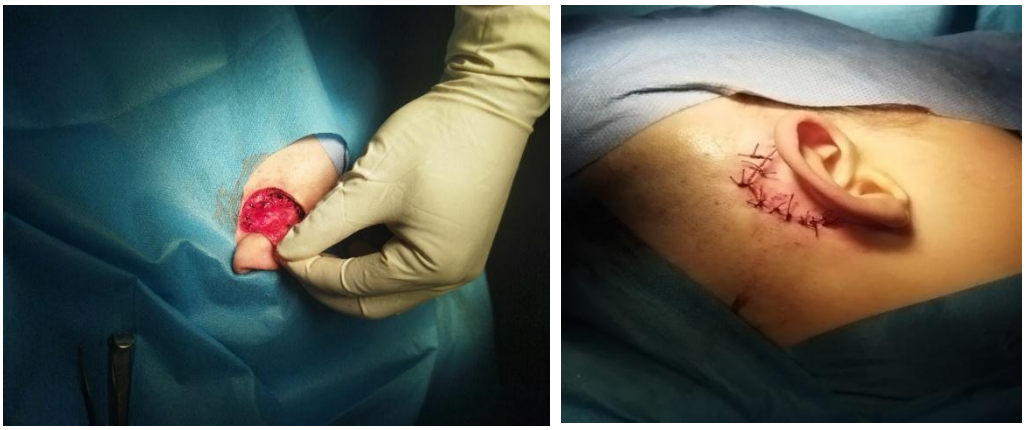


Figure 84 : Fermeture.

V.6 Le suivi post-implantation cochléaire

Après le transfert du patient vers la salle de réanimation, son réveil a eu lieu avec succès et l'enfant était calme et coopératif.

L'hospitalisation était de 10 jours, et une radiographie en incidence de Stenvers permettait de vérifier le positionnement des électrodes.

Son état était stable, l'activation de l'implant aura lieu dans un mois à partir du jour d'implantation.

Parie II : Réalisation d'un implant

V.7 Conception d'un implant cochléaire avec l'impression 3D

Après avoir assisté à une intervention chirurgicale pour une implantation cochléaire, nous allons passer à la réalisation d'un prototype d'un implant cochléaire à l'aide de l'impression 3d.

Nous allons suivre plusieurs étapes dans ce processus.

V.8 Logiciel de simulation

FreeCAD est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) gratuit et open-source qui permet de créer des objets en 3D. Il est utilisé par des ingénieurs, des architectes et des concepteurs pour des projets variés, comme la fabrication de pièces mécaniques, de produits, ou même de bâtiments.

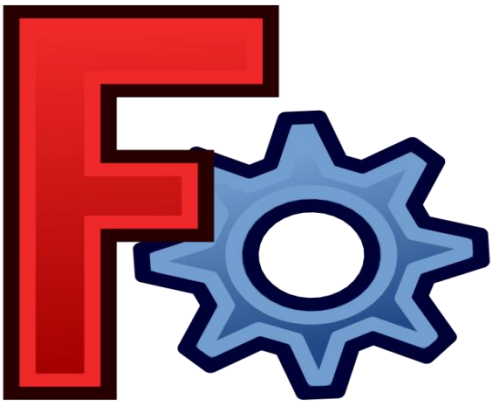


Figure 85 : Logo du logiciel FreeCad.

V.8.1 Caractéristiques et Avantages

FreeCAD fonctionne de manière paramétrique, ce qui signifie que vous pouvez définir des dimensions et des règles pour vos modèles, et les modifier facilement par la suite. Par exemple, si vous changez la taille d'une pièce, le reste du modèle s'ajuste automatiquement.

Voici quelques points clés de ce logiciel :

- **Création de modèles 3D** : Vous pouvez dessiner des formes simples (carrés, sphères, cylindres) et les combiner pour créer des objets plus complexes.

- **Importation et exportation de fichiers** : FreeCAD prend en charge plusieurs formats de fichiers (STEP, STL, OBJ, etc.), ce qui permet de partager facilement vos projets avec d'autres logiciels.
- **Outils pour dessiner en 2D** : Ces outils permettent de créer des croquis utilisés ensuite pour générer des objets en 3D.
- **Modules spécialisés** : FreeCAD propose des extensions pour l'architecture, l'usinage CNC ou encore l'analyse de la résistance des pièces.

V.8.2 Utilisation dans l'industrie et l'enseignement

FreeCAD est très utilisé pour les **projets de prototypage** ou la création de produits. Il permet de concevoir des pièces mécaniques détaillées et de les tester avant fabrication. Le logiciel est aussi populaire dans les écoles d'ingénierie car il est gratuit et offre une bonne introduction à la CAO.

V.8.3 Communauté et mises à jour

Étant open-source, FreeCAD est amélioré en continu par une grande communauté de développeurs. Ils publient régulièrement des mises à jour et ajoutent de nouvelles fonctionnalités. De plus, il existe de nombreux forums où les utilisateurs peuvent poser des questions et partager leurs idées.

V.8.4 Inconvénients et améliorations possibles

Malgré ses nombreux atouts, FreeCAD a quelques limites, notamment une interface parfois difficile à utiliser pour les débutants. Il n'a pas toutes les fonctionnalités avancées des logiciels payants comme CATIA ou SolidWorks, mais il est idéal pour des projets de petite à moyenne envergure.

Dans **FreeCAD**, la barre de menu général se situe en haut de l'interface et contient plusieurs menus permettant d'accéder aux différentes fonctionnalités du logiciel. Voici les principaux éléments que vous y trouverez :

1. Fichier

- **Nouveau** : Créer un nouveau document.
- **Ouvrir** : Ouvrir un fichier existant.

- **Enregistrer / Enregistrer sous** : Enregistrer le projet actuel.
- **Exporter** : Exporter le modèle dans différents formats (STEP, STL, OBJ, etc.).
- **Fermer** : Fermer le document ou quitter le programme.

2. Édition

- **Annuler / Rétablir** : Annuler ou rétablir la dernière action.
- **Couper / Copier / Coller** : Manipuler des objets dans le projet.
- **Supprimer** : Supprimer l'objet sélectionné.
- **Préférences** : Ouvrir les préférences du logiciel pour personnaliser l'interface et les paramètres.

3. Affichage

- **Vue standard** : Changer l'angle de vue (avant, arrière, droite, gauche, etc.).
- **Zoom** : Zoomer ou dézoomer sur le modèle.
- **Ajuster la vue** : Ajuster la vue pour afficher tout le modèle.
- **Mode de représentation** : Alterner entre les modes filaire, ombré, etc.

4. Outils

- **Mesurer** : Mesurer des distances ou des angles sur le modèle.
- **Création de macros** : Enregistrer et exécuter des macros pour automatiser des tâches répétitives.
- **Options de capture d'écran** : Capturer des images du modèle en cours.

5. Esquisse

- **Créer une esquisse** : Démarrer une esquisse en 2D.
- **Contraintes géométriques** : Ajouter des contraintes (alignement, égalité, etc.) à une esquisse.

- **Dimensions** : Définir des dimensions précises pour des lignes, cercles ou autres objets d'esquisse.

6. Partie / Corps

- **Créer une pièce** : Créer des objets 3D à partir d'esquisses.
- **Opérations booléennes** : Fusionner, soustraire ou diviser des solides.
- **Tronquer / Arrondir** : Ajouter des bords arrondis ou chanfreinés aux objets.

7. Fenêtre

- **Gestion des documents** : Organiser les fenêtres et documents ouverts.
- **Basculer entre les documents** : Passer d'un projet ouvert à un autre.

8. Aide

- **Documentation** : Accéder à la documentation en ligne de FreeCAD.
- **Forum** : Aller directement sur les forums d'utilisateurs.
- **À propos de FreeCAD** : Informations sur la version du logiciel.

Ces menus couvrent l'essentiel des fonctionnalités de FreeCAD, facilitant la gestion des fichiers, la modélisation, l'édition et la personnalisation du logiciel.

L'interface FreeCAD est basée sur la boîte à outils **Qt** et possède une bonne organisation. Certains aspects de l'interface peuvent être personnalisés. Vous pouvez, par exemple, ajouter des barres d'outils personnalisées avec des outils de plusieurs ateliers ou des outils définis dans des macros et vous pouvez créer vos propres raccourcis clavier. Mais les menus et barres d'outils par défaut fournis avec FreeCAD et ses ateliers ne peuvent pas être modifiés.

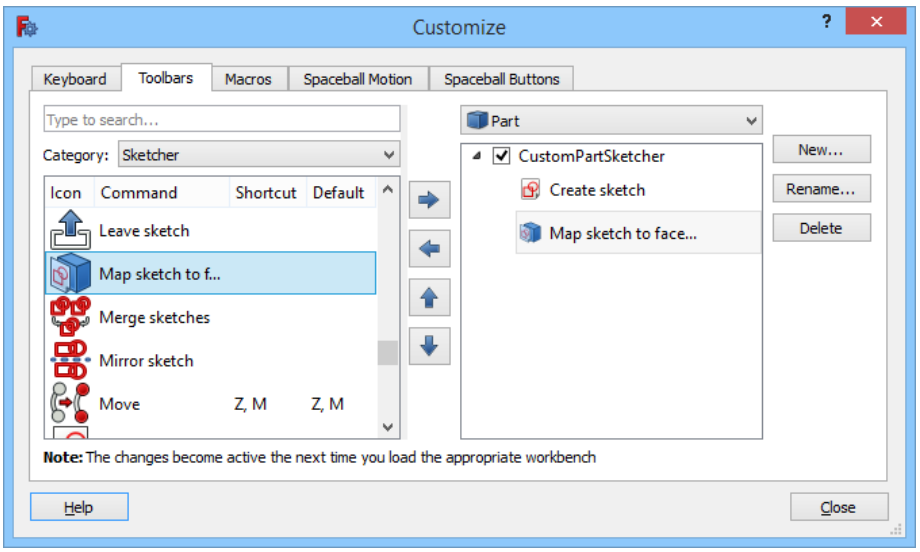


Figure 86 : La boite de dialogue de personnalisation de l'interface.

- **Utilisation**

1. Les commandes disponibles dans la boite de dialogue de personnalisation d'interface dépendent des ateliers qui ont été chargés dans la session FreeCAD en cours. Vous devez donc d'abord charger tous les établis dont vous souhaitez avoir accès aux commandes.

2. Il existe plusieurs façons de lancer la commande **Std Personnaliser :**

   - Sélectionnez l'option **Outils** → **Personnaliser...** du menu.
   - Cliquez avec le bouton droit sur une zone de barre d'outils et choisissez **Personnaliser...** dans le menu contextuel.

3. La boîte de dialogue **Personnaliser** s'ouvre. Pour plus d'informations, voir **Options.**

4. Le bouton **Aide** ne fonctionne pas pour le moment.

5. Appuyez sur le bouton **Fermer** pour fermer la boîte de dialogue.

Options

Dans la boîte de dialogue Personnaliser, les onglets suivants sont disponibles :

- **Clavier**

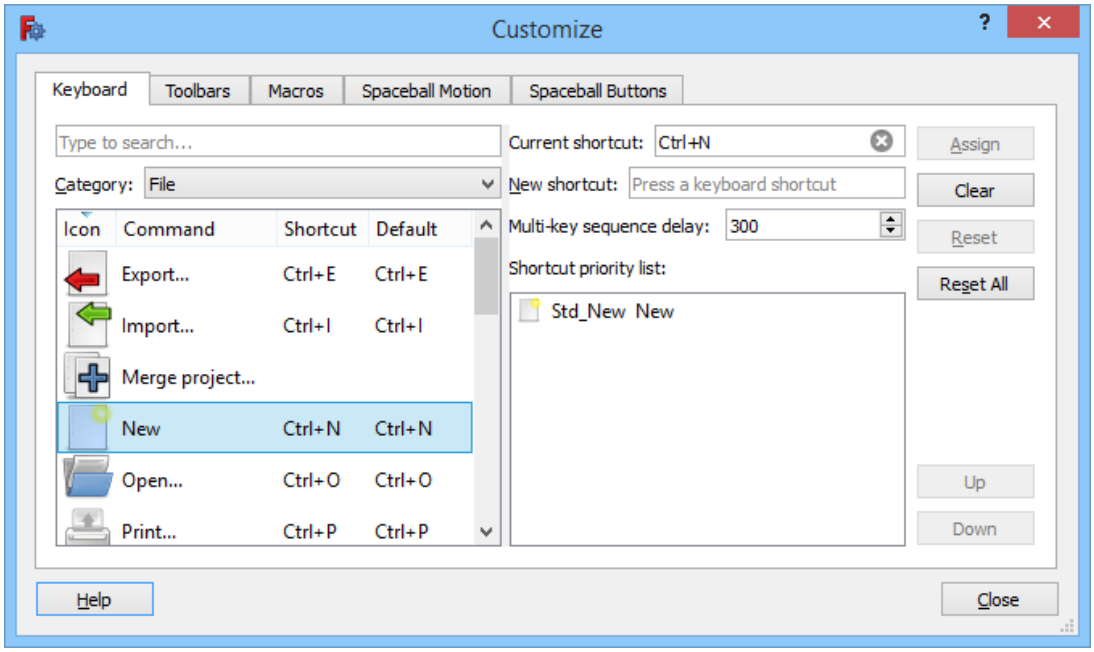


Figure 87 : L'onglet Clavier.

Dans cet onglet, des raccourcis clavier personnalisés peuvent être définis. Les raccourcis des macro-commandes peuvent être définis dans l'onglet **Macros.**

- **Recherche**

Vous pouvez rechercher des commandes en saisissant au moins 3 caractères de leur texte de menu ou de leur nom dans le champ de recherche. La recherche est insensible à la casse.

Il est également possible de rechercher des raccourcis :

- Dans le champ de recherche, les touches spéciales des raccourcis doivent être saisies sous forme de chaînes. Par exemple, pour rechercher des commandes qui utilisent **Ctrl** dans leur raccourci, entrez **ctrl** (4 lettres).
- Ajoutez des parenthèses pour rechercher des raccourcis à un seul caractère, par exemple : **(c).**
- Ajoutez une virgule et un espace entre les caractères des raccourcis multi-caractères, par exemple : **g**, **b**, **b**.

- **Ajouter un raccourci**

1. Sélectionnez une catégorie de commande dans la liste déroulante **Catégorie**.

2. Sélectionnez une commande dans le panneau **Commandes**.
    - Cliquez sur les en-têtes de colonne **Commande**, **Raccourci** ou **Défaut** pour réorganiser la liste.
    - Vous pouvez également faire glisser le séparateur à droite du panneau pour le redimensionner.
3. La case **Raccourci actuel** affiche le raccourci actuel, s'il est disponible.
4. Entrez un nouveau raccourci dans la zone de saisie **Nouveau raccourci**. Les raccourcis peuvent comporter jusqu'à 4 entrées. Chaque entrée est soit un caractère unique, soit une combinaison d'une ou plusieurs touches spéciales, soit une combinaison d'une ou plusieurs touches spéciales et d'un caractère. Utilisez **Retour** pour corriger les erreurs.
5. Les autres commandes actives (voir **Remarques**) qui utilisent déjà le raccourci seront listées dans la **Liste de priorité des raccourcis**.
6. Appuyez sur le bouton **Attribuer** pour attribuer le nouveau raccourci.
7. Si la **Liste de priorité des raccourcis** contient plus d'une commande, vous pouvez modifier son ordre en sélectionnant les commandes individuelles et en appuyant sur le bouton **Haut** ou sur le bouton **Bas**.Si des commandes actives partagent le même raccourci, le raccourci déclenchera celle qui est la plus haute dans la liste.

- **Supprimer un raccourci**

1. Sélectionnez une catégorie de commande dans la liste déroulante **Catégorie**.
2. Sélectionnez une commande dans le panneau **Commandes**.
3. Appuyez sur le bouton **Clear**.

- **Restaurer un raccourci par défaut**

1. Sélectionnez une catégorie de commandes dans la liste déroulante **Catégorie**.
2. Sélectionnez une commande dans le panneau **Commandes**.
3. Appuyez sur le bouton **Réinitialiser**.

- **Restaurer tous les raccourcis par défaut**

1. Appuyez sur le bouton **Tout réinitialiser.**

Remarques

- Les raccourcis ne fonctionnent que pour les commandes actives. Les commandes actives sont des commandes qui apparaissent dans le menu standard, ou dans le menu de l'atelier actif, ou des commandes qui apparaissent dans une barre d'outils "visible".

- **Barre d'outils**

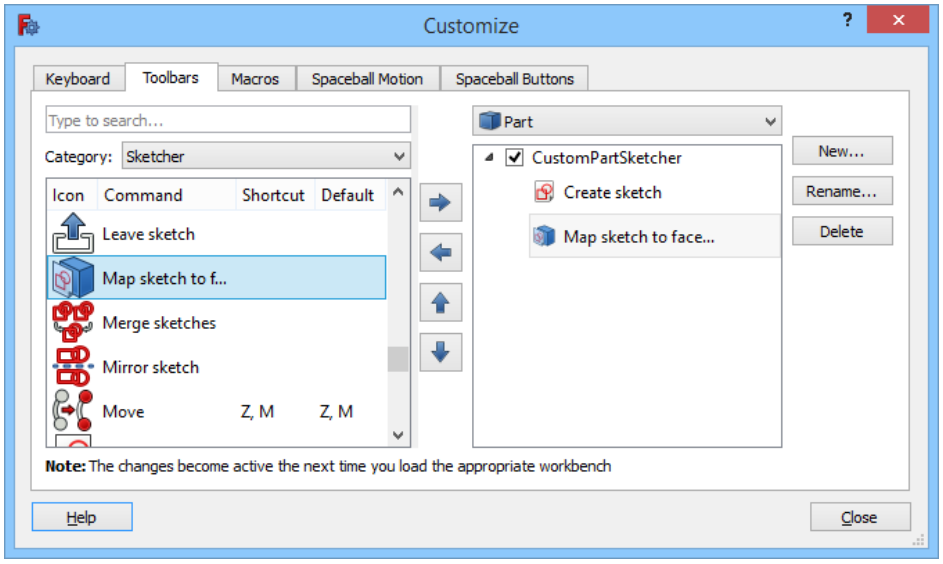


Figure 88 : L'onglet Barres d'outils.

Dans cet onglet, des barres d'outils personnalisées peuvent être créées et modifiées.

- **Recherche**

Voir **Clavier.**

- **Sélectionnez l'atelier**

1. Dans la liste déroulante à droite, sélectionnez l'atelier dont vous souhaitez modifier les barres d'outils personnalisées. L'option Global est disponible pour les barres d'outils personnalisées qui devraient être disponibles dans tous les ateliers.

- **Créer une barre d'outils**

1. Appuyez sur le bouton **Nouveau....**

2. Saisissez un nom dans la boîte de dialogue qui s'ouvre.
3. Appuyez sur le bouton **OK**.
4. La nouvelle barre d'outils apparaîtra dans le panneau de droite.

- **Renommer une barre d'outils**

1. Sélectionnez une barre d'outils dans le panneau de droite.
2. Appuyez sur le bouton **Renommer**....
3. Saisissez un nouveau nom dans la boîte de dialogue qui s'ouvre.
4. Appuyez sur le bouton **OK**.

- **Supprimer une barre d'outils**

1. Sélectionnez une barre d'outils dans le panneau de droite.
2. Appuyez sur le bouton **Supprimer**.

- **Désactiver une barre d'outils**

1. Décochez la case devant le nom de la barre d'outils dans le panneau de droite.
2. Une barre d'outils désactivée sera invisible dans l'interface FreeCAD.

- **Ajouter une commande**

1. Il faut au moins une barre d'outils personnalisée. Voir **Créer une barre d'outils.**
2. Sélectionnez la barre d'outils appropriée dans le panneau de droite. Si aucune barre d'outils n'est sélectionnée, la commande sera ajoutée à la première barre d'outils de la liste.
3. Sélectionnez une catégorie de commande dans la liste déroulante **Catégorie**. Les macro-commandes qui ont été configurées dans l'onglet **Macros** apparaissent dans la catégorie Macros.
4. Sélectionnez une commande dans le panneau **Commandes** ou sélectionnez <**Séparateur**> pour ajouter un séparateur (une ligne entre deux boutons de la barre d'outils).

- Vous pouvez également faire glisser le séparateur à droite du panneau pour le redimensionner.

5. Appuyez sur le bouton  .

- **Supprimer une commande**

1. Si nécessaire, développez la barre d'outils dans le panneau de droite.
2. Sélectionnez une commande.
3. Appuyez sur le bouton .

- **Modifier une position de commande**

1. Si nécessaire, développez la barre d'outils dans le panneau de droite.
2. Sélectionnez une commande.
3. Appuyez sur le bouton  ou sur le bouton  .
4. Répétez éventuellement cette opération jusqu'à ce que la commande soit dans la bonne position.

Remarques

- Les barres d'outils appartenant à l'atelier en cours sont mises à jour immédiatement, mais après avoir désactivé/réactivé une barre d'outils, un changement d'atelier est requis (basculer vers un atelier puis revenir en arrière).
- Pour mettre à jour les barres d'outils globales, un changement d'atelier (si des commandes ont été ajoutées ou supprimées) ou un redémarrage (si l'ordre d'une barre d'outils a changé ou une barre d'outils a été renommée) est requis.

- **Macros**

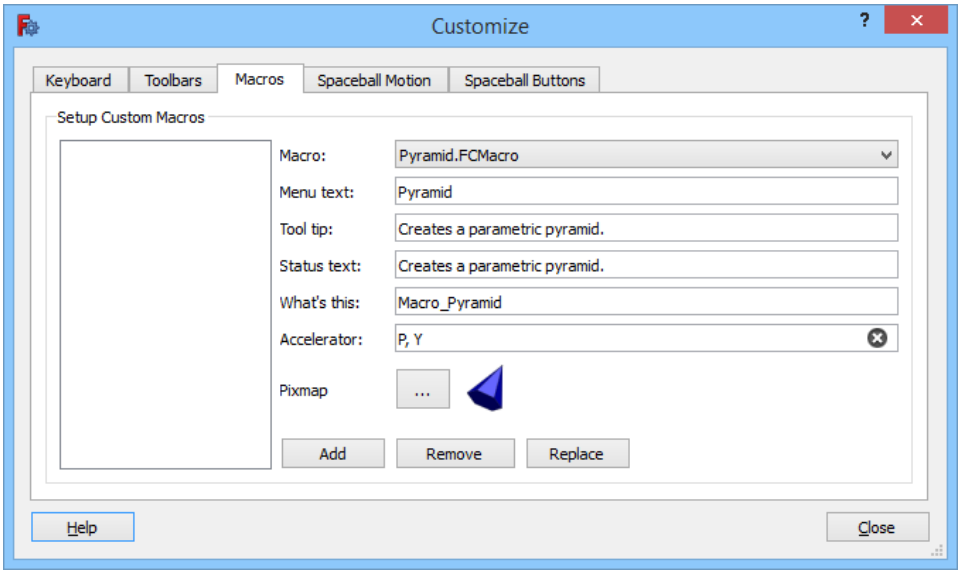


Figure 89 : L'onglet Macros.

Cet onglet permet de définir des commandes de macro. Une fois configurées, elles peuvent être ajoutées à des barres d'outils personnalisées. Les macros installées avec le gestionnaire des extensions sont configurées automatiquement et ajoutées à une barre d'outils **Globale** (voir **Barre d'outils)**, si vous confirmez le popup **Ajouter un bouton** pendant le processus d'installation.

- **Ajouter une commande macro**

1. Dans la liste déroulante **Macro**, sélectionnez une macro.
2. Saisissez un **Texte du menu**. Ce sera le nom utilisé pour identifier la macro-commande et apparaîtra également dans la barre d'outils s'il n'y a pas d'icône.
3. Vous pouvez également saisir une **Infobulle**. Ce texte apparaîtra près de l'emplacement de la souris lorsque vous survolez l'icône de la barre d'outils.
4. Vous pouvez également saisir un **Texte d'état**. Ce texte apparaîtra dans la **barre d'état** lorsque vous survolez l'icône de la barre d'outils.
5. Vous pouvez entrer la page wiki de la macro, si elle est disponible, dans la zone de saisie **Qu'est-ce que c'est**. Saisissez le nom de la page, pas l'URL complète.

6. Vous pouvez également saisir un raccourci dans la zone de saisie **Créer un raccourci**. Voir **Clavier** pour plus d'informations.
7. Pour ajouter une icône :
    1. Appuyez sur le bouton **Icône** ....
    2. La boîte de dialogue **Choisir une icône** s'ouvre.
    3. Si nécessaire, appuyez sur le bouton **Dossiers d'icônes...** pour ajouter un dossier d'icônes.
    4. Sélectionnez une icône dans le panneau. La boîte de dialogue **Choisir une icône** se ferme automatiquement.
8. Appuyez sur le bouton **Ajouter**.
9. La commande de la macro apparaît dans le panneau de gauche.
10. La commande de la macro peut maintenant être sélectionnée dans l'onglet **Barre d'outils.**

- **Supprimer une commande de macro**

1. Sélectionnez la commande de la macro dans le panneau de gauche.
2. Appuyez sur le bouton **Supprimer**.

- **Modifier une commande de macro**

1. Double-cliquez sur la commande de la macro dans le panneau de gauche.
2. Apportez les modifications requises. Notez que vous ne pouvez pas supprimer l'icône, vous pouvez uniquement la remplacer.
3. Appuyez sur le bouton **Remplacer**.

- **Mouvement de la Spaceball**

Cet onglet est vide si aucune souris 3D n'est détecté. Voir **: Périphériques d'entrée de connexion 3D.**

- **Boutons de la souris 3D**

Cet onglet est vide si aucune souris 3D n'est détecté. Voir **: Périphériques d'entrée de connexion 3D.**

V.9 Utilisation de l'Alfawise U20 dans le cadre de ce projet

Dans ce mémoire de fin d'études, on a utilisé l'imprimante **Alfawise U20** pour la réalisation du prototype de l'implant. L'Alfawise U20 est une imprimante 3D **FDM** (Fused Deposition Modeling), une technologie qui consiste à déposer du filament fondu couche par couche pour créer des objets tridimensionnels.

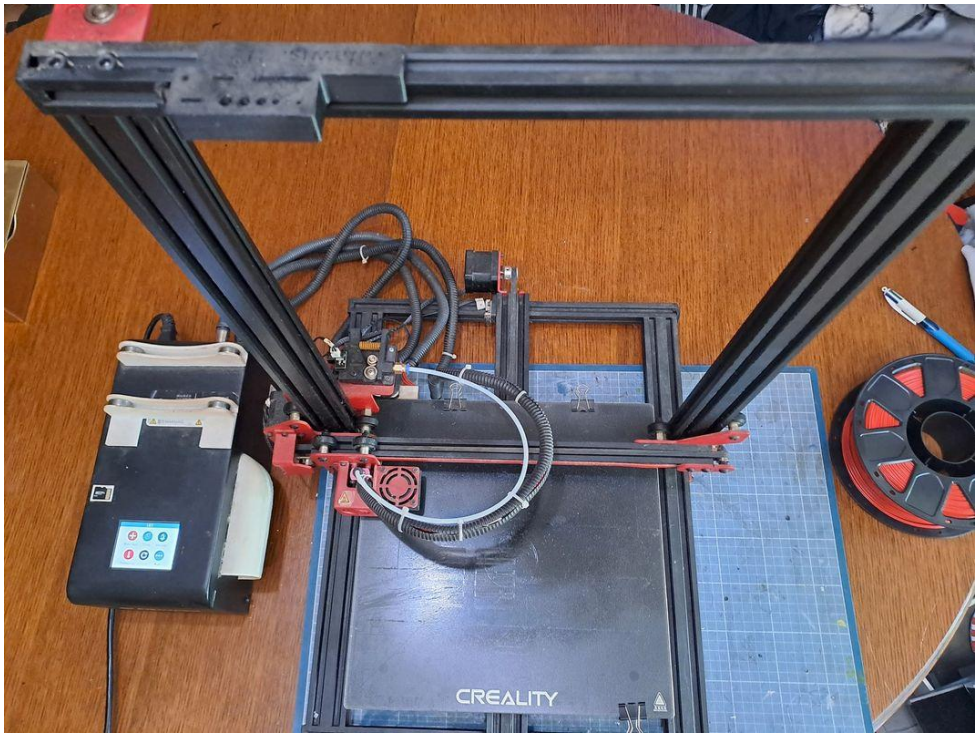


Figure 90 : L'imprimante 3D Alfawise U20.

V.9.1 Caractéristiques techniques principales

- **Surface d'impression** : Avec une zone d'impression généreuse de **300 x 300 x 400 mm**, l'Alfawise U20 permet la fabrication de pièces de grande taille, un atout important pour la réalisation d'éléments complexes comme les prothèses.
- **Précision d'impression** : Cette imprimante offre une précision respectable allant jusqu'à **0,1 mm**, garantissant un niveau de détail suffisant pour des prototypes médicaux tels que les implants.
- **Écran tactile** : Le modèle est équipé d'un **écran tactile couleur** de 2,8 pouces, qui facilite l'interaction avec l'imprimante et la gestion des impressions.

- **Fonction de reprise d'impression** : Une fonctionnalité utile est la reprise automatique des impressions après une coupure de courant, assurant que les impressions en cours ne sont pas perdues en cas d'interruption.
- **Compatibilité des filaments** : L'Alfawise U20 supporte différents types de filaments, tels que le PLA, l'ABS, et le PETG, ce qui permet d'adapter le choix des matériaux en fonction des exigences du projet.

V.9.2 Application dans le projet

L'Alfawise U20 s'est révélée particulièrement adaptée à la réalisation de prototypes de prothèses grâce à sa facilité d'utilisation, son grand volume d'impression, et sa fiabilité. La précision offerte par cette imprimante m'a permis de créer des modèles détaillés répondant aux besoins spécifiques de l'implant étudié dans ce projet. De plus, la compatibilité avec plusieurs types de filaments a permis de choisir un matériau adapté à la robustesse et à la biocompatibilité du prototype.

V.10 Croquis de prototype

Le dessin de l'implant cochléaire Med-El a été réalisé en plusieurs étapes simples pour montrer ses dimensions et ses parties principales. On a d'abord fait un croquis à main levée pour positionner l'implant et l'électrode en vue de dessus et de côté, en s'inspirant des schémas techniques disponibles. Ensuite, chaque élément a été dessiné avec soin en respectant les proportions et les dimensions précises.

Les mesures ont été ajoutées à l'aide de règles et d'outils de dessin pour garantir leur exactitude, avec des annotations en rouge pour bien indiquer les longueurs, hauteurs et largeurs importantes. Enfin, les contours ont été affinés et les détails soulignés pour donner un rendu clair et précis, facilitant la compréhension du dessin pour les lecteurs de notre mémoire.

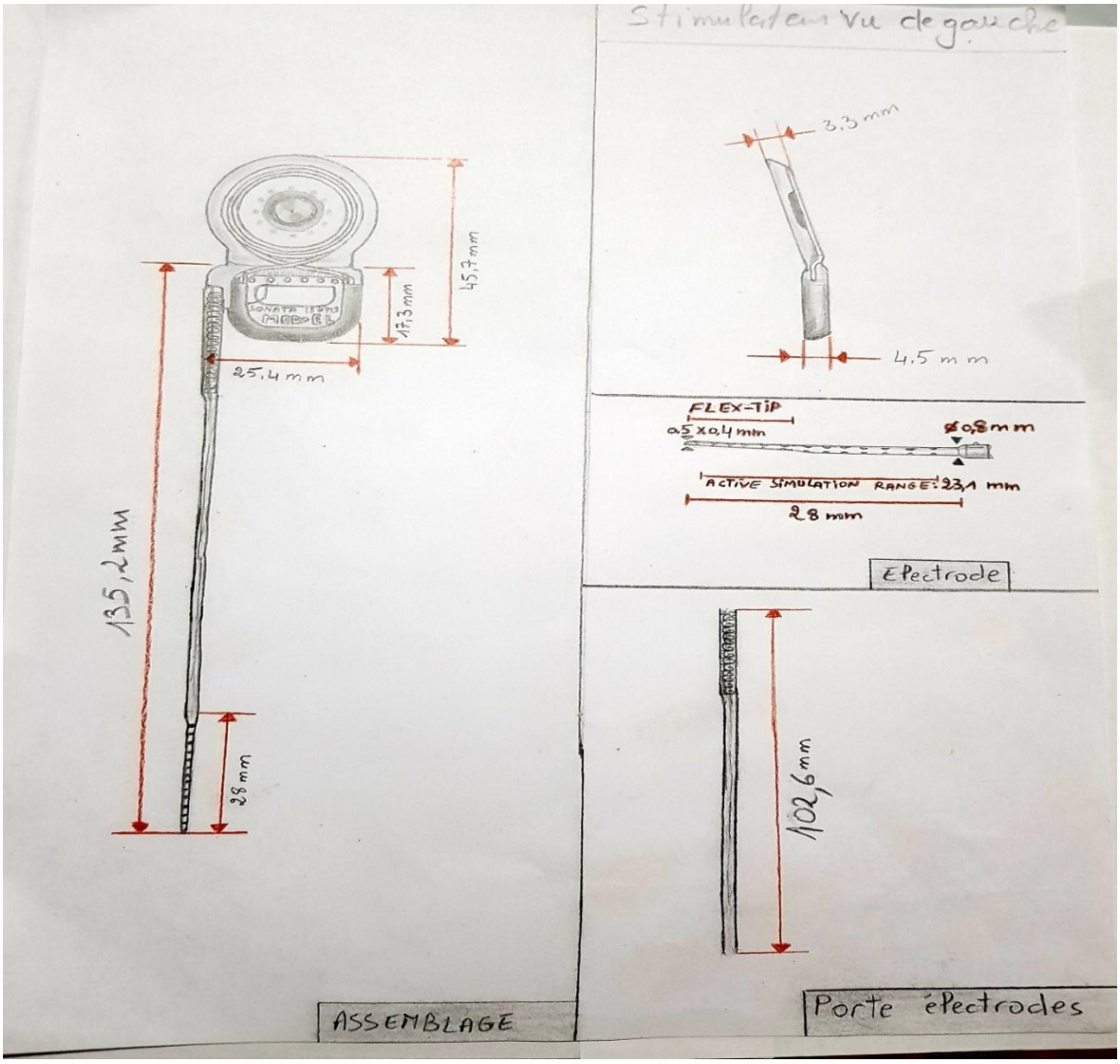


Figure 91 : Croquis du prototype (voir annexe 8).

Ce dessin technique représente l'implant cochléaire interne du modèle Med-El, illustrant ses principales dimensions. L'implant se compose d'un boîtier interne mesurant environ 45,7 mm de longueur, 25,4 mm de largeur, et 17,3 mm de hauteur, dimensions caractéristiques des dispositifs Med-El. La longueur totale de l'électrode est de 50 mm, avec une partie active de stimulation de 28 mm, conçue pour s'insérer dans la cochlée de manière atraumatique. Les spécifications détaillées, telles que l'épaisseur et la flexibilité de l'électrode, assurent une adaptation optimale à l'anatomie cochléaire, ce qui favorise une transmission efficace des signaux sonores tout en minimisant les risques de lésion tissulaire. Ces caractéristiques font de l'implant Med-El un choix privilégié pour les patients souffrant de surdité sévère à profonde.

V.11 La réalisation en 3D

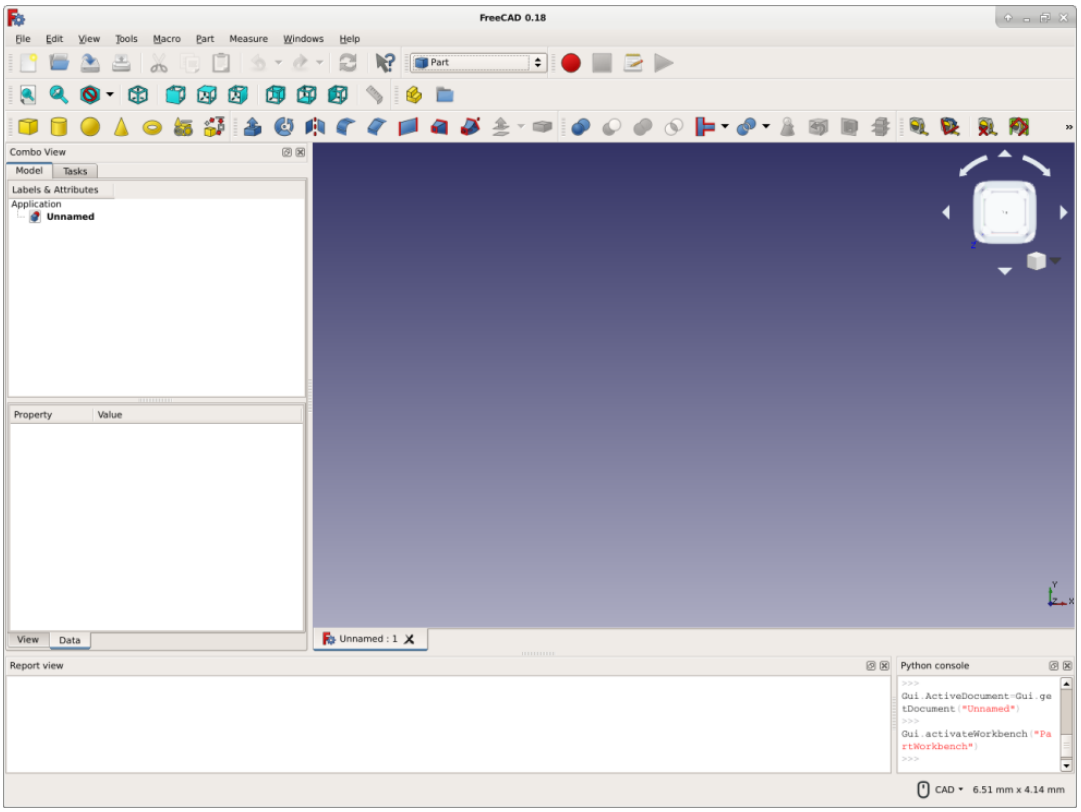


Figure 92 : L'interface du logiciel.

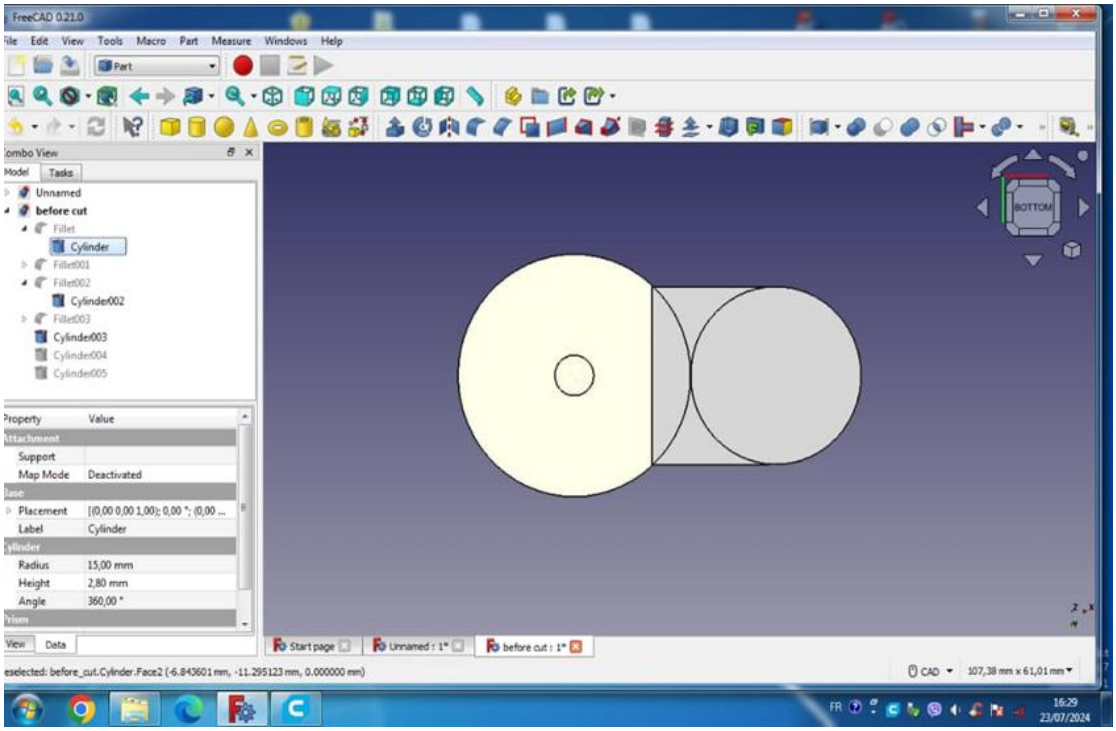


Figure 93 : Création de la forme de l'implant.

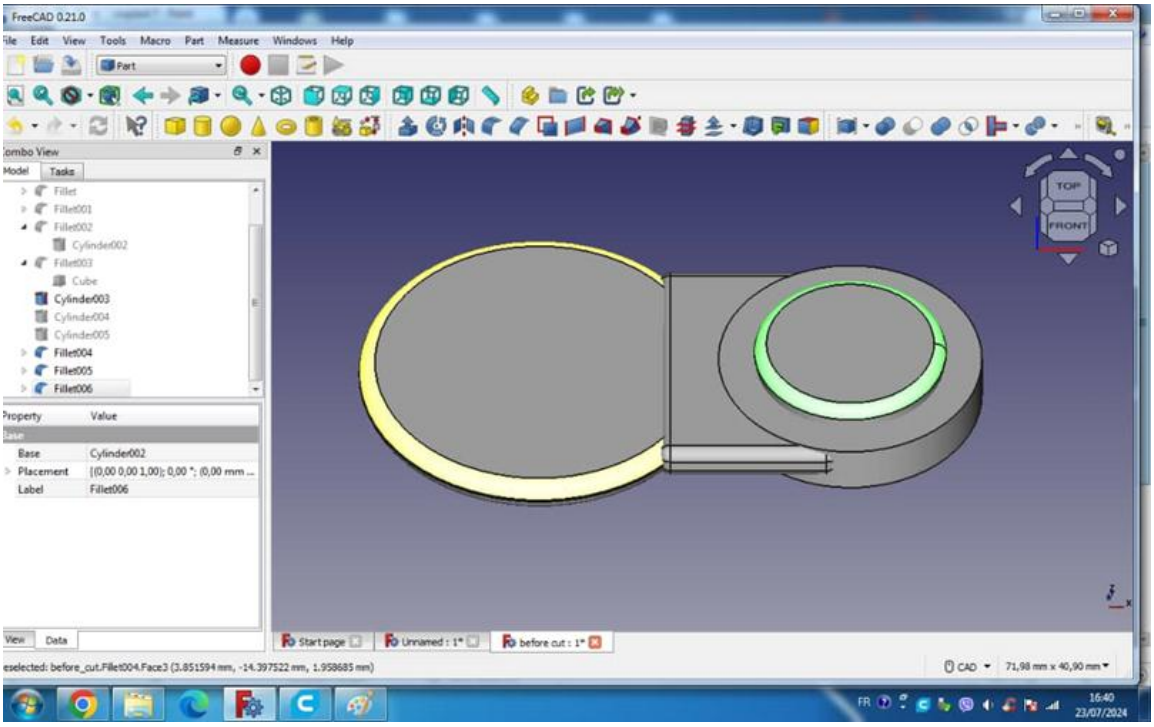


Figure 94 : Créer une forme cylindrique en 3D.

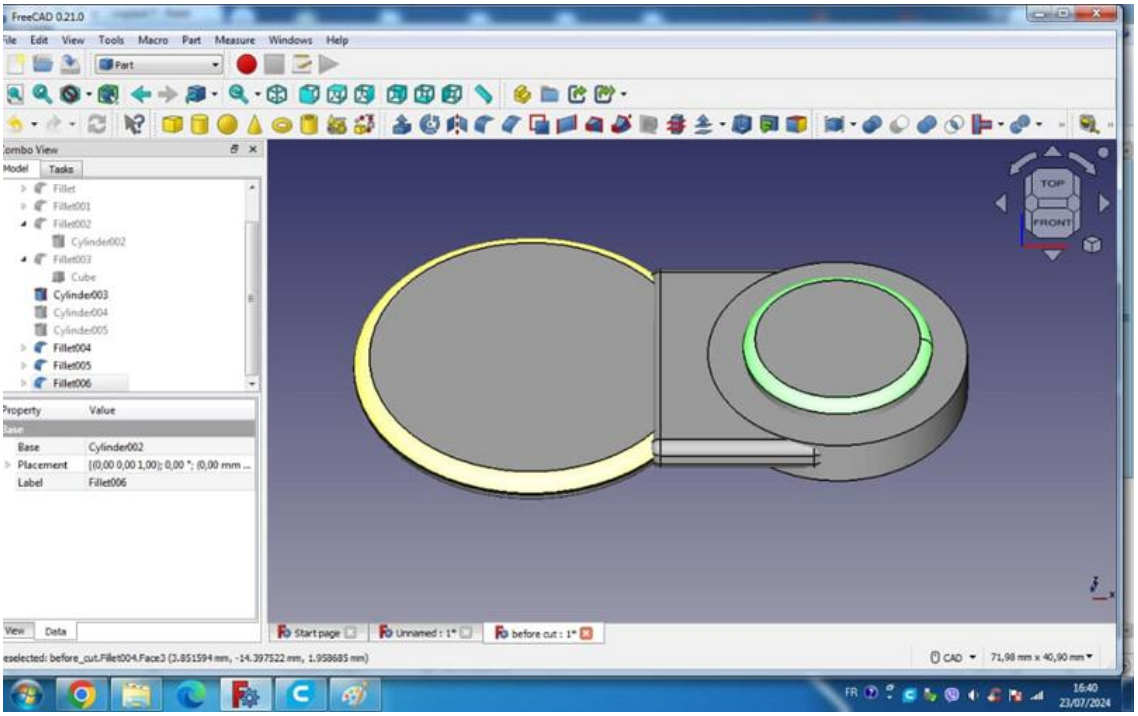


Figure 95 : Ajustage de la forme cylindrique.

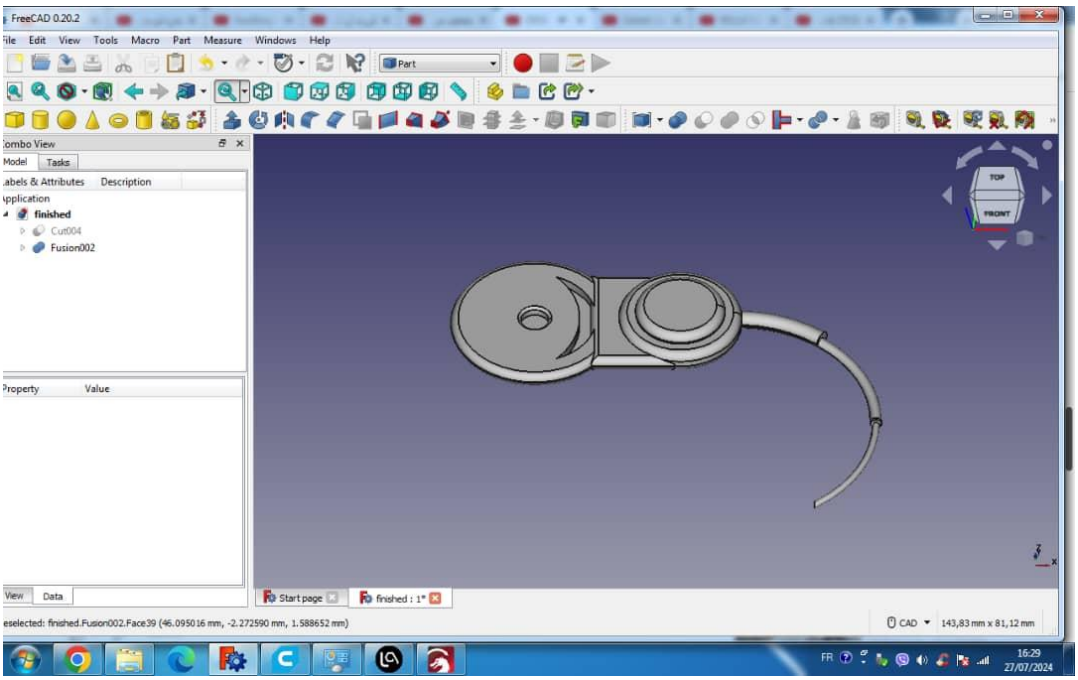


Figure 96 : Rajout de porte électrode.

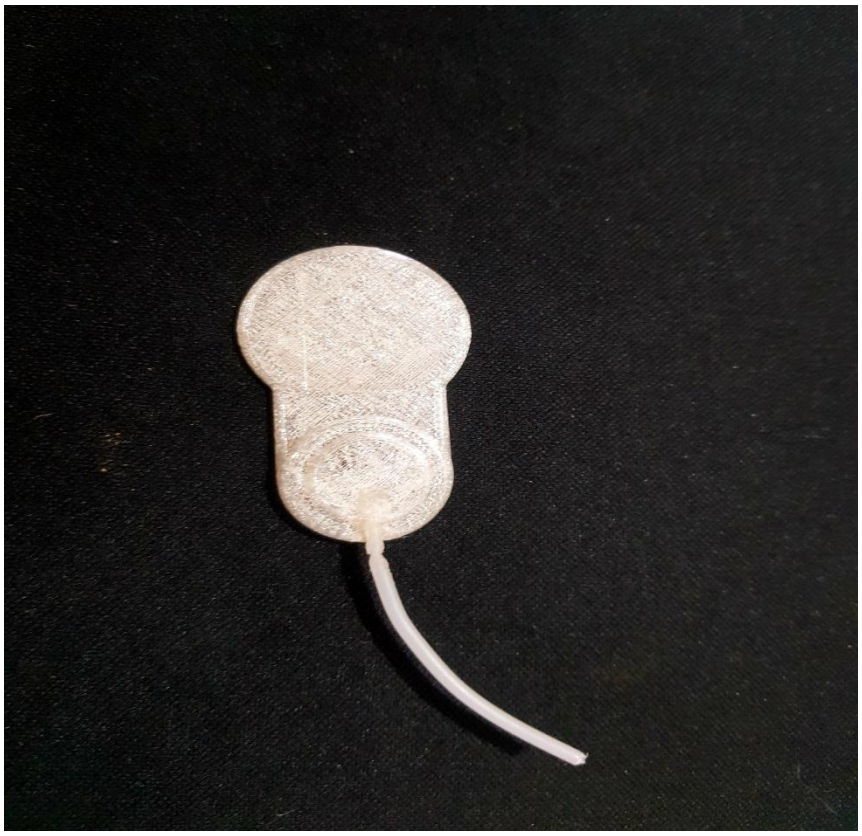


Figure 97 : Premier prototype de l'implant.

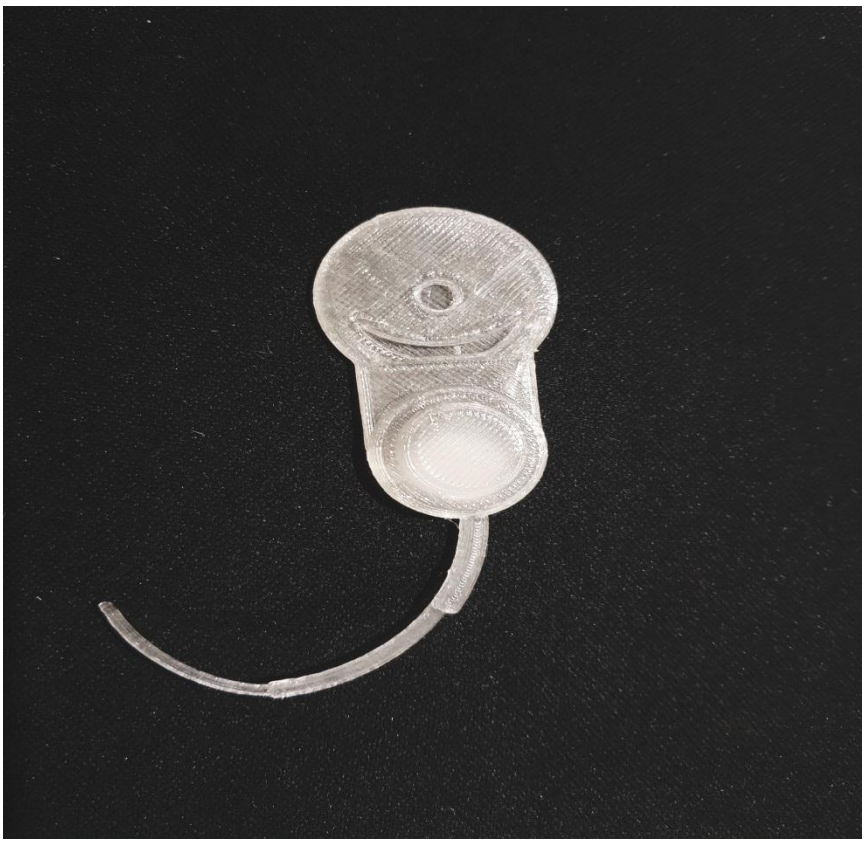
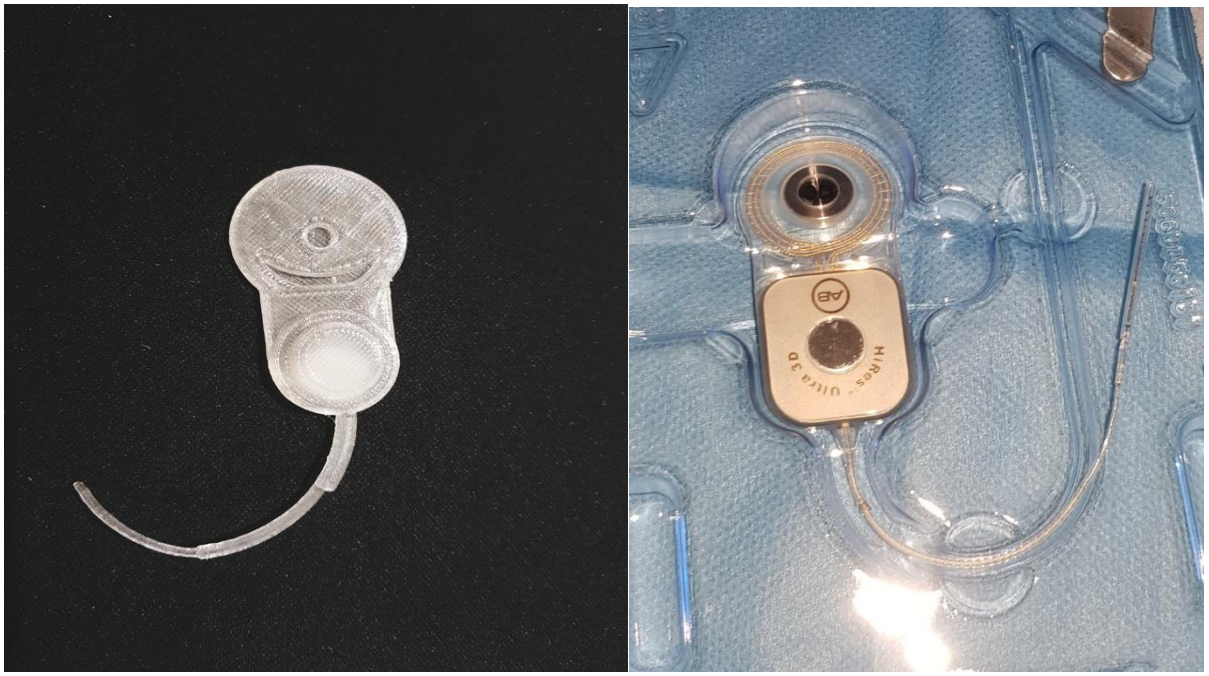


Figure 98 : Deuxième prototype de l'implant.



A : Implant imprime en 3D**.** **B :** Implant réel.

Figure 99 : L'implant réel original et l'implant imprimé en 3D.

V.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons assisté à des interventions chirurgicales, nous avons vu les chirurgiens pratiquer l'opération, inséré l'implant sous la peau avec précision. Nous avons pu voir de près l'implant cochléaire et les différentes étapes avant et après son déballage jusqu'à son insertion dans l'oreille. Après avoir eu la chance d'assiste à tout ça, ça nous a donné la motivation et nous a poussé à réaliser un prototype de cet implant avec l'impression 3D.

Conclusion Générale

Une bonne audition est essentielle pour maintenir une qualité de vie optimale. Nous avons observé que les implants cochléaires permettent avant tout de retrouver une bonne audition et améliorent la capacité des personnes ayant des pertes auditives sévères à profondément sourdes à participer aux activités de la vie quotidienne. Ils augmentent également leur qualité de vie générale et leur capacité à écouter d'autres personnes. Le port d'un implant cochléaire favorise également la vie sociale et les échanges avec l'entourage, permettant aux utilisateurs de participer activement à des conversations, de profiter de la musique, de regarder la télévision et de prendre part à des événements sociaux sans se sentir exclus.

L'objectif de notre travail a été d'étudier les implants cochléaire, et leurs principes de fonctionnements, ainsi que de suivre le parcours d'implantation sous formes d'un stage pratique au service ORL Belloua de Tizi Ouzou.

A cet effet, une étude théorique de quatre chapitres nous a permis de présenter :

Le chapitre I : Le système auditif qui est une chaine de traitement d'informations acoustiques composées de sons, de l'oreille et le cerveau.

Le chapitre II : Implant cochléaire, nous avons mis en évidence sa description cochléaire, ses constituants et son fonctionnement.

Le chapitre III : Les biomatériaux et les matériaux composites en générale qui rentre dans la réalisation des implants cochléaires afin d'améliorer les propriétés des organes ou bien encore de les remplacer.

Le chapitre IV : l'impression 3D et les matériaux utilisés pour l'impression, les diverses techniques de cette dernière tels que la méthode de dépôt de matière fondu (FDM).

Enfin on a terminé avec une étude expérimentale qui nous a permis de présenter :

Le chapitre V : Porte sur un stage effectué au service ORL CHU de Belloua-Tizi Ouzou ou on a assisté à l'intervention chirurgical de l'implant cochléaire, ce qui nous a permis la réalisation d'un prototype de cet implant en 3D.

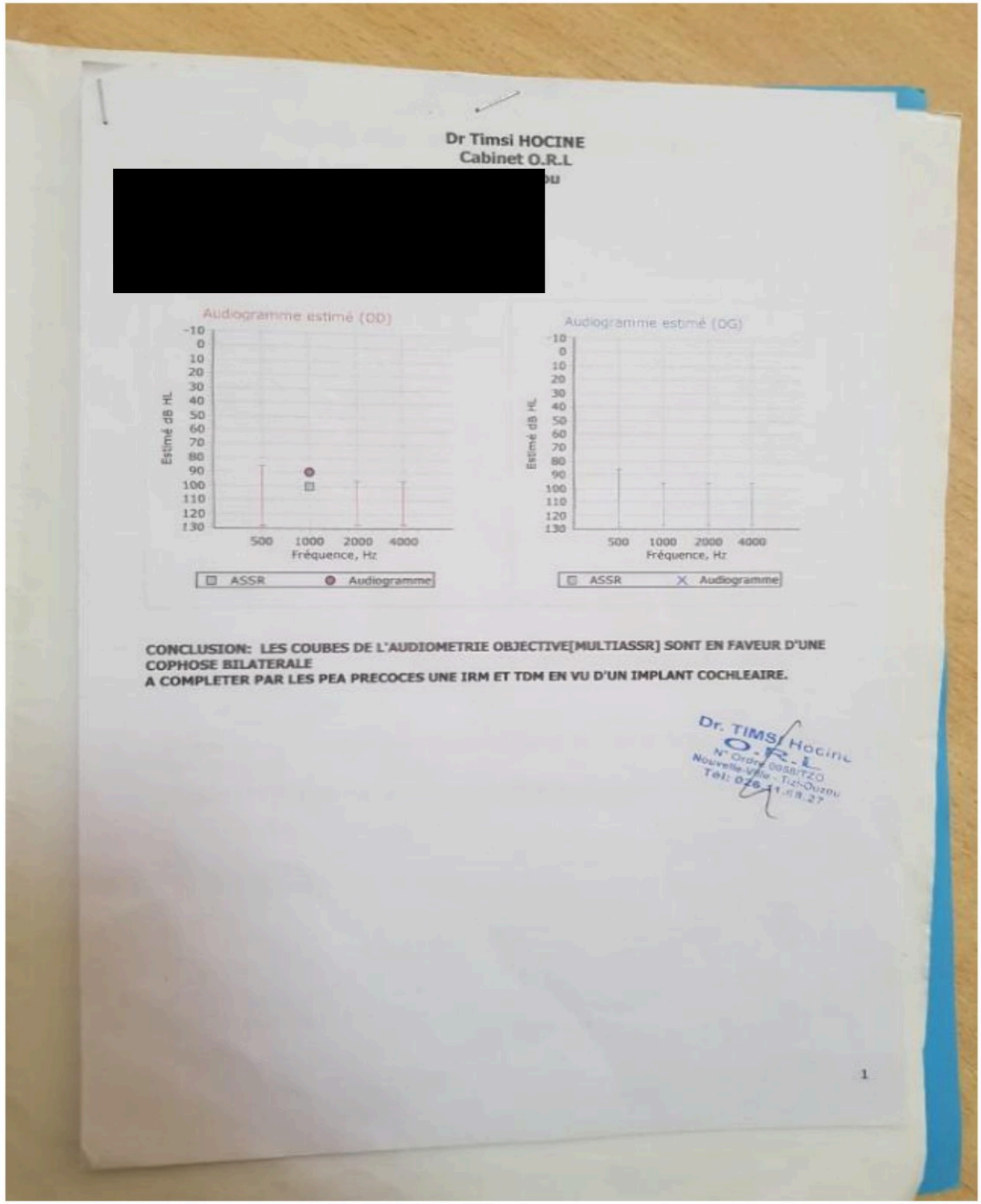
Durant l'accomplissement de ce travail, nous avons eu la chance de voir de près comment le docteur KABRI et son équipe travaillent ensemble pour soigner les patients. Et lors de ceci, nous avons pu partager des moments émouvants avec ces patients, car retrouver l'ouïe est une renaissance pour eux surtout pour les enfants.

Cette expérience nous a permis d'apprendre beaucoup sur l'importance du travail en équipe et la compassion dans le domaine médical.

Les objectifs de ce mémoire ont été atteints, et nous espérons que les travaux présentés ouvriront la voie à de nouveaux sujets de recherche pour les futurs projets de fin d'études.

Annexe

Annexe 1



Dr Timsi HOCINE
Cabinet O.R.L
[redacted]

Audiogramme estimé (OD)

Estimé dB HL
-10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130
500 1000 2000 4000
Fréquence, Hz
ASSR Audiogramme

Audiogramme estimé (OG)

Estimé dB HL
-10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130
500 1000 2000 4000
Fréquence, Hz
ASSR Audiogramme

CONCLUSION: LES COUBES DE L'AUDIOMETRIE OBJECTIVE[MULTIASSR] SONT EN FAVEUR D'UNE COPHOSE BILATERALE
A COMPLETER PAR LES PEA PRECOCES UNE IRM ET TDM EN VU D'UN IMPLANT COCHLEAIRE.

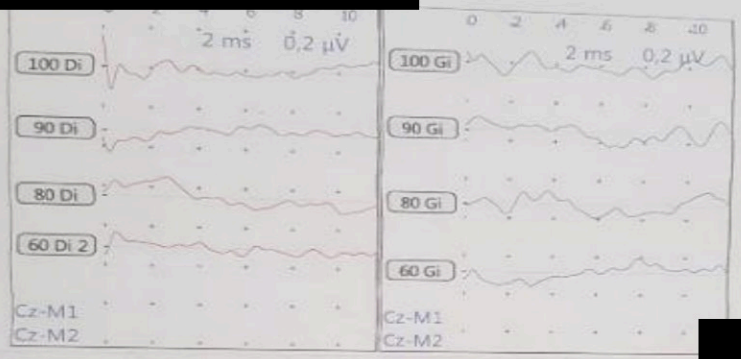
Dr. TIMSI Hocine
O.R.L
N° Ordre 0058/TZO
Nouvelle Ville - Tizi-Ouzou
Tél: 026 21.18.27

1

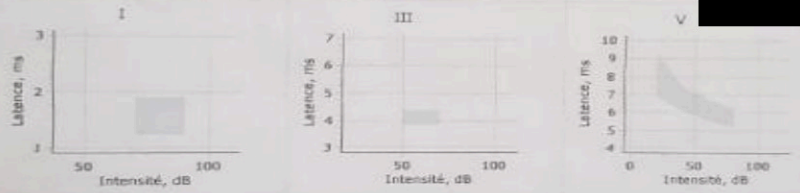
Annexe 2

[redacted]

S EVOQUES AUDITIFS PRECOCES



[redacted]



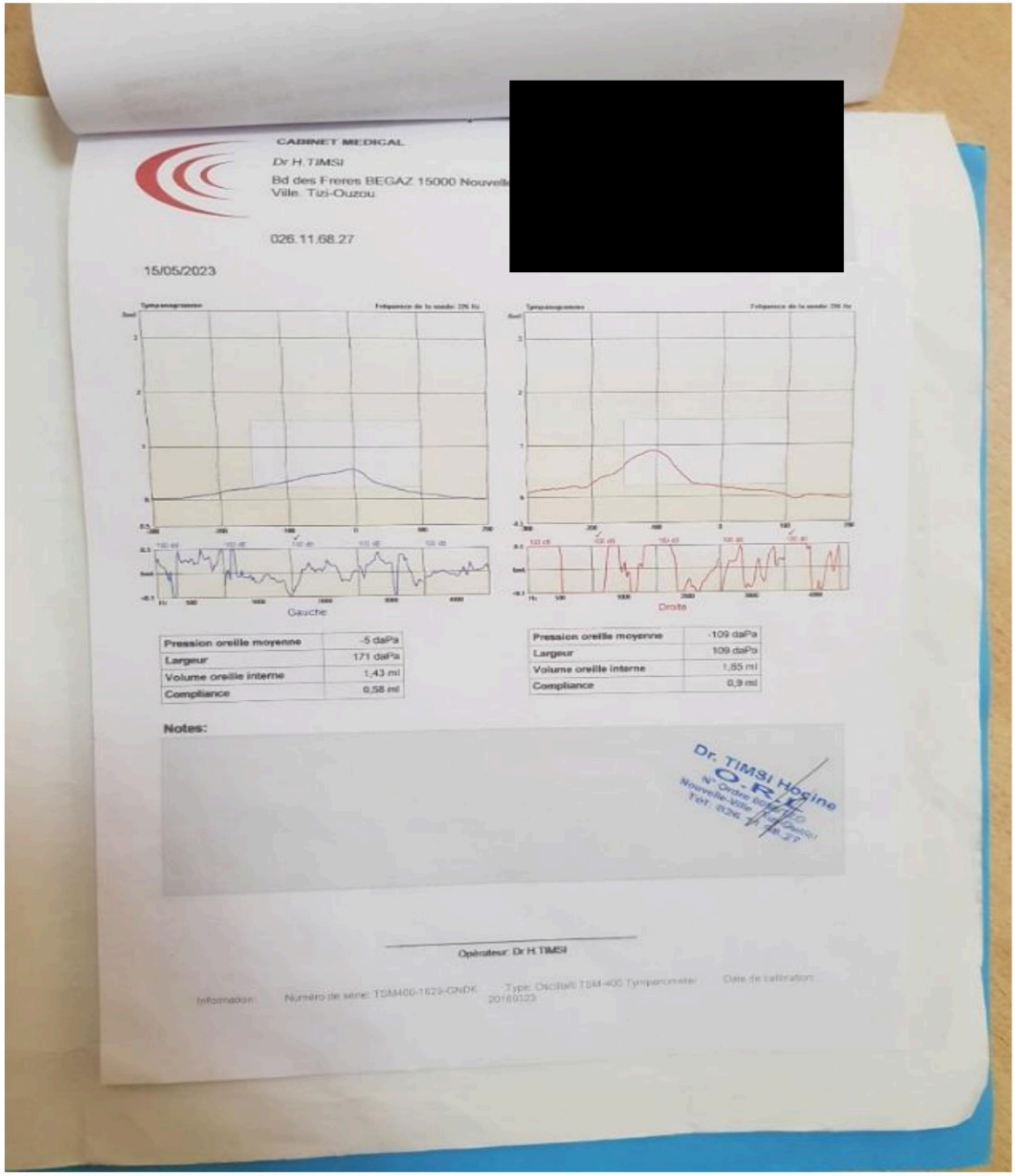
CONCLUSION :DEROULEMENT DE L'EXAMEN DANS DE BONNES CONDITIONS DE SOMMEIL PHYSIOLOGIQUE

LA STIMULATION MEME A DE FORTES INTENSITES[100DB] NE REVELE AUCUNE REPONSE.

Dr. TIMSI Hocine
SARL

1

Annexe 3



CABINET MEDICAL

Dr H.TIMSI

Bd des Freres BEGAZ 15000 Nouvelle
Ville. Tizi-Ouzou

026.11.68.27

[redacted]

15/05/2023

Gauche

Pression oreille moyenne	-5 daPa
Largeur	171 daPa
Volume oreille interne	1,43 ml
Compliance	0,58 ml

Droite

Pression oreille moyenne	-109 daPa
Largeur	109 daPa
Volume oreille interne	1,65 ml
Compliance	0,9 ml

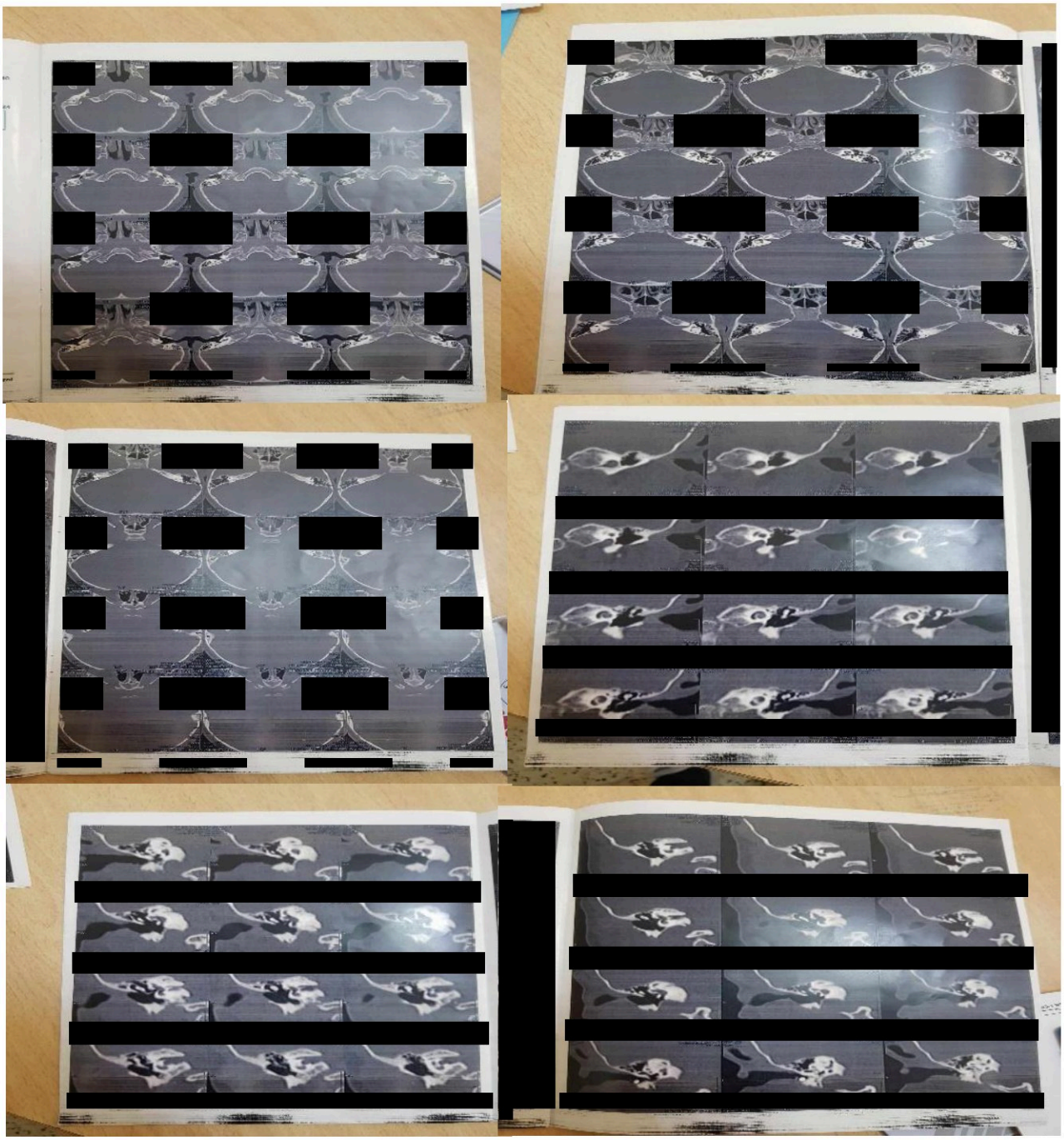
Notes:

Dr. TIMSI Hocine
O.R.L
Nouvelle-Ville

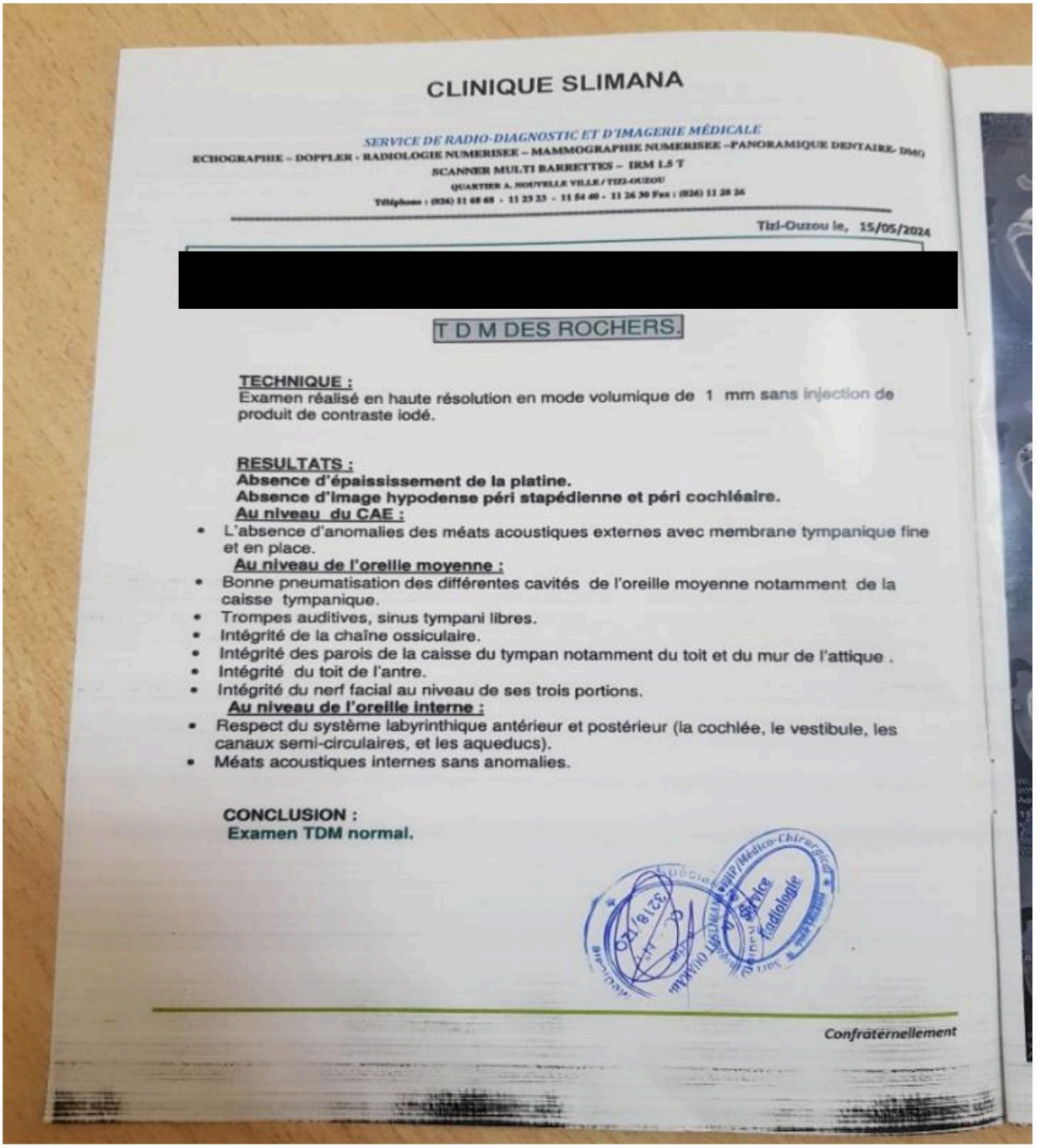
Opérateur: Dr H.TIMSI

Information: Numéro de série: TSM400-1622-GNDK Type: Otoflash TSM-400 Tympanometer Date de calibration: 20160323

Annexe 4



Annexe 5



CLINIQUE SLIMANA

SERVICE DE RADIO-DIAGNOSTIC ET D'IMAGERIE MÉDICALE

ECHOGRAPHIE – DOPPLER - RADIOLOGIE NUMERISEE – MAMMOGRAPHIE NUMERISEE –PANORAMIQUE DENTAIRE- DMO

SCANNER MULTI BARRETTES – IRM 1.5 T

QUARTIER A. NOUVELLE VILLE / TIZI-OUZOU

Téléphone : (026) 11 68 68 - 11 23 23 - 11 54 40 - 11 26 30 Fax : (026) 11 28 26

Tizi-Ouzou le, 15/05/2024

[redacted]

T D M DES ROCHERS.

TECHNIQUE :
Examen réalisé en haute résolution en mode volumique de 1 mm sans injection de produit de contraste iodé.

RESULTATS :
Absence d'épaississement de la platine.
Absence d'image hypodense péri stapédienne et péri cochléaire.
Au niveau du CAE :

- L'absence d'anomalies des méats acoustiques externes avec membrane tympanique fine et en place.

Au niveau de l'oreille moyenne :

- Bonne pneumatisation des différentes cavités de l'oreille moyenne notamment de la caisse tympanique.
- Trompes auditives, sinus tympani libres.
- Intégrité de la chaîne ossiculaire.
- Intégrité des parois de la caisse du tympan notamment du toit et du mur de l'attique .
- Intégrité du toit de l'antre.
- Intégrité du nerf facial au niveau de ses trois portions.

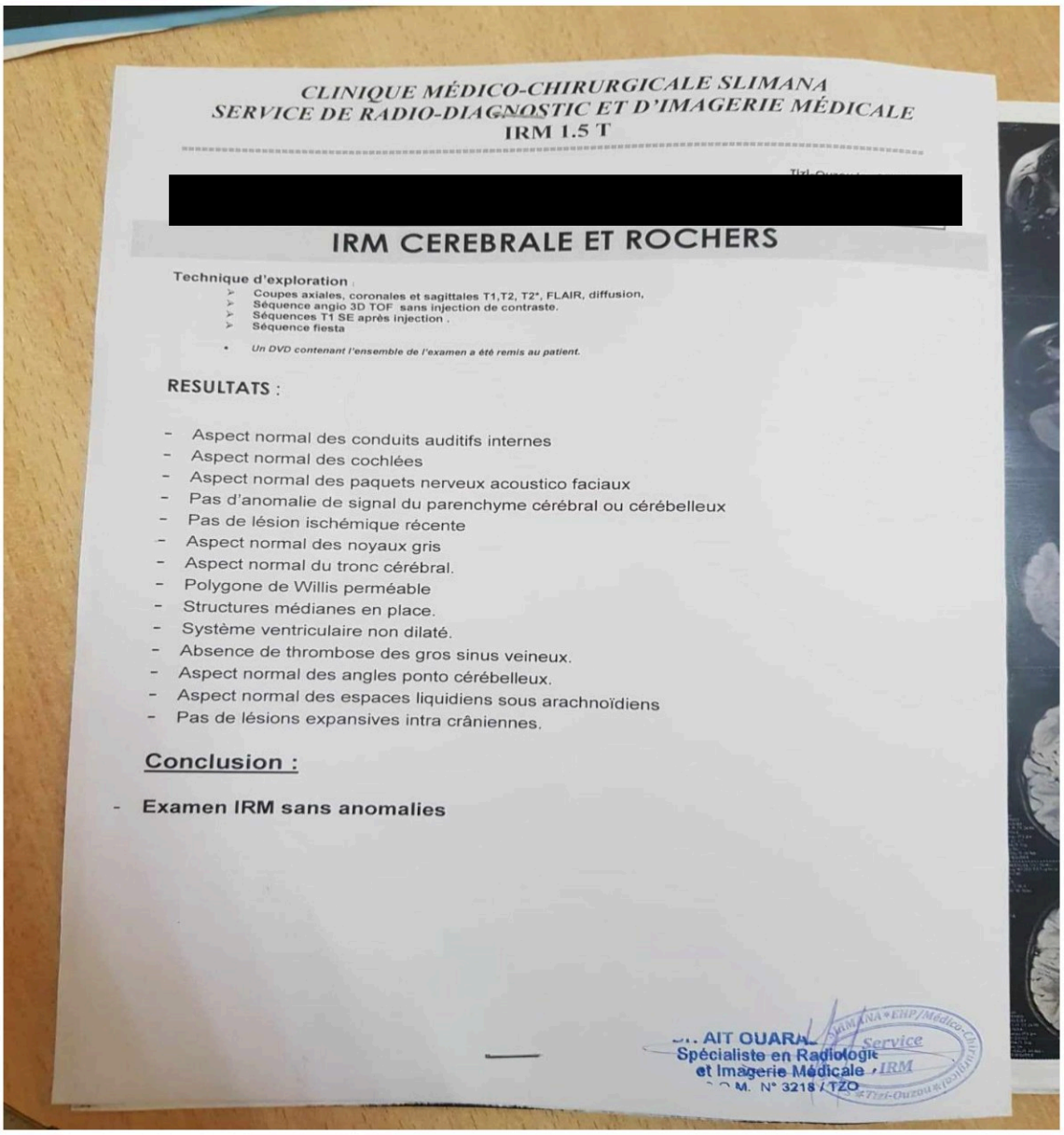
Au niveau de l'oreille interne :

- Respect du système labyrinthique antérieur et postérieur (la cochlée, le vestibule, les canaux semi-circulaires, et les aqueducs).
- Méats acoustiques internes sans anomalies.

CONCLUSION :
Examen TDM normal.

Confraternellement

Annexe 6



CLINIQUE MÉDICO-CHIRURGICALE SLIMANA
SERVICE DE RADIO-DIAGNOSTIC ET D'IMAGERIE MÉDICALE
IRM 1.5 T

[redacted]

IRM CEREBRALE ET ROCHERS

Technique d'exploration :

- Coupes axiales, coronales et sagittales T1,T2, T2*, FLAIR, diffusion,
- Séquence angio 3D TOF sans injection de contraste.
- Séquences T1 SE après injection .
- Séquence fiesta

• *Un DVD contenant l'ensemble de l'examen a été remis au patient.*

RESULTATS :

- Aspect normal des conduits auditifs internes
- Aspect normal des cochlées
- Aspect normal des paquets nerveux acoustico faciaux
- Pas d'anomalie de signal du parenchyme cérébral ou cérébelleux
- Pas de lésion ischémique récente
- Aspect normal des noyaux gris
- Aspect normal du tronc cérébral.
- Polygone de Willis perméable
- Structures médianes en place.
- Système ventriculaire non dilaté.
- Absence de thrombose des gros sinus veineux.
- Aspect normal des angles ponto cérébelleux.
- Aspect normal des espaces liquidiens sous arachnoïdiens
- Pas de lésions expansives intra crâniennes.

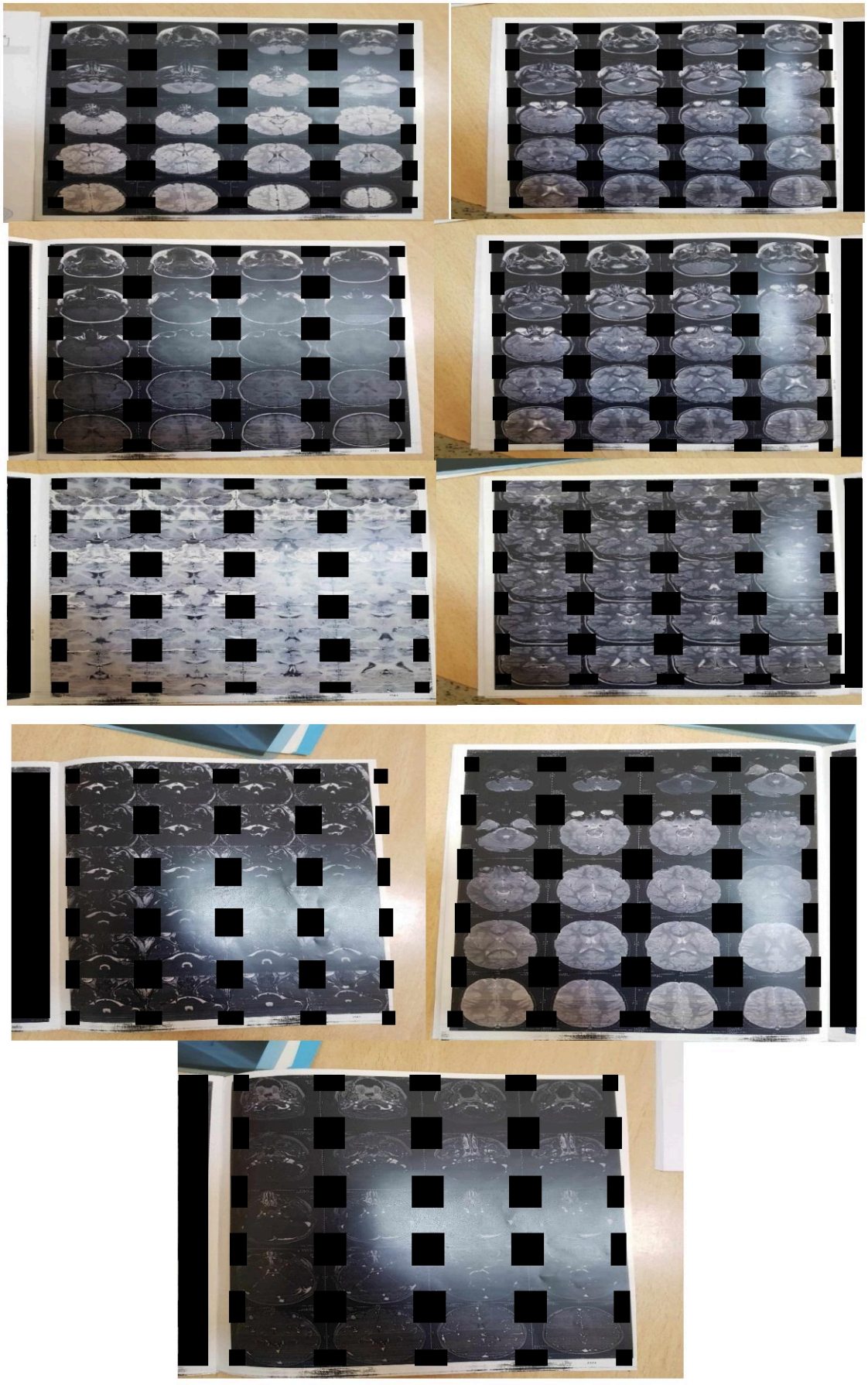
Conclusion :

- **Examen IRM sans anomalies**

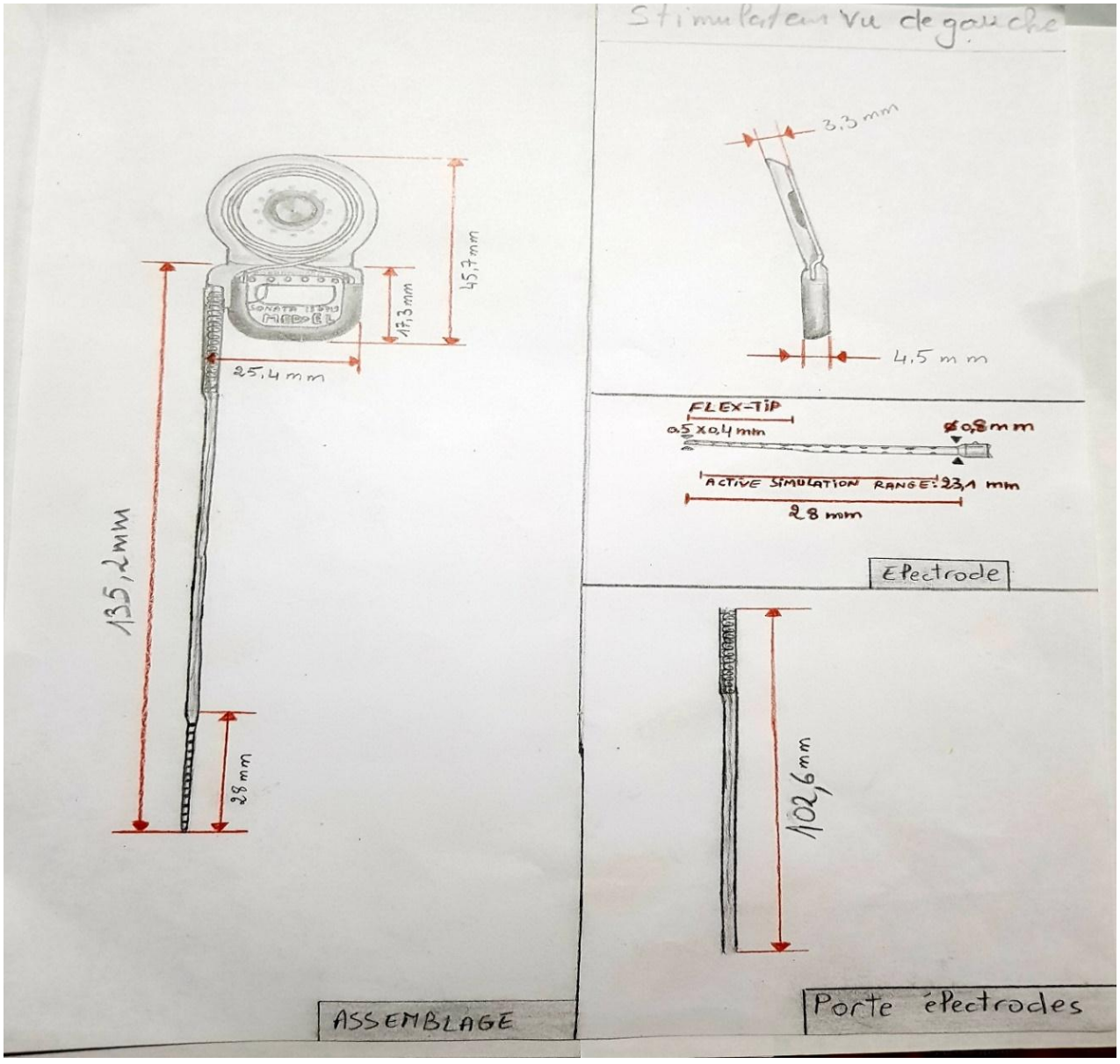
Dr. AIT OUARA
Spécialiste en Radiologie
et Imagerie Médicale
N° 3218 / TZO

SLIMANA • EHP/Médico-Chir
Service IRM
Tizi-Ouzou

Annexe 7



Annexe 8


Stimulateur vu de gauche
3,3 mm
4,5 mm
FLEX-TIP
ø0,5 x 0,4 mm
ø0,8 mm
ACTIVE SIMULATION RANGE: 23,1 mm
28 mm
Electrode
45,7 mm
17,3 mm
25,4 mm
135,2 mm
28 mm
ASSEMBLAGE
102,6 mm
Porte électrodes

Bibliographe

[1] Pr L. Laccourreye, « Anatomie et physiologie de l'audition », ORL CHU Angers, 2014.

[2] Delfouf Ouafia, Fekir Hanane, « Etude Et réalisation d'une prothèse auditive numérique », mémoire de Master en électronique biomédical, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

[3] Pr. Y. ROCHDI, Pr.M.D. EL AMRANI, Dr. Y. LAANANI, « Anatomie de l'oreille », Faculté de médecine et de pharmacie-MERRAKECH, 2022.

[4] Jean-Marc Chevallier, « ORL 3 », livre Médcine-Sciences Flammarion.

[5] ZEROUAL Raouenak, ZEGAA Lamis Ouissem El kholoud, « IMPLANT COCHLEAIRE : ÉTUDE ÉPIDEMIOLOGIQUE, ÉTAT DE LIEUX ET RESULTAT DANS LA RÉGION DU SUD DE 2009- 2021 », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du doctorat enmédecine, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021/2022.

[6] Tortora G J, Grabowski S R, Principe d'anatomie et de physiologie, 3éme édition, Bruxelles: édition De Boeck ; 1256 p, 2002.

[7] Sauvage JP, Puyraud S, Roche O, Rahman A, Anatomie de l'oreille interne, Paris : Encycl. Med Chir, Oto-Rhino-Laryngologie, 20-020-A-10, 1999.

[8] Fillon Thomas, « Traitement Numérique du Signal Acoustique pour une Aide aux Malentendants » présentée pour obtenir le grade de docteur, École Nationale Supérieure des Télécommunications et Électronique de Paris, 2004.

[9] AZOUAOU Sabrina, MOUSSOUS Asmaa, « Etude de la fabrication des prothèses auditives avec l'impression 3D au centre d'audioprothèse (O.N.A.A.P.H Alger) », Mémoire de Master Université MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU, 2023.

[10] Par Dr F.S BOUHADIBA, Médecin résidente en Anatomie générale, « NEURO-ANATOMIE LE NERF VESTIBULO-COCHLÉAIRE (VIII) », Laboratoire d'Anatomie d'Oran Année universitaire, 2019-2020.

[11] Imedjdab Yasmina, « Etudes des différentes prothèses auditives », mémoire de Master en Génie biomédical, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020/2021.

[12] L'appareil de l'audition et voies auditives. Disponible sur https://facmed-univ-oran.dz/ressources/fichiers produits/fichier_produit_3780.pdf . Consulter le 20/04/2024.

[13] Denoyelle, S. Marlin, Surdités de perception d'origine génétique, EMC - Oto-rhino-laryngologie, Volume 2, Issue 4, 2005, Pages 343-364.

[14] Dr Khaled Al Tabaa, ORL Chirurgie cervico-faciale Stomatologie Chirurgie maxillo-faciale, JANVIER 2017, Vernazobres-Grego.

[15] Implant cochléaire et développement du langage chez les jeunes enfants sourds profonds, Le Briec, 11 décembre 2012, UNIVERSITÉ RENNES 2.

[16]] La surdité ou déficience auditive, Claire Allais (Dr - Médecin généraliste), Gabriel Niango (Dr - Médecin oto-rhino-laryngologiste et chirurgien de la face), Équipe Offre Prévention de la Mutualité Française,3 1 / 0 1 / 2 0 2 2.

[17] Conduite à tenir devant une surdité de l'enfant Journal : EMC - Oto-rhino laryngologie Volume 2, Issue 3, August 2005, Pages 290-300, G. Lina-Granade, E. Truy.

[18] Hang AX, Kim GG, Zdanski CJ, Cochlear implantation in unique pediatric populations, Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg, 2012 Dec.

[19] M.Mondain,C.Blanchet,F.Venail,A.Vieu, « Classification et traitement des surdités de l'enfant », EMC-Oto-rhino-laryngologie, Volume 2, Issue 3, 2005, Pages 301-319.

[20] Houari, Soukaina, « Anatomie tridimensionnelle de l'oreille », thèse du doctorat en médecine, Université Cadi Ayyad faculté de médecine et de pharmacie Marrakech, 2013.

[21] D. Mariano-Goulart, « Eléments de biophysique de l'audition », cours de DFGSM 2, UE neurosensoriel, Département de Médecine Nucléaire de Montpellier, 2016.

[22] Hssaine KHaoula, « L'implantation cochléaire : expérience du service d'oto-rhino- laryngologie du chu Mohammed VI (2007-2010) » thèse du Doctorat en MEDECINE, Université CADI AYYAD Marrakech, 2011.

[23] Dorothée douchement-santerre, « intérêt d'un porte électrode charge en dexamethasone dans la conservation de l'audition résiduelle en implantation cochléaire », thèse pour le diplôme d'état de docteur en médecine, université du droit et de la sante – Lille 2, 2012,61 p.

[24] L'implant cochléaire : comment et pourquoi cela marche. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/272638220_L'implant_cochleaire_c

omment_et_pourquo i_cela_marche .

[25] Josef Prusa,LES BASES DE L'IMPRESSION 3D, Première édition, Prague 2020.

[26] Lemsadfa Haiballah, « Contribution et réalisation d'une imprimante 3d » Mémoire de Master Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017.

[27] Ayad Oussama, « Réalisation d'une imprimante 3D », Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, École supérieure des sciences appliquer, 2021.

[28] Ophélie Gastineau, « Impression 3D de médicaments : développement de nouvelles formes pharmaceutiques et personnalisation des traitements », Sciences pharmaceutiques, 2022.

[29] Lyna AMRANE, Mélissa BERROUBACHE, Initiation à la Fabrication Additive (Impression 3D) par la Technique « Fused Deposition Modeling» (FDM), Bejaïa, Algérie ,2019.

[30] BELAISSA, M'Hamed, « Nouvelles perspectives d'utilisation de l'impression 3D pour la réalisation de l'outillage (modèle et ponte à noyau du polymère à profil de la fonderie) », Mémoire de fin d'études de Master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2020.

[31] M. OULD OUALI Mohand, « Etude de pièces plastiques réalisées par impression 3D », Application à l'aérodynamique, Mémoire de Master Université MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU,2018/2019.

[32] Brahimi ziri, « Réalisation d'une Prothèse myoelectrique d'un bras avec l'impression 3D », En vue d'obtention de diplôme de master en Génie Biomédicale, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2021.

[33] Seyedeh-Marya Hasheminya, Jalal Dehghannya,Composition, phenolic content,antioxidant and antimicrobial activity of Pistacia atlantica subsp, kurdica hulls' essential oil, Food Bioscience, Volume 34,2020.

[34] Wong JY, Bonzino JD, Biomaterials. In : CRC Press, USA, 2007.

[35] Benazouz Sana, « Elaboration et Caractérisation d'échantillons de composites à Base de Polyester (cas noix et feuilles d'olive) », Mémoire de master,Université Med Khider – Biskra, 2019.

[36] Fathi Er-romeyssa, « Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une résine thermodurcissables renforcé par la sciure de bois», diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf – M'sila,

2019.

[37] Aéro Composites Saintonge - Comment bien choisir son composite carbone (aero-composites.com)

[38] BENDIFALLAH Mourad, « Travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magistère, Université de Batna, 2011.

[39] Bande de fibre de verre Unidirectionnelle 1200 g/m2, largeur 250 mm (castrocompositesshop.com) Bande de fibre de verre Unidirectionnelle 1200 g/m2, largeur 250 mm (castrocompositesshop.com)

[40] 1500d / 3 fibre de filament aramide para - position, fil torsadé Aramide (tchaintech.com)

[41] Khan SN, Sandhu HS, et al, Bone graft substitutes in spine surgery, Bull Hosp Jt Dis, 59:5-10,2000.

[42] https://cliniqueduval.com/blogue/la-prothese-totale-de-la-hanche-a-tete-de-grand-diametre-notre-solution-optimale

[43] Kenas Sarah, « Réalisation d'une prothèse fémorale dernière génération (ONAAPH TiziOuzou) », En vue d'obtention de diplôme de master en Génie Biomédicale, Université Mouloud Mammerie de Tizi Ouzou, 2021.

[44] Leyes C, Peters M, Titanium and titanium alloys – fundamentals and applications, In : Wiley – VCH, vol.1, 2003.

[45] Shalaby SW, Salz U, Polymers for dental and orthopedic applications, In : CRC Press, NY, vol.1, 2007.

[46] Sáenz A, Rivera-Muñoz E, et al. Ceramic biomaterials: an introductory overview. J Mater Educ, 21 :297-306, 1999.

[47] Kutz, M. Bone Tissue, In : Biomedical Engineering and Design Handbook, MacGraw Hill, 2nd edition, vol.1, 2009.

[48] El Feninat F, Fiset M, Laroche G, Mantovani D, Shape Memory Materials : Biomedical Applications, Adv Mater Eng, 4 : 1-14, 2002.

[49] Jean-Louis PARIENTE, Laurence BORDENAVE, Pierre CONORT Biomatériaux, Biomatériels et Biocompatibilité Journal Progrès en Urologie (2005).

[50] The Biomedical Engineering Handbook Second Edition, édité par J.D. Bronzino (CRC Press), 2000.

[51] Précis de Métallurgie, Elaboration, Structures-propriétés, Normalisation de J. Barralis et G. Maeder (AFNOR-Nathan), 1997.

[52] Mantovani D. Shape memory alloys : Properties and biomedical applications, JOM, 2000.

[53] White, R, History and Development of Titanium Production, Metallurgical Transactions A, 39(3), 789-804, 2008.

[54] Merrell, J. G, McLaughlin, S. W. ; Tie, L.; Laurencin, C. T.; Chen, A. F.; Nair, L. S. Curcumin-Loaded Poly(Epsilon-Caprolactone) Nanofibres : Diabetic Wound Dressing with Anti-Oxidant and Anti-Inflammatory Properties. Clin. Exp. Pharmacol. Physiol. 2009, 36, 1149–1156.

[55] Alliages titane grade: Propriétés physiques et mécaniques - Delta Metal.

[56] Jones, A, & Smith, B, Applications of silicone in biomedical devices. Medical Device Technology, 2008.

[57] Brown, A., et al. « Platinum-Based Chemotherapy: Mechanisms of Action and Clinical
Applications », Cancer Research, vol. 72, no. 4, pp. 893-910, 2021.

[58] Jones, M., et al. « Platinum's Electrical and Thermal Conductivity: Implications for Future Materials », Physical Review Letters, vol. 115, pp. 1501-1510, 2019.

[59] PURE natural platinum | wow, this little rock is very heavy … | Flickr.

[60] Gold : Chemistry, Properties, and Industrial Applications, Journal of Material Science, 45(3), 789-802.

[61] Smith, R. (2017). « The Historical Significance of Gold in Ancient Civilizations », Historical Journal of Metallurgy, 12(2), 123-145.

[62] https://www.i-diamants.com/fr/de-l-or-pur-au-bijou-en-or-18-carats.html,00270.

[63] Process for the Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide and/or Methanol, European Patent Application, EP1209121, Haldor Topsoe, 2002.

[64] **https://www.monblocoperatoire.com/anatomie-et-pathologie-de-loreille/**

[65] **https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/11701/canal-cochleaire**

[66] **https://www.jutekott.ee/eng/what-is-jute/**

Abstract

Our end-of-study project aims to design and develop a cochlear implant using 3D printing technology. Cochlear implants are medical devices used to restore hearing in individuals with severe or profound hearing loss. It is within this framework that our project will highlight cochlear implantation at the CHU Belloua in TIZI OUZOU, enabling deaf individuals to regain their hearing. Additionally, the objective of designing a prototype of the cochlear implant has been achieved.

Keywords : Cochlear implant, 3D printing, biomaterials, CHU Belloua in TIZI-OUZOU.

Résumé

Notre travail de fin d'étude vise à concevoir et réaliser un implant cochléaire en utilisant la technologie d'impression 3D. Les implants cochléaires sont des dispositifs médicaux utilisés pour restaurer l'audition chez les personnes atteintes de surdité sévère ou profonde. C'est dans ce cadre que notre projet va mettre en évidence l'implantation cochléaire au CHU Belloua de TIZI OUZOU en permettre de retrouver l'ouïe pour les personnes sourdes, aussi l'objectif de concevoir un prototype de l'implant cochléaire a était atteint.

Mot clés : implant cochléaire, impression 3D, biomatériaux, CHU de Belloua de TIZI-OUZOU.

ملخص

يهدف مشروعنا لنهاية الدراسة إلى تصميم وتنفيذ زراعة قوقعية باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد. الزراعات القوقعية هي أجهزة طبية تُستخدم لاستعادة السمع لدى الأشخاص الذين يعانون من فقدان السمع الجزئي أو الكلي. وفي هذا الإطار، سيبرز مشروعنا زراعة القوقعة في مستشفى بلوا بتيزي وزو لمساعدة الأشخاص الصم على استعادة السمع، كما تم تحقيق هدف تصميم نموذج أولي للزراعة القوقعية.

الكلمات المفتاحية: زراعة قوقعية، طباعة ثلاثية الأبعاد، بيومادية، مستشفى بلوا بتيزي وزو

.

Agzul

Leqdic-nneɣ n tgara n tezrawt yesɛa iswi n usnulfu n yiwen n uẓeḍḍa n tmeẓẓuɣt s useqdec n teknoloji n tɣuri n 3D. Iferdisen n tmeẓẓuɣt d allalen n tujjya yettwasqedcen i uɛiwed n tmesliwt deg yimdanen yesɛan aḍḍan n tmeẓẓuɣt s waṭas neɣ s lqaɛa. Dɣa deg ukatar-a aydeg ara d-yesmekti usenfar-nneɣ aẓeḍḍa n tmeẓẓuɣt deg usbiṭar n tesdawit n Belloua n TIZI

OUZOU deg uɛiwed n tmesliwt i yimdanen ur nesɛi aẓawan, am wakken ay d-yewweḍ yiswi n usnulfu n yiwen n uẓeḍḍa n tmeẓẓuɣt**.**

Awal agejdan : Aẓeḍḍa n tmeẓẓuɣt, tiẓrigin n 3D, ttawilat n tudert, Asbiṭar n tesdawit n Belloua n TIZI-OUZOU.