HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE
ET DE GESTION
DU CANTON
DE VAUD

Route de Cheseaux 1
Case postale
1401 Yverdon-les-Bains

Hes·so

ClAudio 2.0

Rapport technique - V0

Projets Multidisciplinaires 2026

Rédigé par :

Taverney Timothé ROCM, Coudert Arnaud ROCM
Yusuf Anas EEM, Di Giovanni Rémy EEM

Professeur répondant :

Mentano Carlo

7 juin 2026

Historique du document

Version	Date	Changements
V0		Version initiale

Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document.

Norme	Description
	Cahier des charges fonctionnel – V1
ISO/IEC Dir 2 : 2016	Principes et règles de structure et de rédaction des documents ISO et IEC
OMG UML 2.5.1	*Unified Modeling Language* pour l'ingénierie logicielle.

Abréviations

Cette section de termes et définitions précise les terminologies techniques et autres acronymes propres au projet.

Terme	Définition
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
SBC	SubBand Codec, standard actuel pour la transmission d'audio BLuetooth
LE Audio	Sous ensemble de norme concernant les protocoles audio dans la norme Bluetooth Low Energy, (incluant le codec LC3 à très faible latence)
SoC	System on a Chip

Table des matières

Historique du document 2
Références normatives 2
Abréviations 2
1 Introduction 7
1.1 Contexte 7
1.2 But et objectifs 7
1.3 Etat de l'art 7
1.4 Répartition du travail 8
2 Conception électronique 9
2.1 Blocks fonctionnels 9
2.2 SystemOnChip 10
2.3 Interface utilisateur 11
2.4 Microphones 11
2.5 Alimentation 12
3 Conception mécanique 13
3.1 Boitier 13
3.2 Etanchéité 14
3.3 Station de recharge 15
3.4 Fabrication et matériaux 15
3.5 Assemblage 15
4 Software 16
4.1 Structure globale du programme 16
4.2 Programmation de l'interface utilisateur 17
4.3 Structure du nRF5340 17
4.4 Programmation sur PCB 17
5 Système électrique 18
5.1 Schéma 18
5.2 Alimentation 18
5.3 Stockage d'énergie 19
5.4 Recharge et transformation de tension 19
5.5 Interface utilisateur 19
6 Tests 20
6.1 Latence 20
6.1.1 Schéma de mesure 20
6.1.2 Liste de matériel 20
6.1.3 Tableaux de réglage 20
Générateur de fonction 20
6.1.4 Procédure 21
6.1.5 Interprétation des résultats 21
6.1.6 Résultat 21
6.2 Consommation et autonomie 23
6.2.1 Profil énergétique 23

6.2.2 Test absolu 23
6.2.3 Autonomie à la fin de la durée de vie 23
6.2.4 Résultats 23
6.3 Portée 24
7 Prototype 1 25
7.1 Présentation du prototype 1 25
7.2 Présentation des fonctionnalités 25
7.3 Performances 25
7.3.1 Latence 25
7.3.2 Portée 25
7.3.3 Autonomie 25
7.4 Finalité 25
8 Prototype 2 26
8.1 Présentation du prototype 2 26
8.2 Présentation des fonctionnalités 26
8.3 Performances 26
8.3.1 Latence 26
8.3.2 Portée 26
8.3.3 Autonomie 26
8.4 Finalité 26
9 Produit final 27
9.1 Présentation du produit 27
9.2 Présentation des fonctionnalités 27
9.3 Performances 27
9.3.1 Latence 27
9.3.2 Portée 27
9.3.3 Autonomie 27
9.4 Finalité 27
10 Estimation des couts 28
11 Conclusion 29
11.1 Résultats principaux 29
11.1.1 Latence 29
11.1.2 Autonomie 29
11.1.3 Portée 29
11.2 Revue des objectifs 29
11.3 Condition importante 29
11.4 Perspectives 30
11.5 Remerciements 30
11.6 Commentaire Personnel 30
12 Bibliographie 31
13 Annexes 32

Liste des figures

Figure 3-1 : Dimension principales du boitier 13
Figure 3-2 : Partie basse du boitier 13
Figure 3-3 : Partie haute du boitier 14
Figure 3-4 : Filetage partie haute 14
Figure 3-5 : Filetage partie basse 14
Figure 3-6 : Slice des cylindres 14
Figure 3-7 : Station de recharge 15
Figure 4-1 : Flux de donnée 16
Figure 4-2 : Kit de développement NRF5340 17
Figure 5-1 : Schéma bloc du système électrique 18
Figure 5-2 : Base de recharge 18
Figure 5-3 : Batterie Li-Po 124050 19
Figure 6-1 : Exemple de signal 21
Figure 6-2 : Temps de latence SBC 21
Figure 6-3 : Temps de latence LC3 partie 1 22
Figure 6-4 : Temps de latence LC3 partie 2 22
Figure 6-5 : Profil de consommation en fonctionnement nominal 23
Figure 6-6 : Profil de consommation en veille 23
Figure 6-7 : Consommation pendant l'appairage 23
Figure 7-1 : Prototype 1 25
Figure 8-1 : Prototype 2 26
Figure 9-1 : PCB final 27

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Répartition du travail 8
Tableau 6-1 : Schéma de mesure 20
Tableau 6-2 : Liste du matériel de mesure 20
Tableau 6-3 : Réglage de l'oscilloscope 20
Tableau 6-4 : Réglage du générateur de fonction 20
Tableau 10-1 : Estimation des coûts 28

1 Introduction

1.1 Contexte

Ce projet est réalisé dans le cadre du cours Projet-Multi 2026. Dans le cadre de ce cours, 16 séances de 2 périodes sont prévues.

Une première version de ce projet a été réalisé lors du cours Projet multi-disciplinaire 2025.

1.2 But et objectifs

But : Développer un système de microphones pour transmettre vers un casque Bluetooth.

- Objectif 1 : Offrir une solution d'aide auditive alternative aux prothèses classiques, en transmettant directement le son ambiant vers un casque Bluetooth à conduction osseuse (ou classique).
- Objectif 2 : Garantir une latence minimale (si possible en dessous de 30 ms pour éviter l'effet d'écho désagréable lors de la parole.
- Objectif 3 : Assurer une utilisation simple et intuitive (un seul bouton pour allumage/veille).
- Objectif 4 : Maintenir une autonomie longue durée pour un usage quotidien sans recharge fréquente.

1.3 Etat de l'art

Les solutions de récepteur audio → transmetteur Bluetooth sont très spécifiques et représente un marché de niche. Par exemple il existe des appareils de transmission audio analogique : Jack 3.5mm vers Bluetooth et des casques Bluetooth pouvant recevoir un signal, et les solutions de micros-sans-fil sont plutôt adressées à de l'enregistrement audio ou du karaoké, soit des applications ou la latence n'est pas une priorité.

Actuellement les solutions sur le marché ne permettent pas de fournir une latence suffisamment faible, en effet nos tests montrent que les meilleure performances avec le protocole audio SBC (standard actuel pour le Bluetooth) implique 100 ms pour l'encodage du signal sonore avant la transmission, en ajoutant les diverses sources de latence supplémentaires (correction d'erreur de transmission, conversion AD, déplacement des ondes, décodage par le récepteur) les meilleures performances possibles avec les technologies actuelles se situent entre 120 ms et 180 ms c'est-à-dire bien au-delà des de la valeur de 30 ms demandée.

Pour pallier cette problématique, nous avons décidé de mettre en place l'utilisation d'un protocole Bluetooth plus moderne LE Audio, prévu pour des applications à plus faible latence mais qui n'est pas encore présent dans des produits sur le marché.

En combinant les exigences de latence et la jouvence de la technologie LE Audio, il n'existe pas de produit comparable dans le domaine grand publique.

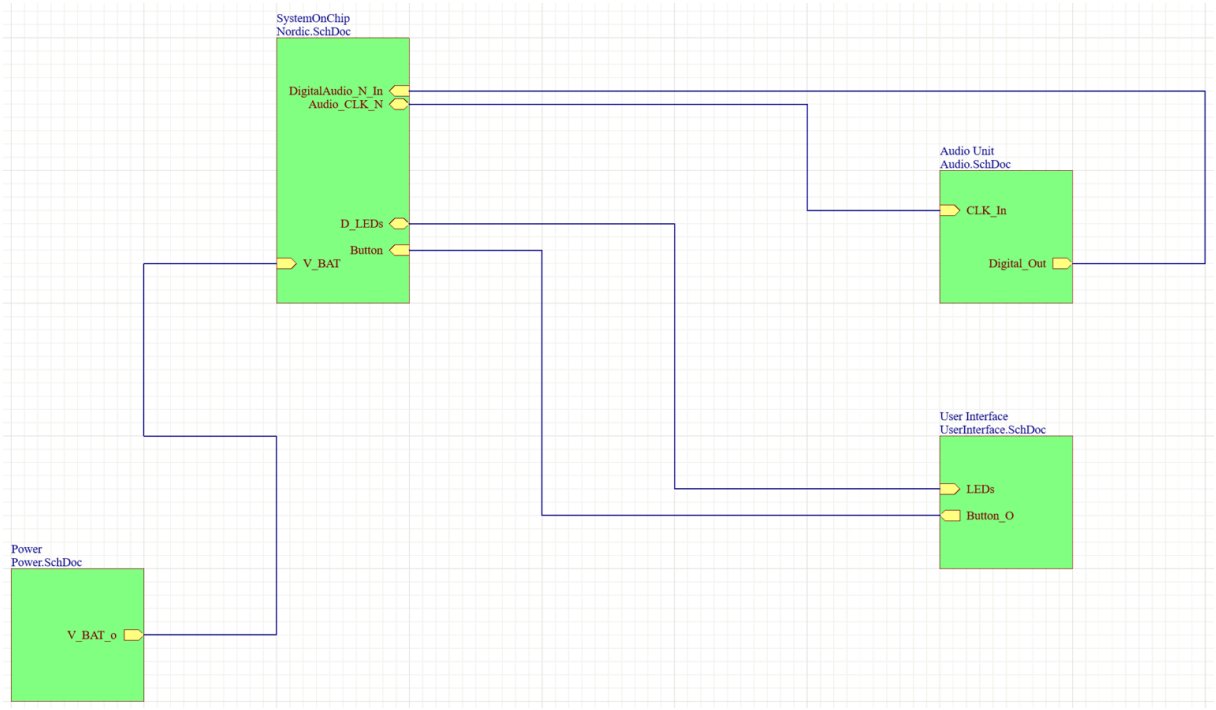
1.4 Répartition du travail

Description			Responsable	Temps estimé [h]
Elaboration et vérification du concept	Rédaction du CDCF		Taverney	8
	Recherche et sélection des solutions et composants	Microphones + Bluetooth	Yusuf	6
		Conception électronique	Di Giovanni	10
		Conception boitier	Coudert	8
		Alimentation + Interface	Taverney	8
Prototype	Boitier FDM		Coudert	6
	Programmation		Yusuf	10
	Véroboard		Taverney	10
	Banc de test		Di Giovanni	3
Produit final	Boitier SLA		Coudert	2
	Base de recharge		Taverney	6
	Programmation		Yusuf	22
	PCB		Di Giovanni	10
	Alimentation + Station de charge		Taverney	12
Préparation des livrables	Rapport final		Tous	50
	Photos		Coudert	1
	Vidéo		Coudert	2
	Présentation		Tous	8
	Affiche		Taverney	1
Gestion de projet	Répartition des tâches / Suivi de la progression		Taverney	12
Autre			Tous	20
Total				215

Tableau 1-1 : Répartition du travail

2 Conception électronique

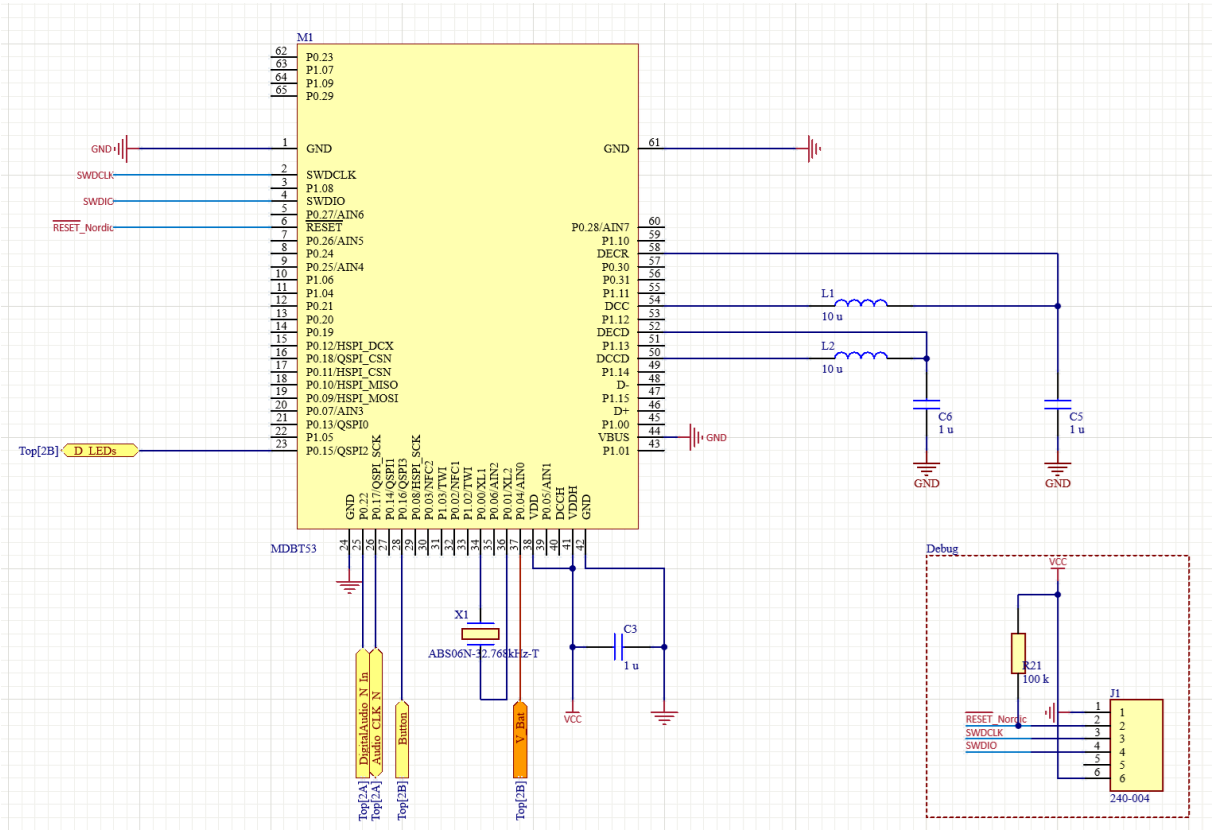
2.1 Blocks fonctionnels



La séparation du schéma en blocks fonctionnels permet une meilleure lisibilité et une plus grande flexibilité.

Les blocks sont détaillés ci-après.

2.2 SystemOnChip



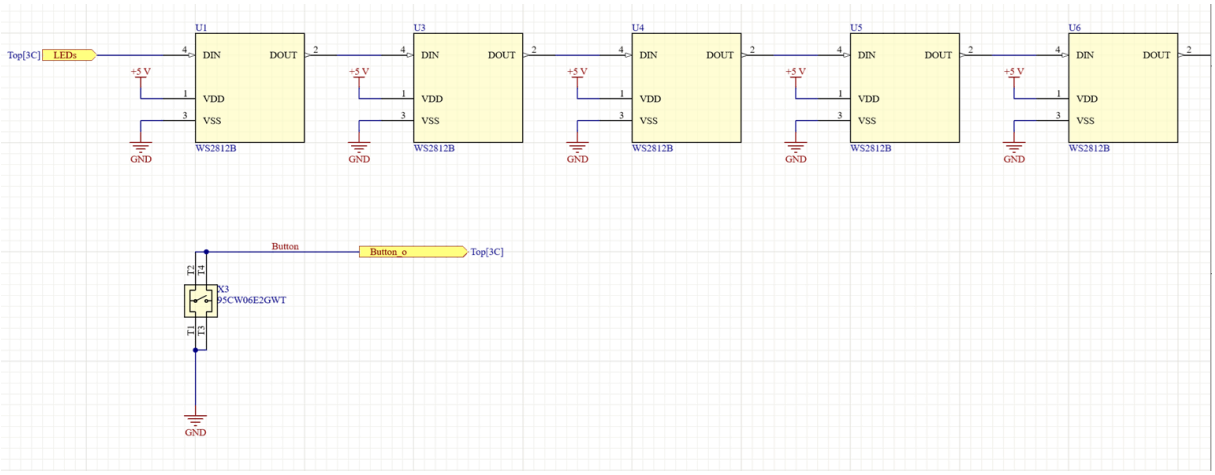
Le choix de ce composant a été déterminé par plusieurs facteurs :

- Le circuit intègre le chip NRF5340 supportant nativement le support du protocole LE Audio
    - Indispensable pour une faible latence
- L'antenne est déjà intégrée
    - Evite des contraintes liées à l'impédance des pistes d'alimentation, notamment dû à l'incertitude de l'épaisseur de cuivre sur un PCB bon marché.
    - La qualité du signal est ainsi garantie et permet d'éviter les erreurs de transmission nécessitant la répétition de l'envoi des données audio
- Nordic Semiconductor est reconnu pour ses composants énergétiquement efficace
    - Permet une autonomie maximale pour ce travail et notre taille de batterie

Il est naturellement entouré de plusieurs condensateurs de découplage ainsi que d'inductances servant à la gestion de l'alimentation.

Un quartz de 32.768 kHz a été ajouté pour garantir un bon timing, permettant aussi une meilleure gestion de l'alimentation.

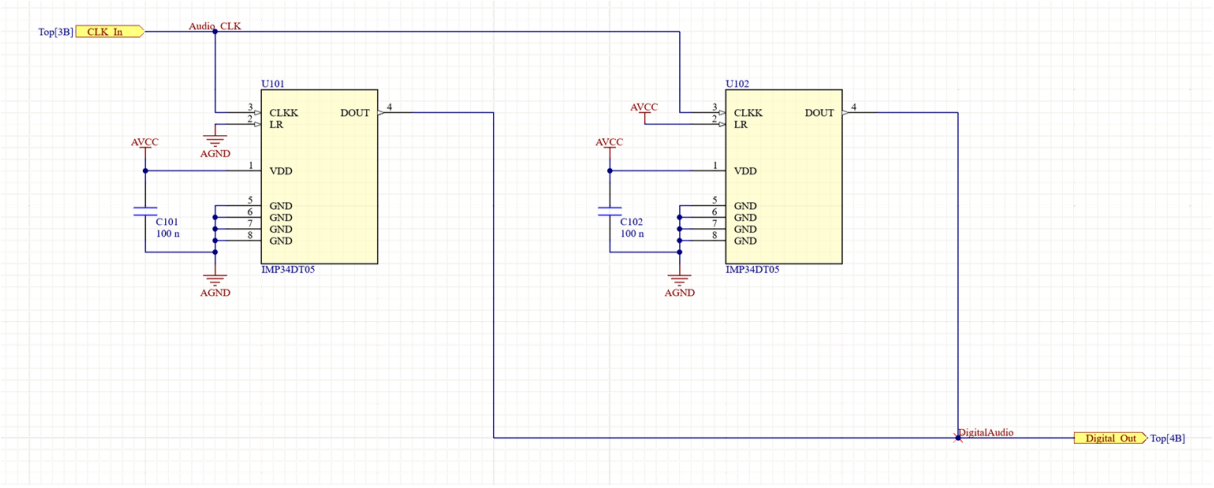
2.3 Interface utilisateur



L'utilisation de LEDs commandées numériquement permet une grande gamme de couleurs avec une implémentation facilitée, cela permet de réduire la complexité du câblage. Les LEDs WS2812B sont alimentée en 5V et utilisent une transmissions sérielle asynchrone à 800 kBits/s sur un seul fil en DaisyChain.

Le bouton est actif bas, une pull-down dans le microcontrôleur permet d'avoir le niveau haut.

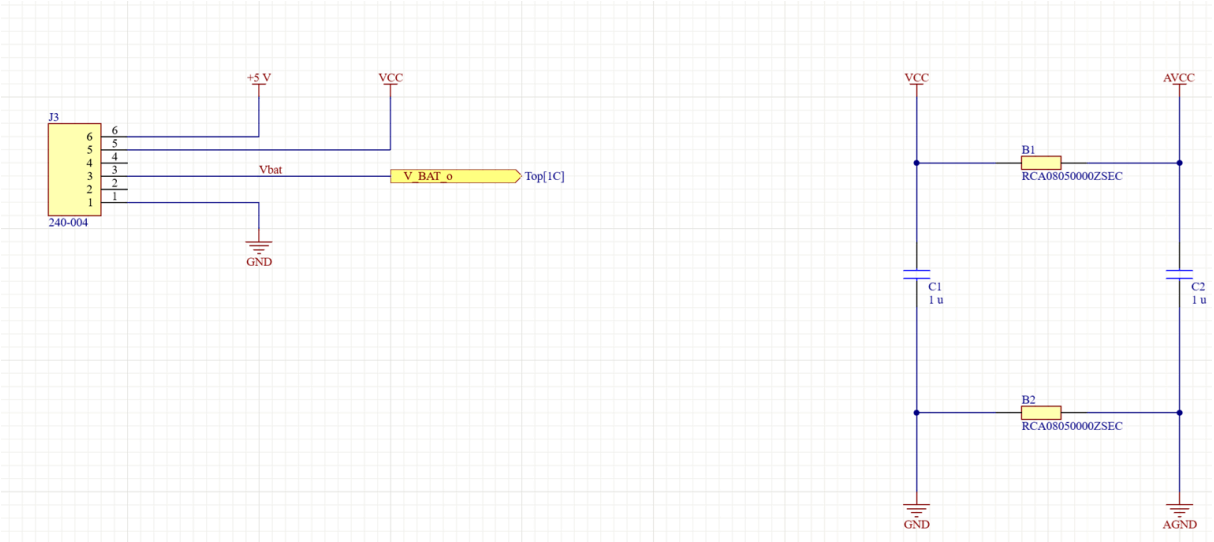
2.4 Microphones



Les microphones utilisés sont des microphones capacitifs à basse consommation IMP34DT05, fabriqué par ST MicroElectronics. Ils sont dotés d'une sortie audio numérique utilisant le protocole PDM.

L'utilisation de microphones mems avec sortie numérique permet d'avoir une bonne qualité dans une petite empreinte et de diminuer l'influence du bruit généré par les autres composant, particulièrement le Bluetooth et l'alimentation sans fil.

2.5 Alimentation



L'étage d'alimentation est critique car c'est ce qui permet à tout le système de fonctionner.

Il y a plusieurs éléments critiques à prendre en compte :

Fournir l'alimentation nécessaire aux différents composants, 3V au SoC et aux micros, 5V aux Leds avec le courant nécessaire.

Limiter la propagation des bruits électronique en séparant l'alimentation des microphones Les micros disposent ainsi de leur propre plan de masse et d'alimentation séparée par une résistance 0 Ohm pour allonger le chemin que les perturbations doivent emprunter pour arriver jusqu'aux microphones, les laissant s'estomper en chemin.

Afin d'accélérer le développement, nous avons décidé de placer ce rôle sur une carte séparée, une future évolution pourra embarquer ces fonctions afin de gagner en épaisseur.

Le signal `Vbat` permet au SoC d'estimer le niveau de charge de la batterie d'après sa tension

3 Conception mécanique

3.1 Boitier

Pour accueillir le projet, il nous faut un boitier assez grand pour tous les composants tant en respectant le cahier des charges. En dimension maximale, nous avions un diamètre de 85 mm et une hauteur de 40 mm. Ce boitier doit aussi posséder un bouton cliquable au-dessus ainsi que des trous pour que le son puisse être capté par les microphones. Le boitier doit également être étanche. L'objet doit être discret et portable d'où sa forme arrondi et ergonomique. Voici donc les dimensions principales :

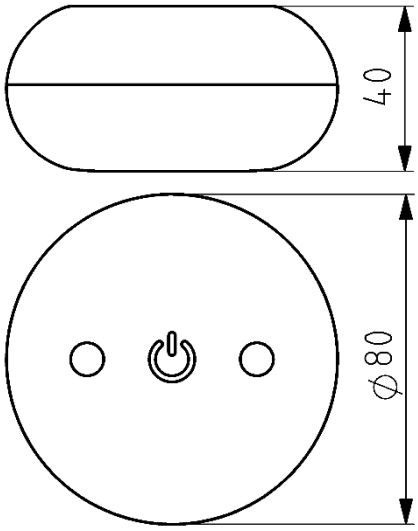


Figure 3-1 : Dimension principales du boitier

Le boitier est composé de 2 parties : une partie basse qui accueille le système de recharge sans fil et la batterie, et une partie haute à laquelle est vissé le PCB avec tous les composants électroniques.

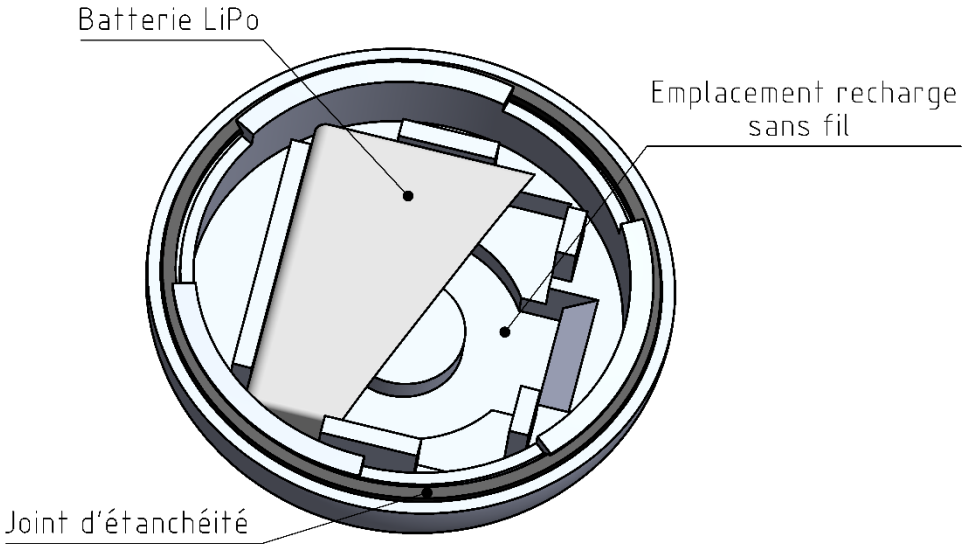


Figure 3-2 : Partie basse du boitier

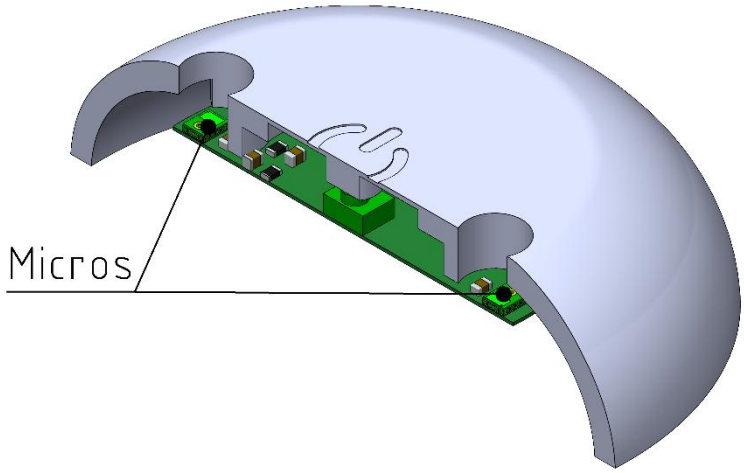


Figure 3-3 : Partie haute du boitier

3.2 Etanchéité

Pour fermer le boitier et assurer l'étanchéité, un petit filetage sur les bords des 2 parties du boitier permettent de pincer le joint et de seller ce dernier. Ce système garantit une bonne résistance aux éclaboussures d'eau ainsi qu'un accès rapide à l'intérieur du boitier.

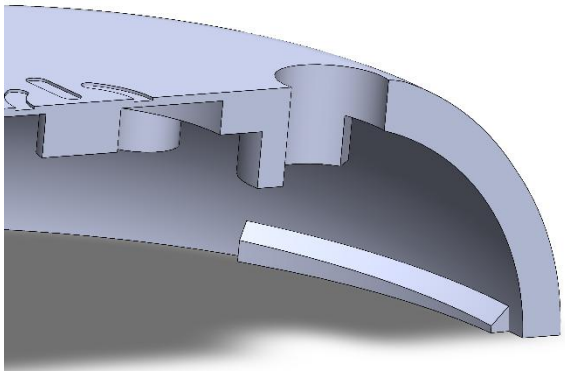


Figure 3-4 : Filetage partie haute

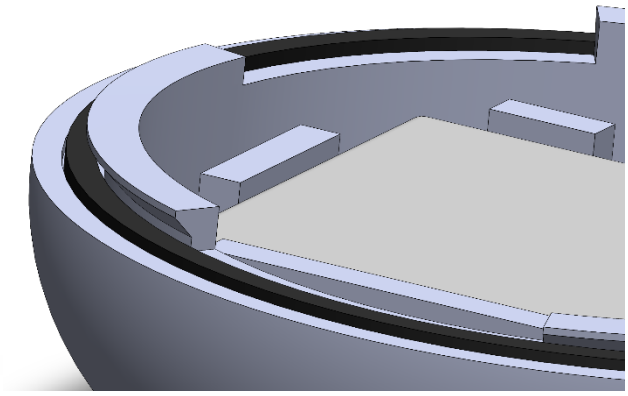


Figure 3-5 : Filetage partie basse

Afin de laisser passer le son en essayant d'avoir la meilleure étanchéité, 2 cylindres ont été imprimés avec une imprimante FDM en enlevant les premières et dernières couches dans le slicer et avec un infill rectangulaire.

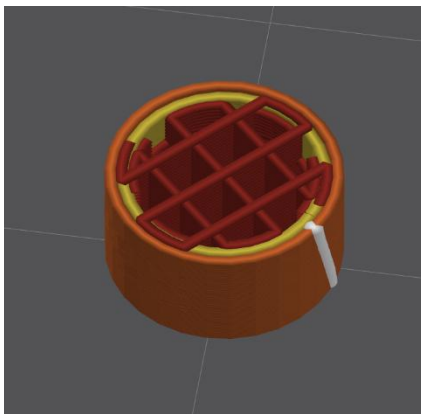


Figure 3-6 : Slice des cylindres

3.3 Station de recharge

Pour la station de recharge, une plateforme avec un creux arrondi permet d'épouser le dessous du boitier, la bobine et les composants de recharge dans cette station permettent un rechargement efficace et simple. La station de recharge doit être raccordée à une alimentation externe via un connecteur USB-C.



Figure 3-7 : Station de recharge

3.4 Fabrication et matériaux

Pour réaliser ce projet, plusieurs procédés de fabrication et matériaux ont été utilisé. Dans un premier temps, afin de permettre une itération rapide, le boitier est imprimé en PLA avec des imprimantes 3D FDM. Pour la version finale, le boitier est réalisé en impression résine avec de la résine GREY V5. Cela permet d'avoir une excellente précision dimensionnelle et un état de surface lisse sur les surfaces avec un fort overhang. La station de recharge est quant à elle imprimé en PLA avec une imprimante FDM. Elle n'est pas une pièce complexe et ne nécessite donc pas un procédé aussi long et couteux que l'impression résine.

3.5 Assemblage

L'avantage de notre conception est que l'assemblage se réalise sur les deux parties du boitier de façon indépendante. Le PCB est fixé mécaniquement par des vis vissées dans des inserts collés au boitier, le système de recharge sans fil et la batterie ont des slots spécifiques qui les maintiennent en place.

4 Software

4.1 Structure globale du programme

Le Nordic nRF5340 permet donc une communication en Bluetooth Low Energy à un appareil compatible. Le programme initie la communication Bluetooth avant de se mettre en scan périodique, où une adresse particulière est acceptée :

```
/* Exemple de configuration d'adresse d'appareil*/
static const bt_addr_le_t target_headset_addr = {
.type = BT_ADDR_LE_PUBLIC,
.a.val = {0xFF, 0xE9, 0x5E, 0xDC, 0x99, 0xA8}, /* Little endian. Adresse :
A8:99:DC:5E:E9:FF */
};
```

Une fois l'appareil reconnu, le programme quitte le mode scan et configure le flux de données audio avant d'entamer l'envoi de données audio.

Le programme chargé du flux complet est divisé en 4 fichiers sources C :

- main.c : fichier contenant la boucle principale du programme, s'occupe de l'initialisation des différents flux de donnés et de la connexion avec l'appareil Bluetooth.
- stream_tx.c : fichier contenant le code se chargeant de l'envoi de paquets Bluetooth à l'appareil
- stream_lc3.c : fichier contenant le code se chargeant de la gestion du codec LC3
- stream_pdm.c : fichier contenant le code se chargeant de la récolte de données audio venant des micros PDM

Le flux de données suit donc ce schéma :

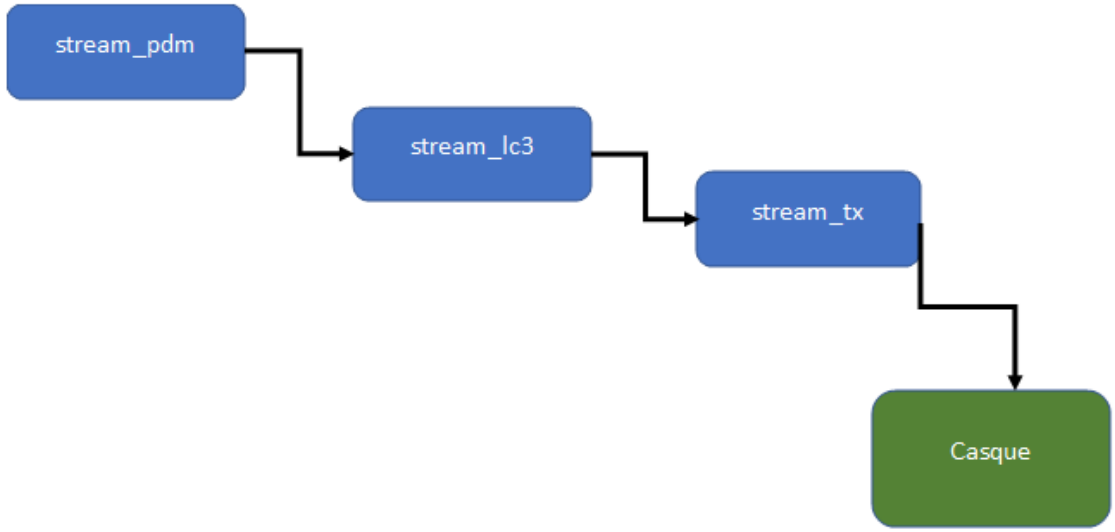


Figure 4-1 : Flux de donnée

Le nRF5340 assure la communication Bluetooth à l'aide de deux oscillateurs externes : un de 32kHz pour l'horloge du SoC ainsi que l'opération en basse puissance, ainsi qu'un oscillateur 32MHz pour toutes les opérations radiofréquences ainsi que la gestion des périphériques audio (ici les microphones PDM). Il est possible d'ajuster la fréquence envoyée sur les dits périphériques selon les besoins. Ceci est grâce à un Audio PLL (Phase-Locked Loop) intégré dans le SoC.

4.2 Programmation de l'interface utilisateur

En parallèle au flux audio existe un contrôle des GPIO à travers le fichier source app_state.c, dont les fonctions sont appelées dans la boucle principale du programme. Nous pouvons ainsi contrôler l'état du cycle de la boucle principale à l'aide d'un interrupteur et afficher l'état de connexion à travers une série de LEDs WS2812B.

4.3 Structure du nRF5340

Le nRF5340 est doté de deux cores : un core contenant l'application (Application) et un core gérant la transmission radio à travers l'antenne 2.4GHz (Network). Pour les buts de ce projet, il est nécessaire de faire communiquer les deux cores pour assurer la transmission complète du flux audio.

4.4 Programmation sur PCB

La programmation du SoC sur PCB est réalisée à travers la connexion sur un kit de développement (nRF5340 DK) qui contient le hardware nécessaire pour faire du débugging. La connexion passe ensuite à travers les pins SWD (Serial Wire Debug) qui ont été préparés en aval sur le PCB. Alors, une fois l'assemblage du programme effectué, le chargement est effectué directement sur le PCB et non le kit de développement.

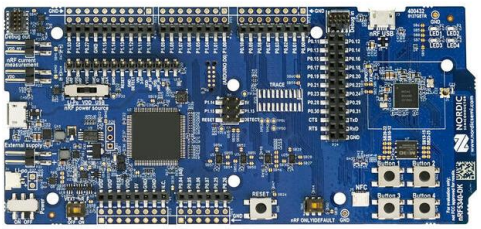


Figure 4-2 : Kit de développement NRF5340

5 Système électrique

5.1 Schéma

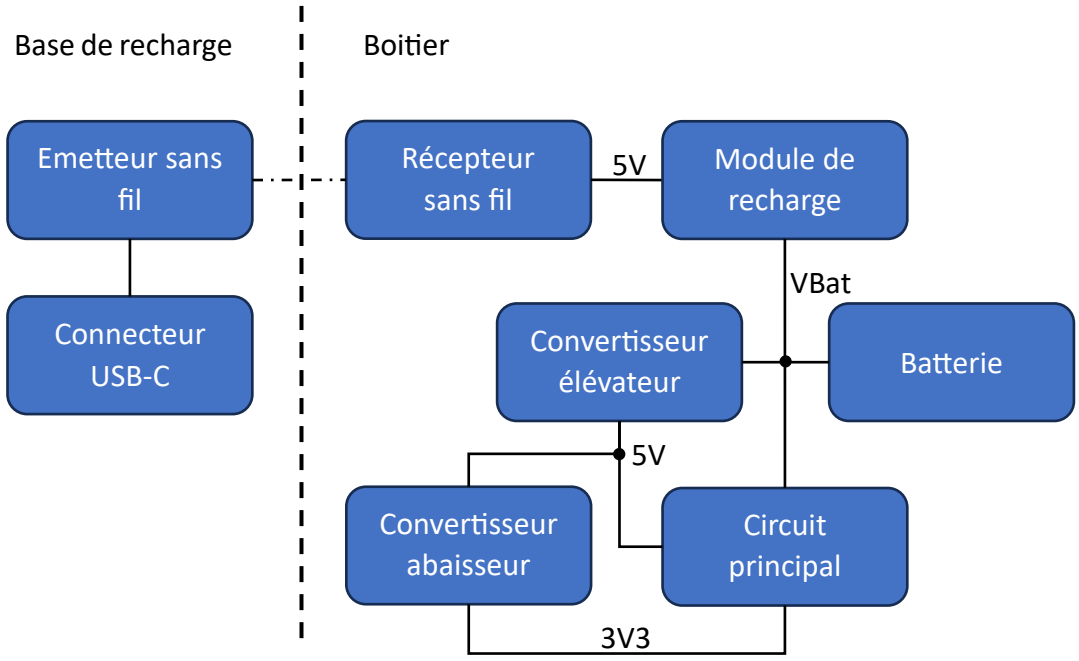


Figure 5-1 : Schéma bloc du système électrique

5.2 Alimentation

L'alimentation du système est assurée par un module de recharge sans fil DFR0362 permettant de recharger l'appareil sans connexion filaire directe.

L'émetteur du système, intégré à la base de recharge, est alimenté via un connecteur USB-C. Le récepteur, quant à lui, est placé au fond du boîtier afin d'optimiser le couplage avec la base de recharge. Celui-ci fournit une tension continue de 5 V avec un courant maximal de 1 A pour alimenter le système et recharger la batterie.



Figure 5-2 : Base de recharge

5.3 Stockage d'énergie

L'énergie nécessaire au fonctionnement autonome du dispositif est stockée dans une batterie Li-Po 1S modèle 124050 d'une capacité de 3000 mAh.
Cette batterie a été choisie pour sa bonne densité énergétique et son faible encombrement.



Figure 5-3 : Batterie Li-Po 124050

5.4 Recharge et transformation de tension

Le module de recharge sans fil est relié à un contrôleur de charge TP4056 spécialement conçu pour les batteries Li-Po monocellules. Ce module assure une recharge sécurisée de la batterie en régulant le courant et la tension de charge.

La batterie alimente ensuite un convertisseur élévateur de tension PowerBoost 1K Basic. Ce module fournit une tension régulée de 5 V avec un courant maximal de 1 A afin d'alimenter les LEDs du système.

Le convertisseur élévateur alimente également un convertisseur abaisseur LM3671, chargé de générer une tension stable de 3,3 V avec un courant maximal de 0,6 A pour le microcontrôleur et les autres composants électroniques basse tension.

5.5 Interface utilisateur

La tension de la batterie est mesurée par le microcontrôleur au moyen d'un pont diviseur résistif connecté à une entrée analogique. À partir de cette mesure, le niveau de charge de la batterie est estimé puis affiché à l'aide des LEDs situées sur le dessus du boîtier.

Des indicateurs lumineux supplémentaires sont également présents sur le côté du dispositif afin d'informer l'utilisateur de l'état de recharge : une LED rouge indique que la batterie est en cours de charge et une LED bleue indique que la batterie est complètement chargée et que le système peut être retiré de sa base de recharge.

6 Tests

6.1 Latence

6.1.1 Schéma de mesure

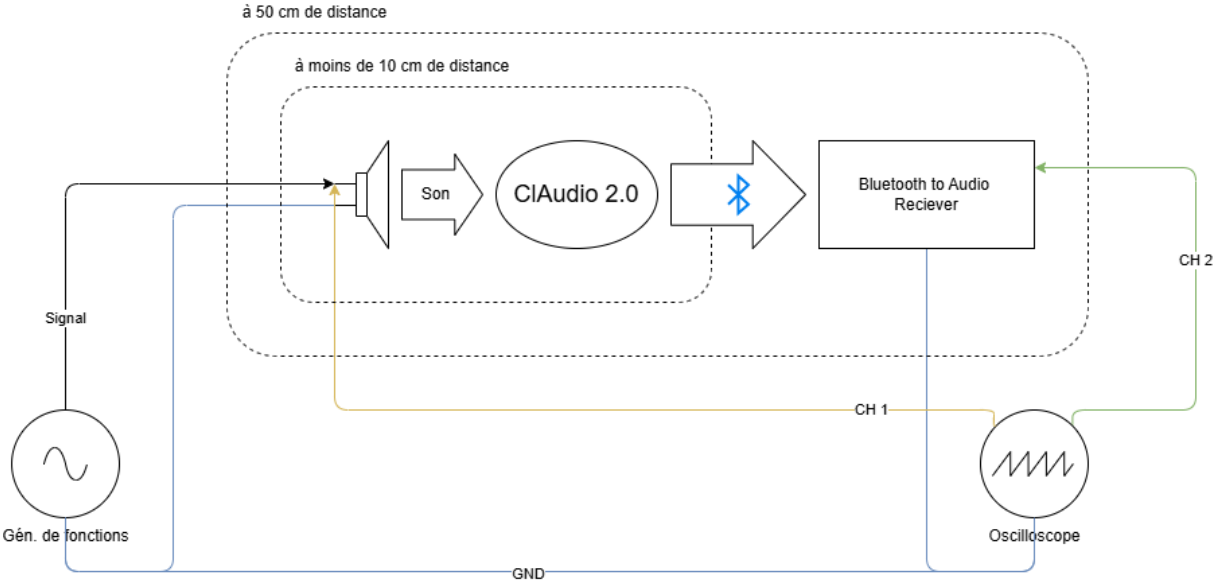


Tableau 6-1 : Schéma de mesure

6.1.2 Liste de matériel

Appareil	Marque	Modèle	N° Série	Notes
Oscilloscope	PicoScope	2204A	JY906/0561	LGN
Gén. de fonctions	Rigol	DG1022	DG1ZA223202022	Makelab
BT2A Reciever	Avantree	AS70P	WJ5-BTHS-AS70-P(25f1)	LE-Audio
BT2A Reciever	UGREEN	BT509	2AQI5-BT509 (55546)	SBC

Tableau 6-2 : Liste du matériel de mesure

6.1.3 Tableaux de réglage

Oscilloscope

Réglage	Valeur
Trigger mode	Single Shot
Flanc	Flanc Montant
Niveau	100 mV
Source	CH 1
Echelle temporelle	Ajuster pour recherche
Echelle CH 1	1 V/div
Echelle CH 2	1 V/div

Tableau 6-3 : Réglage de l'oscilloscope

Générateur de fonction

Réglage	Valeur
Forme d'onde	Sinus
Fréquence	1 kHz
Amplitude*	3 Vpp
Offset	0 V

Tableau 6-4 : Réglage du générateur de fonction

/!\ L'amplitude (*) doit être adaptée au haut-parleur choisi

6.1.4 Procédure

1. Connecter selon le Schéma
2. Régler le générateur de fonction selon le Tableau de réglage
3. Régler l'oscilloscope selon le Tableau de réglages
4. Activer la sortie du Générateur de fonction
5. Relever l'oscillogramme
6. Mesurer le délai entre le début du signal d'entrée et de sortie

6.1.5 Interprétation des résultats

La différence de temps (axe des abscisse (x)) entre le début du signal d'entrée et le signal de sortie correspond à la latence du processus de transmission

6.1.5.1 Exemple

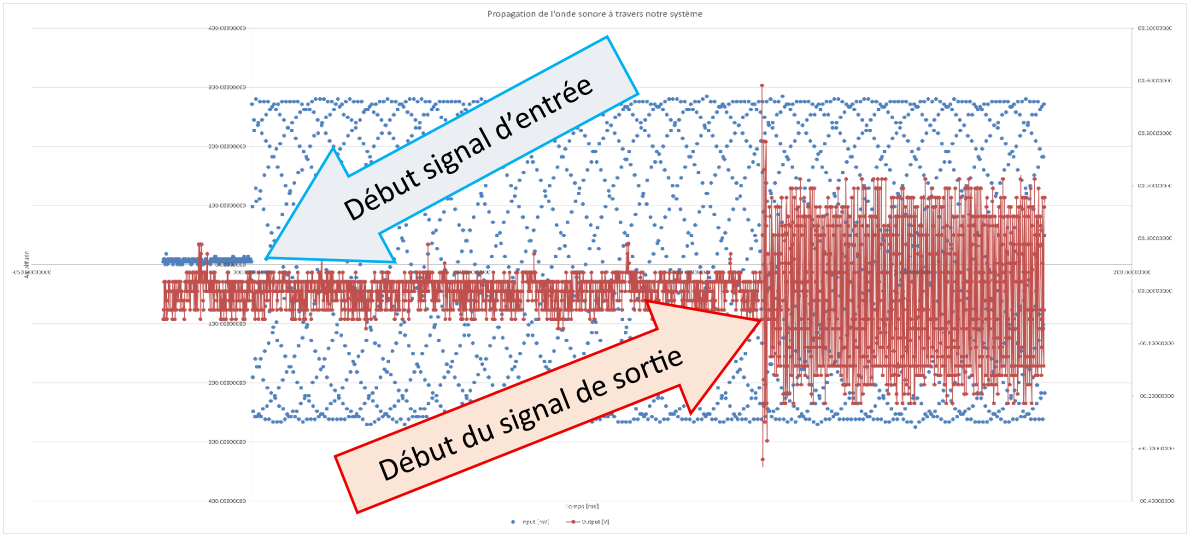


Figure 6-1 : Exemple de signal

6.1.6 Résultat

6.1.6.1 SBC

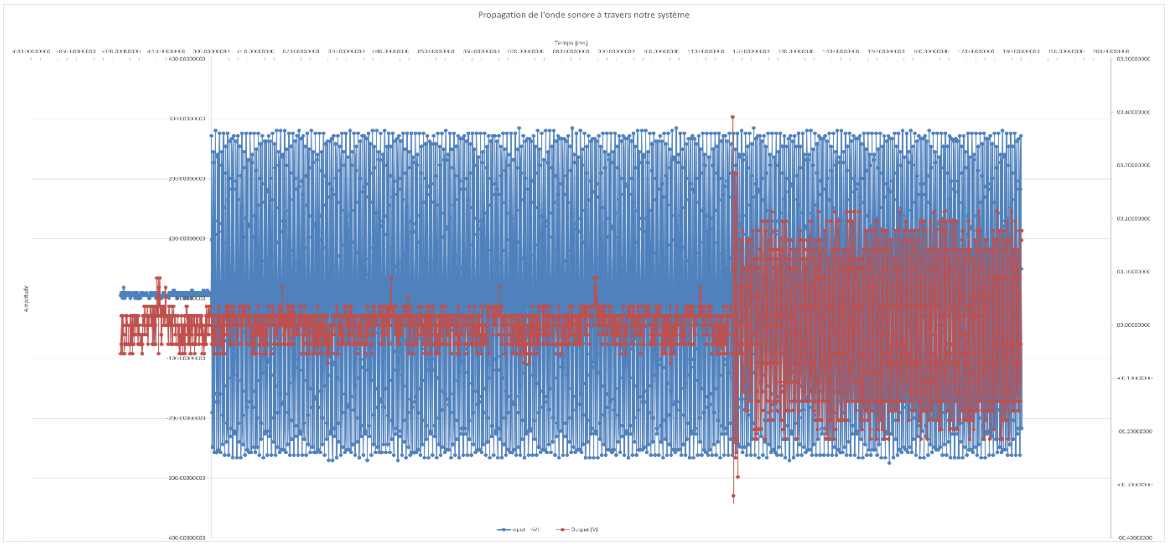


Figure 6-2 : Temps de latence SBC

➔ 120 ms

6.1.6.2 LE Audio (LC3) avec micro I2S (kit de développement)

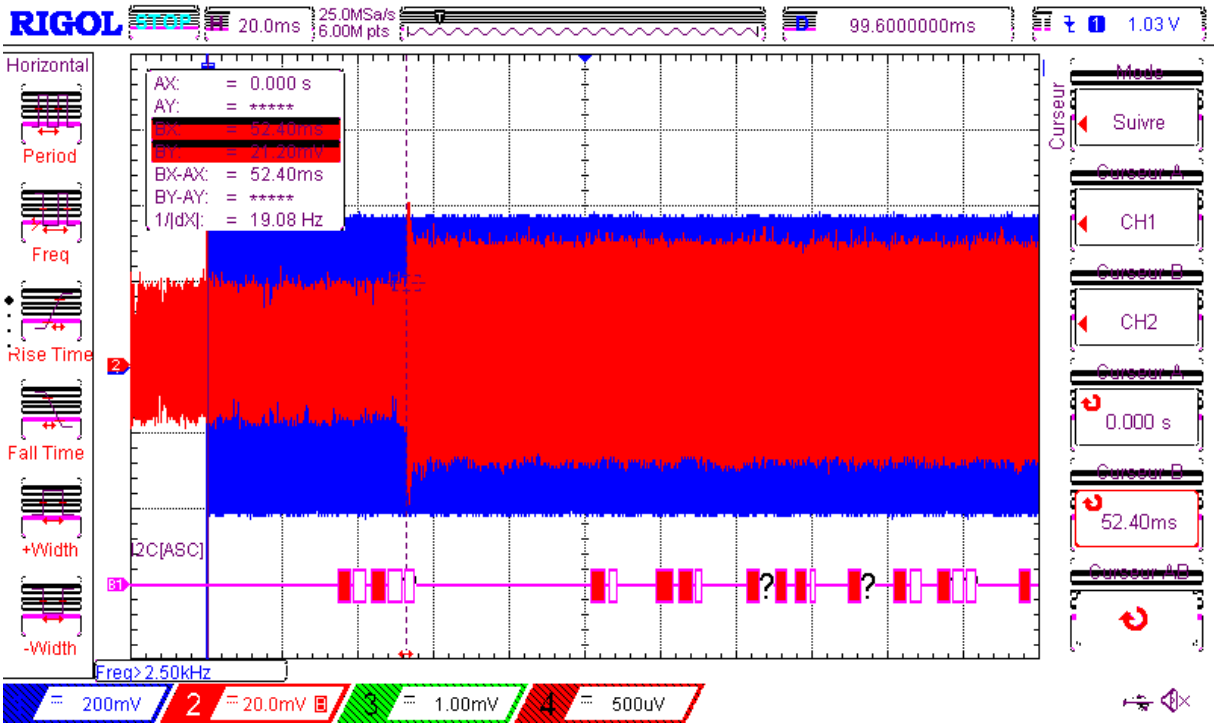


Figure 6-3 : Temps de latence LC3 partie 1

➔ 52.4 ms

6.1.6.3 LE Audio (LC3) avec micros PCM (Produit final)

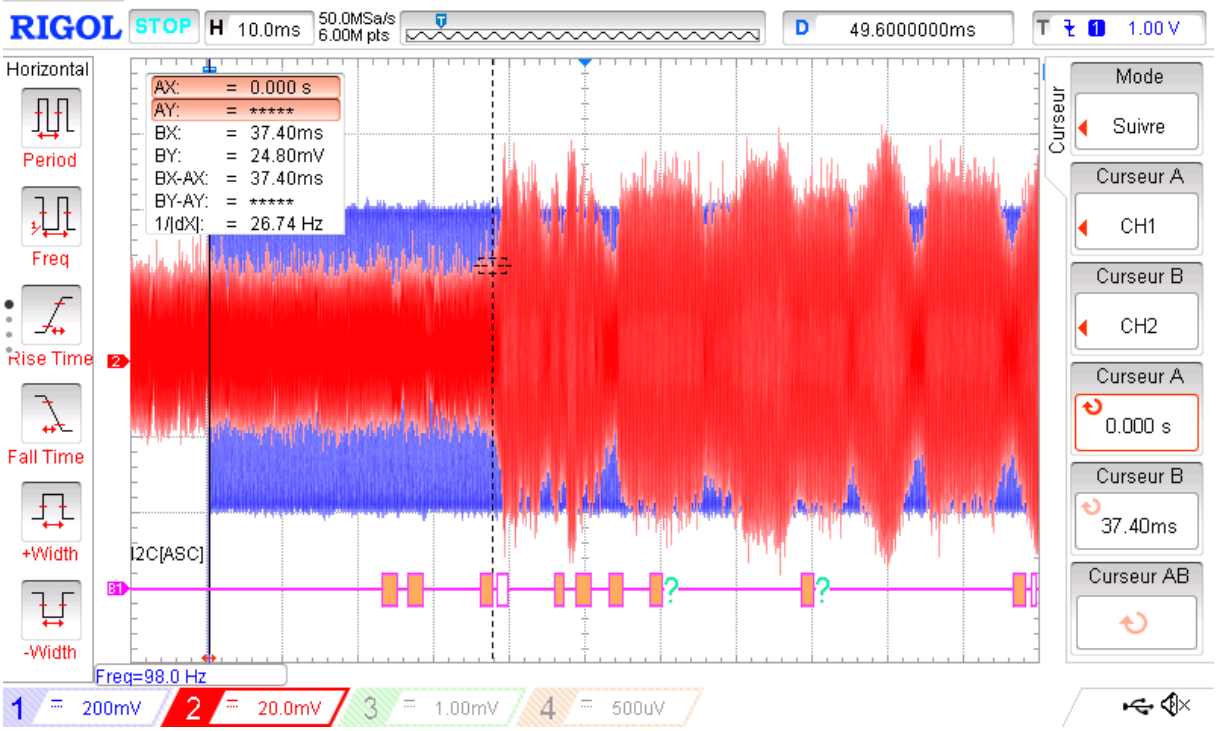


Figure 6-4 : Temps de latence LC3 partie 2

➔ 37.4 ms

6.2 Consommation et autonomie

6.2.1 Profil énergétique

Mesure de la consommation d'un cycle à l'aide d'un power profiler

Nous estimerons la consommation du système et déduirons combien de temps la capacité de la batterie permettra de tenir.

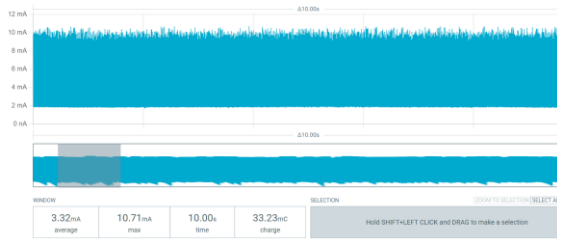


Figure 6-5 : Profil de consommation en fonctionnement nominal

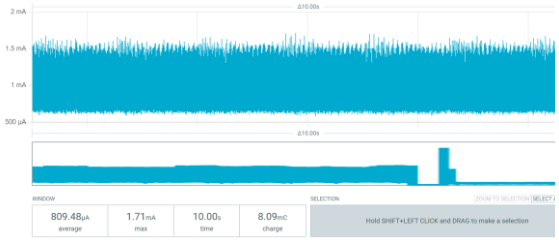


Figure 6-6 : Profil de consommation en veille



Figure 6-7 : Consommation pendant l'appairage

6.2.2 Test absolu

Mesure du temps de fonctionnement avant l'extinction après une recharge complète.

Nous relevons la charge de la batterie périodiquement pour afficher son état sur les LEDs, donc nous avons choisi de relever l'heure à laquelle cette dernière devient trop faible pour le fonctionnement, cela nous permettra ensuite de mesurer la durée de fonctionnement.

6.2.3 Autonomie à la fin de la durée de vie

Le vieillissement d'une batterie est prévisible.

Grâce aux modèles de capacité de batterie LiPO4 et notre profil de consommation, nous pourrons facilement estimer la durée de vie après un ou plusieurs millier(s) de cycles et donc après 2, 5 et 10 ans.

6.2.4 Résultats

Capacité de la batterie : $3.7\ V \cdot 3\ Ah = 11.1\ Wh$

Puissance du circuit : $3.2\ V \cdot 3.32\ mA = 10.6\ mW$

Durée de fonctionnement : $\left(\frac{11.1\ Wh}{10.624\ mW}\right) \cdot 81\% = \mathbf{847\ h} = 35\ J$

Après 10 ans notre projet devrait avoir effectué 500 cycles et sa batterie devrait avoir 80 % de sa capacité initiale soit 678 heures (28 jours) de fonctionnement.

6.3 Portée

Protocole « Walk Test » :

Dans un couloir d'un bâtiment, nous éloignerons la source du récepteur jusqu'à percevoir un affaiblissement du signal.

Le test sera répliqué avec ClAudio sur sa base de recharge.

Résultats :

Le signal se coupe à 50 m de distance dans un couloir vide.

7 Prototype 1

7.1 Présentation du prototype 1

Le premier prototype a été réalisé sur une véroboard à l'aide d'un module de développement ESP32 DevKit utilisant une communication Bluetooth A2DP. Les microphones employés étaient des microphones numériques Adafruit. Le boîtier a été fabriqué en PLA par impression 3D FDM.

Ces choix ont été effectués afin de simplifier et d'accélérer au maximum l'intégration du système tout en permettant des itérations rapides sur la conception mécanique et électronique.

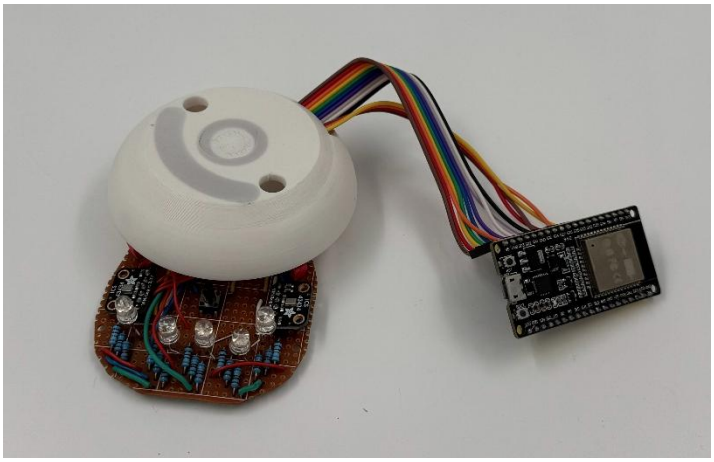


Figure 7-1 : Prototype 1

7.2 Présentation des fonctionnalités

Le prototype intègre deux microphones configurés en stéréo avec une sortie numérique utilisant le protocole I²S.

L'ESP32 assure la transmission du flux audio numérique vers un casque Bluetooth conventionnel. Toutefois, en raison de ses dimensions, le module ESP32 DevKit ne peut pas être intégré à l'intérieur du boîtier. Il est donc relié à la véroboard par des câbles externes.

7.3 Performances

7.3.1 Latence

La latence mesurée varie entre 120 ms et 180 ms selon les conditions d'utilisation.

7.3.2 Portée

La portée du système n'a pas été mesurée durant cette phase de développement.

7.3.3 Autonomie

L'autonomie du système n'a pas été mesurée durant cette phase de développement.

7.4 Finalité

Ce premier prototype a permis de valider le concept général du système et de réaliser plusieurs itérations du boîtier. Cependant, la solution basée sur l'ESP32 a finalement été abandonnée, car elle ne permettait pas de satisfaire les exigences de latence définies dans le cahier des charges.

8 Prototype 2

8.1 Présentation du prototype 2

Pour le deuxième prototype, l'ESP32 a été remplacé par un module de développement de Nordic Semiconductor. Ce changement a permis d'adopter la technologie Bluetooth LE Audio. À ce stade du développement, seuls les microphones ont été intégrés au prototype sur une breadboard, les autres composants étant encore en cours de développement.

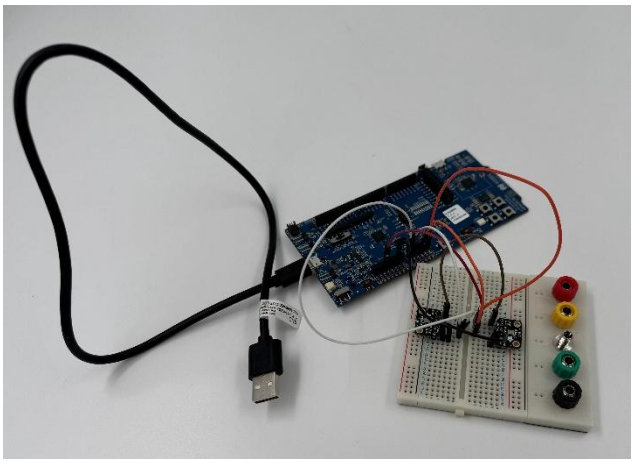


Figure 8-1 : Prototype 2

8.2 Présentation des fonctionnalités

Le prototype intègre deux microphones configurés en stéréo avec une sortie numérique utilisant le protocole I²S, permettant la capture du son en stéréo.

Le système NRF assure la transmission du flux audio numérique vers un récepteur compatible LE Audio. Ce protocole offre une latence significativement plus faible que le protocole Bluetooth A2DP utilisé dans le prototype précédent.

8.3 Performances

8.3.1 Latence

La latence mesurée au démarrage est de 52,4 ms. Cependant, une différence trop importante entre le débit de données généré par les microphones et le débit de transmission Bluetooth provoque un remplissage progressif du buffer. Après environ une minute de fonctionnement, la latence atteint alors près de 150 ms.

8.3.2 Portée

La portée du système n'a pas été mesurée durant cette phase de développement.

8.3.3 Autonomie

L'autonomie du système n'a pas été mesurée durant cette phase de développement.

8.4 Finalité

Ce prototype a permis de valider l'utilisation du protocole LE Audio et de confirmer la réduction significative de la latence par rapport à la solution précédente. Il a également mis en évidence un problème majeur lié à la différence de débit entre l'acquisition audio et la transmission Bluetooth, entraînant une augmentation progressive de la latence.

9 Produit final

9.1 Présentation du produit

Le produit final est composé d'une base de recharge imprimée en PLA avec un imprimante 3D FDM, un boitier en deux parties avec une fermeture à baillonette imprimé en résine grise avec une imprimante SLA, l'étanchéité au niveau de la fermeture est assurée par un joint imprimé en TPU avec une imprimante FDM.

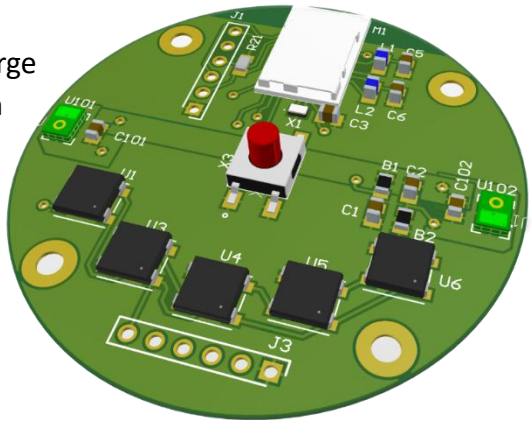


Figure 9-1 : PCB final

Le système de recharge est intégré dans la partie basse du boitier, l'interface utilisateur ainsi que le contrôleur et les micros sont intégrés sur un PCB dans la partie haute du boitier. La séparation du système d'alimentation par rapport au PCB permet d'obtenir des blocs déjà montés, ce qui permet de réduire les coûts, les temps de fabrication et fiabilise le système de recharge.

9.2 Présentation des fonctionnalités

Le son est capté en stéréo via 2 capteurs PCM, puis transmit par une puce nRF5340 à un récepteur Bluetooth compatible LE Audio. L'interface utilisateur est composée de 5 Leds RGB et un bouton poussoir. Une pression longue sur le bouton poussoir permet de lancer une demande de connexion.

9.3 Performances

9.3.1 Latence

La latence mesurée est de 37.7 ms.

9.3.2 Portée

La portée, mesurée dans un couloir, est de 50 m.

9.3.3 Autonomie

L'autonomie estimée est de 847 h. Selon la mesure du profil énergétique.

9.4 Finalité

Ce produit final nous a permis de concrétiser les solutions testées sur les prototypes et de valider les attentes du cahier des charges.

10 Estimation des couts

Cout horaire	Description	Nb d'heures	Taux horaire	Total
	Ingénieur HES	215	150 CHF/h	32250 CHF
	Impression 3D	18	40 CHF/h	720 CHF
			Sous total	32970 CHF
Cout fixe	Description	Frais de port	Prix	Total
	Ampul : Batterie Li-Po	15.12	7.80	22.92
	Mouser Electronics : MEMS audio sensor (STM), quartz (ABRACON)	23.00	15.67	38.67
	Unikeyic : MDBT53-P1M (Raytac)	15.62	20.25	35.87
	Mouser Electronics : Wireless Charging (DFR), PowerBoost/LM3671 (Adafruit)	23.00	25.33	48.33
	Mouser Electronics : I2S MEMS(Adafruit), nRF6835, ESP32, RGB LED (Kingbright)	0.00	83.30	83.30
	JLCPCB : PCB (partagé)	12.33	11.36	23.69
			Sous total	155.91
			Total	33125.91

Tableau 10-1 : Estimation des coûts

11 Conclusion

11.1 Résultats principaux

11.1.1 Latence

Nous avons obtenu une latence minimum de 37.5 ms, par rapport aux premiers résultats obtenu de ~150 ms et aux résultats obtenus dans la première version du projet, on observe une nette amélioration, qui se répercute sur la qualité de l'expérience utilisateur.

11.1.2 Autonomie

Avec la mesure du profil énergétique, nous avons pu estimer l'autonomie à 847 h, soit un peu plus de 35 jours. Cette estimation pourrait être raffinée par un cycle complet d'utilisation, qui n'a pas pu être effectué, faute de temps.

11.1.3 Portée

Lors de nos tests, la qualité audio n'était pas affectée avant 50 m de distance entre l'émetteur et le récepteur. Cela nous montre que dans une utilisation quotidienne, la portée ne devrait pas poser de problèmes.

11.2 Revue des objectifs

Pour rappel, nos objectifs étaient de transmettre du son ambiant via Bluetooth, de faire tendre la latence vers 30 ms, d'assurer une utilisation simple et intuitive et de maintenir une autonomie longue durée.
La transmission du son ambiant fonctionne bien, nous n'avons malheureusement pas pu réduire la latence en dessous de 30 ms mais nous nous sommes bien approchés. La facilité d'utilisation n'est pas aboutie car nous n'avons pas bien estimé la charge de travail que représentait la mise en place de la communication Bluetooth. Pour l'autonomie, des tests plus approfondis seraient nécessaire mais il est certain que les 18h d'autonomie demandés sont respectés.

11.3 Condition importante

Notre produit utilise uniquement le protocole LE Audio.
Il est important de noter que cette technologie est encore aujourd'hui très jeune et son adoption par les fabriquant de casque Bluetooth est encore en cours.

Durant nos tests, nous avons utilisé le module Avantree AS70P compatible avec LE Audio dans l'état, il s'agissait du seul appareil compatible et facilement disponible, il se connecte à n'importe quel casque disposant d'une entrée analogique Jack 3.5 mm et disponible à https://www.amazon.fr/Avantree-AS70P-R%C3%A9cepteur-Adaptateur-Haut-parleurs/dp/B0CPSR42BD

Le caque Philips TAA5608BK dont le fabriquant a annoncé que le support de la technologie LE Audio serait déployée dans une future mise à jour et est disponible à : https://www.galaxus.ch/fr/s1/product/philips-taa5608bk-pas-de-reduction-du-bruit-6-h-sans-fil-ecouteurs-37116283

11.4 Perspectives

Nous avons décidé de séparer le système de recharge afin d'en garantir le fonctionnement à ce stade du développement.

Ce système pourra être intégré à bord du PCB principal afin de diminuer la masse de l'appareil, taille du boitier ou d'augmenter la capacité de stockage d'énergie.

11.5 Remerciements

Laurent Gravier nous a prêté le haut-parleur utilisé pour tous nos tests ainsi qu'un PicoScope que nous avons utilisé quant à lui dans nos premiers tests mais que nous avons abandonné au profit d'un oscilloscope plus performant et plus ergonomique présent dans le MakeLab.

11.6 Commentaire Personnel

Nous avons sous-estimé la charge de travail que représentait la gestion de la communication Bluetooth, en effet il s'est avéré que le flux audio en Bluetooth LE Audio était nettement plus compliquée.

En raison d'une erreur de branchement, notre premier produit final a été détruit, cela nous a obligé à assembler en urgence la carte de remplacement. Ce temps aurait pu être mis en place pour soutenir la programmation de l'interface utilisateur et la stabilisation du fonctionnement.

Ces imprévus ont donc retardé la finalisation de notre projet, et nous avons décidé de miser sur la fonctionnalité principale et la latence minimale au détriment de l'interface utilisateur.

Anas Yusuf et Rémy Di Giovanni sont disposés à terminer le développement du système durant l'été.

12 Bibliographie

https://fr.wikipedia.org/wiki/Objectifs_et_indicateurs_SMART. (s.d.).

Nordic Semiconductor. (2025, 02 12). *Nordic Semi : nRF5340 Product Specification*. Récupéré sur docs.nordicsemi.com: https://docs.nordicsemi.com/bundle/ps_nrf5340

Raytac Corporation. (2024, 10 25). *Approval Sheet : MDBT53.* Récupéré sur raytac.com: https://www.raytac.com/download/index.php?index_id=60

13 Annexes


Batterie.pdf


imp34dt05.pdf


LM3671.pdf


DFR0362.pdf


NRF5340.pdf


PowerBoost.pdf


TP4056.pdf


WS2812B.pdf

Lien du répositoire GitHub pour le code :

https://github.com/YUSUF-Anas-HEIG/HEIG_Multi_ClAudio_2.0