

DALENS Emilie, DURET Mathieu et GOUBIN Lou

Pourrait-on faire écouter de la musique à des sourds ou malentendants ? Et si oui, comment ?



Sciences à l'École



FONDATION
cGENIAL

Table des matières

I.La Transmission du son.....	4
I.1.Fonctionnement de l'oreille.....	4
I.1.a.Les composants de l'oreille.....	4
I.1.b.Causes des différents types de surdité.....	5
I.2.Le principe de la conduction osseuse.....	7
I.2.a.Définition de la conduction osseuse.....	7
I.2.b.La conduction osseuse et surdité.....	7
II. Fabrication d'un casque à conduction osseuse....	8
II.1.Premier casque.....	8
II.1.a.Objectifs initiaux concernant le casque.....	8
II.1.b.Matériel initial.....	8
II.1.c.Réalisation étape par étape.....	11
II.1.d.Résultats.....	14
II.2.Deuxième casque.....	15
II.2.a.De nouveaux objectifs.....	15
II.2.b.Matériel choisi et tests.....	15
II.2.c.Impression 3D de la structure du casque.....	17
II.2.d.Résultats.....	19
III.Partage.....	20
III.1.Culture de l'OpenSource et du logiciel libre.....	20
III.2.élaboration d'un site.....	21
IV.Conclusion.....	22
Annexes.....	23
Lexique.....	23
Bibliographie.....	25

Pourrait-on faire écouter de la musique à des sourds ou malentendants ? Et si oui, comment ?

Au XIXe siècle, le célèbre compositeur sourd Ludwig van Beethoven utilisait déjà une baguette en bois, posée contre la caisse de son piano, qu'il plaçait entre ses dents afin de ressentir les vibrations et composer sa musique. Mais en quoi le fait de ressentir ces vibrations lui permettait d'entendre la musique qu'il composait ? Et est-ce que cette technique fonctionne sur toutes les personnes sourdes et malentendantes ?

Dès le XVIe siècle, nous avons découvert le principe utilisé par Beethoven : il s'agit de la conduction osseuse. Les tests de conduction osseuse ont notamment permis des diagnostics de troubles auditifs et le développement du diapason en 1711. Il a néanmoins fallu attendre le XXe siècle avant que la conduction osseuse ne soit utilisée pour développer des aides auditives.

Nous avons étudié le principe de fonctionnement de l'oreille et de la conduction osseuse, puis nous avons rencontré un médecin ORL afin d'approfondir nos recherches. Enfin, grâce à ces connaissances, nous avons essayé de fabriquer notre propre casque à conduction osseuse.



Portrait de Ludwig van Beethoven travaillant à la Missa solemnis de Joseph Karl Stieler en 1820

I. La Transmission du son

I.1. Fonctionnement de l'oreille

I.1.a. Les composants de l'oreille

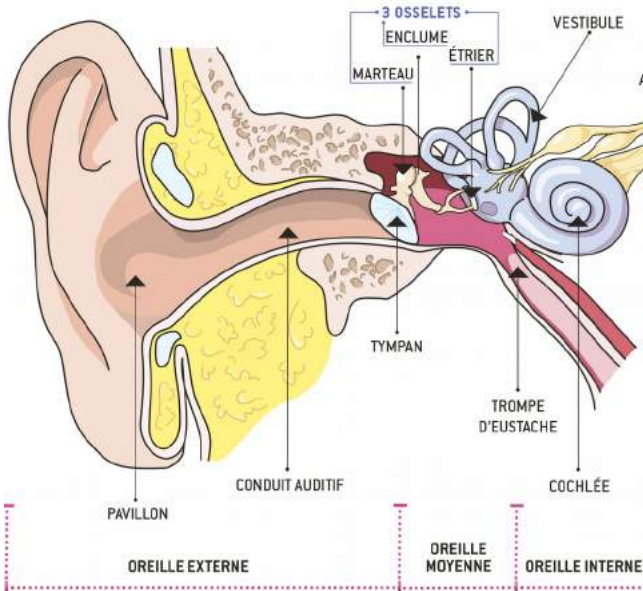


Schéma de la composition de l'oreille

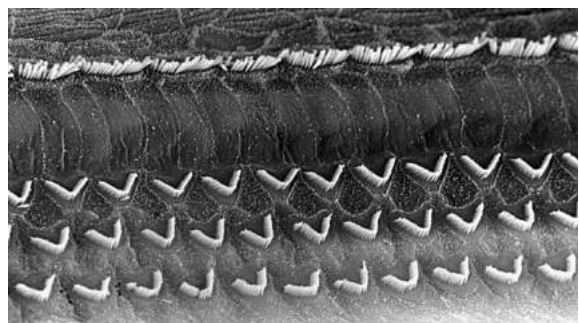
L'oreille est composée de 3 parties : l'oreille interne, l'oreille moyenne et l'oreille externe.

L'oreille externe est l'organe de perception. Elle est constituée du pavillon et du conduit auditif externe. Le fond de ce conduit est fermé par le tympan. Son rôle est de canaliser les sons. Elle n'est pas essentiel à l'audition mais lorsqu'elle est là, elle assure la transmission des sons vers l'oreille moyenne.

L'oreille moyenne est composée du tympan et de petits osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier). Le rôle de l'oreille moyenne est de transformer les vibrations aériennes qui

frappent la membrane du tympan en vibrations de pression. Cette membrane vibre parfaitement grâce à la trompe d'Eustache dont le rôle est de veiller à ce que la pression de chaque côté de tympan soit la même. C'est une sorte de tuyau qui s'ouvre et se ferme pour assurer sa fonction.

L'oreille interne est un dédale de conduits et de passages. Elle est constituée de deux organes : la cochlée, en forme d'escargot (pour l'audition) et le vestibule (pour l'équilibre). La platine de l'étrier fait un mouvement de piston afin de faire vibrer un liquide dans l'oreille interne, ce qui va pousser la cochlée. Les **cellules ciliées** de la cochlée vont vibrer et transformer un mouvement mécanique en signal électrique : c'est une transduction électrique. Ce signal part ensuite au cortex cérébral.



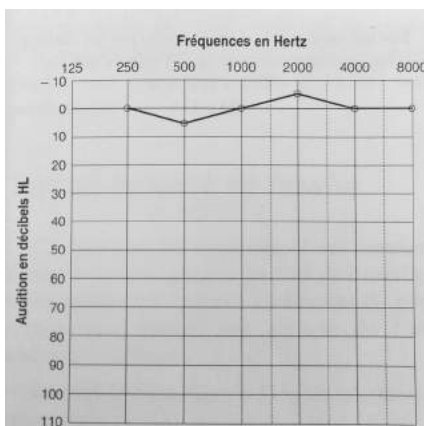
Les **cellules ciliées** de la cochlée

I.1.b. Causes des différents types de surdité

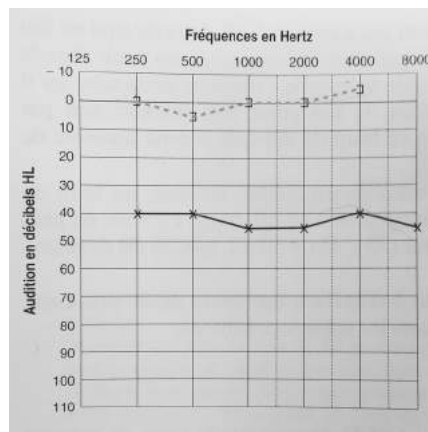
La surdité est un diagnostic posé par un médecin en cas de perte d'audition. C'est la diminution très importante ou l'inexistence totale de l'audition. On peut alors soit avoir affaire à une surdité légère (à partir de 20 dB de perte) soit lourde (à partir de 60 dB de perte).

Il existe quatre types de surdité :

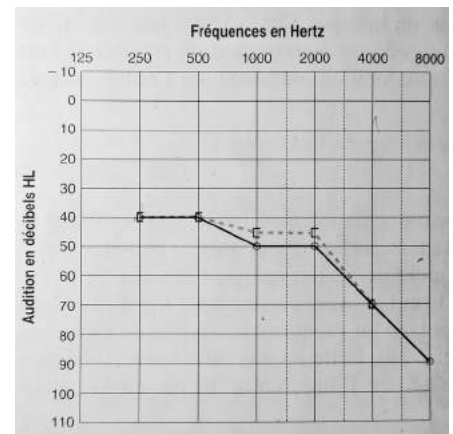
- La première est celle de perception. Dans ce cas, la perception est défectueuse (lésion de la cochlée, du nerf auditif donc en soit de l'oreille interne).
- La deuxième est celle de transmission. Cette forme touche l'oreille moyenne, l'oreille externe, ou les deux. Elle est souvent temporaire et est la plupart du temps bien soignée.
- On parle de forme mixte lorsqu'on observe à la fois une surdité de perception et une surdité de transmission.
- Enfin, la surdité centrale provient d'un problème au niveau du cortex cérébral. Elle ne peut actuellement pas être soignée.



Audiogramme d'une audition normale



Audiogramme d'une surdité de transmission : l'oreille a une perte de son au niveau du tympan (trait) mais le test sur l'oreille interne (pointillé) est normal

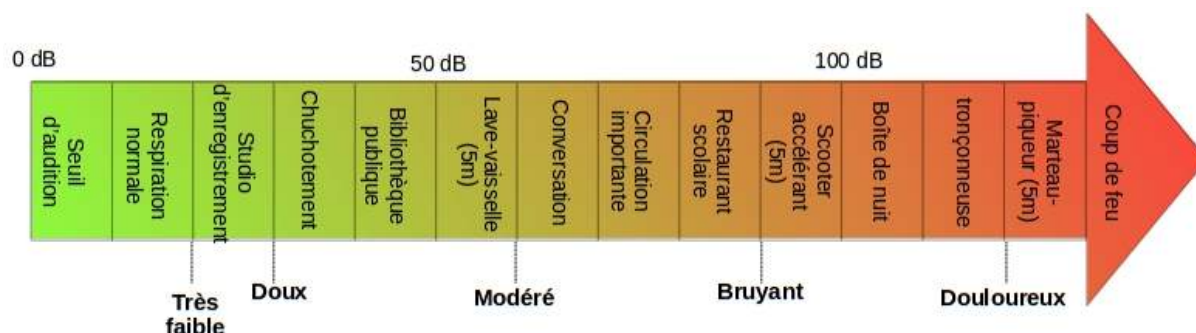


Audiogramme d'une surdité de perception : atteinte de la cochlée ou des voies nerveuses auditives montrées par une baisse du son présent dans l'oreille interne (pointillé) et moyenne (trait)

Source : Audiologie pratique, par F. Legent, P. Bordure, C. Calais et Olivier Malard, 2002, p37-38

Il existe de nombreuses causes à ces surdités :

- Des malformations génétiques, pouvant provoquer tous types de surdité.
- Des maladies infantiles, telles que de graves **otites**, les **oreillons**, la **méningite** et la **maladie de Ménière**.
- Des traumatismes sonores causés par des écouteurs, un casque. En effet, le **réflexe stapédien** permet de protéger l'oreille interne en cas de son au-delà des 80 dB, mais comme tout réflexe, si des sons trop forts se reproduisent en continu, comme dans un concert, alors il ne fera plus effet et cela produira des lésions des **cellules ciliées**.
- La prise de certains médicaments peut causer une surdité de perception, comme la chimiothérapie. Un AVC peut être la cause d'une surdité centrale.
- Une maladie des osselets (qui peut être opérée) ou une perforation du tympan suite à un accident entraînent une surdité de transmission.
- Enfin, la presbyacousie qui résulte de la vieillesse peut entraîner des surdités, de perception et centrale principalement.



Échelle de décibels

Un son de plus de 80 décibels abîme les **cellules ciliées**. Cela peut être la cause d'**acouphènes** et pire, de surdité.

Notes : « Sourd » et « malentendant » sont deux termes exprimant la baisse d'audition d'une personne. Mais « sourd » est utilisé dans le milieu médical tandis que « malentendant » est utilisé dans le langage courant. Dans notre TPE, vous retrouverez le terme « sourd » étant donné que notre démarche est scientifique.

I.2. Le principe de la conduction osseuse

I.2.a. Définition de la conduction osseuse

La conduction osseuse (ou ostéophonie) est une technique de propagation du son. Elle fait passer le son jusqu'à l'oreille interne, idéalement via les os **mastoïdiens** du crâne. Elle fait intervenir, en fonction de la fréquence, l'oreille externe et l'oreille moyenne tout en atténuant plus ou moins certaines vibrations.

Ces vibrations ne sont pas sous forme aérienne mais mécanique. Elles retentissent alors dans le crâne et dans les liquides de l'oreille interne, ce qui va mobiliser la membrane et les **cellules ciliées**. Comme lorsque le son est propagé par voie aérienne, les **cellules ciliées** vont ainsi transformer la vibration en signal électrique.

I.2.b. La conduction osseuse et surdité

La conduction osseuse est utilisée dans le milieu médical à travers des appareils auditifs. Ces appareils sont implantés dans le crâne (sur les os **mastoïdiens**). Elle n'est utile que lorsque le patient est atteint d'une surdité de transmission ou de perception unilatérale.

Le son sera perçu lors d'une surdité de transmission car les oreilles internes ne sont pas altérées (comme on peut le voir sur le deuxième **audiogramme** p.6). Dans le cas de la surdité de perception, elle n'est utile que lorsqu'une oreille interne est viable donc lorsque la surdité de perception est unilatérale et non bilatérale.



II. Fabrication d'un casque à conduction osseuse

II.1. Premier casque

II.1.a. Objectifs initiaux concernant le casque



Casque à conduction osseuse de batband.com qui nous a inspirés

Afin de comprendre comment fonctionne la conduction osseuse, nous avons choisi de réaliser notre propre casque. Nous avons donc étudié le principe des casques existants et déjà commercialisés pour nous en inspirer. Nous avons comme objectif de créer un casque fonctionnel, avec les meilleures performances possibles. La structure externe, le mode d'alimentation et les possibilités d'utilisation (étanche, Bluetooth...) n'étaient pas nos priorités. Nous voulions simplement pouvoir expérimenter cette technologie.

II.1.b. Matériel initial

Batterie LiPO :



La batterie LiPO, pour "Lithium Polymer Batterie" (batterie lithium-polymère), est un **accumulateur électrochimique**. Il est appelé ainsi car sa réaction est basée non pas sur le lithium à l'état **ionique** (pour le Li-ion) mais à l'état de **polymère** (**l'électrolyte** est sous forme de gel). C'est une technologie présente aujourd'hui partout et sous différentes formes, que ce soit dans les smartphones, les ordinateurs portables ou les tablettes.

Ce nouveau type de batterie est arrivé surtout avec les technologies de type drone. En effet, elles ont pour avantage d'être très légères et de posséder une haute puissance. De plus, contrairement aux batteries "traditionnelles", elles ne se déchargent que très lentement quand elles ne sont pas utilisées. Aujourd'hui, cependant, il faut faire attention à l'utilisation de ces batteries qui peuvent prendre feu si elles sont mal utilisées, et notamment si elles sont mal chargées (au delà de 4,2 V) car elles ne sont pas conçues dans ce but. Il faut donc être précautionneux. Avec le temps, les batteries LiPO ont également tendance à gonfler, ce qui est le signe qu'elles sont usées et doivent être mises de côté.

Nous avons choisi d'utiliser ce type de batterie pour son rapport masse/puissance très intéressant.

Adaptateur micro USB LiPO :

Il permet de charger notre batterie LiPO via USB, ce qui paraît plus ergonomique pour un casque audio.



Amplificateur Audio :



L'amplificateur audio est présent pour amplifier le signal sonore venant du câble jack en le déformant le moins possible. En effet, le signal électrique de base venant du câble jack (relié à un smartphone par exemple) est trop faible pour que les haut-parleurs le retransmettent de façon claire et intelligible à notre oreille. L'amplificateur a donc pour fonction d'amplifier ce signal afin que les haut-parleurs piézoélectriques puissent le retransmettre de manière audible.

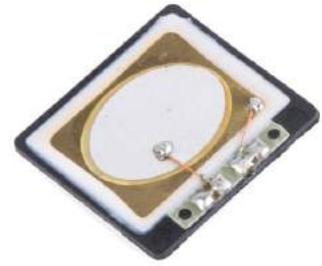
Audio jack femelle :

C'est la **prise femelle** qui recevra la **fiche jack mâle**. Elle permettra donc de connecter un câble double jack entre le casque et l'appareil permettant de lire le fichier audio.



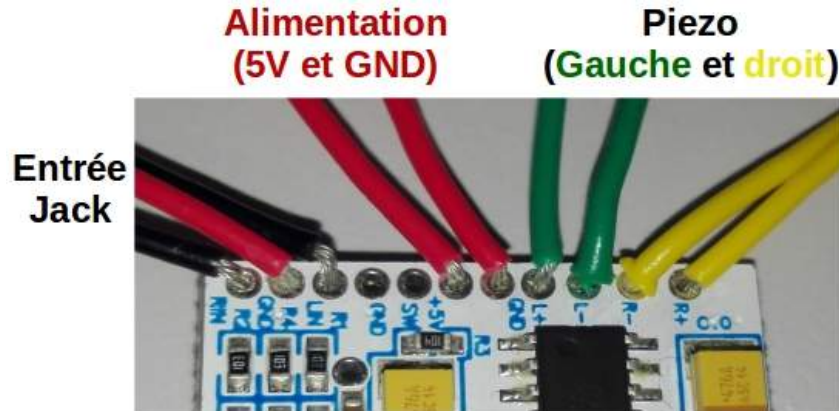
Haut-parleurs piézoélectriques (abrégés piézos ou piézoélectriques) :

Ils reçoivent le signal électrique de l'amplificateur audio et le convertissent en ondes acoustiques : ce sont des transducteurs acoustiques. Le signal reçu fait se contracter la céramique du haut parleur, proportionnellement à la tension du courant qu'on lui applique. La membrane fixée sur la céramique subit une flexion et se contracte, ce qui convertit le signal en onde sonore. L'un des inconvénients du transducteur piézo est qu'il a des difficultés à retranscrire les basses, mais son faible coût, sa robustesse et son encombrement minimal contribuent à son énorme succès.

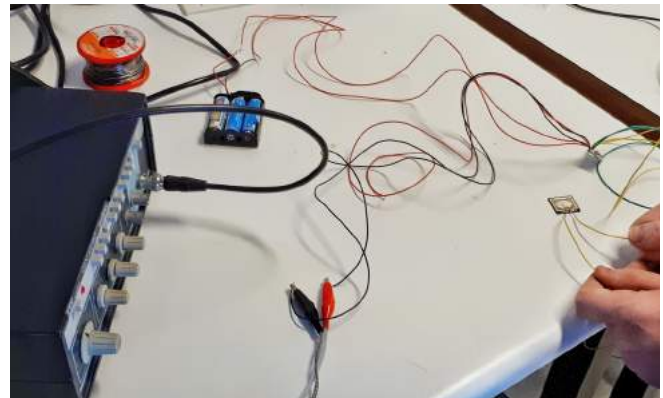


II.1.c. Réalisation étape par étape

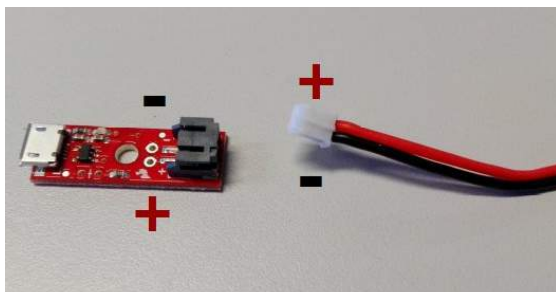
Nous avons commencé l'élaboration du casque lorsque nous avons reçu ses composants début décembre. Tout d'abord, nous avons soudé de longs fils à l'amplificateur comme ci-dessous :



Après quelques tests pour vérifier nos schémas, nous avons soudé nos composants aux fils et avons testé le bon fonctionnement du système (voir ci-contre).

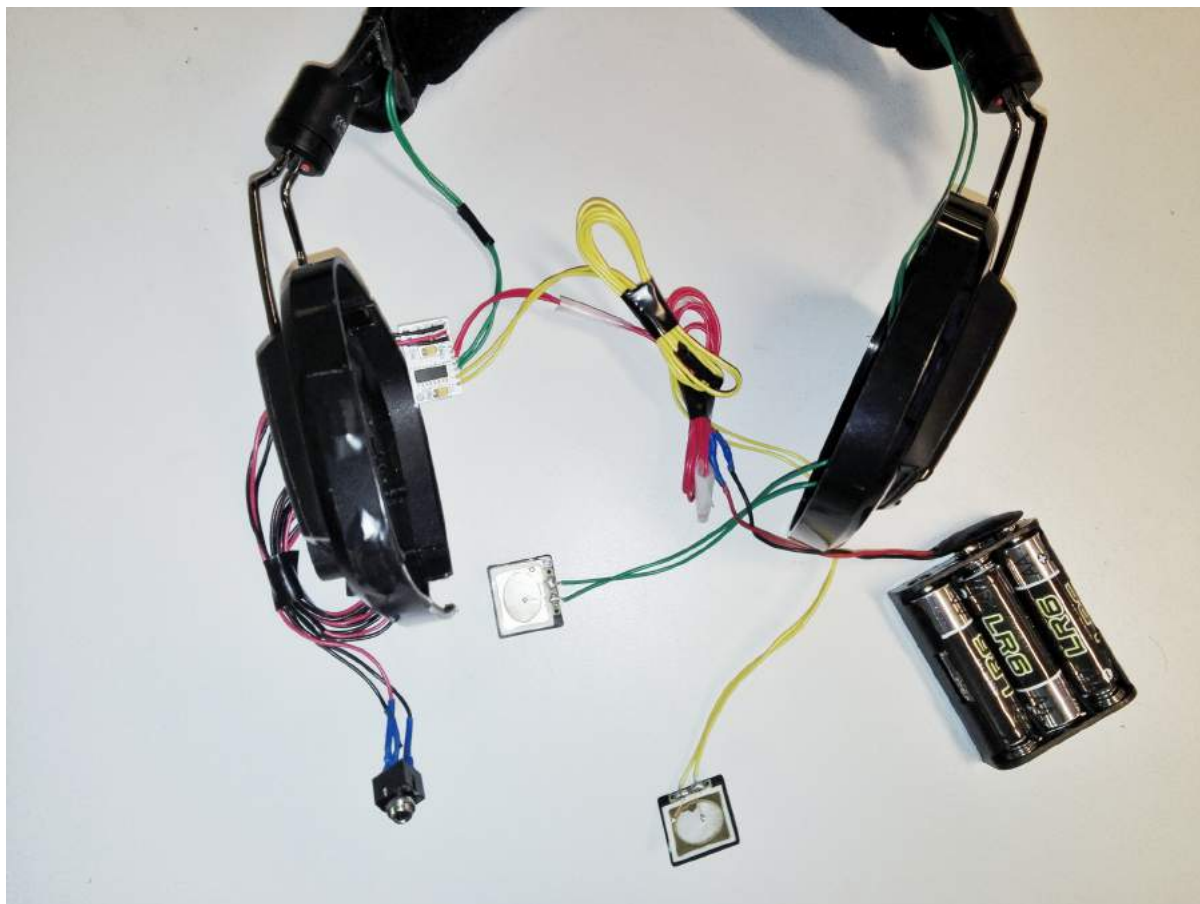


Lorsque nous avons reçu la batterie LiPO, nous avons constaté un problème : ses bornes et celles de l'adaptateur USB étaient inversées, ce qui produisait un échauffement lorsque les deux éléments étaient branchés.



Pour ne pas prendre le risque de nous mettre en retard, nous avons abandonné l'alimentation par LiPO. Nous avons alors choisi de continuer à alimenter le casque par trois piles 1,2V et de régler ce problème seulement si nous étions sûrs d'être dans les temps.

Nous avons ensuite utilisé la structure d'un casque vidé de tous ses composants électroniques. Notre appareil ressemblait alors à un véritable casque et fonctionnait correctement, il ne restait plus qu'à le fermer



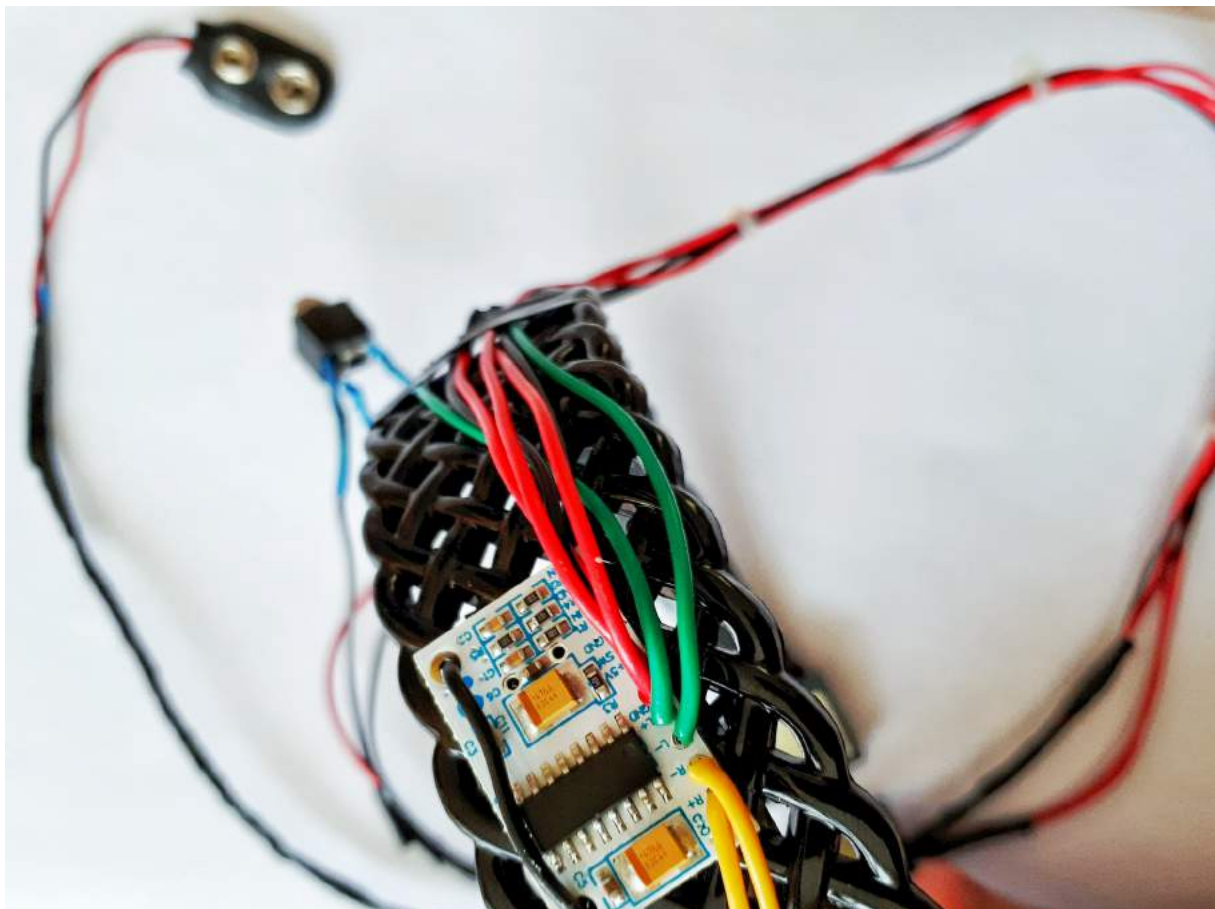
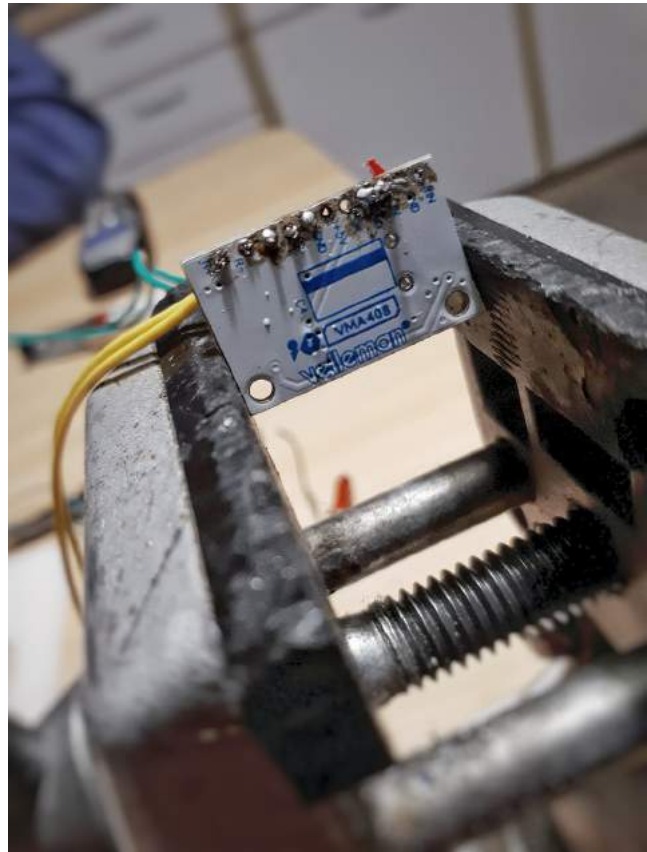
Arrivés à ce stade de la fabrication, nous nous sommes entretenus avec le docteur Vincent Bouetel, chirurgien ORL. Nous lui avons présenté notre système, mais il nous a conseillé d'en changer de structure. En effet, d'après lui, un simple serre-tête suffirait, car il appliquerait une pression bien plus importante sur la **mastoïde** et le son serait alors plus audible. Nous avons donc dû tout modifier.



Nous avons alors récupéré les fils et les composants et avons adapté le tout à un serre-tête.

Nous avons été confrontés à quelques problèmes : trop fragiles, certaines des soudures ont lâchées et la carte de l'amplificateur audio était trop endommagée.

Nous avons donc recommencé avec une nouvelle carte et nous étions très satisfaits du résultat final de notre casque.



II.1.d. Résultats

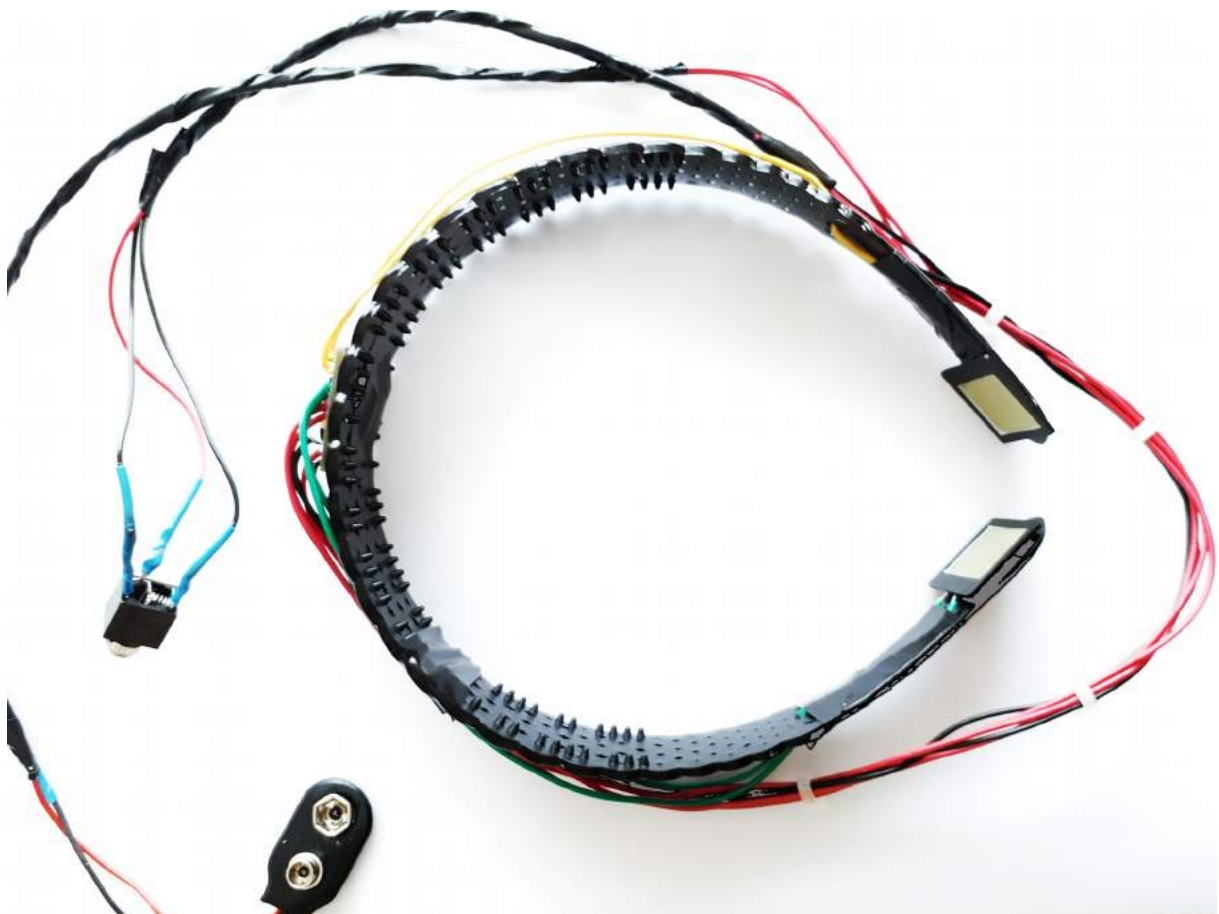
Le résultat de notre casque est mitigé. En effet, bien qu'il fonctionne correctement et qu'il nous permette d'expérimenter la conduction osseuse, les piézoélectriques vibrent trop peu et sont très loin d'égaliser ceux des ORL.

Nous aurions eu besoin de piézos bien plus puissants pour améliorer le rendu et obtenir un casque fonctionnel.

Nous ne regrettons pas, en revanche, d'avoir modifié la structure du casque. La pression du serre-tête a réellement permis d'améliorer la transmission des vibrations du casque aux os mastoïdiens.

Le circuit de notre casque a beau être simple, nous avons été confrontés à quelques problèmes (grésillements soudain des transducteurs, échange des bornes de la batterie et de son adaptateur...), et les importants délais de réception des commandes nous ont fait perdre beaucoup de temps.

Par manque de temps, nous n'avons pas inclut la batterie LiPO.



II.2. Deuxième casque

II.2.a. De nouveaux objectifs

Ce second casque a pour but d'être plus élaboré que le précédent : nous voulons augmenter les vibrations pour mieux entendre la musique en utilisant des composants différents et meilleurs, et retravailler la structure du casque.

Nous le fabriquons à présent dans l'optique du partage. Le matériel et les techniques que nous expérimentons nous donne plus d'informations à mettre sur le site (voir III.Partage).

II.2.b. Matériel choisi et tests

Nous avons voulu comparer les capacités de nos deux amplificateurs. Pour ce faire, nous avons tenté de mesurer leur réponse en fréquence. Il s'agit de la mesure de la réponse de tout système (mécanique, électrique, électronique, optique, etc.) à un signal de fréquence variable (mais d'amplitude constante) à son entrée. On obtient donc une plage de fréquence dans laquelle le système fonctionne de manière optimale.

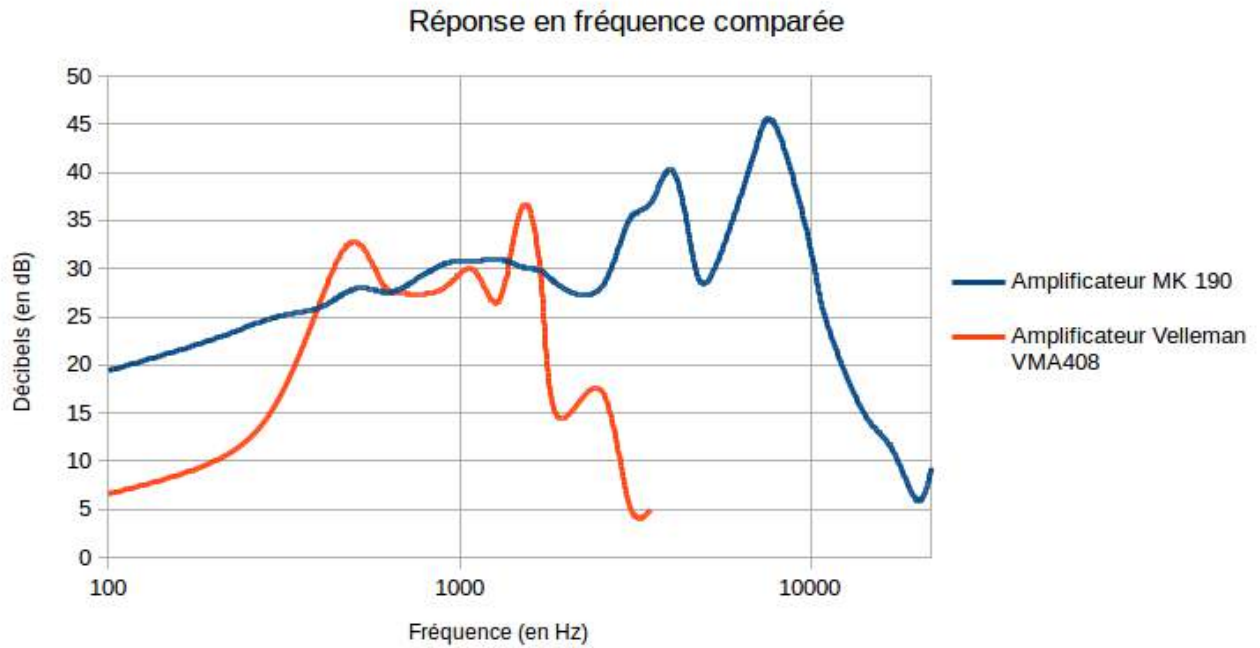
Pour réaliser cette expérience, nous avons utilisé un oscilloscope pour mesurer les fréquences et un générateur basse fréquence. Nous avons mesuré les décibels à l'aide d'un sonomètre



Notre sonomètre



Le GBF et l'oscilloscope



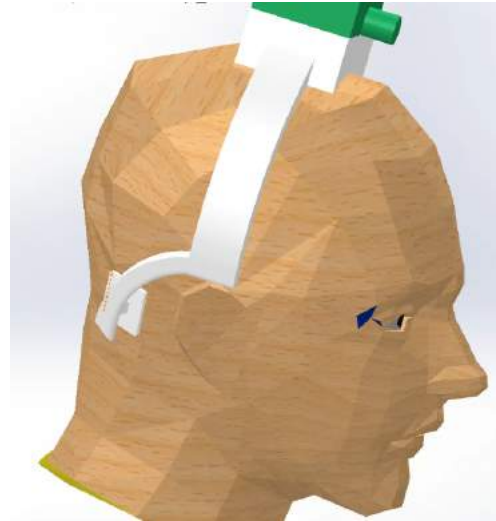
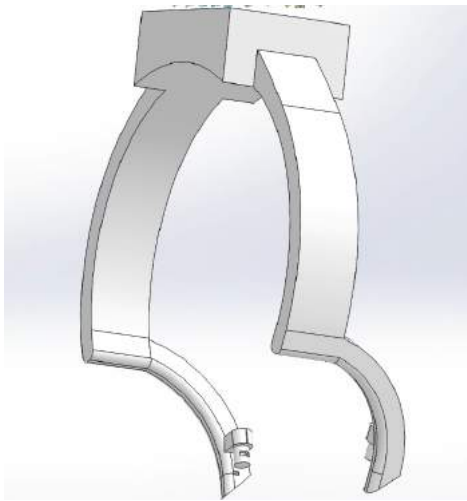
Nous avons construit ce graphique à partir des valeurs que nous avons relevé afin de comparer l'amplificateur du premier casque (VMA408) et celui que nous venions de nous procurer (MK 190).

Le test fut concluant : ce nouvel amplificateur était bien meilleur que le précédent. Le port Jack est inclus à l'amplificateur.

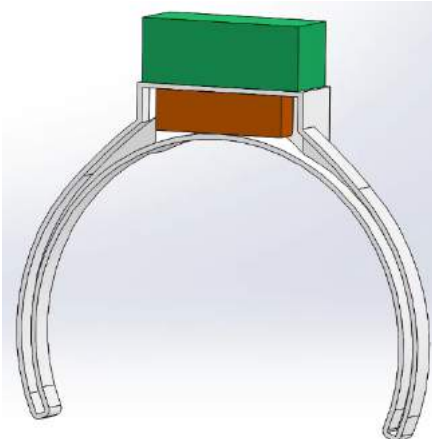
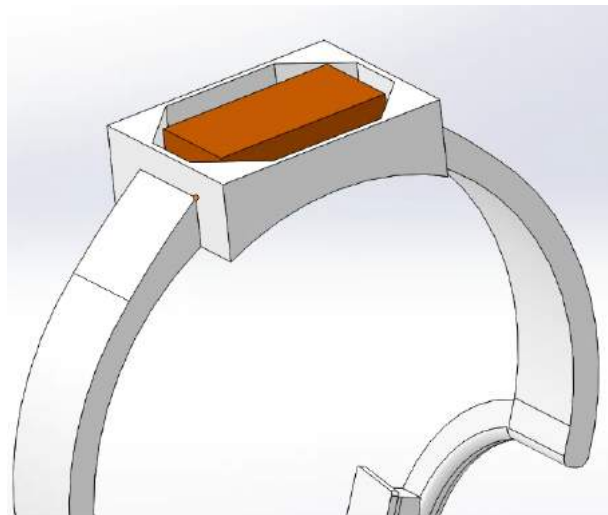
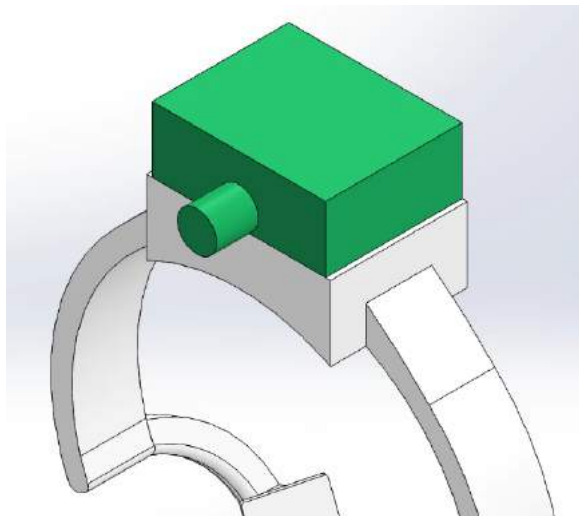
Nous avons en revanche choisit d'utiliser les mêmes piézoélectriques. Il en existe peu de différents modèles et aucun autre ne nous convenait autant, en terme de plage de fréquence et de dimensions.

II.2.c. Impression 3D de la structure du casque

Nous avons modélisé la structure du casque sur SolidWorks, avec l'objectif de l'imprimer en 3D.

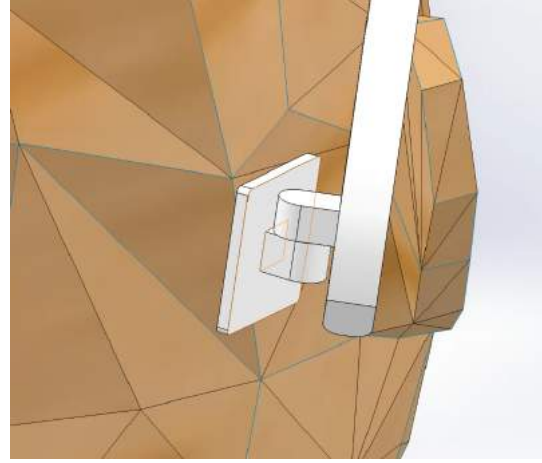
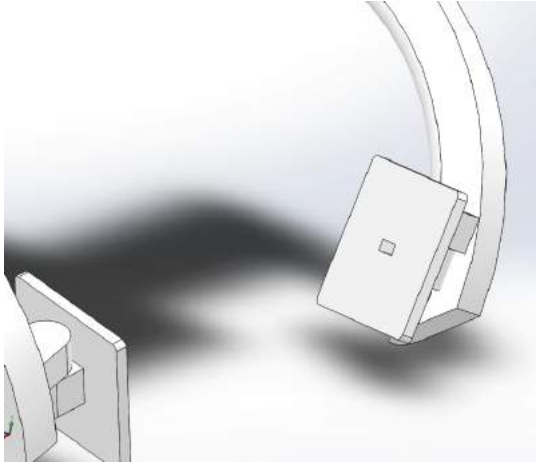


L'amplificateur (en vert) est placé sur le haut du casque, vissé. La batterie (en orange) est située en dessous, dans un boîtier.



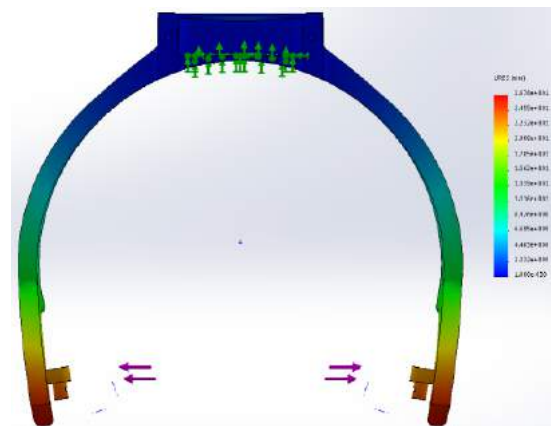
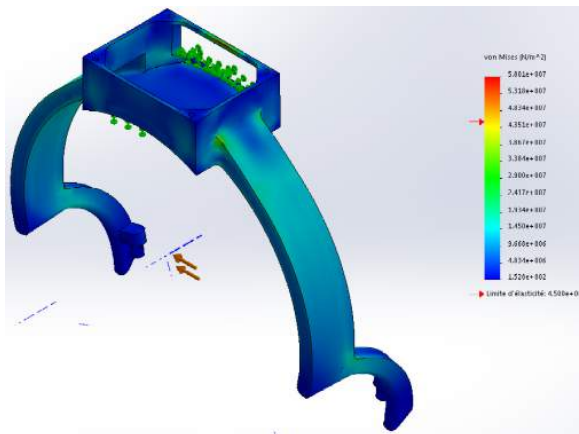
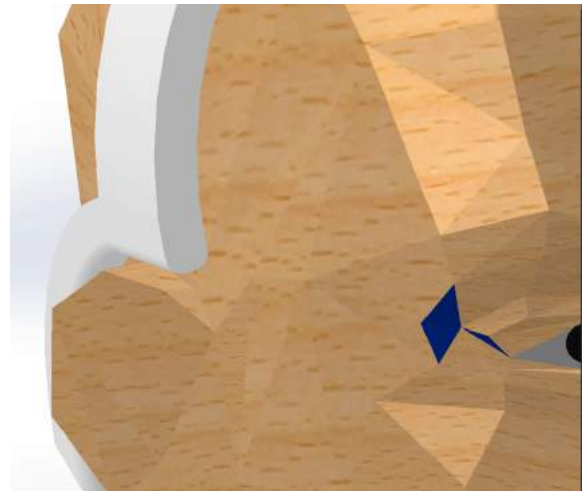
Le casque est entièrement creux afin de pouvoir faire passer les fils, mais cela permet également de réduire sa masse.

Le casque est donc une coque de 2mm d'épaisseur.



Des supports pivotant pour les piezos vont permettre de placer à la perfection les transducteurs contre les mastoïdes, et ainsi garantir un meilleur confort et une meilleure transmission des vibrations.

Des congés améliorent, à l'extérieur du casque, le confort et l'esthétique, et aident, à l'intérieur du casque, au passage des fils.



Nous avons également pu simuler la résistance du matériau, pour s'assurer que le casque puisse s'étirer suffisamment pour être porté.

Le casque est imprimé grâce à l'imprimante Ultimaker³. Il est en PLA noir et nous utilisons du PVA, soluble, pour le support.

II.2.d. Résultats



Nous sommes très satisfaits de notre résultat, autant en terme de performances que d'ergonomie.

Nous avons réussi à proposer un casque à un prix abordable (une cinquantaine d'euros), bien moins cher donc que les casques à conduction osseuse en vente dans le commerce ou encore que les appareillages en conduction osseuse.

Nous ne souhaitons pas nous contenter de ce résultat pour autant : nous ne sommes pas convaincus par la taille de la carte d'amplificateur, bien trop imposante et visible.

Nous aimerions également que la structure du casque soit réglable et pliable pour faciliter son rangement en sécurité.

Notre projet n'est pas terminé, de nombreuses choses peuvent encore être améliorées, mais nous pouvons que nous féliciter en voyant l'avancée réalisée entre les deux casques.

III. Partage

III.1. Culture de l'OpenSource et du logiciel libre

Les deux notions « Logiciel libre » et « OpenSource » sont très souvent confondues, et non sans raison, car ces deux concepts sont très proches, mais possèdent une différence fondamentale.

Le plus ancien est le logiciel libre, initié par Richard Stallman, et vient s'opposer aux logiciels propriétaires. Les logiciels libres doivent pouvoir offrir la possibilité aux utilisateurs d'exécuter, copier, distribuer, étudier, modifier et améliorer le logiciel. Mais le terme anglais « free » désignant les logiciels libres prête à confusion, « free » signifiant également « gratuit », or les logiciels libres ne sont pas nécessairement gratuits. C'est cette confusion, obstacle important à l'adoption commerciale, qui a mené des partisans du logiciel libre à créer l'OpenSource.

Richard Stallman définit la différence fondamentale entre les deux concepts : « *l'open source est une méthodologie de développement ; le logiciel libre est un mouvement social* ». Elle est donc principalement philosophique et peu distinguable, la quasi-totalité des logiciels répondant aux critères de l'un répondent également à ceux de l'autre.



Logos de quelques logiciels libres.

III.2. Élaboration d'un site

Notre travail s'inscrit donc dans la philosophie du logiciel libre. En effet nous souhaitons rendre libres et accessibles l'intégralité de nos recherches, expériences et constatation. La création du casque à été longue, et nous souhaitons la partager pour que notre travail puisse éventuellement aider des personnes.

Pour cela nous avons créé un site à partir du logiciel libre WordPress :

<https://bonesound.wordpress.com/>

Il présente nos recherches, et les étapes de création de nos casques et propose de nous contacter pour nous interroger et obtenir des précisions.



IV. Conclusion

Nos recherches nous ont permis de comprendre le principe de la conduction osseuse et de la surdité et nous savons à présent que la conduction osseuse, beaucoup utilisée par les ORL dans le cadre de leurs diagnostics, est utilisée pour palier à certains types de surdités, soient celles de transmission et de perception unilatérale. Ce type d'appareillage, bien que fréquent, reste moins utilisé que les appareillages à voie aérienne.

Cette technologie est peu répandue, pourtant la conduction osseuse est à la portée de tous car peu de matériel, de connaissance et d'argent sont nécessaires à la conception d'un casque à conduction osseuse, comme nous avons pu l'expérimenter.

Les casques à conduction osseuse ont des applications variées qui ne profitent pas seulement à certaines personnes malentendantes. Le principal atout et inconvénient de cette technologie est qu'elle offre la possibilité d'entendre, aussi bien et simultanément, sa musique et son environnement. C'est un argument indéniable au près des sportifs qui peuvent ressentir le besoin d'entendre le monde qui les entoure tout en ayant envie d'écouter la musique de leur choix, que ce soit pour une question de sécurité s'ils courent ou marchent au bord d'une route, pour entendre et pouvoir communiquer avec les autres, ou pour ne pas perturber leur perception spatiale. Cela permet aussi de parler sans avoir à retirer son casque ou sans élever la voix par réflexe. C'est surtout très important pour l'armée, qui utilise ces casques pour ces mêmes raisons dans le cadre de la communication tactique.



Militaire américain portant un casque à conduction osseuse



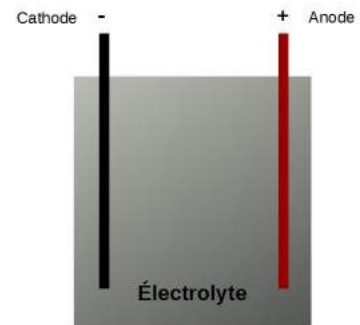
Cependant, la qualité sonore d'un casque à conduction osseuse n'égale pas celle d'un casque audio habituel, surtout dans les basses (que les piézoélectriques ont du mal à atteindre), et leur prix reste relativement élevé. En effet, c'est encore une technologie peu démocratisée et peu connue du grand public. On peut néanmoins espérer qu'elle se développe dans les années à venir...

Annexes

Lexique

Accumulateur électrochimique :

Les accumulateurs et piles électrochimiques permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Leur fonctionnement et leurs réactions sont très complexes. Ils sont notamment composés ; d'un électrolyte, une substance conductrice qui contient des ions mobiles ; et d'une cathode et d'une anode, qui sont les électrodes (bornes moins et plus) qui envoient et reçoivent les électrons.



Acouphènes : Les acouphènes sont des sensations auditives (sifflement, grésillement, bourdonnement) qui ne sont pas causées par un bruit extérieur.

Audiogramme : Représentation graphique, obtenue grâce à un audiomètre, traduisant le degré d'acuité auditive. L'axe vertical de l'audiogramme représente le volume sonore ou l'intensité qui est exprimé en décibel (dB). Plus vous descendez sur l'axe, plus le son est fort. L'axe horizontal de l'audiogramme représente la fréquence sonore mesurée en Hertz (Hz). Les fréquences sonores augmentent graduellement au fur et à mesure que vous vous déplacez sur la droite de l'axe.

Cellule ciliée : Une cellule ciliée qualifie chacune des cellules sensorielles de l'oreille interne. Son inclinaison sous l'effet des ondes sonores est responsable de la production d'influx nerveux.

Électrolyte polymère et électrolyte ionique : Un polymère est une classe de matériaux légers et en général souples. Une électrolyte polymère est donc solide, contrairement à une électrolyte ionique qui est souvent un solvant liquide.

Logarithme décimal : Le logarithme décimal est la fonction continue qui transforme un produit en somme et qui vaut 1 en 10.

Maladie de Ménière : Maladie Chronique caractérisée par des crises de vertiges et des sifflements/bourdonnements de l'oreille.



Mastoïde : La mastoïde est l'apophyse (extrémité osseuse) c'est-à-dire l'éminence de l'os temporal, située en arrière du conduit auditif externe et recouverte par le pavillon de l'oreille.

Méningite : Inflammation des méninges (membrane qui entoure le système nerveux central).

Oreillons : Maladie virale contagieuse responsable d'une inflammation des glandes salivaires.

Otite : Inflammation de l'oreille d'origine infectieuse couramment présente chez l'enfant.

Prise femelle et fiche mâle : La prise femelle est chargée de distribuer ou de relayer l'énergie qu'elle reçoit. La fiche mâle est le dispositif s'insérant dans la prise femelle associée.

Réflexe stapédien : Réaction des muscles du tympan soumis à un son de forte intensité. La réponse à cette forte stimulation sonore consiste en une contraction réflexe.

Bibliographie

- Le 23 janvier, nous avons rencontré le docteur Vincent Bouetel. Il est chirurgien ORL (Oto-Rhino-Laryngologiste) et est donc spécialisé dans le diagnostic et le traitement des troubles du nez, de la gorge, de l'oreille, et de la région tête et cou. Nous l'avons questionné pendant plus d'une heure à propos de l'oreille, de la surdité et de la conduction osseuse. Nous le remercions vivement pour ses nombreuses explications, essentielles pour notre compréhension et pour la réalisation de ce dossier.
- Comment ça Marche, Tout le Savoir : Technologie, Presse Fleurus, Avril/Mai/Juin 2017
- Manuel de physique Belin de Terminale S et Terminale S spé, 2012
- *Larousse Médical*, dirigé par Carola Strang, 2006
- *Les surdités de perception*, coordonné par Alain Robier, 2001
- *Audiologie pratique*, par F. Legent, P. Bordure, C. Calais et Olivier Malard, 2002

L'oreille :

- <http://www.cochlea.org/audition/oreille>
- <https://www.hear-it.org/fr/l-oreille-interne-1>
- http://anso.pagesperso-orange.fr/page_le_fonctionnement.htm
- <http://www.auditionmutualiste.fr/fonctionnement-de-loreille>

Surdité :

- <http://www.cnrtl.fr/definition/surdite%C3%A9>
- <http://www.terre-audition.fr/index.php/profil-auditif/definition-de-la-surdite>
- <https://www.hear-it.org/fr/surdite-de-transmission>
- <https://aftershokz.com/>

Conduction osseuse :

- <http://www.elno.fr/fr/produits-technologies/technologies/conduction-osseuse.html>
- <https://www.audilo.com/blog/2016/02/conduction-osseuse-et-casques-audio/>

Amplificateur Audio :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur_audio
- <http://www.01net.com/actualites/a-quoi-sert-un-amplificateur-audio-511191.html>
- <https://openclassrooms.com/courses/l-electronique-de-zero/l-amplification-d-un-signal>

Audio jack :

- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Jack_\(prise\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jack_(prise))
- <http://blog.gamerstuff.fr/prise-jack-comme-ca-marche/>

Haut-parleurs piézoélectriques :

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Haut-parleur>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transducteur>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- <https://fr.audiofanzine.com/haut-parleur/editorial/dossiers/le-haut-parleur-piezo.html>

- <http://www.edencast.fr/osteophonie-entre-mythe-et-realite/>

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ost%C3%A9ophonie>

Batterie LiPO :

- <http://blog.patrickmodelisme.com/post/qu-est-ce-qu-une-batterie-lipo>
- <http://www.mk-fr.info/forum/index.php?topic=1427.0>
- <https://www.modelisme.com/forum/aero-electrique/153561-debutant-aide-les-lipo-cest-quoi.html>
- <http://www.majordome-video.com/guides/le-guide-ultime-de-la-batterie-lipo/>
- <http://www.droneaddict.net/les-batteries-lipo/>

Logiciel libre et Open Source :

- <https://www.developpez.com/actu/87401/Logiciel-libre-et-open-source-les-deux-concepts-sont-parfois-utilises-de-maniere-interchangeable-mais-quelle-est-la-difference/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Logiciel_libre
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Open_source

Accumulateur électrochimique :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique
- <http://villemin.gerard.free.fr/aScience/Electron/AnodCath.htm>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Anode>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyte#Conductivit.C3.A9.C3.A9lectrique>

Polymère et Li-ion :

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A8re>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Solvant_aprotique

Fiche et prise :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Prise_%C3%A9lectrique#M.C3.A2le_ou_femelle

Réponse en fréquence :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Réponse_en_fréquence

Nous tenions aussi à remercier nos professeurs, MM. Halbert, Chauvin, Piètre et Eneau pour leur aide.

Emilie Dalens, Mathieu Duret et Lou Goubin.