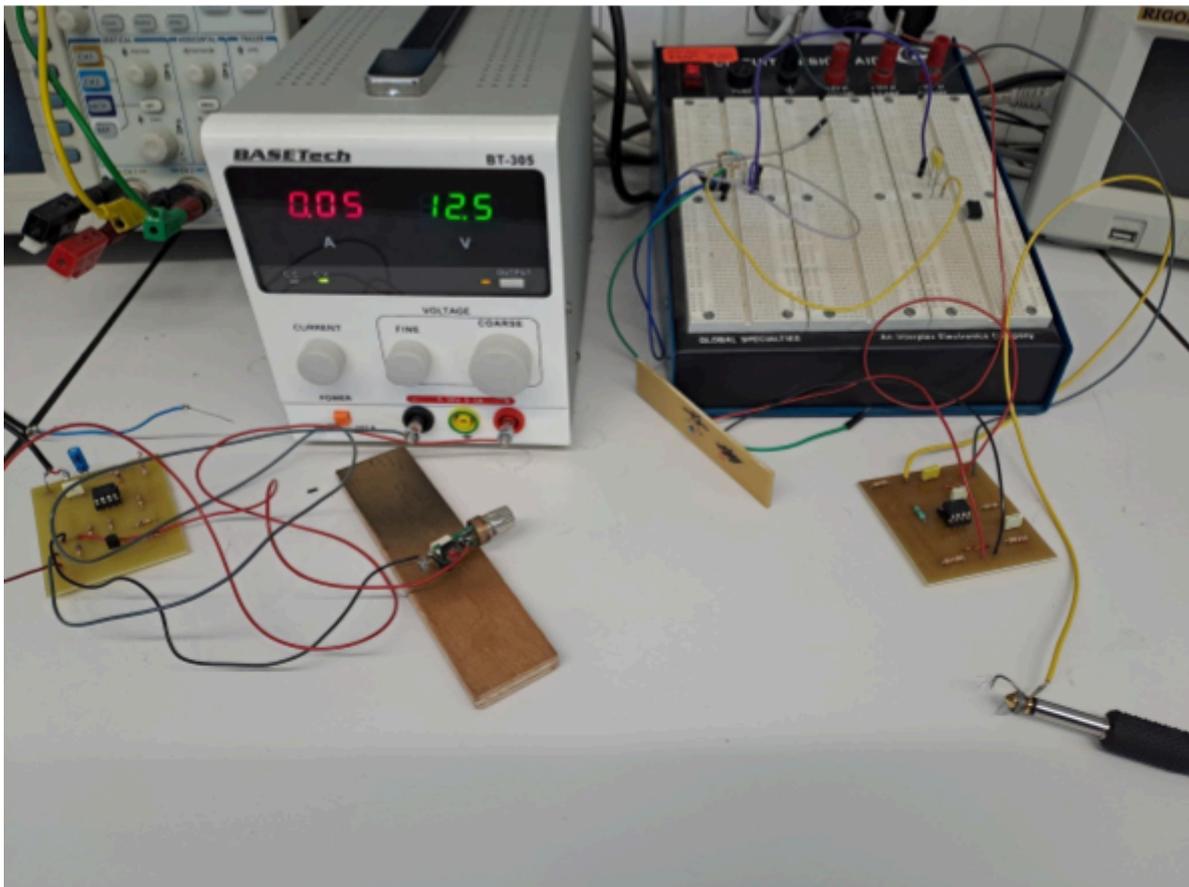


Digital audio / data link free-air optics**Étudiants :**

Paul GERMAIN

Lucas LEBLOND

Irina COSTRITA

Enseignant-responsable du projet :

Simon BUSBRIDGE

Date de remise du rapport : 15/06/2024

Référence du projet : STPI/P6/2024 – 41

Intitulé du projet : **Digital audio / data link using free-air optics**

Type de projet : **Étude – Simulation - Réalisation électronique**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Le but de ce projet est de faire la transmission d'un signal audio par lumière, en utilisant les sources d'information appropriées et appliquant les connaissances acquises au cours des enseignements de physique et d'électronique. Également, nous souhaitons accomplir tous nos objectifs prévus afin d'obtenir un système qui permettra la transmission d'un son pur aux différentes fréquences.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **Électronique, simulation, communication optique**

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	5
1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Fonctionnalité.....	8
3.1. Les composants.....	8
3.1.1. Les amplificateurs opérationnels.....	8
3.1.2. Les transistors.....	8
3.1.3. Les condensateurs.....	9
3.1.4. LED / diode Laser.....	9
3.1.5. La photodiode.....	10
3.2. Les circuits.....	11
4. Travail réalisé.....	11
4.1. Travail préparatoire.....	11
4.2. Travail Théorique - LTSpice.....	12
4.3. Travail pratique.....	12
4.3.1. Assemblage.....	12
4.3.2. Soudure.....	13
4.4. Travail avec FreePCB.....	14
4.5. Problèmes et leurs solutions.....	15
4.5.1 Les signaux saturés.....	15
4.5.2 Lumière de la salle.....	15
4.5.3. Bruit.....	16
4.5.4. Circuit imprimé, résistor 12 kOhm.....	16
4.5.5. Résistance infinie.....	17
5. Tests.....	18
5.1 Réalisation d'une expérience.....	18
5.2 Interprétation.....	19
6. Conclusion et perspectives.....	21
7. Bibliographie.....	22
8. Annexes.....	23

Remerciements

Il s'agit ici peut-être de la partie la plus compliquée à rédiger. Nous aimerions tout d'abord adresser nos remerciements aux responsables de l'EC, à savoir Mme.DUVAL Diane, M.HONORE David et M.YON Jérôme pour l'organisation et la mise en place de ce projet scientifique encadré apportant une large richesse scientifique et des compétences multiples.

Nous remercions sincèrement M.BUSBRIDGE Simon, notre professeur et encadrant de projet. M.BUSBRIDGE nous a constamment guidé et aidé dans la réalisation de ce projet, tout en suscitant notre intérêt pour l'électronique. Il a également toujours été à l'écoute et s'est montré disponible à nos questions et interrogations, un grand merci à lui.

Nous souhaitons aussi remercier nos encadrants techniques M.WILLIAMS Pascal et M.JOLLY Michael, qui ont toujours su répondre à nos requêtes et qui nous ont obtenu des composants dans de courts délais.

Enfin, merci à M.LEBLOND Stéphane, le père de Lucas, dont l'aide a pu être précieuse à plusieurs reprises.

1. Introduction

Nous sommes trois étudiants (Irina, Lucas, Paul) en deuxième année STPI de l'INSA de Rouen Normandie. C'est dans le cadre de nos études, que nous effectuons ce projet scientifique encadré. Plusieurs sujets nous ont été proposés, et nous avons opté pour la fabrication d'un système de transmission de données en utilisant l'optique, *data link using free air optics*.

Tout d'abord, parlons un peu de l'histoire des communications optiques. Cela fait des milliers d'années que les communications, bien que primitives, mettaient en œuvre des moyens optiques de transmission. Mais les quantités d'informations communiquées restaient très faibles. On peut citer l'exemple de l'Empire Romain qui utilisait des feux placés sur des points hauts permettant de transmettre rapidement des informations rudimentaires essentiellement à caractère militaire. Dans le même ordre d'idées, les chinois utilisèrent des cerfs-volants munis de lampes pour transmettre des signaux. Si la préhistoire des télécommunications s'étend sur des millénaires, on peut dire que l'histoire des télécommunications ne commence vraiment qu'à la fin du XIX^{ème} siècle avec l'apparition du photophone d'Alexandre Graham Bell en 1880.

Ce photophone utilisait la lumière solaire modulée par la voix puis collectée par une cellule de sélénium photoconductrice reliée à une pile et aux écouteurs.

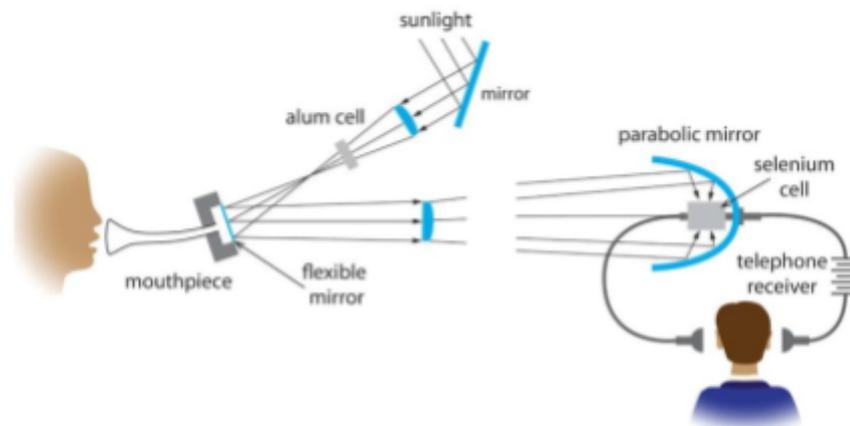


Fig 1 : Représentation schématique du photophone

Ce n'est que 120 ans plus tard que les ingénieurs reprennent l'idée du photophone et utilisent les liaisons optiques pour des transmissions haut débit. L'invention du laser en 1960 a ouvert la voie aux télécommunications par fibres optiques.

Depuis lors, les communications optiques ne cessent de se développer, car elles représentent une avancée technologique significative. Avec l'augmentation exponentielle des besoins en bande passante, la saturation des spectres de radiofréquence et leur rapidité face aux transmissions électriques du type ADSL, les technologies optiques se positionnent comme une alternative prometteuse en permettant des transmissions de données à très haut débit.

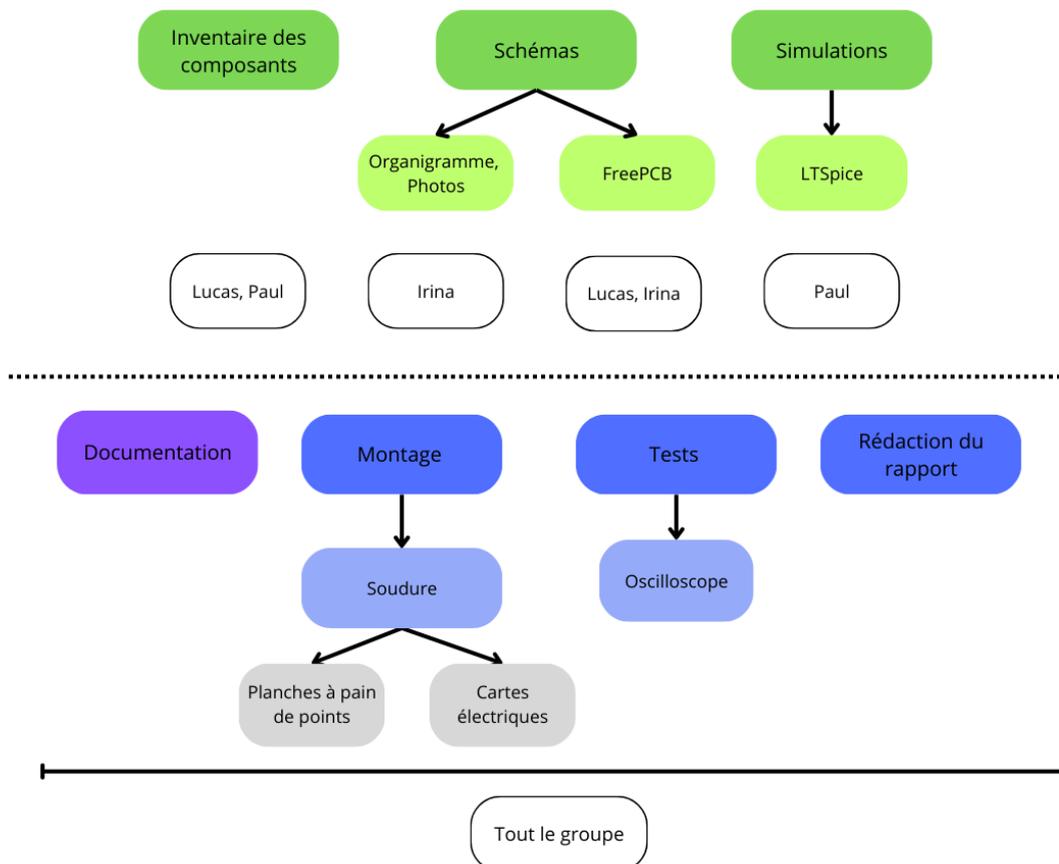
Dans ce rapport, nous vous présenterons la méthodologie que nous avons utilisée pour réussir à créer un système de transmission audio qui se divise en deux parties, une partie émettrice et une partie réceptrice.

2. Méthodologie / Organisation du travail

Tout d'abord pour réaliser ce projet, nous devons nous informer sur le fonctionnement de la communication optique en espace libre. Ensuite nous avons analysé les schémas proposés et noté les composants à utiliser. Tout ce que concerne l'inventaire de composants, les commandes et la fourniture de quelques-uns, était à la charge de deux étudiants.

Notre projet peut être divisé en deux parties principales: l'assemblage et la simulation (ou les tests). Afin d'être efficaces pour faire les montages, nous nous sommes échangés à chaque fois. De cette manière, nous avons réussi à mieux nous familiariser avec le projet.

Nous nous sommes basés plus sur la partie pratique. Faisant un circuit, nous le testions directement. En ce qui concerne le montage lui-même, il était également réalisé en deux étapes : sur les planches à pain de points (plaque d'essai) et les cartes électroniques. Pour avoir un bon modèle à la fin, une grande partie du temps était consacré pour la première étape, le travail sur les planches à pain de points. Le logiciel LTSpice était essentiel pour obtenir les mesures correctes.



3. Fonctionnalité

3.1. Les composants

Voyons d'abord quels composants nous avons choisi d'utiliser pour réaliser nos circuits. Ensuite nous expliquerons leurs rôle et fonctionnement dans le circuit.

3.1.1. Les amplificateurs opérationnels

Nous avons utilisé des amplificateurs opérationnels, AD845. Les amplificateurs opérationnels (AO) permettent de réaliser de nombreux types de montage tels que amplificateur intégrateur, dérivateur ou encore suiveur, etc. Dans notre système, nous n'utilisons les AO que pour amplifier le signal d'entrée selon un montage amplificateur inverseur.

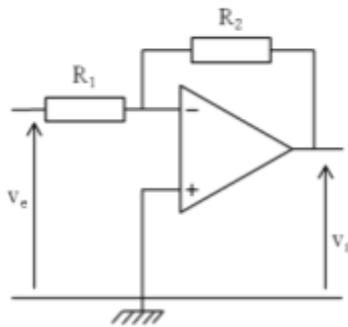


Fig 2 : AO inverseur

La tension de sortie v_s est donnée par la relation :

$$V_s = - R_2/R_1 \times V_e$$

L'AD845 est un amplificateur opérationnel de haute précision, nous l'avons choisi pour sa capacité à amplifier une tension appartenant à un large spectre de fréquences, jusqu'à 5 MHz, mais aussi pour sa capacité à ne générer qu'un bruit très faible.

3.1.2. Les transistors

Un autre élément très important est le transistor, BC557. Il est utilisé dans des circuits amplificateurs de faible puissance et de faible courant, il permet d'amplifier des signaux audio ou issus de capteurs. Ce transistor possède trois broches dont le rôle est différent selon la nature du transistor (PNP ou NPN).

Dans le cas d'un transistor PNP, constitué par la succession de 3 semi-conducteurs dopés respectivement dans l'ordre P N P, la jonction émetteur-base est polarisée en direct et celle base-collecteur est polarisée en inverse.

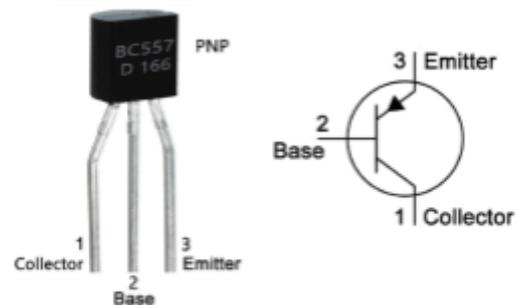


Fig 3 : Transistor PNP

Un transistor peut être comparé à l'association de 2 diodes têtes-bêches, disposées différemment selon la nature PNP ou NPN du transistor (voir annexes 1 et 2).

Le sens du courant change selon qu'il s'agit d'un transistor PNP ou NPN, mais l'émetteur est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'effet transistor qui permet à la diode, qui est en inverse, de conduire quand une tension est appliquée sur la base.

Très souvent, dans les différentes structures organisées autour du transistor, on distingue :

- un circuit de commande censé déterminer le régime de fonctionnement du transistor ou constituant un signal « source »
- le circuit de charge qui intervient dans l'état de fonctionnement du transistor et dont le courant peut être « piloté » par le circuit de commande.

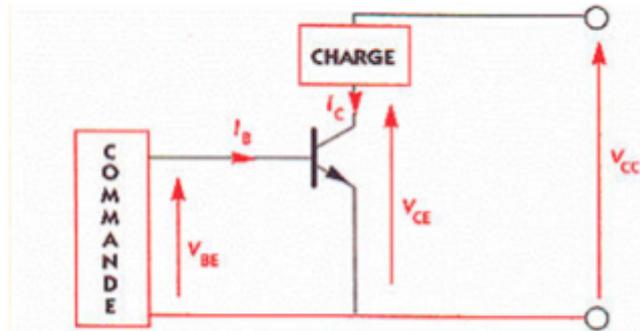


Fig 4 : Montage avec transistor

Deux sources d'alimentation sont donc nécessaires pour assurer un fonctionnement correct du transistor : l'alimentation du circuit de base (commande) et l'alimentation du circuit de charge.

Selon l'intensité du courant de base et la valeur de la tension V_{CE} , un transistor possède 2 modes de fonctionnement :

- fonctionnement en commutation (transistor bloqué ou saturé), il se comporte alors soit en interrupteur ouvert, soit en interrupteur fermé;
- fonctionnement en amplification.

Dans son mode de fonctionnement amplification, le courant I_C est proportionnel à I_B ($I_C = \beta I_B$), on comprend donc qu'un faible courant de base suffit pour provoquer un changement important de l'intensité du courant collecteur émetteur dans le circuit de charge.

Pendant les premières expériences, nous avons utilisé le transistor BC547 NPN, qui est bien adapté pour des tensions assez importantes, qui peuvent atteindre 5 ou 6 V. Cependant le transistor BC557 était le meilleur choix, parce que c'est un transistor PNP et ce type de transistor est plus sensible donc il réagit même pour une faible variation de tension. Il était donc plus adapté à notre circuit, qui a une tension base émetteur d'environ 0,6 V.

3.1.3. Les condensateurs

Les condensateurs sont largement utilisés pour filtrer les signaux électriques en lissant les fluctuations de tension. Ils peuvent éliminer le bruit et les interférences électromagnétiques des circuits d'alimentation, assurant ainsi un fonctionnement plus stable du système.

3.1.4. LED / diode Laser

Pour la réalisation de notre circuit émetteur nous avons eu la possibilité d'utiliser soit une LED (Light Emitting Diode), soit une diode laser à semiconducteur. Pour une transmission de signal audio, les deux systèmes sont suffisants et, même si le temps de réponse des LEDs est relativement long par rapport à celui des diodes laser, il reste tout à fait convenable. Sachant que les diodes laser et les LEDs fonctionnent entre 1,5 et 3,5 V, il n'était pas difficile de passer de l'une à l'autre. Ce qui nous a décidés à garder le laser est sa

capacité à produire un faisceau lumineux qui, une fois bien orienté, permet d’avoir une distance de transmission plus grande que la DEL qui perd en intensité lorsqu’on s’éloigne.

Le fonctionnement d’une diode laser est assez simple. En effet, lorsqu’un courant électrique traverse la diode, les électrons excités dans le matériau semi-conducteur se dés excitent, c’est-à-dire redonnent leur excès d’énergie sous forme de photons cohérents : tous en phase et de même longueur d’onde. Ce processus permet à la diode laser d’émettre de la lumière de manière rapide, unidirectionnelle et assez intense (de l’ordre de 300 mW). La conversion d’intensité électrique en intensité lumineuse est une fonction affine après un seuil d’intensité comme représenté ci-contre.

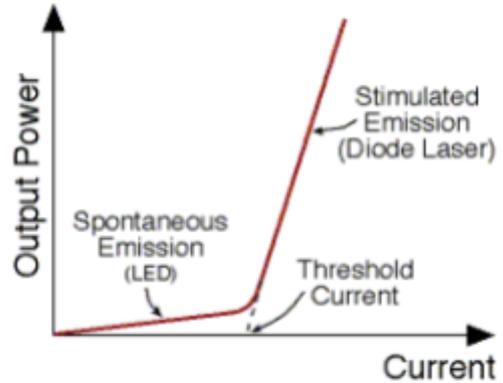


Fig 5 : Graphique montrant l'émission stimulée

Malgré tout, les diodes laser n’ont pas que des avantages. Elles sont assez fragiles et sans résistance de protection il est assez facile de les “griller” (ce qui nous est arrivé !).

3.1.5. La photodiode

Les photodiodes permettent la conversion efficace de la lumière en courant électrique. Leur fonctionnement repose sur le principe de l’effet photoélectrique et celui de la génération d’électrons dans un semi-conducteur dopé spécifiquement pour cette fonction.

Pour maximiser l’effet photoélectrique, la photodiode est polarisée en inverse (tension négative appliquée à la région *p* et tension positive à la région *n*), créant une région de déplétion large et sensible à la lumière. La zone de déplétion correspond à une région d’appauvrissement contenant peu de porteurs de charges libres. Si la photodiode n’est pas polarisée, elle fonctionne en mode photovoltaïque et produit une petite tension de sortie lorsqu’elle est éclairée par une source lumineuse. En cas de polarisation inverse, la photodiode fonctionne en mode de diode à avalanche, la lumière incidente permet la création d’électrons libres par effet photoélectrique dans la zone éclairée. Ce photocourant est proportionnel au flux lumineux incident.

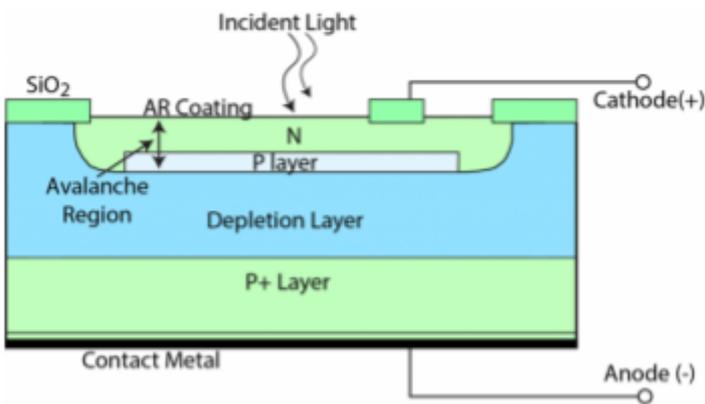


Fig 6 : Coupe schématique d'une photodiode branchée en inverse (mode avalanche)

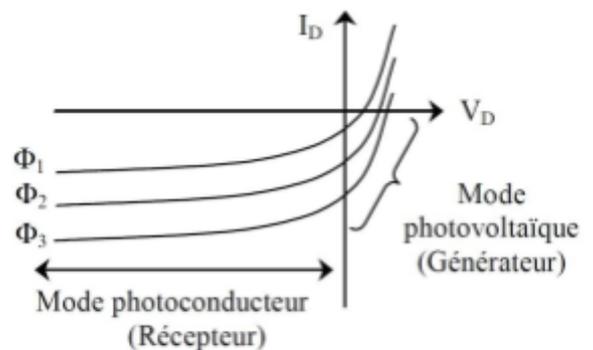


Fig 7 : Influence du flux lumineux sur l'intensité du photocourant

Ce mode de fonctionnement en polarisation inverse, avec une zone de déplétion plus large, limite la charge d'espace et permet des temps de réponse plus courts et une sensibilité accrue.

3.2. Les circuits

Intéressons nous aux différents circuits qui composent le système global et expliquons leur fonctionnement.

Étudions d'abord la partie émettrice du système. Cette partie prend en entrée un signal électrique analogique, typiquement la sortie audio d'un ordinateur, puis amplifie son intensité pour être dans la zone de fonctionnement du laser (après le seuil d'intensité) grâce à un amplificateur opérationnel. Ensuite, ce signal est reçu par une diode laser qui convertit les variations de tension et d'intensité en variations d'intensité lumineuse.

Passons maintenant à l'analyse de la partie réceptrice. Lorsque le faisceau laser est bien orienté sur la photodiode, celle-ci crée un courant et une tension proportionnels à l'intensité lumineuse reçue mais cette tension étant trop faible il faut l'amplifier grâce à un deuxième amplificateur opérationnel. À la sortie de l'amplificateur, le signal est quasi identique au signal d'entrée du circuit émetteur et est assez fort pour pouvoir être transformé en musique grâce à un amplificateur pour guitare par exemple.

4. Travail réalisé

4.1. Travail préparatoire

Au début de ce projet, comme pour le travail de recherche, nous avons dû nous renseigner sur le fonctionnement et le principe de la transmission des données par la lumière. Nous avons également dû prendre connaissance des deux circuits à réaliser (émetteur et récepteur) et planifier les étapes à suivre pour y arriver.

Avant de commencer l'assemblage, nous avons rassemblé tous les composants dont nous disposions et commandé ceux qui manquaient. En attendant qu'ils arrivent, nous avons utilisé des planches à pain de points (point breadboard) pour réaliser quelques expériences. Ces premiers tests nous ont permis de nous familiariser avec le matériel comme les générateurs, les oscilloscopes... Ces manipulations nous ont aussi appris les erreurs à ne pas reproduire et à être efficaces dans notre travail.

Ensuite, nous sommes passées à un travail théorique sur le logiciel LTSpice, qui nous a permis de mieux comprendre comment fonctionnent les deux circuits à réaliser. Même si notre enseignant nous a donné les bases des circuits il a fallu les adapter à nos besoins et aux composants que nous avions prévu d'intégrer, comme le laser.

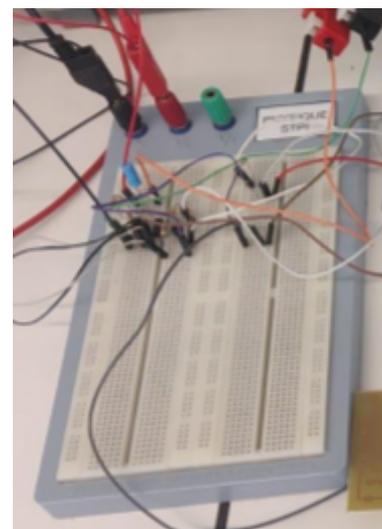


Fig 8 : Planche à pain de points

4.2. Travail Théorique - LTSpice

Comme évoqué précédemment, nous nous sommes basés en premier lieu sur le logiciel LTSpice, à la fois pour comprendre et observer les circuits mais aussi pour en avoir une approche théorique avant de réaliser des tests pratiques. Ce dernier nous a aussi permis de nous familiariser avec des schémas de circuits électriques, d'en comprendre rapidement le fonctionnement et de développer des compétences d'analyse.

Ces schémas LTSpice (voir annexes 5 et 6) ont été très importants car ce sont eux qui nous ont servi de modèles lors de la réalisation des montages. Ainsi, nous avons pu les suivre étape par étape pour éviter de faire le moins d'erreurs possibles.

Cependant, quelques difficultés ont été rencontrées comme notamment la prise en main du logiciel (différent sur Mac et sur Windows) et l'absence de quelques composants utiles et précis comme la diode laser, ici modélisée par une simple diode dont les caractéristiques sont un peu hasardeuse et surement différent de nos diodes et lasers réelles.

Au niveau simulation et graphe des tensions et courants, ce logiciel nous a particulièrement été utile pour deux aspects : la vérification du bon fonctionnement du circuit émetteur et l'utilité du transistor (qui nous a causé des problèmes de compréhension). Premièrement, comme expliqué dans la partie 3.2, le circuit émetteur doit faire légèrement varier la tension aux bornes de la diode autour d'une composante constante. C'est ce qu'on retrouve ici en vert, et en bleu la tension du générateur basse fréquence : les variations sont courtes d'amplitude avec un offset important, ce qui permet d'être et de rester dans la zone affine de la diode (cf partie 3.1.4). On remarque aussi qu'il n'y a pas de déphasage. Deuxièmement, la possibilité de tracer plusieurs courbes de tension et d'intensité du courant nous a permis de comprendre en profondeur et de manière appliquée comment le transistor influence notre circuit et en quoi il est indispensable : contrôler de façon précise l'intensité du courant dans la diode à l'aide de la résistance R1.

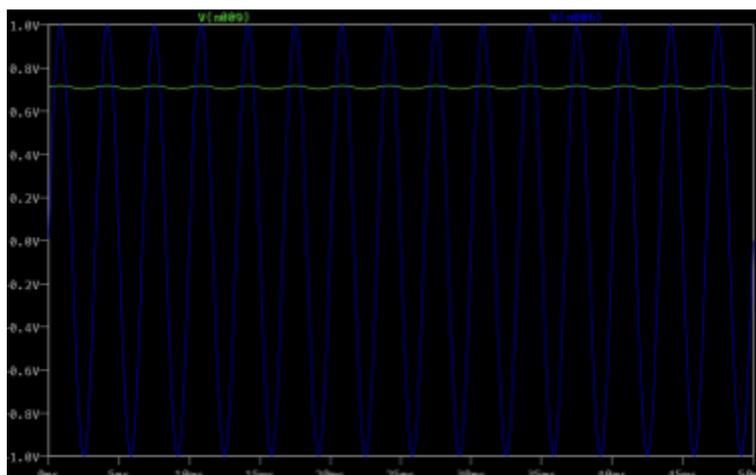


Fig 9 : Tensions de la diode (en vert) et du générateur basse fréquence (en bleu) lors d'une simulation LTSpice

4.3. Travail pratique

4.3.1. Assemblage

Dans cette partie, nous allons décrire le procédé d'assemblage des circuits sur la plaque d'essai, et les graphiques obtenus sur l'oscilloscope.

Premièrement, nous avons commencé le montage du circuit émetteur dont la plupart des composants étaient présents dans les laboratoires, tandis que pour d'autres, nous avons recouru à leurs équivalents. Nous avons d'abord utilisé une LED comme source de

transmission de l'information, vu que la commande de laser n'était pas encore arrivée. D'autres composants ont aussi été intervertis, comme l'amplificateur TL081CP et le transistor BC547. Les tests obtenus étaient différents de nos prévisions. Même si les composants sont équivalents, il y a des caractéristiques qui influencent la sortie du signal.

Dès que nous avons reçu les composants nécessaires, nous avons changé ceux qui étaient déjà implémentés dans les circuits. De plus, grâce aux composants ramenés (le laser et la photodiode) par notre collègue Lucas, nous avons pu commencer plus tôt l'assemblage complet. En même temps, nous avons pris la deuxième planche à pain de points avec alimentation, pour monter le circuit récepteur.

Pendant les premiers essais, nous avons connecté l'émetteur au générateur de tension variable et le générateur de fonctions. Nous mettions en entrée une fréquence constante, pour voir le comportement du circuit dans son ensemble. Sa sortie était liée à l'oscilloscope, ce qui nous a permis de voir les signaux qui émettent notre circuit. Le laser fonctionnait bien pour les différentes fréquences, et clignotait aux petites fréquences. De la même manière, la photodiode opérait correctement, et montrait une tension différente quand était couverte.

Ensuite, nous avons aligné le laser avec la photodiode et injecté un signal alternatif. Évidemment, les signaux obtenus n'étaient pas ceux que nous attendions, il y avait de la saturation, mais nous parlerons de cela plus tard. Cependant, nous continuions des expériences avec les deux circuits, afin d'avoir les graphiques souhaités.

Quand nous avons des diagrammes propres et après que Paul ait apporté un amplificateur audio, nous sommes passés aux tests avec le câble Jack. Tout d'abord, nous avons sectionné un câble jack (3.5mm connecté à la source audio), puis soudé deux petits fils sur la terre et sur l'une des deux bornes positives (un seul canal sur les deux canaux stéréo) au niveau de l'extrémité coupée. Cette manœuvre était faite pour avoir la possibilité de connecter le câble à la plaque d'essai. Pour tester notre circuit sous l'influence de la musique, nous avons branché le câble Jack à l'ordinateur. Le son transmis par la lumière était clair et d'une bonne qualité, mais avec des petits bruits, principalement causés par l'amplificateur audio.

4.3.2. Soudure

La soudure a été un élément important du projet, parfois pour faciliter les connexions sur les plaques d'essais, mais surtout lors de la réalisation des circuits imprimés. Préalablement, nous avons fait un inventaire (cf annexes 7 et 8) pour voir quels composants nous disposons, d'autant plus que cela a facilité la tâche lors de la soudure. En premier, nous avons commencé par le circuit de l'émetteur, mais la méthode restait la même pour le récepteur.

La soudure était faite au verso des circuits imprimés. Cela était réalisé à l'aide de fers à souder, qui s'est réchauffé jusqu'à 400 °C. À une telle température, l'étain, le métal utilisé lors du brasage, fond instantanément.

Son processus consiste à commencer par les plus petits composants afin de faciliter la mise des futurs composants et éviter le risque d'erreurs lors de la manipulation des éléments électroniques. Dans ce contexte, nous avons débuté par souder les résistances, à cause de leur petite taille et leur grand nombre parmi les autres composants. De cette façon, nous évitons toute obstruction par des composants plus gros, qui seront ajoutés plus tard. Ensuite nous avons soudé les condensateurs et les transistors. Finalement, nous avons mis en place les composants avec les câbles, comme la photodiode, le laser et le câble Jack.

Les fils sont en dernier, parce que cela permet d'éliminer les difficultés de la soudure des petits détails.

Pour avoir un bon circuit, les composants devaient être plats sur le circuit imprimé, ce qui garantit l'uniformité de la hauteur sur le PCB. En effet, pour avoir un contact fiable, les fils des composants devaient être perpendiculaires sur le circuit. Cela permet d'avoir un bon ajustement et simplifie la mise des autres pièces. Pour obtenir une telle connexion directe, nous avons utilisé une pince. Nous avons plié les fils du composant, de manière qu'il soit bien placé sur la carte électronique. Après cela, nous les brasions. Dès qu'il était bien mis, nous avons coupé les fils restants.

4.4. Travail avec FreePCB

Cette étape était décisive pour avoir les résultats envisagés et des bons circuits imprimés. Nous avons fait les circuits d'après les schémas de LTSpice. Le logiciel FreePCB est simple en utilisation, parce qu'il comporte tous les composants et l'interface est compréhensible. L'unique point qui nous a posé des doutes, était le choix exactement du composant parmi la liste donnée. En effet, dans cette liste, il y a plusieurs dimensions pour chaque type de composant. Par exemple, pour les résisteurs, modèle *th* (*through hole* - pour avoir des trous dans la carte électrique, par lesquels il faut passer les fils du composant) nous avons utilisé RC05 avec les dimensions appropriées. Tandis que la liste nous propose 19 résisteurs *th* avec des dimensions et nombre de trous différents. Cependant, grâce aux conseils de Monsieur Busbridge, nous avons vite maîtrisé cet aspect.

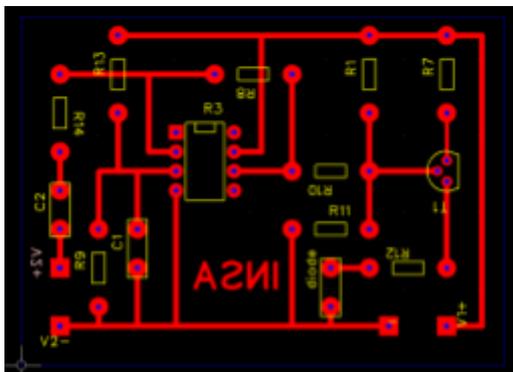


Fig 10 : Schéma PCB de l'émetteur

Un autre point à mentionner est la largeur des chaînes. En réalité, les chaînes d'une petite largeur peuvent être facilement abîmées. Les tailles que nous avons utilisées en FreePCB étaient de quelques millimètres, et tant que nous avons travaillé dans le logiciel, c'était difficile de s'apercevoir sur le modèle réel. Ainsi, nous avons changé la largeur des chaînes à 30 mils, soit 0,762 mm.

Pour les connexions qui ne devaient pas être croisées avec les autres chaînes, nous avons procédé par deux méthodes. L'une était de passer par la partie où devrait être placé le composant. Par exemple, sur la figure 10, la chaîne passe en dessous du composant R13.

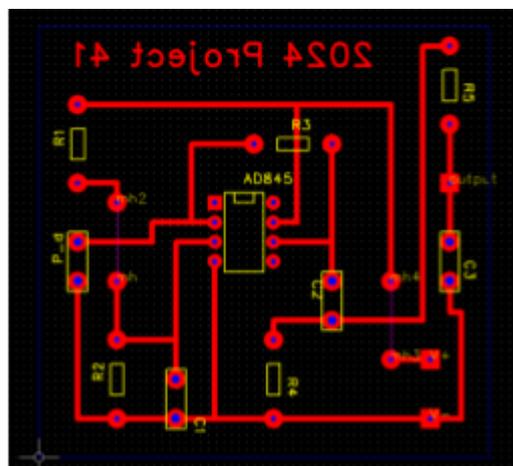


Fig 11 : Schéma PCB du récepteur

La deuxième méthode consistait à faire des sauts sur la chaîne. Cette méthode était utilisée dans les cas où le croisement des chaînes était inévitable. Pour cela, nous avons pris des composants appelés trou de montage (*mounting hole*). Nous le mettons d'un côté et de l'autre de la chaîne qui ne devait pas être croisée. Par exemple, sur la figure 11, le saut est fait pour la connexion entre R1 et R2, et est représenté par un fil bleu fin.

4.5. Problèmes et leurs solutions

4.5.1 Les signaux saturés

La première étape nous a pris plus de temps, en raison des problèmes rencontrés sur les signaux du voltage.

La première fois lors de l'assemblage, nous avons mis deux alimentations de laboratoire, l'une était pour l'émetteur, tandis que l'autre était pour le récepteur. Un problème est apparu sur les oscilloscopes. Nous avons un signal semi-sinusoïdal, ce qui représente un signal saturé. En raison de cela, nous avons effectué plusieurs expériences avec le circuit et les appareils de mesure électroniques.

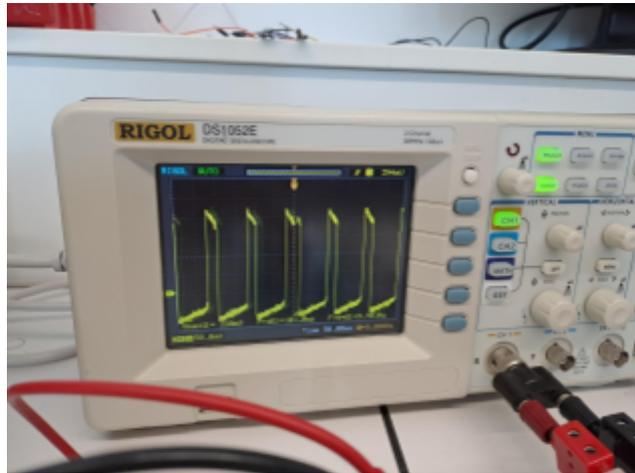


Fig 12 : Signal saturé

Une solution était de modifier les connexions entre le récepteur et l'alimentation. Le changement concernait à ajouter la tension de -10V sur l'entrée inverseuse de l'amplificateur TL081CP. Néanmoins, cela n'a eu aucun effet sur le signal.

Une autre suggestion était de remplacer les deux alimentations de laboratoire par une plaque d'essai qui contenait l'alimentation. La terre était connectée à la sortie de l'émetteur, la tension de +10V était à la sortie du récepteur et aussi à la sortie de l'amplificateur de l'émetteur. Enfin, la tension de -10V se trouvait sur la terre du récepteur (voir annexe 3). Cependant, cela a créé plus de bruit, même pour les basses fréquences.

À la fin, nous avons décidé de séparer les deux circuits et donc de les faire sur deux platines différentes. Nous avons assemblé le récepteur sur une autre plaque d'essai avec l'alimentation. Cette fois-ci nous avons mis moins de câbles, et les deux circuits étaient plus clairs. Nous avons réussi à obtenir deux graphiques clairs et sinusoïdaux. Il est donc possible que l'origine de ces problèmes était une erreur de branchement, corrigée après avoir repris à zéro et de manière plus rigoureuse les circuits.

4.5.2 Lumière de la salle

Un problème/inconvénient que nous avons eu était la lumière dans la salle, parce que cela empêchait la photodiode de capter uniquement le laser. Parfois, nous avons couvert le chemin du laser vers la photodiode avec différents objets comme des feuilles ou des manteaux. Le graphique du récepteur devenait plus lisible avec moins de bruit externe.

4.5.3. Bruit

Le récepteur captait bien la lumière et son graphique était assez bon, mais il y avait du bruit qui affectait le son de la sortie. En général, le problème de base réside dans le bruit

de tension d'entrée de l'amplificateur. Pour les hautes fréquences, ce bruit semble être amplifié significativement.

La solution proposée par notre enseignant était de mettre un filtre passe-bas. Nous avons choisi de mettre sur la plaque d'essai, une résistance de 750 Ohm et un condensateur de 10 nF afin d'obtenir une fréquence de coupure de 21 kHz, approximativement la limite de l'audition humaine.

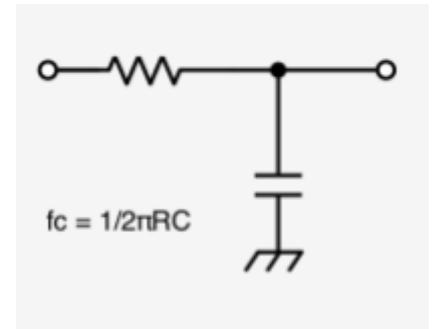


Fig 13 : Schéma d'un filtre RC du premier ordre avec calcul de la fréquence de coupure

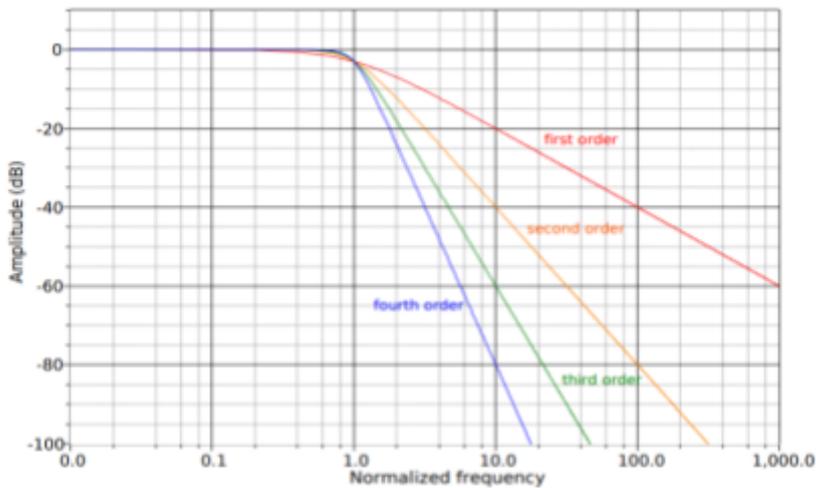


Fig 14 : Diagramme de Gibbs et gain selon la fréquence et l'ordre du filtre

Ce filtre RC, étant d'ordre 1, n'est théoriquement pas le plus efficace comme nous pouvons le voir sur le diagramme de Gibbs ci-contre. Cependant, appliqué à notre circuit, il l'est assurément : après l'installation de ce filtre, le graphique présentait un signal plus clair. Grâce à cela, la qualité du son a été améliorée. Cela s'explique par la très haute fréquence de ce bruit.

En ce qui concerne le filtre pour le circuit imprimé, nous avons changé les valeurs de deux composants. À cause du manque d'un autre condensateur de 10 nF, nous en avons choisi un autre de 15 nF. Ce changement a influencé le choix de la résistance. Pour avoir la même fréquence de transmission, nous avons calculé la résistance avec la formule: $R = 1/2\pi C f_c$. La résistance estimée était de 560 Ohm, obtenant donc une fréquence de coupure de 19 kHz. Le filtre obtenu nous a amené aux mêmes bons résultats.

4.5.4. Circuit imprimé, résistance 12 kOhm

Lors de l'inventaire de composants, nous avons remarqué l'absence d'une résistance de 12 kOhm. Nous avons décidé de mettre sur la plaque d'essai, deux résistances en série, l'une de 10 kOhm et l'autre de 2 kOhm. Le montage sur la plaque d'essai est passé avec succès.

D'autre part, le souci était sur le circuit imprimé de l'émetteur, le composant R13. En effet, comme énoncé précédemment, lors de la conception sur FreePCB nous n'avons pas pris cela en compte et nous avons suivi les schémas de LTSpice. Donc, sur le circuit imprimé, il y avait de la place seulement pour une résistance, celle de 12 kOhm.

La solution adoptée consistait à souder les deux résistors de telle manière que le fil de la résistance de 10 kOhm était connecté à l'entrée de la chaîne et le fil de celle de 2 kOhm à la sortie. Les fils restants ont été soudés entre eux.

4.5.5. Résistance infinie

Pendant les essais avec les circuits imprimés préassemblés, nous nous sommes concentrés sur la qualité du son en sortie. Celui-ci a radicalement changé. Le son reçu était tellement faible que nous n'étendions presque rien. De plus, il y avait beaucoup de bruit.

Pour comprendre lequel parmi les deux circuits générait des problèmes, nous avons testé chaque circuit séparément. En premier nous avons vérifié le récepteur, à l'aide de l'émetteur de la platine d'expérimentation. Le circuit capturait le son et l'amplifiait de façon optimale. Ensuite, nous avons testé l'émetteur de la carte, et, en résultat, le bruit est réapparu. Nous avons examiné le circuit imprimé, et tout nous semblait en ordre. Après la discussion de ce problème avec Monsieur Busbridge, nous avons essayé de vérifier le circuit avec le multimètre. Enfin, le défaut se trouvait dans la connexion du câble Jack et la terre, avec une résistance infinie. Nous avons soudé à nouveau ce câble et nous nous sommes assurés que le contact était devenu meilleur. Grâce à ces manipulations, le circuit final nous a donné les résultats attendus et le son était clair et bien amplifié.

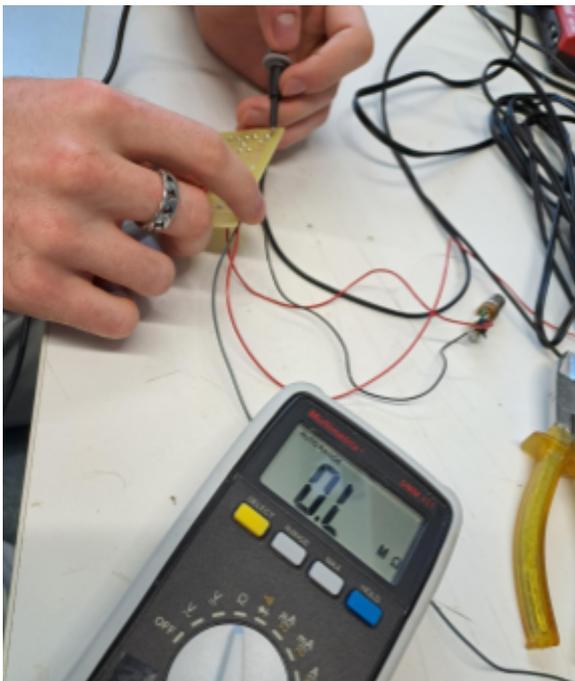


Fig 15 : Résistance infinie pour le contact entre le câble Jack et la masse du circuit

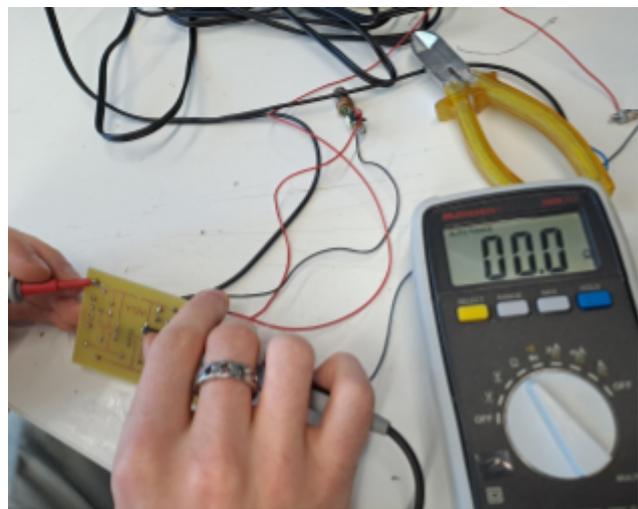


Fig 16 : Résistance nulle après le ressoudage

5. Tests

5.1 Réalisation d'une expérience

Afin de connaître le domaine d'utilisation de notre système (analogique et/ou digital) et la stabilité de celui-ci, nous avons mené une expérience. Nous avons ainsi mesuré la réponse de la tension en sortie du circuit récepteur selon la fréquence d'entrée sur le circuit émetteur.

Pour ce faire, il était important d'avoir un protocole précis et de rester concentré tout le long de l'expérience afin d'obtenir des résultats probants. En effet, il était facile de réaliser une erreur sans même pouvoir sans rendre compte, comme par exemple modifier les tensions des générateurs, ou encore plus problématique, perturber le montage laser/photodiode.

Nous avons donc fixé la tension d'entrée sur le générateur de basses fréquences à 1 V, c'est-à-dire la tension approximative de sortie de nos ordinateurs. Puis nous avons noté un total de 120 valeurs de tension en sortie, chacune correspondant à une valeur de fréquence en entrée. Ces tensions ont été relevées à l'aide d'un oscilloscope. Ainsi le protocole était simple : commencer à 20 Hz puis augmenter petit à petit la fréquence d'entrée par intervalle de 10, 20 Hz ou plus (de quoi observer une différence significative avec la dernière valeur de tension) et noter la tension de sortie à chaque fois. Il était parfois nécessaire de faire un arrêt sur image sur l'oscilloscope avec la touche "Stop/Run"

Il est important de préciser qu'au cours de l'expérience, aux alentours des 435 kHz, il a commencé à être difficile de réaliser nos mesures car la tension du bruit causé par l'amplificateur affectait trop la tension de sortie (dont l'amplitude avait faibli). Cependant, il est intéressant de noter que ce bruit avait une fréquence inférieure à la fréquence d'entrée.

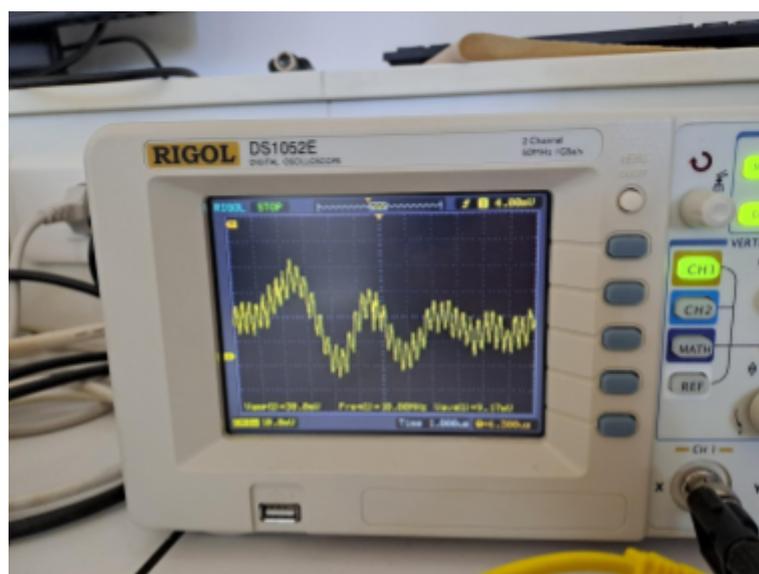
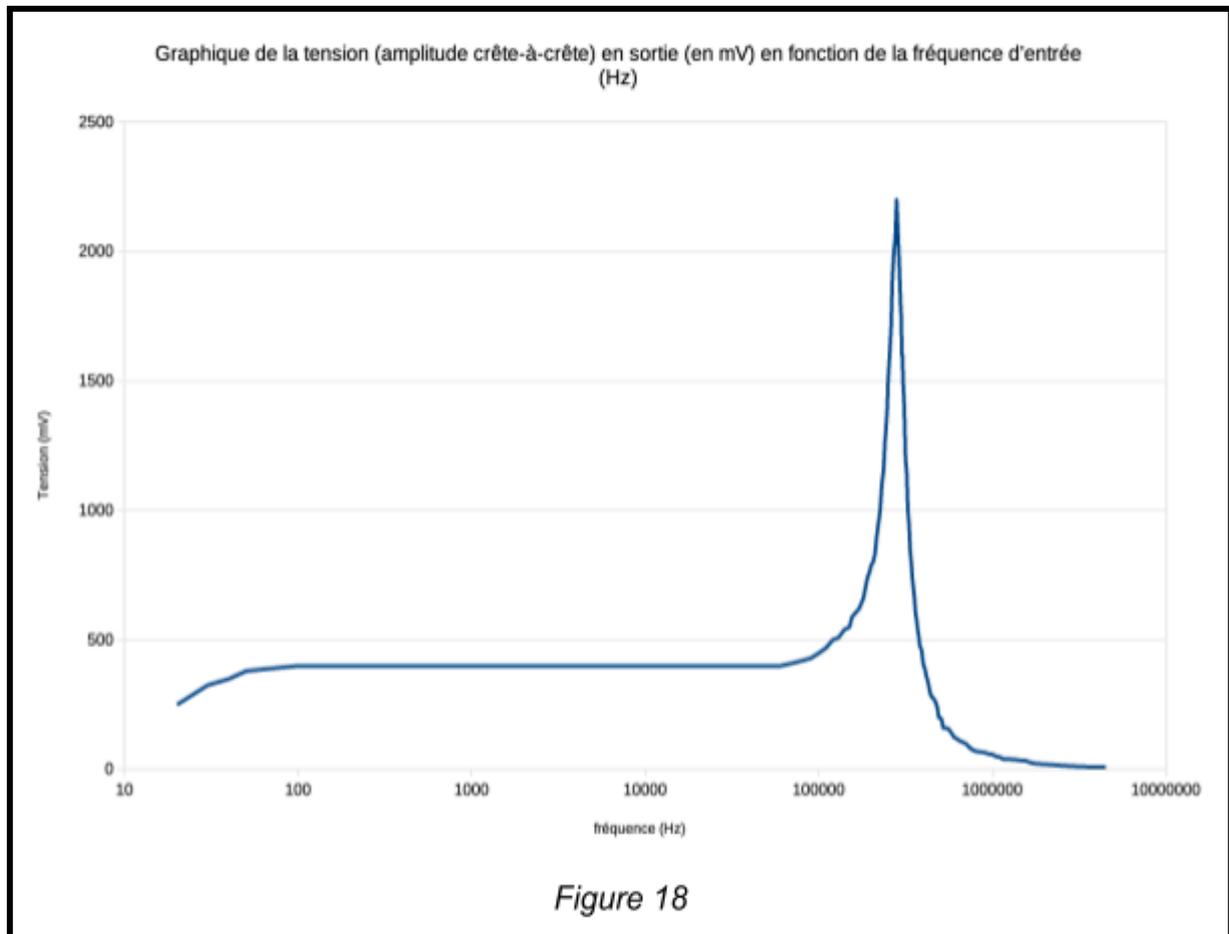


Figure 17: Signal à deux composantes sinusoïdales : la fréquence de sortie attendue à grande fréquence et amplitude constante et le bruit avec une période plus longue et des amplitudes aléatoires

C'est pourquoi, à partir de 850 kHz, nous avons dû réaliser les moyennes des tensions (toujours en crête-à-crête) de plusieurs périodes afin d'obtenir des résultats les moins aberrants possibles.

5.2 *Interprétation*



Voici donc le graphique obtenu après cette expérience, dont l'axe des abscisses est en échelle logarithmique. Observons que dans d'autres conditions expérimentales (luminosité, placements des composants et variables d'entrée), ce diagramme aurait été différent dans ses valeurs, mais aurait tout de même eu la même allure. C'est pourquoi, c'est véritablement cette allure qui nous intéresse plutôt ses valeurs à proprement parler.

Deux choses sont frappantes :

- Tout d'abord le plateau que présente la courbe après une légère augmentation de la réponse dans les faibles fréquences. Cette constance est rassurante car elle atteste de la stabilité mentionnée précédemment sur un large intervalle, entre 70 et 60000 Hz. C'est pourquoi notre système est parfaitement adapté à une utilisation analogique qui se place sur les fréquences du spectre audible, c'est-à-dire de 20 Hz à 20 kHz.

- Puis une résonance qui atteint son maximum à 280 kHz. Ceci était parfaitement inattendu mais aussi décevant : cela signifie que notre système optique est inutilisable pour une application numérique. Pour résoudre ce problème, nous avons dû expérimenter et comprendre quel composant en était à l'origine.

En premier lieu, nous devons déterminer quelle partie du circuit était impliquée (émetteur ou récepteur) : sur nos oscilloscope, aucune variation semblable à une résonance est apparue aux bornes du laser. Cela signifie que c'est le circuit récepteur qui en était la cause (de toute façon, une variation en intensité du laser n'aurait pas pu créer un tel phénomène et aurait saturé la photodiode).

Nous aurions bien voulu changer la photodiode mais malheureusement les seules à notre disposition fonctionnaient en infrarouge. Nous nous sommes donc tournés vers l'amplificateur opérationnel. C'est là que nous avons observé un changement lorsque nous avons remplacé notre AD845 avec un UA741CP : il y avait toujours une résonance mais celle-ci était à une fréquence bien plus faible ! L'amplificateur est donc la source principale de cette résonance, mais le fait de ne pas pouvoir tester la photodiode est très frustrant car une incertitude subsiste. En effet, une question demeurerait : pourquoi n'y a-t-il pas de résonance sur le circuit émetteur, alors que le même amplificateur y est installé, le tout dans la même configuration (inverseur) ?

Par ailleurs, nous pensons fortement que le bruit constamment présent et particulièrement en haute fréquence résulte de cette résonance : un léger bruit présent avant l'amplificateur opérationnel et à toute fréquence, est fortement amplifié spécifiquement autour de cette fréquence de résonance ; cela justifie parfaitement l'utilisation d'un filtre passe-bas.

Finalement, après la résonance, la valeur de la tension chute complètement jusqu'à devenir nulle. Encore une fois, c'est très surprenant car l'amplificateur AD845 est censé pouvoir transmettre des fréquences jusqu'à 5 MHz.

Pour conclure, cette expérience démontre qu'une application numérique de notre montage est impossible : pour cela, un meilleur amplificateur opérationnel est nécessaire.

6. Conclusion et perspectives

Ce projet représente pour nous un pas important dans l'étude et la compréhension de la transmission audio par la lumière.

Grâce à un bon choix des composants et l'utilisation d'un laser au lieu d'une DEL, nous avons la performance souhaitée et une distance plus grande de transmission. L'introduction progressive des éléments nous a favorisé la maintenance de l'équilibre de l'ensemble du circuit.

Nous avons appris beaucoup sur le principe de fonctionnement de la transmission d'audio par la lumière et également nous avons acquis des nouvelles connaissances dans ce domaine et en électronique. Nous sommes contents des résultats obtenus à la fin de ce projet. Tous les circuits fonctionnent proprement et montrent des signaux sans bruit et bien sinusoïdaux. Cela est par la suite reflété par le son transmis, qui est clair et ne présente pas de bourdonnement.

Ce travail en groupe a été une expérience très enrichissante tant sur le plan pratique que sur le plan théorique, grâce à sa complexité et la multitude de tâches réalisées. Malgré les problèmes rencontrés, nous avons réussi à nous adapter, et développer nos compétences d'organisation et la répartition de travail. Également, cela nous a permis de mettre en pratique la créativité et nos savoirs dans l'électronique tout au long de l'avancement du projet.

En ce qui concerne l'évolution du projet, nous envisageons de faire plusieurs tests pour comprendre comment les autres amplificateurs et la photodiode affectent la résonance à 280 kHz. En outre, nous voudrions ajouter un isolant pour la photodiode, afin d'éviter le captage de la lumière extérieure, en dehors de notre circuit.

7. Bibliographie

Livres

Olivier Bouchet, Hervé Sizun, Christian Boisrobert, Frédérique de Fornel, Pierre-Noël Favennec, “ *Optique sans fil* ”, GET et Lavoisier, 2004.

F. MANNEVILLE- J. ESQUIEU, “*Théorie du signal et composants*”, DUNOD, 1989

S. Coeurdacier, “*électronique*”,DUNOD, 1980

Liens Internet

1. Transistor :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor> (valide à la date du 18/10/2023)

<https://www.zpag.net/Electroniques/Transistor/Presentation.htm> (valide à la date du 15/05/2024)

https://www.doritique.fr/Articles/View_Article.php?num_article=111 (valide à la date du 27/07/2023)

2. Photodiode

<https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/> (valide à la date du 26/10/2023)

<https://www.digikey.fr/fr/articles/the-basics-of-photodiodes-and-phototransistors-and-how-to-apply-them> (valide à la date du 12/10/2023)

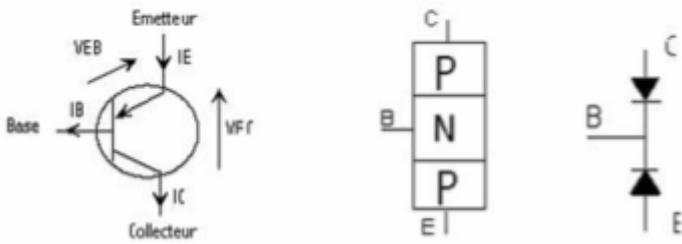
3. Schéma du montage AO inverseur :

https://www.electronique-radioamateur.fr/elec/schema/montage-aop.php#amp_inverseur (valide à la date du 19/04/2024)

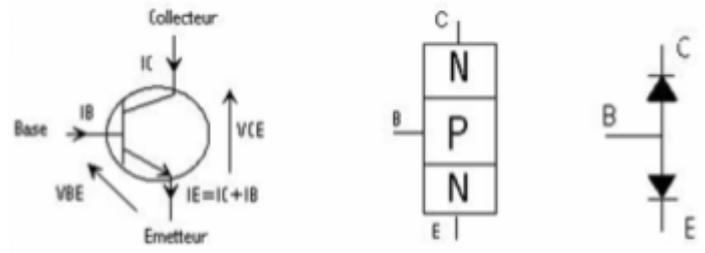
4. Calcul de la fréquence pour le filtre passe-bas :

<https://www.digikey.fr/fr/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-low-pass-and-high-pass-filter> (valide à la date du 12/10/2023)

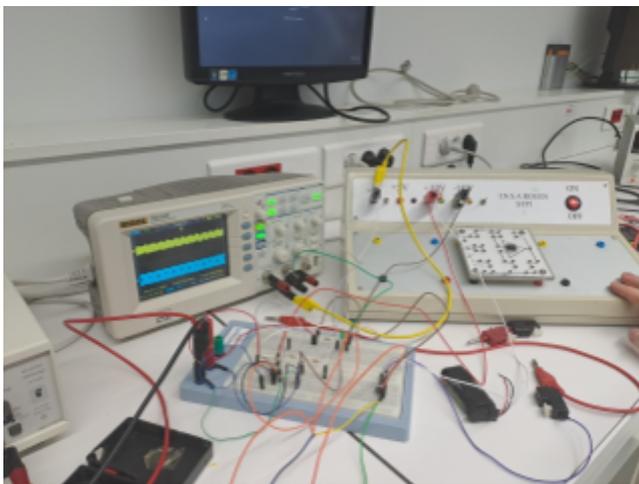
8. Annexes



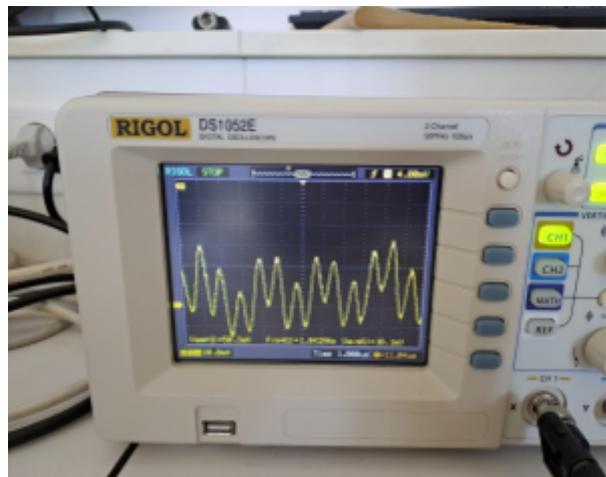
Annexe 1 : Transistor PNP



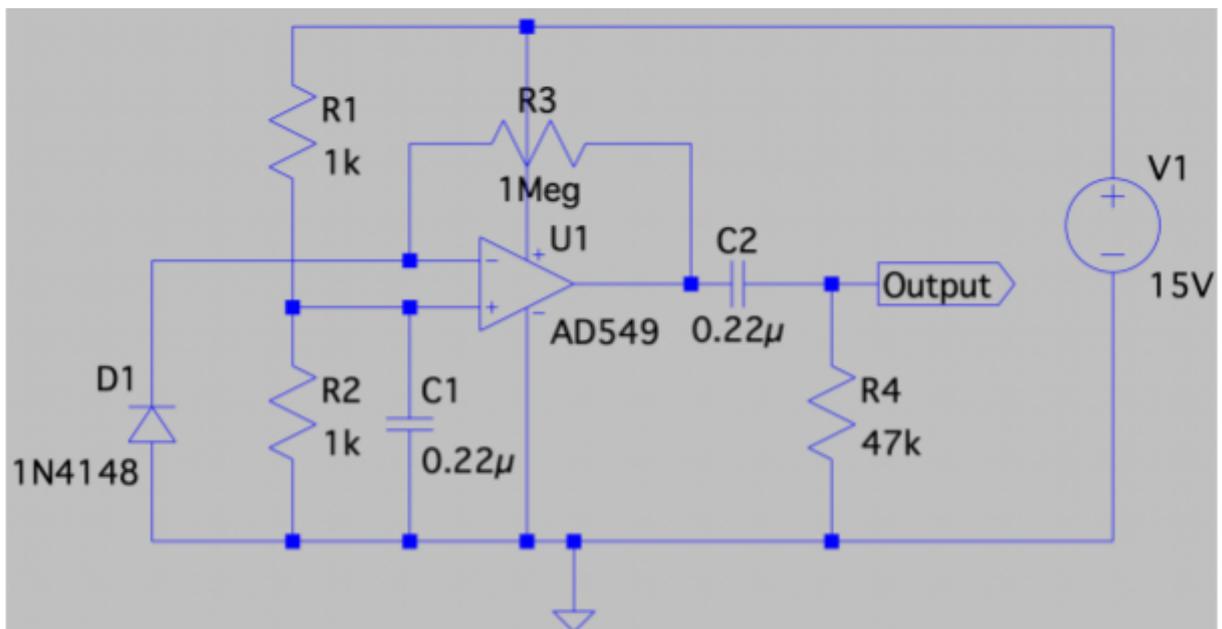
Annexe 2 : Transistor NPN



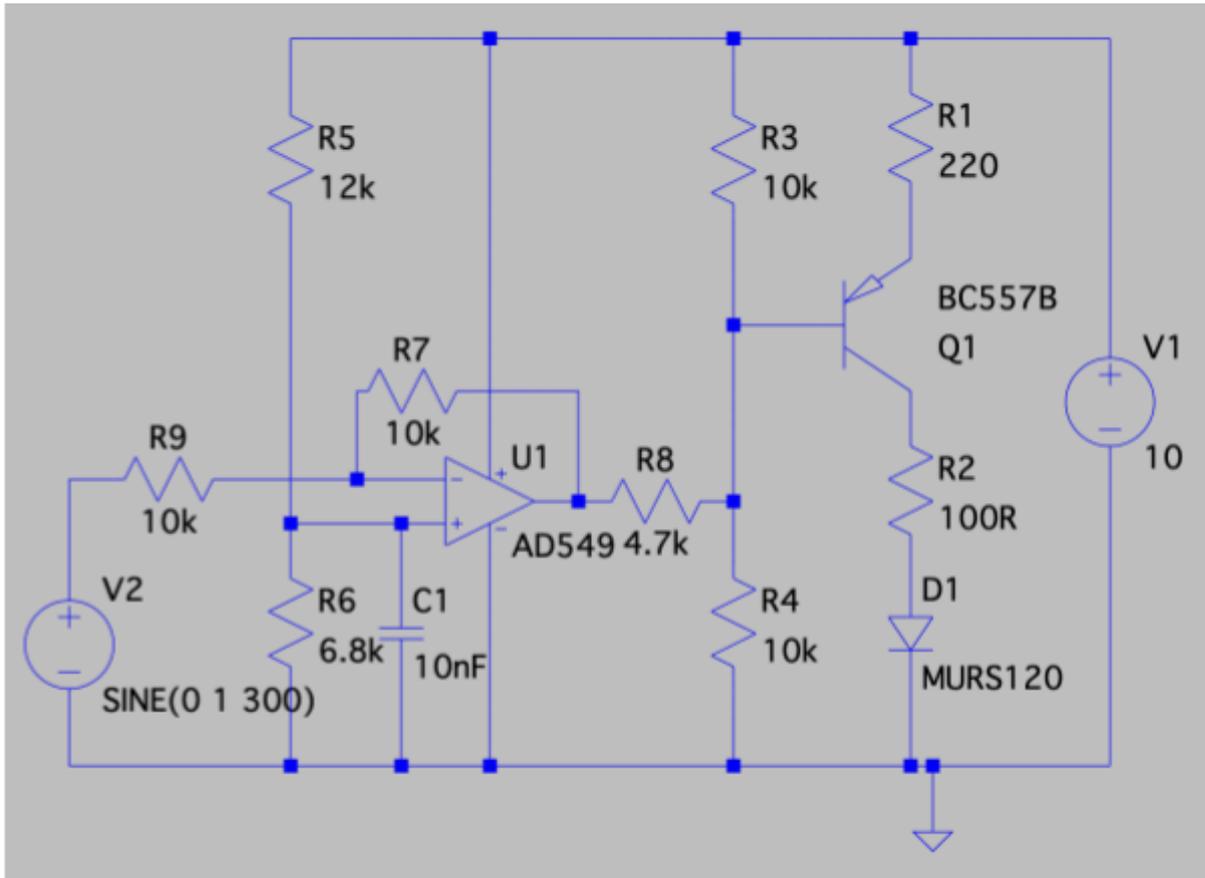
Annexe 3 : Expérience avec une autre alimentation



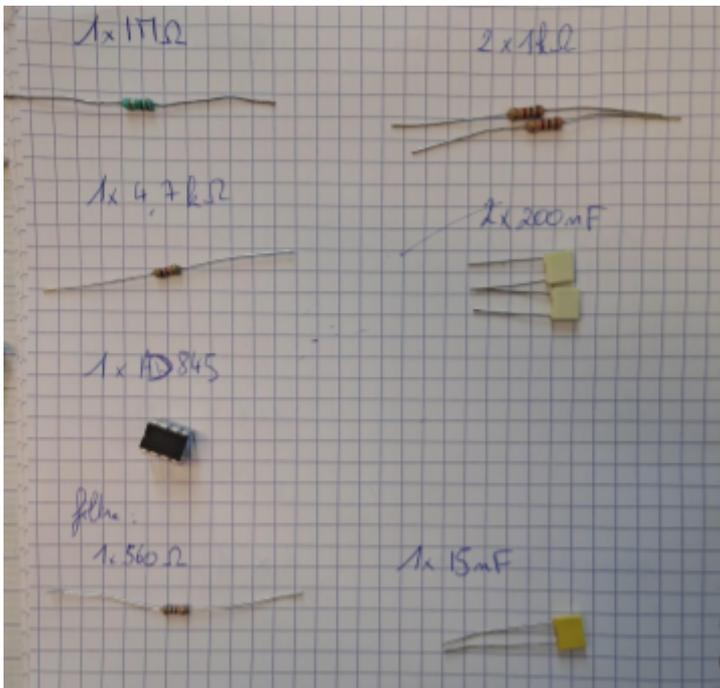
Annexe 4 : Autres signaux



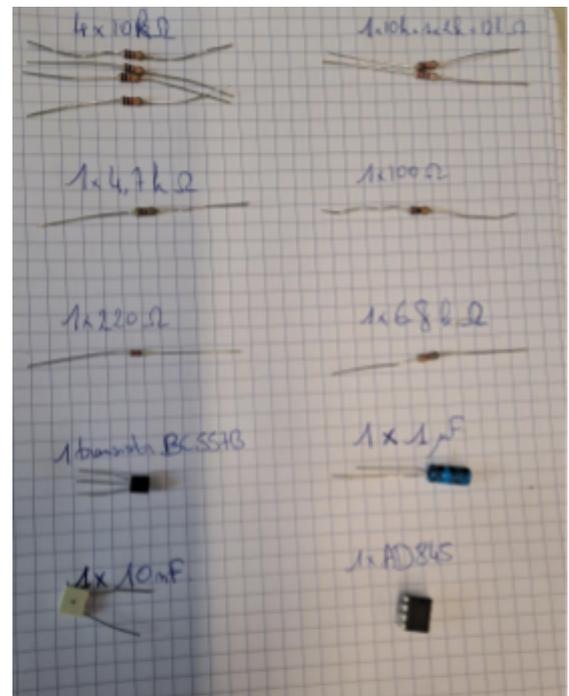
Annexe 5 : Schéma LTspice du circuit récepteur



Annexe 6 : Schéma LTspice du circuit émetteur



Annexe 7 : Inventaire des composants du circuit récepteur



Annexe 8 : Inventaire des composants du circuit émetteur