

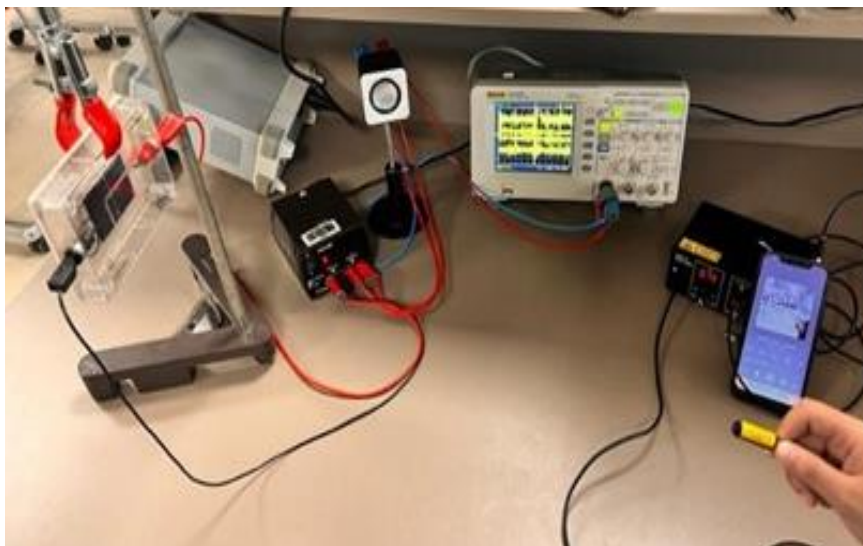


ÉCOLE CENTRALE CASABLANCA  
RAPPORT DE FORMATION EXPERIMENTALE

---

# Transmission d'information par laser

---



**Réalisé par :**

Mohammed EL BARHICHI  
Salma BOUCHAMA  
Chaymae Dahhassi  
Haytham CHAHBI EL ALAOUI

**Encadré par :**

Mr. Khalid Dahi

Juin 2023

## Table des matières

A. Résumé .....	3
B. Introduction .....	3
C. Motivation .....	4
D. Organisation du travail .....	4
Première partie : Modulation et démodulation d'un signal sinusoïdal .....	5
1. Modulation d'un signal sinusoïdal .....	5
i. Partie théorique .....	5
ii. Travail expérimental .....	8
2. Démodulation d'un signal sinusoïdal .....	8
i. Partie théorique .....	8
ii. Travail expérimental .....	10
Deuxième partie : Transmission de l'information par laser .....	12
1. Partie théorique : .....	12
i. Laser .....	12
ii. Onde sonore .....	13
iii. Modulation d'amplitude d'un signal laser .....	14
iv. Interaction lumière-matière .....	15
2. Travail expérimental : .....	17
2.1. Transmission d'un signal sinusoïdal par laser .....	17
2.2. Transmission d'un signal aléatoire par laser .....	18
E. Difficultés rencontrées .....	25
F. Conclusion .....	26
G. Références bibliographiques .....	26

## A. Résumé

Le présent rapport s'intéresse à notre travail expérimental visant à explorer la transmission de son par laser. Notre objectif était de développer un système permettant la transmission de signaux sonores à distance en utilisant un faisceau laser modulé.

Dans cette étude, nous avons d'abord évalué les composants de notre système, comprenant un boîtier de modulation, un amplificateur GBF, un oscilloscope, un haut-parleur et un laser. Nous avons effectué des vérifications approfondies pour garantir le bon fonctionnement de chaque élément.

Ensuite, pour tester la transmission du son, nous avons mis en place une configuration initiale en reliant directement un téléphone portable à un microphone via un câble jack-jack. Malheureusement, cette configuration a révélé des problèmes de clarté sonore, principalement dus à des perturbations extérieures et à des défauts du microphone.

Ces premières observations nous ont conduits à repenser notre approche. Nous avons décidé d'explorer l'utilisation d'une diode laser et d'un panneau photovoltaïque pour capter et transmettre le signal sonore. Le panneau photovoltaïque a été utilisé pour convertir le signal sonore en une variation de l'intensité lumineuse, tandis que le faisceau laser modulé a servi de moyen de transmission.

Nos expérimentations ultérieures ont montré des résultats prometteurs. Nous avons réussi à transmettre avec succès des signaux sonores par le biais du faisceau laser, qui ont pu être détectés et reproduits à l'aide d'un récepteur approprié. Cela démontre la faisabilité de la transmission de son par laser et ouvre des perspectives intéressantes pour des applications futures.

Cependant, il convient de noter que des améliorations restent nécessaires pour optimiser la qualité et la portée de la transmission. Des facteurs tels que les perturbations environnementales et les pertes de lumière du laser ont influencé la qualité de la transmission. Par conséquent, des études supplémentaires et des ajustements techniques sont nécessaires pour surmonter ces limitations.

En conclusion, notre travail expérimental démontre le potentiel de la transmission de son par laser. Nous avons pu établir un système fonctionnel de transmission de signaux sonores à l'aide d'un faisceau laser modulé et d'un panneau photovoltaïque. Malgré les défis rencontrés, nos résultats encourageants soulignent l'importance de poursuivre les recherches dans ce domaine, en vue d'applications pratiques telles que la communication à distance sans fil et la téléphonie optique.

## B. Introduction

Depuis des siècles, l'humanité a cherché des moyens de transmettre le son sur de longues distances, que ce soit pour communiquer, diffuser de la musique ou partager des informations importantes. Au fil du temps, différentes techniques ont été développées, allant des signaux de fumée et des tambours jusqu'aux systèmes de téléphonie et de diffusion radio. Cependant, ces méthodes traditionnelles présentent des limitations en termes de portée, de qualité du signal et de vulnérabilité aux interférences.

Au cours des dernières décennies, les avancées technologiques ont ouvert de nouvelles voies pour la transmission du son. L'utilisation des lasers, avec leurs propriétés uniques de concentration de l'énergie lumineuse et de transmission directionnelle, a suscité un intérêt croissant dans le domaine de la communication acoustique à distance. Les lasers offrent la promesse de surmonter les obstacles inhérents aux méthodes traditionnelles de transmission du son.

Dans cette perspective, notre expérience vise à explorer la transmission du son par laser dans l'air, en utilisant une cellule photovoltaïque comme récepteur. L'objectif est de démontrer la faisabilité de cette approche novatrice et d'évaluer ses performances. Nous avons été intrigués par la

possibilité de transmettre un signal sonore, qui est par nature une onde acoustique non continue, à travers un faisceau laser et de le reproduire à la sortie grâce au panneau photovoltaïque.

En fin de compte, notre étude cherche à enrichir la compréhension des mécanismes physiques impliqués dans la transmission du son par laser et à explorer les perspectives d'application de cette technologie. Nous espérons que nos résultats contribueront à ouvrir de nouvelles voies pour la communication acoustique à distance.

## C. Motivation

Les recherches sur la transmission du son par laser présentent un intérêt croissant en raison des avantages potentiels qu'elles offrent. L'utilisation d'un faisceau laser permet une transmission directionnelle et précise du son, réduisant ainsi les problèmes d'atténuation du signal sur de longues distances. De plus, la transmission du son par laser peut offrir une meilleure immunité aux interférences électromagnétiques par rapport aux méthodes traditionnelles. Comprendre les mécanismes impliqués dans cette transmission et évaluer les performances du système peuvent ouvrir de nouvelles voies pour la communication acoustique à distance.

L'expérience réalisée, permet d'explorer les possibilités de cette approche innovante. Ce rapport détaillera les différentes étapes de l'expérience, les mécanismes physiques sous-jacents et les résultats obtenus.

## D. Organisation du travail

Pendant notre projet, nous avons divisé notre travail en quatre séances distinctes, chacune se concentrant sur des aspects spécifiques de l'expérience de transmission du son par laser. Voici comment nous avons organisé notre travail :

**Première séance :** Modulation et démodulation d'amplitude, notre objectif principal était de comprendre et d'expérimenter la modulation et la démodulation d'amplitude. Nous avons étudié les principes de base de ces techniques.

**Deuxième séance :** Transmission du signal sinusoïdal par laser dans l'air. Au cours de cette séance, nous avons poursuivi nos expérimentations en nous concentrant sur la transmission du signal sinusoïdal par laser dans l'air. Nous avons analysé la qualité du signal reçu puis vérifié les composants matériels pour assurer une transmission fiable pour la prochaine expérience.

**Troisième séance :** Transmission du son par laser avec une première tentative réussie. Cette séance était particulièrement importante car nous avons réussi notre première tentative de transmission du son par laser dans l'air.

**Quatrième séance :** Réalisation finale de l'expérience et identification des facteurs influençant la transmission. Dans cette dernière séance, nous avons finalisé notre expérience de transmission du son par laser en réalisant des ajustements et des optimisations supplémentaires. Nous avons étudié l'influence de différents facteurs tels que la distance, l'alignement du faisceau et les conditions environnementales sur la qualité de la transmission. Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier les facteurs critiques et d'évaluer les performances de notre système de transmission.

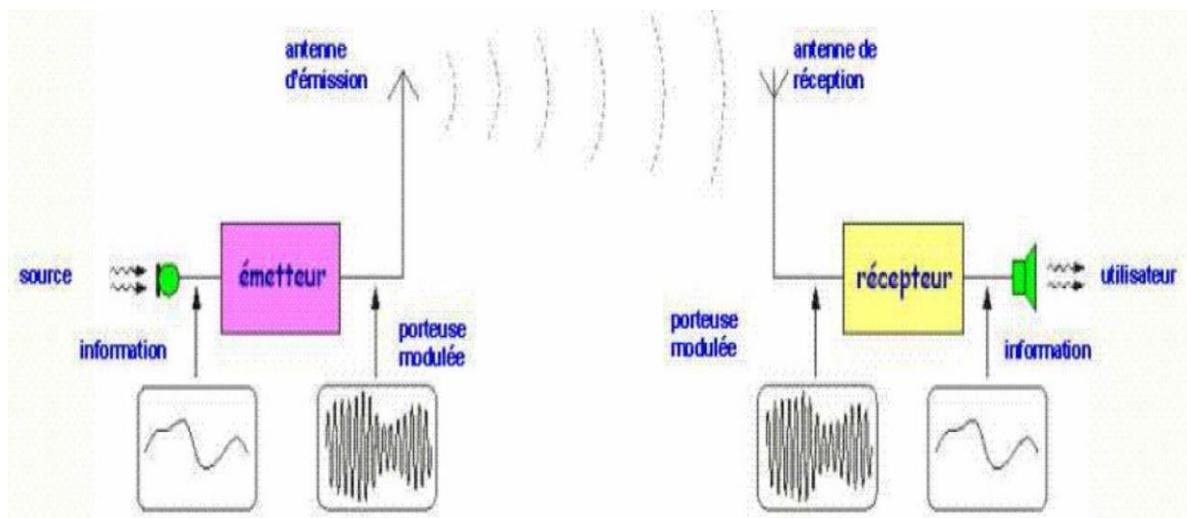
Grâce à cette organisation en séances distinctes, nous avons pu progresser de manière méthodique et ciblée tout au long du projet. Chaque séance nous a permis d'approfondir notre compréhension de la transmission du son par laser et de résoudre les défis techniques rencontrés.

## Première partie : Modulation et démodulation d'un signal sinusoïdal

### 1. Modulation d'un signal sinusoïdal

#### i. Partie théorique

La communication entre deux utilisateurs implique généralement deux processus essentiels : la modulation et la démodulation. L'objectif principal de ces processus est de permettre la transmission et la réception d'un signal contenant diverses formes d'informations telles que des signaux sonores, de la musique, des images, des données, et bien d'autres, d'un emplacement distant à un autre. Cette transmission de l'information se réalise à travers une chaîne de transmission complète, comprenant différentes étapes interconnectées, comme illustré dans le schéma ci-dessous. Lors de la transmission, le signal est modulé pour être adapté aux caractéristiques du canal de communication utilisé, tandis que lors de la réception, le signal est démodulé afin de récupérer l'information d'origine [1].



- Importance de la modulation :

La modulation revêt une importance cruciale dans les systèmes de communication, car elle permet de surmonter les limitations physiques des canaux de transmission et d'optimiser l'efficacité de la transmission de l'information. Voici quelques raisons clés qui soulignent l'importance de la modulation :

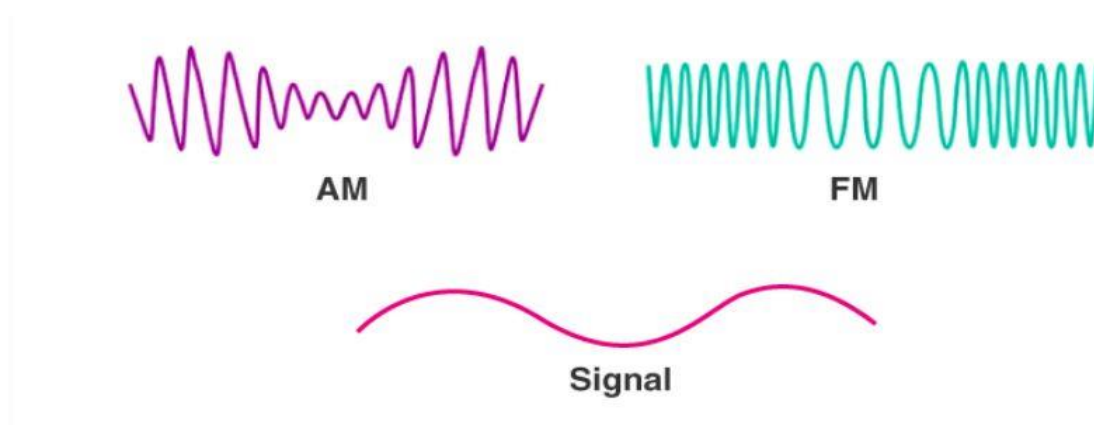
- 1- Adaptation aux canaux de transmission : Les canaux de communication ont des caractéristiques spécifiques, tels que la bande passante disponible, les atténuations et les distorsions. La modulation permet d'adapter le signal à ces caractéristiques, en utilisant des techniques appropriées pour une transmission efficace et une meilleure qualité de réception.
- 2- Transmission sur de longues distances : Les informations que nous souhaitons transmettre (parole, musique, vidéo...etc.) sont généralement des signaux basses fréquences BF. Par exemple, les ondes audibles ont des fréquences faibles [20Hz ; 20KHz] comparées aux fréquences des ondes lumineuses  $10^{14}$  Hz. Ces signaux BF ne peuvent pas se déplacer sur de très grandes distances, d'où la nécessité de la modulation.
- 3- Protection contre les interférences : La modulation permet de rendre le signal modulé plus résistant aux interférences et au bruit présents dans l'environnement de transmission. En utilisant des techniques de modulation appropriées, il est possible de minimiser les effets des perturbations et de garantir une meilleure qualité de réception

- Types de modulations :

Il existe plusieurs types de modulation couramment utilisés dans les systèmes de communication. Les principaux sont :

**Modulation d'amplitude (AM) :** Dans ce type de modulation, l'amplitude de l'onde porteuse varie en fonction de l'amplitude du signal modulant. L'information est transmise en modifiant l'amplitude du signal porteur.

**Modulation de fréquence (FM) :** Dans la modulation de fréquence, la fréquence de l'onde porteuse est modifiée proportionnellement à l'amplitude du signal modulant. Cela permet de transmettre l'information en utilisant les variations de fréquence du signal porteur.



Dans notre projet, on s'intéresse seulement à la modulation d'amplitude AM.



- Principe de la modulation :

La modulation d'amplitude AM consiste à translaté le spectre d'un signal base fréquence (modulant) par une porteuse haute fréquence de manière à pouvoir véhiculer plusieurs signaux simultanément. On distingue deux types de la modulation d'amplitude : AM à porteuse conservée et AM à porteuse supprimée. A l'aide d'un multiplieur, on obtient le signal modulé  $s(t)$  par la multiplication de deux signaux : le modulant  $u_m(t)$  et la porteuse  $u_p(t)$ .

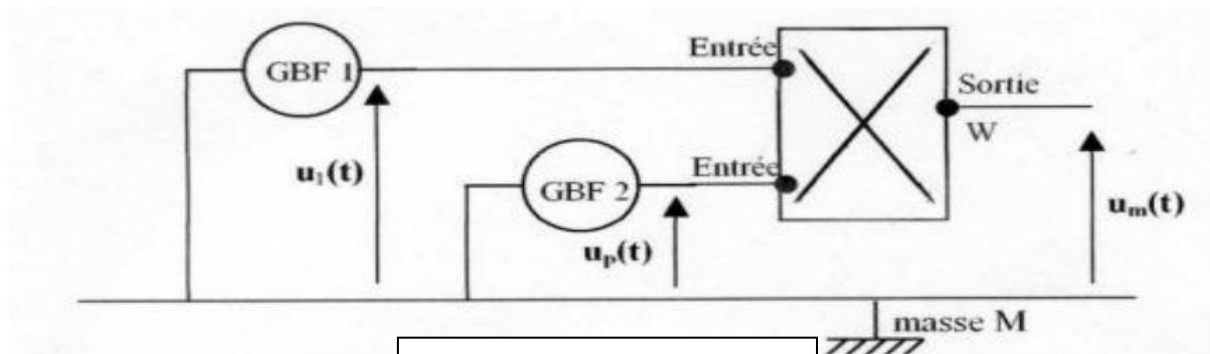
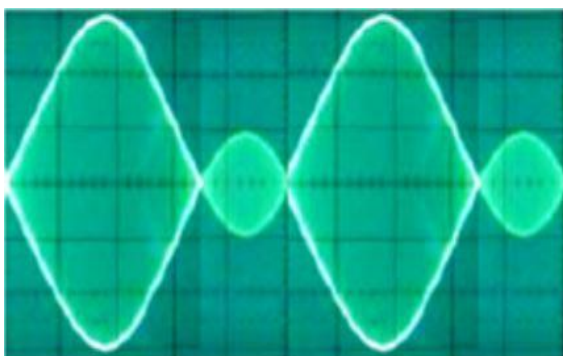


Figure 1 : Circuit de modulation

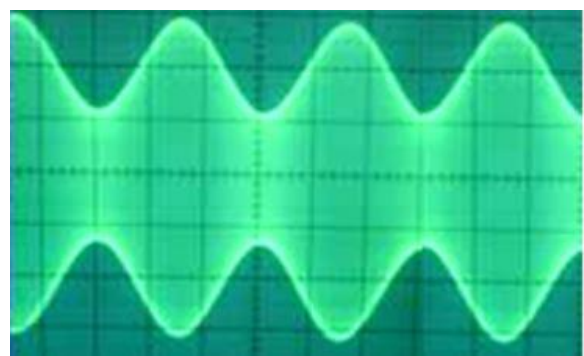
- Signal d'information :  $U_1(t) = A_1 * \sin(2\pi f_1 t)$
- Onde porteuse :  $U_p(t) = A_p * \sin(2\pi f_p t)$
- Multiplication des signaux :  $U_m(t) = U_1(t) * U_p(t) = (A_1 * \sin(2\pi f_1 t)) * (A_p * \sin(2\pi f_p t))$   
 $U_m(t) = A_1 * A_p * \sin(2\pi f_1 t) * \sin(2\pi f_p t)$
- Utilisation de l'identité trigonométrique  $\sin(a) * \sin(b) = (1/2) * [\cos(a - b) - \cos(a + b)]$  :  
 $U_m(t) = (1/2) * A_1 * A_p * [\cos(2\pi f_1 t - 2\pi f_p t) - \cos(2\pi f_1 t + 2\pi f_p t)]$
- Simplification en utilisant les identités trigonométriques  $\cos(-\theta) = \cos(\theta)$  et  $\cos(\theta + \pi) = -\cos(\theta)$   
 $U_m(t) = (1/2) * A_1 * A_p * [\cos(2\pi (f_p - f_1) t) - \cos(2\pi (f_p + f_1) t)]$

- Condition importante

Pour prévenir le repliement spectral et assurer une récupération précise de l'information, la fréquence de la porteuse doit être suffisamment élevée pour permettre un échantillonnage adéquat du signal modulé. Si la fréquence de la porteuse est inférieure à deux fois la fréquence maximale du signal, des problèmes de repliement spectral se produisent, entraînant la confusion des fréquences et la perte d'information. Respecter cette condition garantit un échantillonnage approprié et permet une démodulation précise pour récupérer l'information d'origine [2].



**Mauvaise modulation :  $2f_1 > f_p$**



**Bonne modulation :  $2f_1 < f_p$**

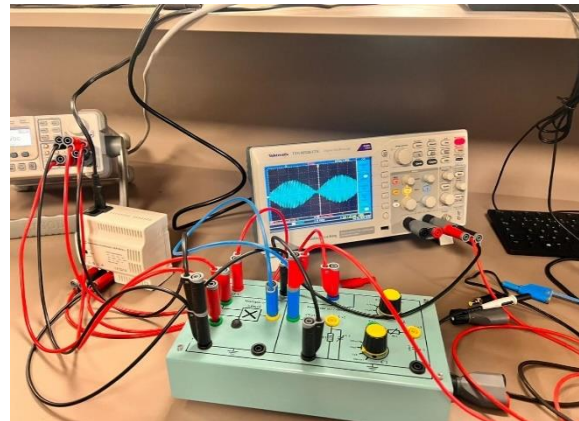
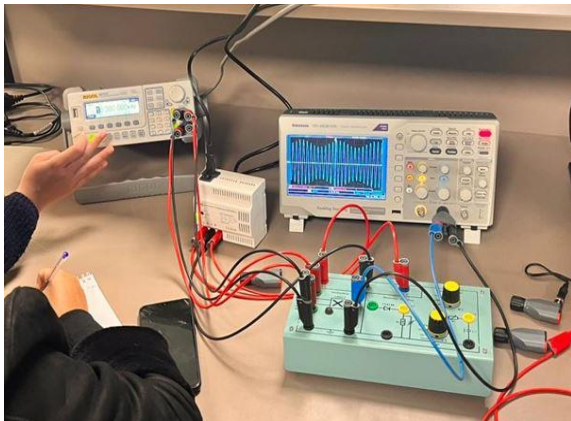
## ii. Travail expérimental

### a. Liste de matériel

Matériel	Quantité
Multiplieur	1
Oscilloscope	1
GBF	1
Alimentation	1 (+15V -15V)

### b. Présentation du montage expérimental

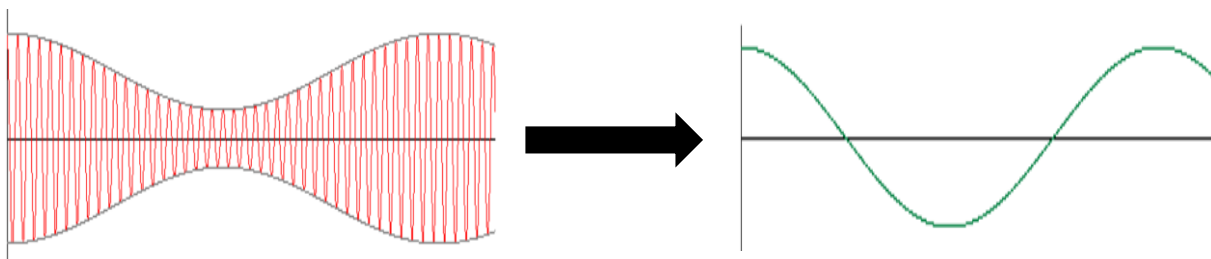
Comme nous avons précédemment dit : ils existent deux types de modulation d'amplitude : bonne ou mauvaise. Nous avons réalisé notre modulation pour les deux types. En suivant le montage sur figure 1, nous avons réalisé le circuit suivant :



## 2. Démodulation d'un signal sinusoïdal

### i. Partie théorique

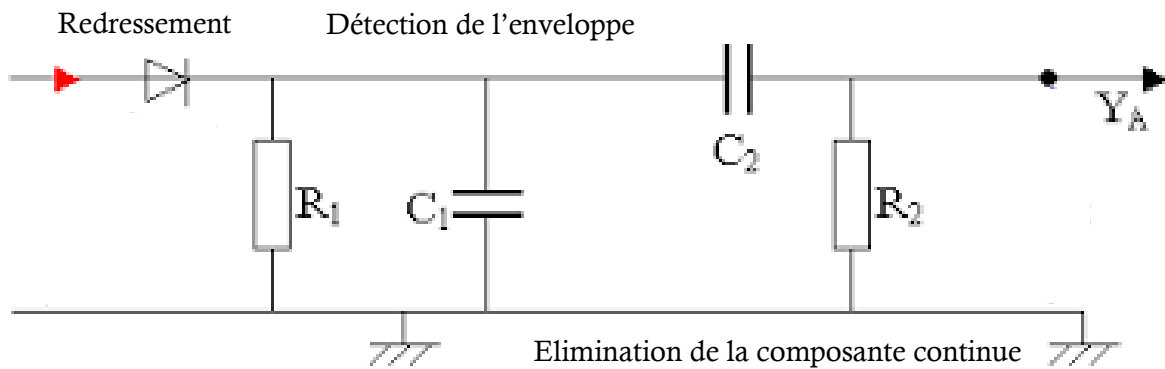
Pour recevoir cette l'information transmise, il est indispensable de séparer l'onde porteuse de haute fréquence du signal à modulé pour restituer l'information. C'est la démodulation [3].



Cette démodulation s'opère en trois étapes :

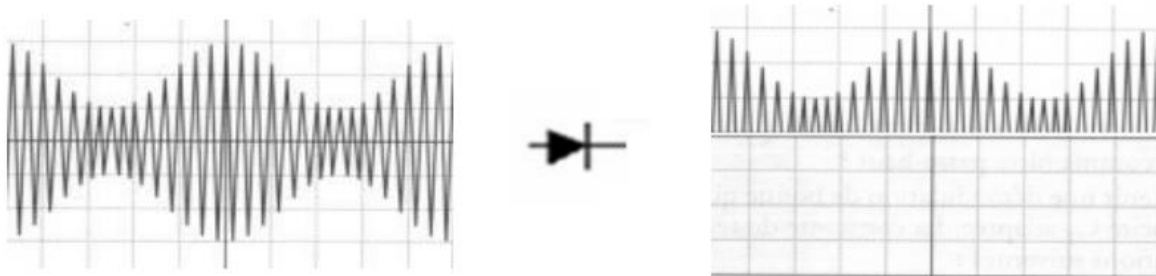
- Le redressement du signal modulé.
- La détection de l'enveloppe.
- L'élimination de la composante continue





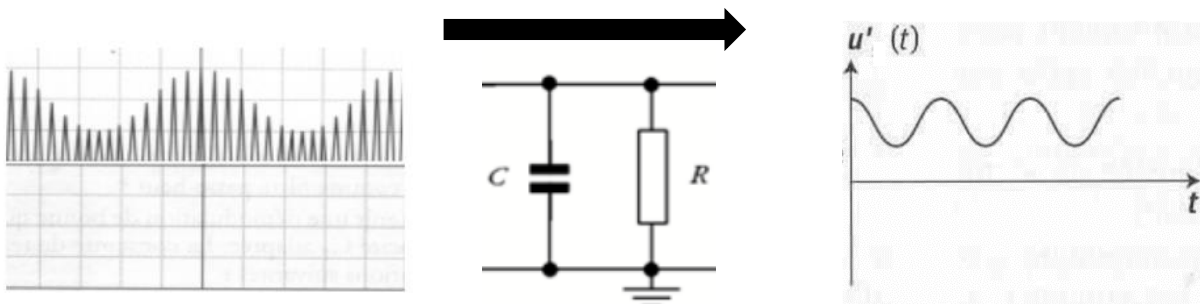
- Redressement du signal modulé

Il s'agit d'un montage redresseur simple, qui consiste à récupérer la partie positive du signal modulé à travers la diode qui ne laisse passer le courant que si la tension à ses bornes est positive.



- Détection de l'enveloppe

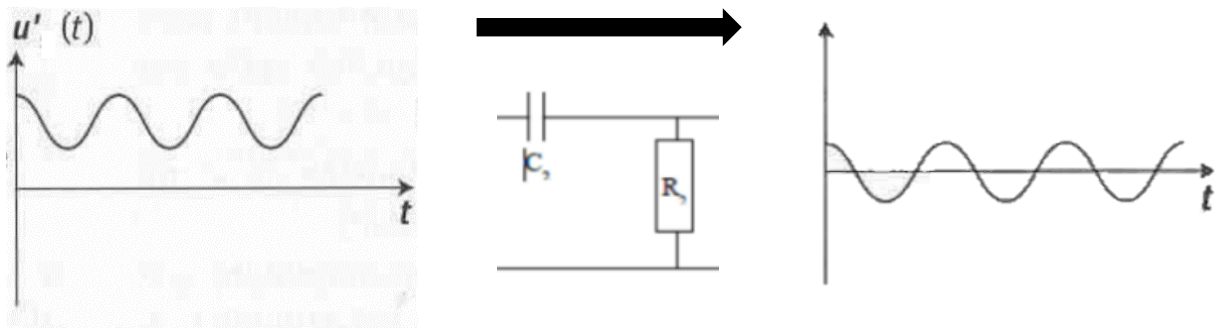
La détection de l'enveloppe du signal modulé se fait en fonction d'un filtre **passé-bas** constitué d'un dipôle (RC) placé en parallèle qui élimine l'onde porteuse de haute fréquence et garde le signal modulant de basse fréquence (l'enveloppe du signal modulé).



En effet, on utilise le condensateur dans le circuit tel que le produit RC soit très grand devant la période  $T_P$  de la porteuse et que ce même produit RC soit très faible devant la période  $T_s$  du signal modulant (basse fréquence).

- Elimination de la composante continue

Pour éliminer la composante continue nous avons besoin d'un filtre **passé-haut**, qui le circuit RC, monté en série, ce filtre ne laisse passer que les hautes fréquences donc il va permettre la suppression de la composante continue  $U_0$  due à la tension de l'offset



## ii. Travail expérimental

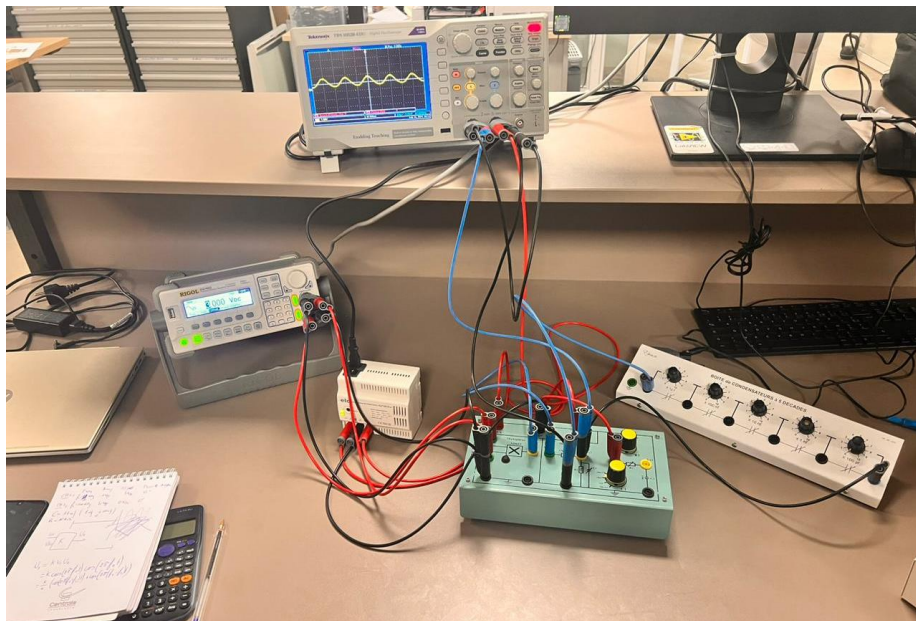
### a. Liste de matériel

Matériel	Quantité
Multiplieur	1
Oscilloscope	1
GBF	1
Alimentation	1 (+15V -15V)
Condensateur réglable	1

### b. Présentation du montage expérimental

Dans la première partie de notre expérience, nous avons utilisé une onde sinusoïdale de 100Hz pour moduler en amplitude une porteuse de 2kHz. On a remarqué lors de l'expérience que l'enveloppe supérieure d'un signal AM a la même forme que le message tant que l'indice de modulation est inférieur ou égal à 1. Ainsi, il s'avère que la meilleure façon de récupérer le signal du message à partir de la porteuse modulée c'est d'isoler uniquement l'enveloppe du reste du signal modulé.

A partir du montage de modulation, on relie la sortie du premier multiplieur aux bornes du montage comportant le circuit RC + diode passante.

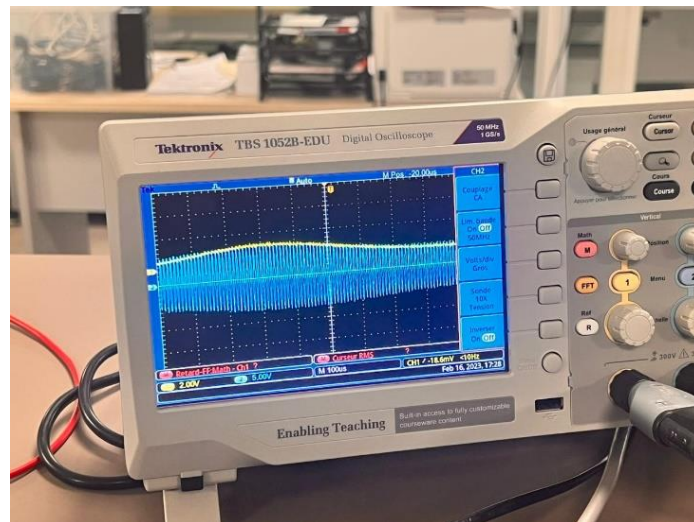


### c. Résultats de l'expérience

Après avoir choisi des valeurs précises de résistance et du condensateur du filtre passe-bas, nous avons pu détecter l'enveloppe du signal modulé qui est le même signal qu'au début et qui contient l'information à transmettre mais additionné d'une composante continue.

Pour utiliser les valeurs calculées, nous avons besoin d'un condensateur additionnel que nous avons branché en parallèle avec le condensateur du multiplieur.

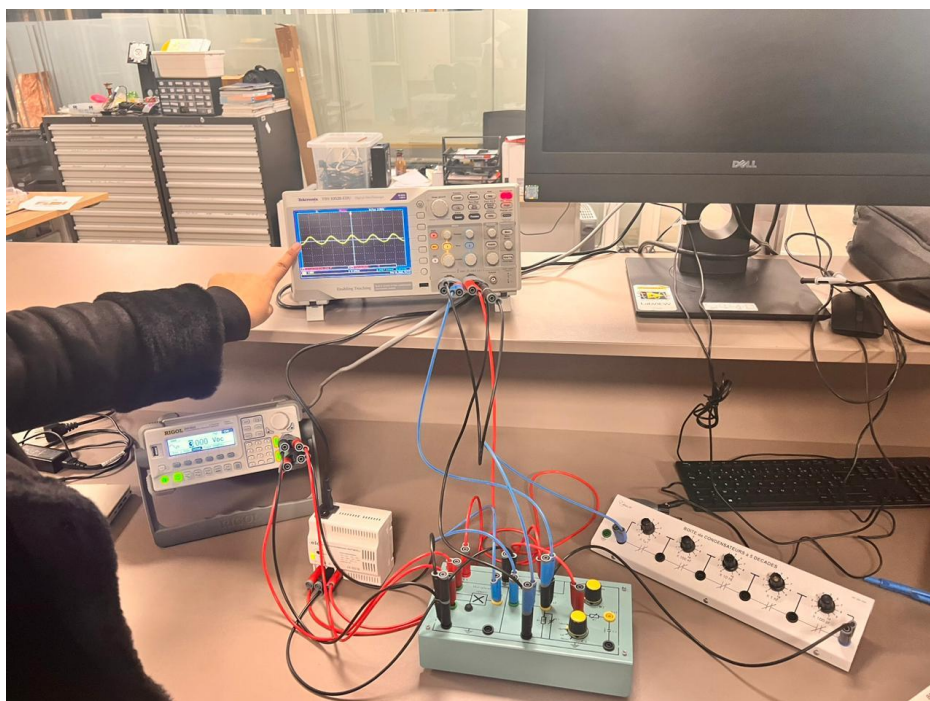
Les résultats que nous avons obtenus sont représentés dans l'image qui suit :



Avec : **Bleu** : Signal modulé

**Jaune** : Signal issu du branchement avec la sortie du filtre passe-bas

Ainsi, après avoir éliminé la composante continue par le filtre passe-haut, on obtient le signal initial qui contient l'information.



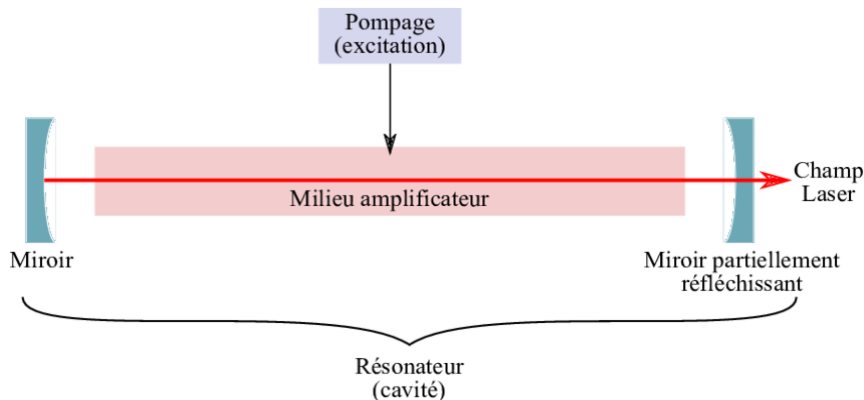
## Deuxième partie : Transmission de l'information par laser

### 1. Partie théorique :

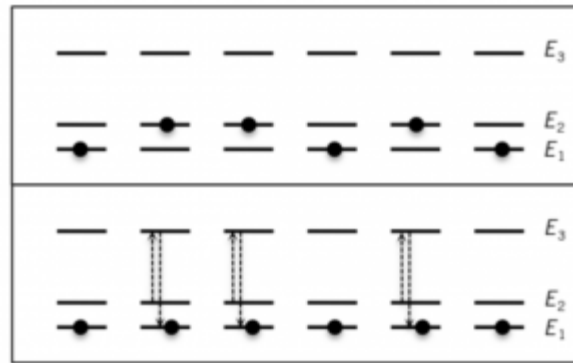
#### i. Laser

Le mot laser est à l'origine un acronyme pour "Light amplification by stimulated emission of radiation", c'est-à-dire « Amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ». Comme il apparaît dans cette dénomination, l'émission stimulée, ou émission induite, joue un rôle important dans le fonctionnement des lasers. Elle est donc un mécanisme clé qui permet au laser de générer une lumière cohérente, monochromatique et directionnelle, ce qui en fait un outil puissant dans de nombreuses applications scientifiques, médicales, industrielles et technologiques [4].

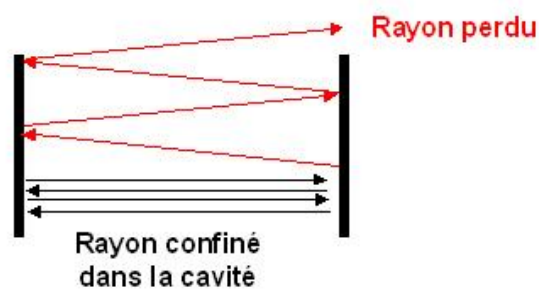
Les lasers sont composés de différents éléments qui travaillent ensemble pour produire un faisceau laser cohérent et amplifié. Les principaux éléments constitutifs d'un laser sont les suivants :



- **Milieu actif (ou milieu amplificateur) :** C'est un matériau qui est capable d'émettre de la lumière par émission stimulée. Le milieu actif peut être solide, liquide ou gazeux. Ce milieu est préparé dans un état énergétique où il peut être stimulé à émettre de la lumière dans une gamme de fréquences spécifique qui est caractéristique du milieu. Ce milieu est préparé dans un état d'inversion de population, où le nombre d'atomes ou de molécules excités dépasse le nombre d'atomes ou de molécules dans l'état fondamental. Cela crée une distribution d'énergie inversée, favorisant l'émission stimulée.
- **Source d'énergie de pompage :** Pour exciter le milieu amplificateur à l'état énergétique approprié, une source d'énergie externe est utilisée. Cette source peut être une lampe flash, un autre laser ou une décharge électrique. L'énergie fournie par la source de pompage est absorbée par le milieu amplificateur, ce qui provoque l'excitation des atomes ou des molécules à des niveaux d'énergie plus élevés.  
Le principe du pompage optique est décrit dans la figure ci-dessous. En haut, une assemblée de six atomes est répartie aléatoirement sur les états d'énergie  $E_1$  et  $E_2$ . En bas, après avoir éclairé les atomes avec des photons d'énergie  $E_3 - E_2$ , on a accumulé tous les atomes dans l'état d'énergie  $E_1$  : le désordre initial a été supprimé.



- **Cavité résonante (ou résonateur optique)** : La cavité optique est formée par deux miroirs placés aux extrémités du milieu actif : le miroir réflecteur est totalement réfléchissant alors que le miroir coupleur est partiellement réfléchissant pour permettre à une fraction de la lumière, qui constitue le faisceau laser, de sortir de la cavité. Ces miroirs réfléchissent la lumière à l'intérieur de la cavité, créant un trajet optique fermé. La cavité optique joue un rôle essentiel dans le processus de bouclage du laser, permettant l'amplification de la lumière par émission stimulée à chaque passage à travers le milieu amplificateur. Cette cavité impose au faisceau laser ses caractéristiques spatiales et temporelles, qui le distinguent de la lumière émise par les sources usuelles.

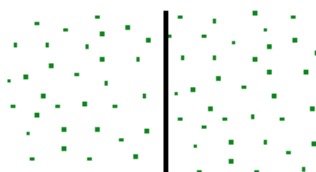


Lorsque l'énergie lumineuse est amplifiée à l'intérieur de la cavité optique, une partie de cette énergie s'échappe à travers l'un des miroirs réfléchissants. Ce faisceau de lumière émis, qui a été amplifié et possède des caractéristiques spatiales et temporelles spécifiques, constitue le faisceau laser.

## ii. Onde sonore

Les ondes sonores se propagent en se basant sur le principe suivant [5]:

fig. 1 - Membrane au repos



Pas de mouvement des particules de l'air autour de la membrane

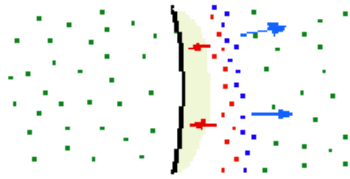
fig. 2 - Membrane en mouvement



Le mouvement crée une zone de dépression derrière la membrane, et une zone de pression devant. Les particules sont projetées par la membrane.

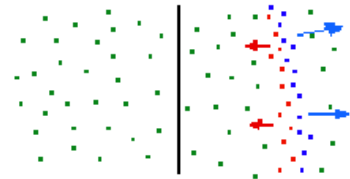


fig. 3 - Chocs entre particules



Les particules projetées par la membrane rencontrent les particules voisines. Lors du choc, les particules les plus proches de la membranes reviennent vers leur position initiale. Le retour de la membrane vers sa position d'origine recrée une dépression, mais ce sont les chocs qui provoquent le retour des particules vers leur point de départ

fig. 4 - Propagation du mouvement



Les particules qui avaient subi le choc des particules déplacées par la membrane rencontrent à leur tour les particules voisines, qui rencontreront elles-même les particules suivantes... propageant ainsi le son

### iii. Modulation d'amplitude d'un signal laser

Le signal sonore est modulé pour être converti en une variation de l'intensité lumineuse. La théorie physique impliquée est la modulation de l'amplitude (AM) : La variation de l'intensité du laser est directement proportionnelle au signal audio.

Soit  $I(t)$  l'intensité instantanée du faisceau laser à un instant  $t$ , et  $s(t)$  le signal audio à cet instant.

La modulation d'amplitude peut être exprimée comme suit :  $I(t) = (1 + m * s(t)) * I_0$

Où :

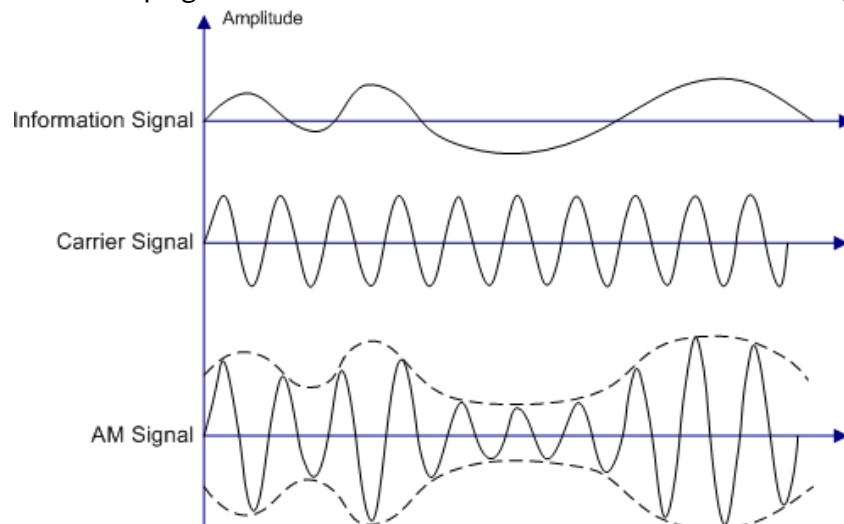
- $I(t)$  est l'intensité instantanée du faisceau laser modulé à l'instant  $t$ ,
- $m$  est l'indice de modulation, qui représente l'amplitude de la variation d'intensité en fonction du signal audio,
- $s(t)$  est le signal audio instantané,
- $I_0$  est l'intensité de base du faisceau laser sans modulation.

Dans cette équation, la partie  $(1 + m * s(t))$  modifie l'amplitude du faisceau laser en fonction du signal audio. Le facteur  $m * s(t)$  représente la variation proportionnelle à l'amplitude du signal audio.

Lorsque le signal audio est à son amplitude maximale ( $s(t) = 1$ ), l'intensité du laser atteint son maximum :  $I_{\text{max}} = (1 + m) * I_0$

Lorsque le signal audio est à son amplitude minimale ( $s(t) = -1$ ), l'intensité du laser atteint son minimum :  $I_{\text{min}} = (1 - m) * I_0$

L'amplitude de la variation d'intensité ( $m$ ) détermine l'étendue de la modulation et peut être contrôlée pour obtenir la plage souhaitée de variation d'intensité en fonction du signal audio [6].





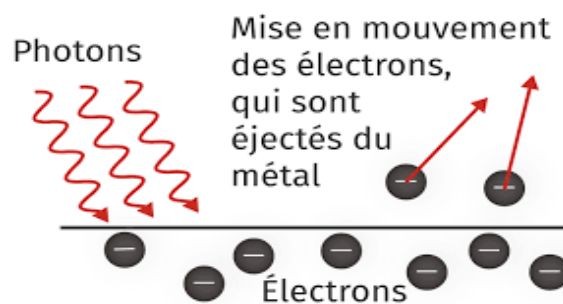
Une fois que le faisceau laser modulé quitte la source d'émission, il se propage dans l'air en transportant le signal audio.

#### iv. Interaction lumière-matière

L'interaction lumière-matière est un aspect clé de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Lorsque le faisceau laser atteint le panneau photovoltaïque, plusieurs phénomènes se produisent au niveau de l'interaction entre la lumière et le matériau semi-conducteur du panneau.

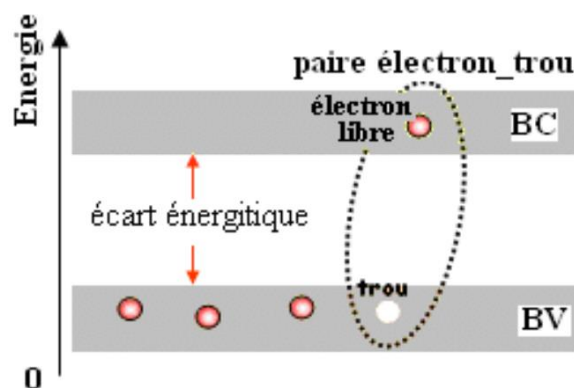
**Effet photoélectrique** : L'effet photoélectrique est le phénomène par lequel les électrons absorbent l'énergie des photons incidents et sont éjectés du matériau. Lorsque les photons du faisceau laser interagissent avec le matériau semi-conducteur du panneau, certains photons peuvent être absorbés par les électrons du matériau, provoquant leur excitation et leur libération de la bande de valence vers la bande de conduction [7].

- **Énergie d'un photon** :  $E = h\nu$ , où  $E$  est l'énergie du photon,  $h$  est la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s) et  $\nu$  est la fréquence du photon.
- **Énergie cinétique d'un électron éjecté** :  $E_c = E - \phi$ , où  $E_c$  est l'énergie cinétique de l'électron,  $E$  est l'énergie du photon et  $\phi$  est la fonction travail du matériau (énergie nécessaire pour libérer un électron).



**Génération de paires électron-trou** : Lorsque les électrons sont excités et se déplacent vers la bande de conduction, ils laissent derrière eux des trous (absence d'électrons) dans la bande de valence. Ces électrons et trous peuvent se déplacer librement dans le matériau semi-conducteur et contribuer au courant électrique. Ainsi, la lumière du laser peut générer des paires électron-trou, qui sont ensuite séparées par le champ électrique présent dans le matériau.

- **Taux de génération de paires** :  $G = \eta \times P$ , où  $G$  est le taux de génération de paires,  $\eta$  est l'efficacité quantique du matériau (probabilité qu'un photon absorbé génère une paire électron-trou) et  $P$  est la puissance optique incidente [8].



**La séparation des charges dans la jonction PN :** est un phénomène essentiel dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette séparation des charges crée une différence de potentiel électrique, également appelée tension de jonction, entre les régions N et P du matériau semi-conducteur du panneau photovoltaïque.

La différence de potentiel électrique est créée par la distribution inégale des charges électriques résultant de la séparation des électrons et des trous. Elle peut être décrite à l'aide de **l'équation du potentiel électrique**, qui est donnée par :

$$V = (V_{bi} - V_A) - (V_{bi} - V_D)$$

Dans cette équation :

- V est la différence de potentiel électrique entre les régions N et P.
- $V_{bi}$  est la tension de diffusion, également appelée tension de contact, qui est déterminée par les niveaux de dopage des régions N et P.
- $V_A$  est le potentiel d'anode, c'est-à-dire le potentiel de la région N par rapport à la région P.
- $V_D$  est le potentiel de drain, c'est-à-dire le potentiel de la région P par rapport à la région N.

La tension de diffusion ( $V_{bi}$ ) est déterminée par les niveaux de dopage des régions N et P et peut être calculée à l'aide de l'équation :

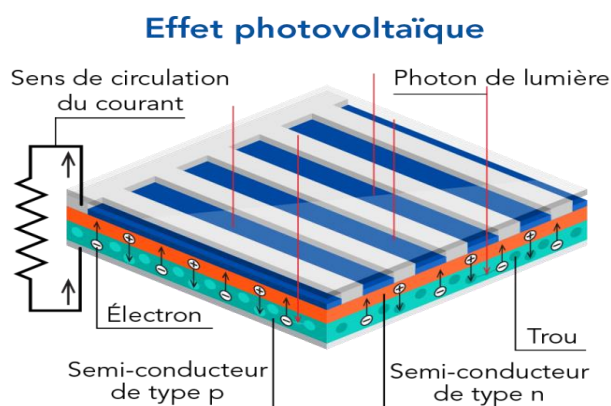
$$V_{bi} = (k * T / q) * \ln(N_A * N_D / n_i^2)$$

Dans cette équation :

- k est la constante de Boltzmann.
- T est la température absolue en kelvins.
- q est la charge élémentaire.
- $N_A$  et  $N_D$  sont les concentrations de dopage dans les régions N et P respectivement.
- $n_i$  est la concentration intrinsèque des porteurs de charge du matériau semi-conducteur.

La distribution inégale des charges résultant de la séparation des électrons et des trous crée un champ électrique au sein de la jonction PN, ce qui donne lieu à la tension de jonction. Ce champ électrique agit comme une barrière pour les porteurs de charge opposés, empêchant leur recombinaison et maintenant la séparation des charges.

Ainsi, la séparation des charges induite par la structure de la jonction PN crée une différence de potentiel électrique entre les régions N et P, ce qui permet la génération d'un courant électrique lorsque la lumière est absorbée par le panneau photovoltaïque [9].



## 2. Travail expérimental :

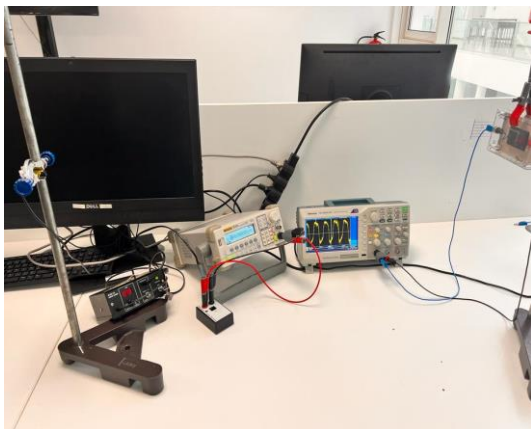
### 2.1. Transmission d'un signal sinusoïdal par laser

#### i. Liste de matériel

Matériels	Quantité
Laser	1
Boîtier de modulation	1
GBF	1
Oscilloscope	1
Cellule photovoltaïque	1
Support	2

#### ii. Présentation du montage expérimental

Dans le cadre de notre étude, nous avons entrepris une expérience novatrice visant à transmettre un signal sonore sinusoïdal de fréquence 100 Hz en utilisant un faisceau laser. Ces images capturées soulignent de manière visuelle cette transmission.



#### iii. Résultats et constatations

Dans notre expérience, nous avons utilisé un panneau photovoltaïque pour capter et transmettre un signal sinusoïdal par le biais d'un faisceau laser. Habituellement, les panneaux photovoltaïques produisent un courant continu en réponse à l'absorption de la lumière. Cependant, dans le cas de la transmission d'un signal sinusoïdal, nous avons observé que le panneau photovoltaïque était capable de capturer les variations du signal et de les transmettre à la sortie. La clé de cette observation réside dans le processus de modulation du signal. Avant d'être transmis par le laser, le signal sinusoïdal est modulé en utilisant une technique appropriée : la modulation d'amplitude (AM). Cette modulation permet de superposer l'information du signal sonore sur le faisceau laser. Lorsque le faisceau laser modulé atteint le panneau photovoltaïque, il interagit avec le matériau semi-conducteur du panneau, qui est généralement composé de jonctions PN. Cette interaction entre la lumière et les électrons du matériau semi-conducteur génère des paires électron-trou, qui sont ensuite séparées par la structure du panneau photovoltaïque. Cela crée un courant électrique

continu proportionnel à l'intensité du signal modulé. Bien que le signal sinusoïdal ne soit pas un signal continu en lui-même, il est converti en une variation du courant continu par le panneau photovoltaïque. Cette conversion est possible grâce aux propriétés des jonctions PN et aux processus de génération et de séparation des charges dans le matériau semi-conducteur.

## 2.2. Transmission d'un signal aléatoire par laser

### i. Liste de matériel

Matériel	Quantité
Laser	1
Boitier de modulation	1
Amplificateur GBF	1
Oscilloscope	1
Cellule photovoltaïque	1
Support	1
Haut-parleur	1
Téléphone	1
Polarisateur	1
Lentille convergente	1
Lentille divergente	1
Fibre optique	1

### ii. Préparatifs de l'expérience

Afin de vérifier le bon fonctionnement de tous les composants, nous avons procédé à une première étape consistant à tenter d'entendre un morceau de chanson provenant d'un téléphone portable, directement connecté à un haut-parleur. Malheureusement, cette configuration n'a pas permis d'obtenir un son clair, en grande partie en raison du mauvais fonctionnement du haut-parleur.



Les résultats obtenus ont donc révélé des problèmes avec le haut-parleur lui-même, ce qui a influé négativement sur la qualité sonore. Ces difficultés ont mis en évidence la nécessité de trouver une autre approche pour parvenir à une transmission sonore de meilleure qualité... et un autre haut-parleur.

Pour résoudre ce problème, nous avons envisagé d'ajouter un amplificateur à notre système. Cette solution vise à renforcer le signal sonore transmis, permettant ainsi d'obtenir un volume plus élevé et une meilleure clarté sonore.



En intégrant un amplificateur à notre configuration existante, nous pourrions accroître l'amplitude du signal sonore émis par le haut-parleur. Cela compenserait les pertes de volume causées par les bruits ambiants et d'autres facteurs, offrant ainsi une expérience d'écoute plus satisfaisante.

L'amplificateur, dans ce contexte, agirait comme un dispositif qui reçoit le signal sonore transmis par le câble jack-jack et augmente son intensité avant de le transmettre au haut-parleur.

L'ajout d'un amplificateur peut améliorer non seulement le volume sonore, mais aussi la fidélité du signal. Il peut contribuer à réduire le bruit de fond et à amplifier les fréquences audios importantes, offrant ainsi une reproduction sonore plus précise et détaillée.

Après avoir réalisé l'expérience, nous avons procédé à la visualisation du signal de sortie (image ci-dessous). Lors de cette étape, nous avons observé que le signal était en réalité composé de plusieurs signaux distincts.



Il est important de noter que ces premières tentatives de transmission étaient une étape de diagnostic visant à s'assurer que les différents éléments du système étaient opérationnels et identifier les problèmes éventuels. En abordant ces problèmes de manière proactive, nous pourrions progresser vers une configuration plus fiable et optimisée, permettant ainsi une meilleure expérience de transmission sonore par la suite.

### iii. Expérience et résultats

Nous avons utilisé un boîtier de modulation pour moduler l'intensité du faisceau laser avec le signal sonore que nous souhaitions transmettre. Le signal sonore était un enregistrement audio préalablement sélectionné, contenant des variations complexes d'amplitude et de fréquence. Le faisceau laser modulé a été projeté dans l'air sur une distance préétablie. Nous avons pris soin de garantir une focalisation adéquate du faisceau et de minimiser les pertes d'énergie lors de sa propagation dans l'air. Le panneau photovoltaïque était positionné de manière à intercepter le faisceau laser modulé. Lorsque le faisceau laser frappait le panneau, les variations d'intensité lumineuse correspondant au signal sonore étaient captées par le panneau photovoltaïque et converties en un signal électrique correspondant. Le signal électrique provenant du panneau photovoltaïque est passé par un amplificateur GBF et transmis au haut-parleur. Nous avons extrait le signal sonore et l'avons comparé au signal sonore d'origine pour évaluer la fidélité de la transmission.

Les résultats de notre expérience ont été prometteurs et ont confirmé la transmission réussie du son par laser dans l'air. Le faisceau laser a réussi à transporter avec précision les variations de pression acoustique du signal sonore, permettant ainsi une restitution fidèle du son à la sortie.



### iv. Facteurs influençant la transmission par laser

#### a. Influence du polarisateur

Nous avons effectué des expériences visant à étudier l'influence d'un polarisateur ajouté entre la source laser et la cellule photovoltaïque lors de la transmission d'information par laser. Les résultats obtenus ont révélé des variations significatives dans la transmission du signal en fonction de l'orientation du polarisateur.

Lorsque l'orientation du polarisateur était alignée avec la polarisation de la lumière émise par le laser, nous avons observé une transmission optimale du signal. Cela s'explique par le fait que le polarisateur permet le passage complet de la composante de polarisation parallèle à son orientation préférentielle. Ainsi, le signal modulé est transmis de manière efficace et la cellule photovoltaïque peut détecter un niveau de puissance maximal.



En revanche, lorsque l'orientation du polarisateur était perpendiculaire à la polarisation de la lumière, nous avons observé une transmission réduite, voire une absence de transmission du signal. Cela s'explique par le fait que le polarisateur bloque efficacement la composante de polarisation perpendiculaire à son orientation. Par conséquent, une grande partie du signal est bloquée et ne peut pas être détectée par la cellule photovoltaïque, entraînant une diminution significative de la puissance du signal reçu.



Ces observations sont cohérentes avec les principes fondamentaux de la polarisation de la lumière. Lorsque la lumière est polarisée, les oscillations du champ électrique se produisent dans une direction préférentielle. Le polarisateur agit comme un filtre sélectif qui transmet la composante de polarisation parallèle à son orientation et bloque la composante perpendiculaire. Ainsi, en ajustant l'orientation du polarisateur, nous pouvons contrôler sélectivement la transmission du signal modulé.

En conclusion, l'ajout d'un polarisateur dans le trajet entre la source laser et la cellule photovoltaïque a un impact significatif sur la transmission d'information par laser. L'orientation du polarisateur détermine la quantité de signal transmis et reçu par la cellule photovoltaïque. En comprenant les principes de la polarisation de la lumière et en ajustant judicieusement l'orientation du polarisateur, il est possible d'optimiser la transmission et la réception du signal, améliorant ainsi la qualité et la fiabilité de la transmission d'information par laser.

#### b. Influence de la distance entre la source et le récepteur

Nous voulons évaluer la sensibilité du système aux variations de distance entre l'émetteur et le récepteur. Pour ce faire, Nous avons transmis un même signal sonore par le laser en variant la distance entre la source et la cellule.

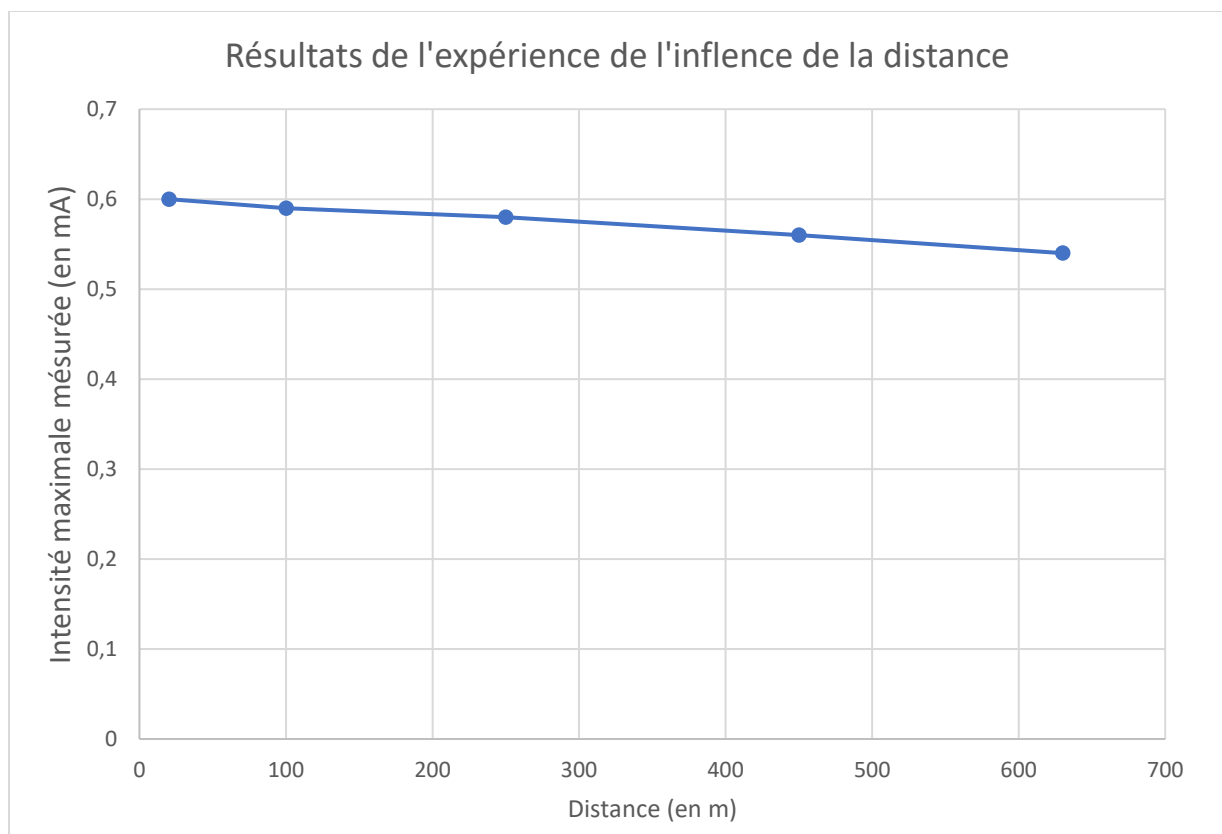
Pour mesurer cette influence, nous avons choisi de visualiser à chaque distance donnée le signal reçu par l'oscilloscope et d'en extraire sa valeur maximale d'amplitude.

Emetteur laser



Cellule  
photovoltaïque

La figure suivante illustre les différents résultats que nous avons trouvés :



Nous avons constaté que, dans une certaine plage de distance (moins de 6m), le système maintenait une transmission stable et une qualité de son acceptable.

Cependant, l'atténuation du signal est toujours observée. Cette atténuation est essentiellement due à la résistance de l'air dont le signal laser est transmis ainsi qu'aux erreurs dues au matériel utilisé.

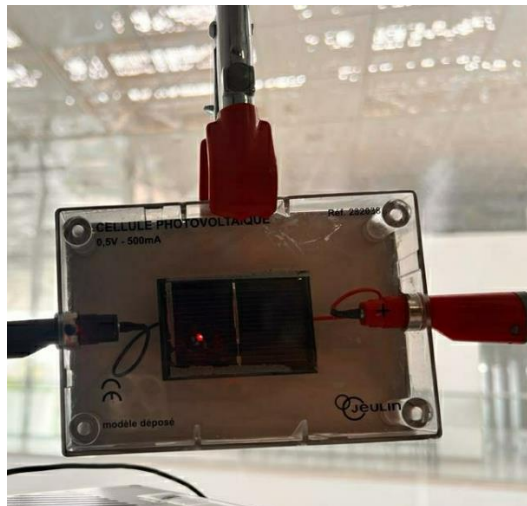
### c. Influence du rayon de la tâche

En utilisant un laser pour transmettre un signal sonore, l'intensité du laser et la taille de la tâche laser incidente peuvent exercer une influence sur la qualité de la transmission.

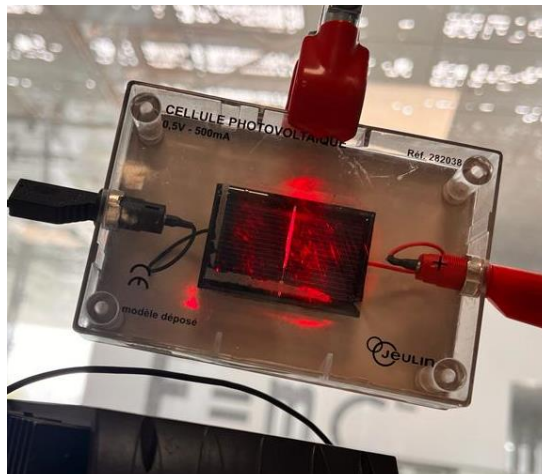
Tout d'abord, l'intensité du laser est importante car elle détermine la quantité d'énergie lumineuse qui est transférée à travers l'air vers le récepteur. Si l'intensité est trop faible, le signal sonore peut ne pas être suffisamment amplifié pour être perçu clairement par le récepteur et donc ne peut pas être suffisamment puissant pour être détecté par le panneau de réception. De l'autre côté, si l'intensité est trop élevée, cela peut provoquer des distorsions et des interférences qui peuvent affecter la qualité du signal. Or, en général, une intensité plus élevée du laser peut permettre une transmission plus efficace du son. Cependant, il est important de trouver un équilibre entre une intensité suffisamment élevée pour permettre une transmission fiable, mais pas si élevée qu'elle endommage la plaque photovoltaïque.

En ce qui concerne la taille de la tâche laser incidente sur le panneau, elle est importante car elle détermine la surface sur laquelle l'énergie lumineuse est concentrée.

En effet, si la tâche est trop **petite** (comme sur l'image ci-dessous), la quantité d'énergie transmise au récepteur est réduite, entraînant ainsi une perte de qualité de la transmission.

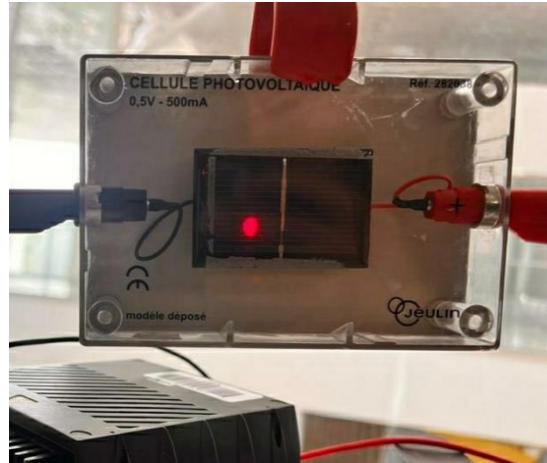


Si la tâche est trop **large**, le signal peut être diffusé sur une surface plus grande, ce qui peut entraîner une dispersion de l'énergie lumineuse, réduisant ainsi l'efficacité de la transmission.



En somme, l'intensité du laser et la taille de la tâche laser incidente sur le panneau peuvent exercer une influence sur la qualité de la transmission de son par laser. Il est important donc de trouver un équilibre entre ces deux facteurs pour garantir une transmission de qualité optimale.

Dans notre cas, on a ajusté la tâche de manière à ce qu'elle ne soit **ni petite ni grande** :

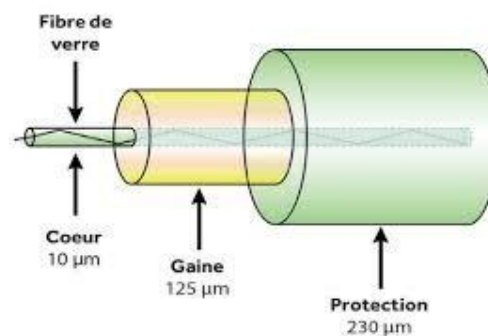


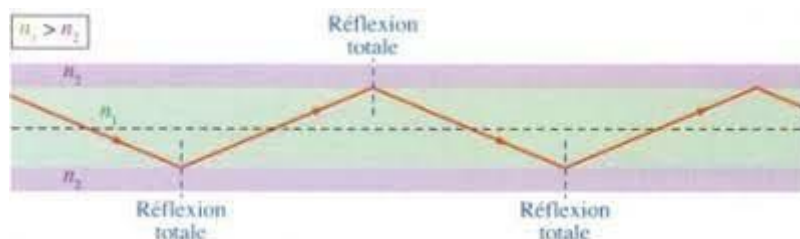
#### d. Influence du milieu de transmission

La résistance du milieu, en l'occurrence l'air, peut avoir une influence sur la transmission du son par laser. Lorsque le faisceau laser se propage à travers l'air, il peut rencontrer divers obstacles et subir des pertes d'énergie dues à des phénomènes tels que l'absorption, la diffusion et la réfraction. L'absorption de l'énergie laser par les molécules d'air peut entraîner une diminution de l'intensité du faisceau au fur et à mesure de sa propagation. Cette absorption est généralement plus prononcée pour les longueurs d'onde spécifiques du laser et peut varier en fonction de la composition de l'air et de la densité de molécules présentes. La diffusion est un processus par lequel la direction du faisceau laser est modifiée en raison des interactions avec les particules présentes dans l'air, telles que les poussières ou les gouttelettes d'eau. Cela peut conduire à une dispersion du faisceau et à une diminution de son intensité. De plus, la réfraction, qui est le changement de direction du faisceau lorsqu'il passe d'un milieu à un autre, peut également entraîner des pertes d'énergie. Lorsque le faisceau laser traverse différentes couches d'air avec des indices de réfraction différents en raison de variations de température ou de densité, il peut être dévié de sa trajectoire initiale.

Ces phénomènes combinés peuvent entraîner une atténuation du faisceau laser pendant sa propagation dans l'air, ce qui peut affecter la transmission du signal sonore.

Afin de surmonter cette limitation, nous avons envisagé l'utilisation d'un système de transmission par fibre optique.





La fibre optique permet une transmission plus efficace du signal sonore par rapport à l'air, car elle présente une atténuation beaucoup plus faible. Cela signifie que le signal peut être transmis sur de plus longues distances sans perte de qualité. Et contrairement à la transmission dans l'air, où le signal sonore peut être sujet à des interférences électromagnétiques provenant d'autres sources, la fibre optique offre une meilleure immunité à ces interférences. Cela garantit une transmission plus stable et moins sujette aux perturbations extérieures. De plus, elle offre une large bande passante (**500 MHz.km à près de 5 000 MHz.km pour les fibres optiques multimodales**), permettant la transmission de signaux sonores de haute qualité sur une gamme de fréquences plus large : transmission de sons complexes et détaillés sans perte de fidélité [10].

Cependant, dans notre expérience, nous avons rencontré des difficultés pour trouver une fibre optique compatible avec notre laser. Par conséquent, nous n'avons pas pu démontrer les avantages spécifiques de cette transmission par une expérience vu les pertes d'information entre le laser et l'entrée de la fibre optique. Néanmoins, il est important de souligner que, dans des conditions idéales, l'utilisation de la fibre optique aurait permis une transmission plus efficace et plus performante du son par rapport à la transmission dans l'air.



## E. Difficultés rencontrées

Lors de la réalisation de notre expérience, nous avons été confrontés à plusieurs difficultés techniques qui ont nécessité des efforts supplémentaires pour les surmonter.

Tout d'abord, la propagation du faisceau laser dans l'air a posé des défis. Des pertes d'énergie peuvent survenir en raison de l'absorption, de la diffusion et de la dispersion de la lumière dans l'air. Nous avons dû optimiser la focalisation du faisceau laser et minimiser les pertes d'énergie pour assurer une transmission efficace.

De plus, la détection précise du signal sonore à partir du panneau photovoltaïque a été une tâche délicate. La conversion des variations d'intensité lumineuse induites par le faisceau laser en un signal électrique correspondant nécessitait une sensibilité élevée. Nous avons dû effectuer des ajustements minutieux pour récupérer le signal sonore.

Enfin, l'identification des facteurs influençant la transmission du son par laser s'est avérée plus complexe que prévu. Bien que nous ayons réussi à transmettre avec succès le son par le laser, il était difficile d'isoler et d'analyser l'effet spécifique de chaque facteur sur la qualité de la transmission. Nous avons dû réaliser plusieurs séries d'expériences en variant les conditions environnementales, telles que la distance entre l'émetteur et le récepteur, pour comprendre l'influence de ces facteurs.



Malgré ces difficultés, notre persévérance et notre approche méthodique nous ont permis de surmonter ces obstacles et de mener à bien notre expérience. Ces défis rencontrés ont contribué à une meilleure compréhension des enjeux et des complexités de la transmission du son par laser dans l'air, et ils soulignent l'importance de la rigueur expérimentale et de l'adaptabilité lors de la réalisation de telles expériences.

## F. Conclusion

La formation expérimentale que nous avons suivie s'est révélée enrichissante, car elle nous a permis d'appliquer concrètement nos connaissances et compétences en physique. Parmi les domaines qui nous ont particulièrement intéressés, celui des télécommunications et de la transmission de l'information a pris une place prépondérante au cours des dernières décennies.

L'objectif de notre projet était de percer les secrets des télécommunications et d'approfondir nos connaissances dans ce domaine. Nous voulions comprendre comment un signal peut être transmis et récupéré, quels sont les facteurs qui influencent la reproduction parfaite d'un signal sur une distance donnée. Nous voulions également comprendre comment un son peut être porté par un faisceau lumineux, et l'importance de la modulation et de la démodulation dans ce processus. Toutes ces questions auxquelles nous avons pu répondre grâce à notre travail et que nous avons exposées dans ce rapport.

Ce rapport est le fruit d'un travail minutieux et laborieux de toute l'équipe. Nous avons passé de nombreuses séances au fablab, fait face à des échecs et des réussites, et avons bénéficié d'un encadrement précieux de nos professeurs qui nous ont aidés à surmonter nos difficultés et à mener à bien ce projet, qui a été une expérience enrichissante pour nous tous.

## G. Références bibliographiques

- [1] « Modulation du signal », *Wikipédia*. 13 novembre 2022. Consulté le : 20 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Modulation\\_du\\_signal&oldid=198623519](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Modulation_du_signal&oldid=198623519)
- [2] J. Tabuteau, « Modulation d'amplitude, démodulation », vol. 89, 1995.
- [3] A. Bulcke, « Modulation des signaux – Sciences de l'Ingénieur », 14 avril 2020. <https://si.blaisepascal.fr/1t-modulation-et-demodulation-de-signaux/> (consulté le 9 mai 2023).
- [4] « Le laser : principe de fonctionnement - Société Française de Physique ». <https://sfpn.net/fr/le-laser-principe-de-fonctionnement> (consulté le 29 mai 2023).
- [5] N. Martello, « Les ondes sonores », *éducation musicale — by nikkojazz*, 3 juillet 2012. <https://www.edmu.fr/2014/10/les-ondes-sonores.html> (consulté le 30 mai 2023).
- [6] A. Yohan, « Le son - de l'analogique au numérique ».
- [7] « 🔍 Effet photoélectrique : définition et explications ». <https://www.techno-science.net/definition/5118.html> (consulté le 22 mai 2023).
- [8] « Qu'est-ce qu'une paire électron-trou dans les semi-conducteurs - Définition ». <https://www.radiation-dosimetry.org/fr/quest-ce-quune-paire-electron-trou-dans-les-semi-conducteurs-definition/> (consulté le 28 mai 2023).
- [9] « 1bis\_diode\_intro\_semiconducteurs.pdf ». Consulté le : 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur : [https://www.emse.fr/~dutertre/documents/1bis\\_diode\\_intro\\_semiconducteurs.pdf](https://www.emse.fr/~dutertre/documents/1bis_diode_intro_semiconducteurs.pdf)
- [10] « Les fibres optiques - Notions fondamentales (Câbles, Connectique, Composants, Protocoles, Réseaux...) (3e édition) - Avantages des fibres optiques | Editions ENI ». <https://www.editions-eni.fr/open/mediabook.aspx?idR=616838281c89dd8903840389309dec47> (consulté le 19 mai 2023).