

LES VITRES ONT DES OREILLES



Adrien WEISSBECK, Pauline NASS, Kanto LIROT et Pablo PENARRUBIA,

encadrés par Marc STRUBEL et Arnaud BOIRON

Année 2020-2021

Résumé du projet

Le projet s'intéresse à un dispositif d'espionnage à distance utilisant une détection optique des vibrations d'un miroir ou d'une vitre sous l'effet d'un son, en particulier de la parole.

Le dispositif de base se compose d'un faisceau émis par une source laser, qui après réflexion sur un miroir est capté par une photodiode ou un phototransistor. Le capteur peut être simplement branché sur la prise casque d'un ordinateur et exploité grâce à un logiciel comme Audacity : ce fut la première partie de notre travail.

On peut aussi associer le capteur à un système autonome constitué d'un amplificateur et d'un casque, ce que nous avons réalisé ensuite.

Nous avons ensuite cherché à remplacer le miroir par une vitre. Il faut pour cela augmenter la sensibilité du dispositif, mais malgré cela le système fonctionne moins bien par réflexion sur une vitre.

Enfin nous avons utilisé un faisceau invisible : des infra-rouges, pour rendre le dispositif indétectable à l'œil.

Plan :

1. Premiers essais avec Audacity
 - 1.1. Essai "de vacances"
 - 1.2. Essais de labo

2. Elaboration d'un système autonome :
 - 2.1. Principe
 - 2.2. Comment le système fonctionne-t-il ?
 - 2.3. Quel laser choisir ?
 - 2.4. Quel capteur optique choisir ?
 - 2.5. Amplificateur
 - 2.6. Sensibilité du système d'essai.

3. Le problème de la vitre
 - 3.1. Augmentation de la sensibilité
 - 3.2. Essais

4. Essai à 35 m

5. Travail en infra-rouge
 - 5.1. Caractéristiques du laser IR
 - 5.2. Mesures de puissances
 - 5.3. Réflexion sur le verre ?

Introduction : Après bon nombre de recherches, un article du journal “Le Monde” suscite notre interrogation. Celui-ci présente une nouvelle technique d’espionnage mise au point par des chercheurs israéliens. En effet, on y parle sobrement d’écoute à distance, qu’ils appellent “lamphone”.

Cette technique permettrait à toute personne possédant un simple ordinateur accompagné d’un télescope et d’un capteur électro-optique d’écouter, instantanément tous les sons émis dans n'importe quelle pièce située à distance, pourvu que celles-ci soit éclairée par une ampoule, dont on capte les vibrations.

Notre projet s’inspire donc de ces recherches, dans le sens où il s’agit d’un système d’écoute basé sur la lumière. Nous allons donc tenter de reproduire cette technique dans l’optique de pouvoir réellement “écouter à travers les vitres”.

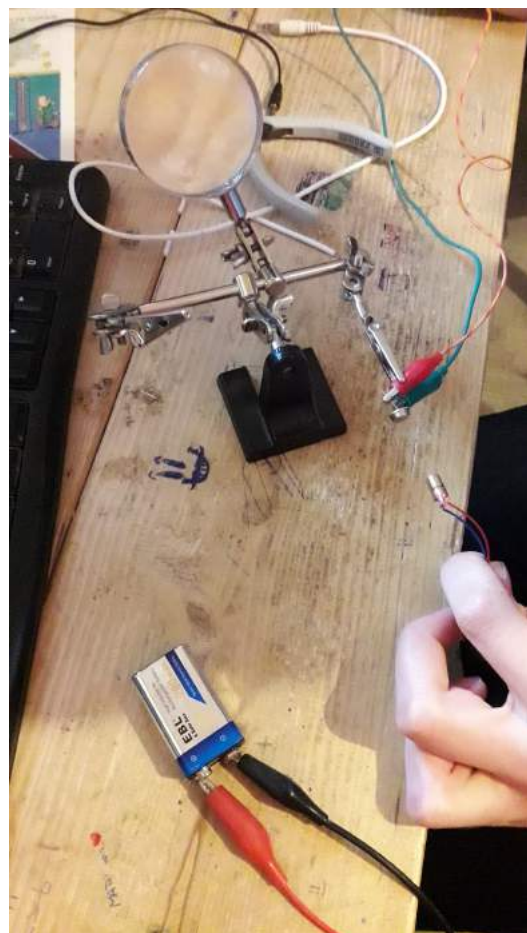
1. Premiers essais avec Audacity :

1.1. Essai “de vacances” :

Pendant les vacances, Kanto a réalisé chez elle un petit montage pour tester une expérience en utilisant le matériel fourni par le professeur : une **diode laser** ainsi qu’une **photodiode**. Elle a tout d’abord vérifié que la photodiode fonctionnait correctement en la connectant à l’aide d’un câble pour écouteurs à l’entrée casque d’un ordinateur, utilisant le logiciel Audacity , puis elle a testé la photodiode en déplaçant la diode laser pour faire varier le signal lumineux : on obtient bien des variations du signal électrique, la diode est fonctionnelle(photo 1).

Maintenant assurée que tout fonctionne, l’élève a réalisé un montage permettant la réflexion du laser sur une fenêtre. La photodiode est placée de sorte qu’elle puisse être dans l’axe du rayon réfléchi.

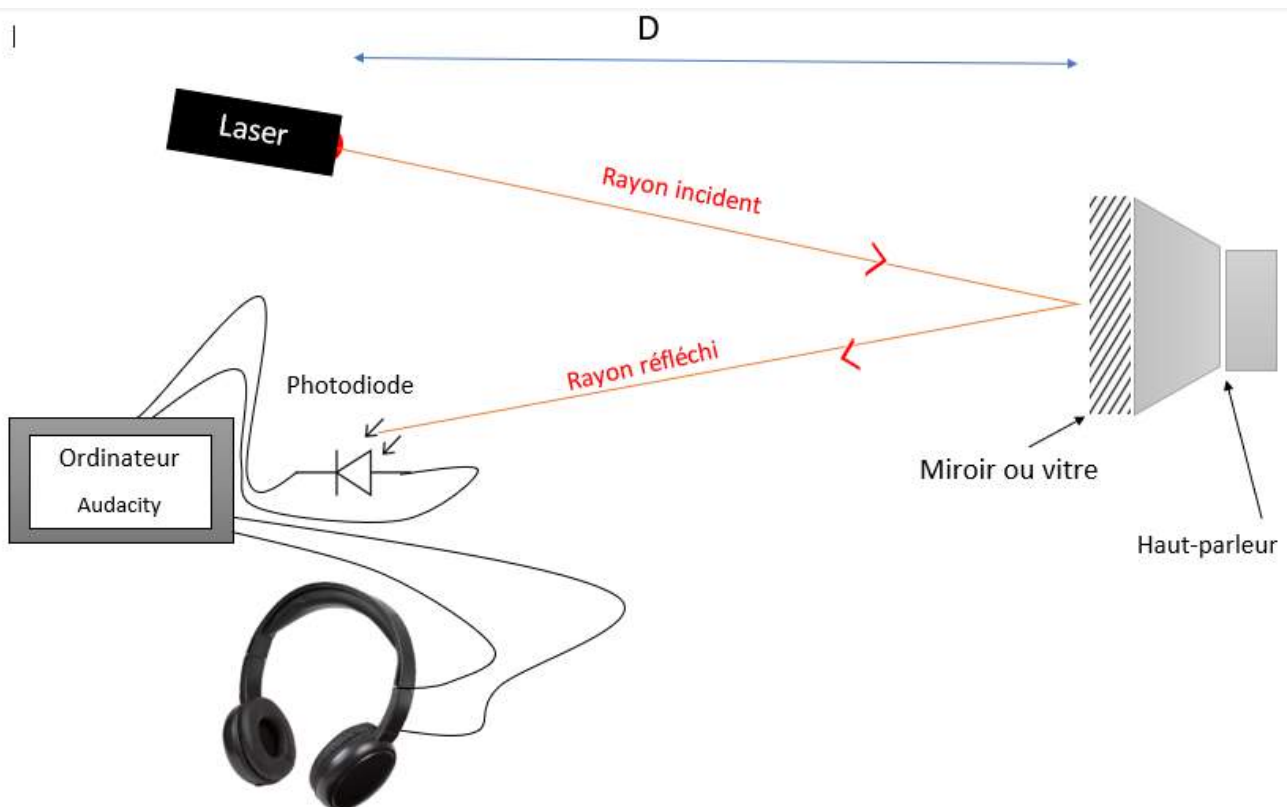
Deux tests sont effectués : l’élève se place derrière la vitre et toque dessus durant un intervalle de temps bien précis, l’enregistrement par Audacity révèle un résultat concluant, les “tocs” sont bien audibles. Dans un second temps, une enceinte est placée derrière la fenêtre, de la musique est lancée à plein volume, le rendu est moins concluant, seuls quelques sons de basses fréquences sont entendus. Le système est donc fonctionnel, mais pas assez sensible.





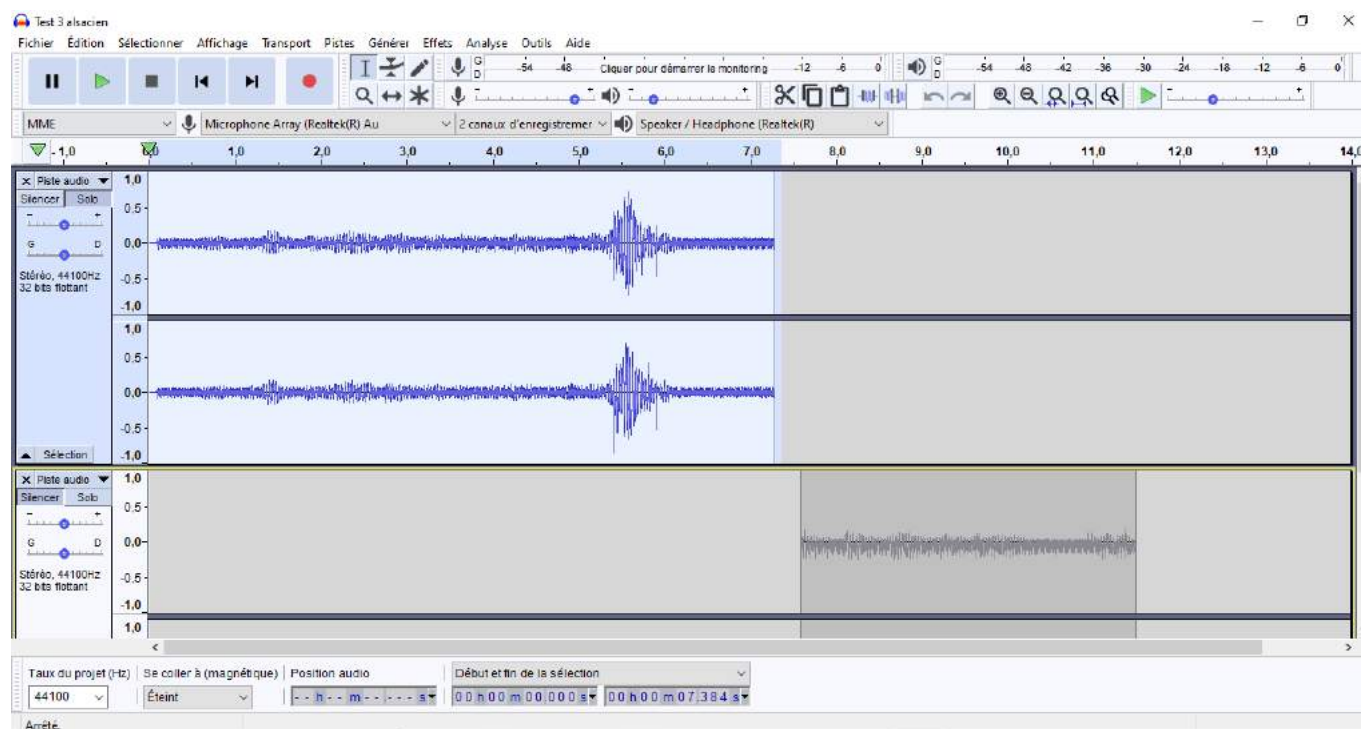
1.2. Essais de labo :

Les premières semaines de reprise des cours, nous nous attelons à la mise en place de notre premier système expérimental. Nous fixons tout d'abord un **miroir** sur un haut-parleur, puis nous plaçons le laser ainsi que la photodiode, servant de capteur, à quelques mètres de là.



Nous relierons ensuite la photodiode à un ordinateur en utilisant la prise micro jack. L'expérience consiste à pointer le miroir avec le laser, de telle sorte que le rayon réfléchi du laser arrive sur la photodiode, puis à crier près du miroir, pour le faire vibrer.

Les signaux sont ensuite enregistrés puis traités grâce au logiciel Audacity. Après traitement des fichiers sonores, le test est concluant : la voix de notre camarade est audible (voir fichier son en annexe) !



Nous décidons alors de réitérer l'expérience en plaçant le laser et la photodiode à 6m75 du miroir et en gardant le même principe. Après **amplification** du signal et **réduction du bruit** sur Audacity, ce deuxième test est également concluant, ses paroles sont non seulement audibles mais même intelligibles (pour peu que l'on comprenne l'alsacien).

Bien décidés à pousser l'expérience et galvanisés par nos récentes réussites, nous tentons d'utiliser ce qui se rapproche le plus d'une vitre et qui est à notre disposition : une vitre de téléphone portable. Les résultats de ce test sont beaucoup moins concluants et un peu décevants : le son n'a plus la même clarté, le signal capté est beaucoup plus faible et le rayon laser est beaucoup plus diffus. Dernier coup de massue, le traitement du son sur Audacity est beaucoup moins efficace.

Décus, mais non pas fatalistes, nous entreprenons d'élaborer un système autonome afin de nous affranchir des contraintes inhérentes à l'utilisation d'Audacity et d'un ordinateur.

2. Elaboration d'un système autonome :

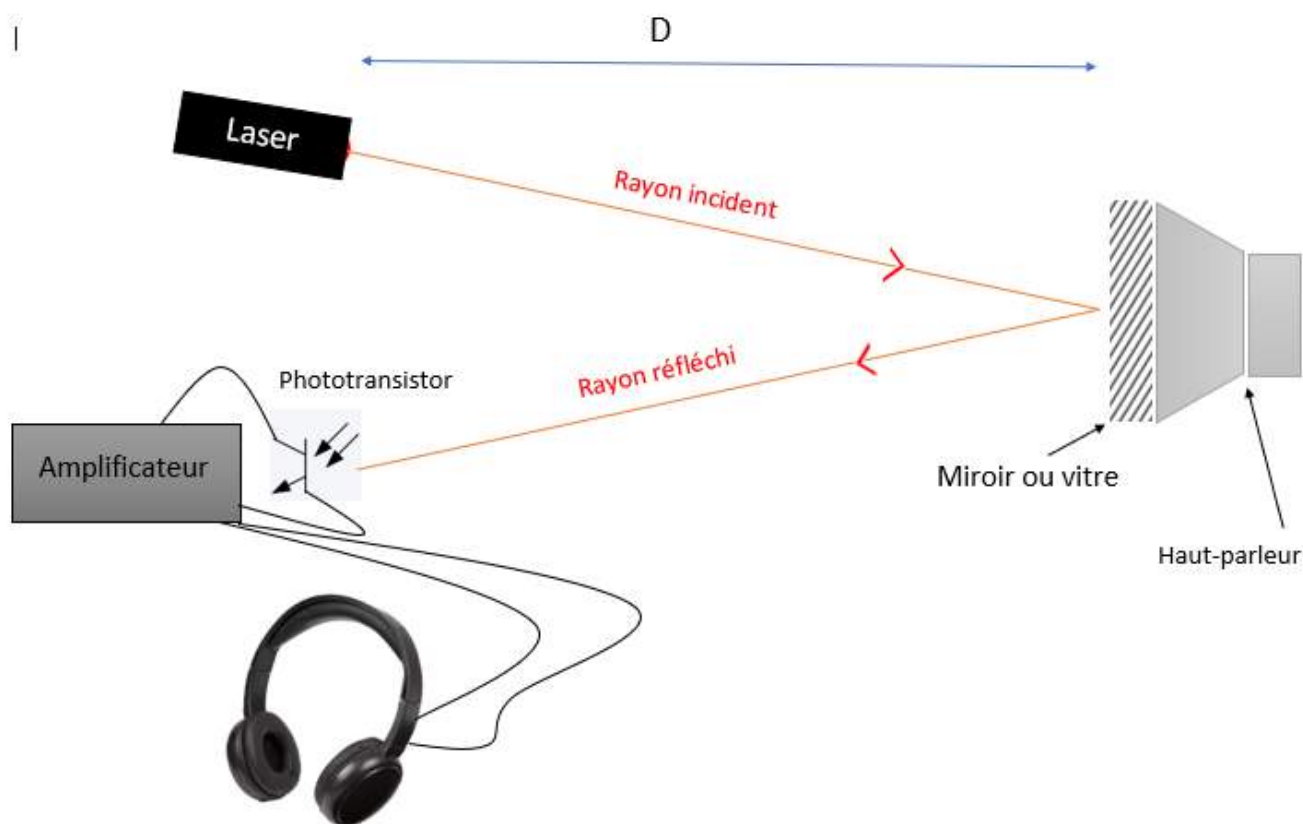
Nous avons voulu construire un système autonome qui permettrait de convertir de signal lumineux en signal sonore sans utiliser Audacity (ni d'ordinateur).

2.1. Principe :

Le système d'essai utilise un laser, et un capteur optique, relié à un petit amplificateur puis à un casque. Le rayon incident du laser est dirigé vers un miroir, de sorte que celui-ci soit réfléchi vers le capteur optique (phototransistor). Dans ce système d'essais, le son est émis par le haut-

parleur, qui est branché en sortie d'un générateur basse fréquence, générant un signal sinusoïdal de fréquence voisine de 500 Hz.

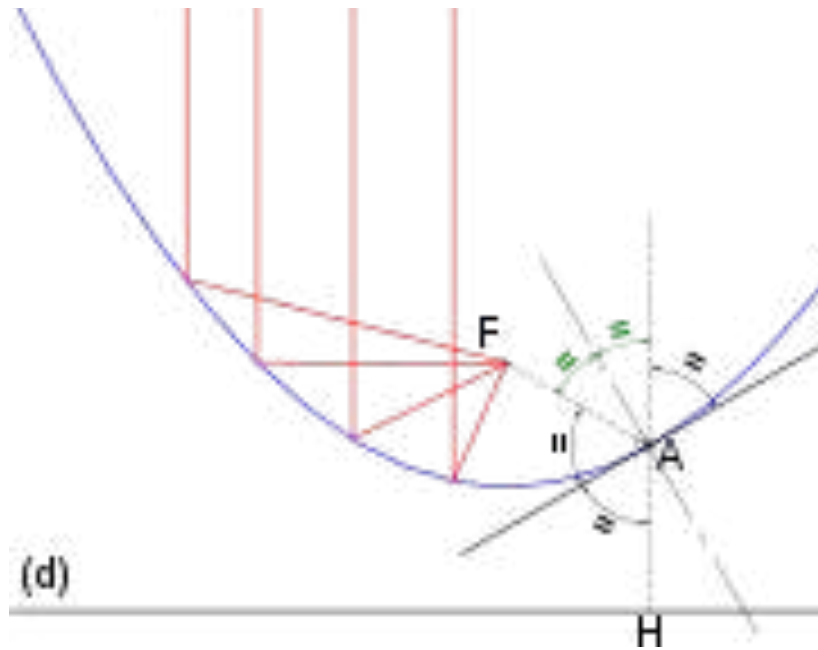
Cela nous permet de mettre au point le système, avant de remplacer le couple haut-parleur+miroir par le miroir seul ou une vitre, et d'utiliser la voix.



Les premiers essais sont concluants : le son du haut-parleur est audible et clair.

Nous supprimons le GBF et parlons ensuite directement devant le miroir accroché au haut parleur. Là encore, le résultat est concluant puisque la structure du haut parleur permettait d'augmenter la sensibilité du système.

Remarque : le fait de placer le miroir au centre du haut parleur contribue à optimiser le système. En effet, la structure de notre haut parleur étant de forme sensiblement parabolique, celle-ci offre une meilleure sensibilité à notre miroir et donc à notre système. Cela s'explique par le fait qu'une structure de forme parabolique a pour principe de concentrer toutes les ondes en un seul point que l'on appelle foyer. En définitive, le miroir sera donc placé de sorte à ce qu'il se trouve sur le foyer de notre parabole (haut parleur), dans l'optique d'avoir une concentration d'onde sonores plus conséquente qui lui offriront une meilleure sensibilité.



2.2. Comment le système fonctionne-t-il ?

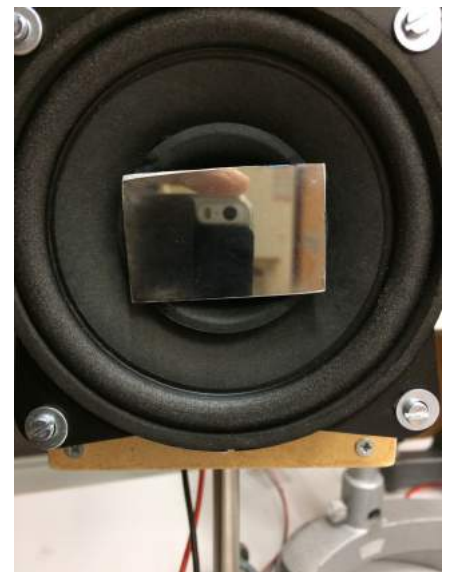
Comment comprendre précisément le phénomène qui nous permet d'écouter à distance ?

Le miroir est en fait constitué d'une couche métallique déposée sur une lame de verre ; une hypothèse est que le son déforme la lame de verre, et provoque des interférences entre les rayons réfléchis par la surface du verre et la surface du métal, interférences détectées par le phototransistor.

Pour tester cette hypothèse, nous avons décidé de changer notre bon vieux miroir par un morceau de disque dur d'ordinateur (photo ci-contre), très lisse et ayant une bonne capacité de réflexion.

La couche externe se compose généralement d'un alliage d'oxyde de fer, de nickel et de cobalt, surmontées d'une couche protectrice, le tout ne dépassant pas 1 millimètre d'épaisseur !

Si notre expérience est basée sur le phénomène d'interférences entre les deux rayons réfléchis par la vitre, alors nous ne devrions pas pouvoir avoir un quelconque résultat probant avec le disque dur, car il s'agit simplement d'une plaque métallique et il n'y aurait alors pas de possibilité d'interférences.



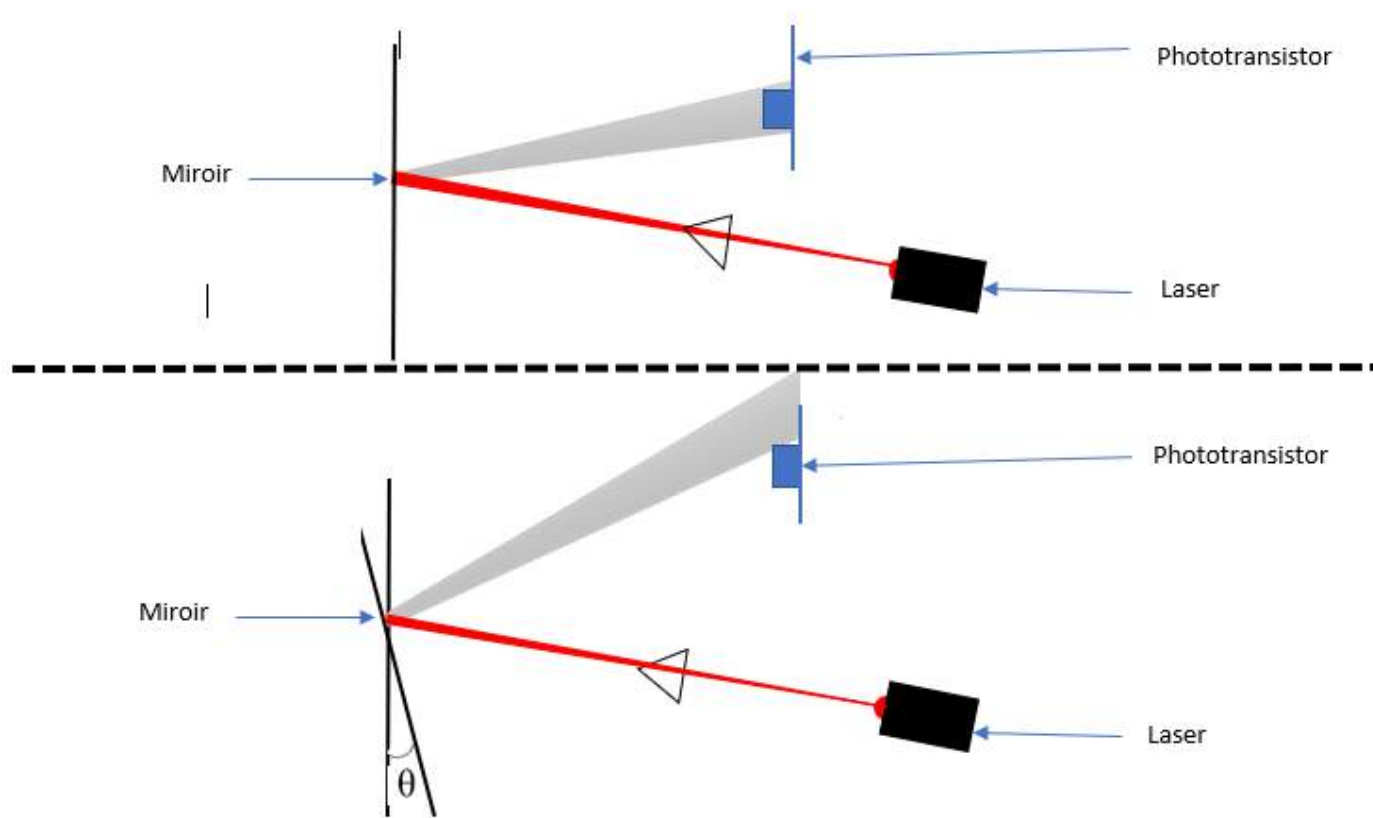
La réalisation de cette expérience ne diffère pas beaucoup des précédentes, à part :

- ❖ le remplacement du miroir par un morceau de disque dur ;
- ❖ l'ajout d'un oscilloscope afin de visualiser le signal réfléchi.

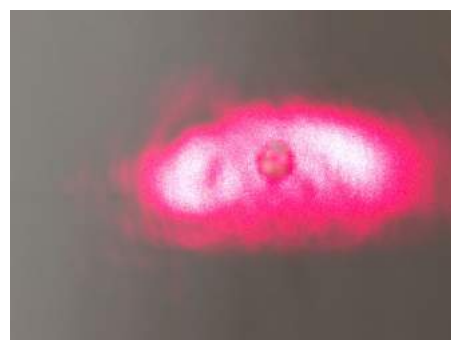
Nous nous plaçons à deux mètres du disque dur seulement, pour optimiser les chances de résultat.

Après expérimentation, nous avons obtenu un résultat, certes moins satisfaisant qu'avec un miroir mais tout de même audible ! Donc pas d'interférences en vue dans notre expérience !

Notre hypothèse est que l'onde acoustique provoque de légères rotations du miroir, donc du faisceau réfléchi : le phototransistor détecte une translation de la tâche.



Cette hypothèse semble corroborée par une autre constatation : le système est très sensible au positionnement de la photodiode sur la tache laser ; on doit se positionner sur une zone contrastée (ci-contre une image de la tache laser).



2.3. Quel laser choisir ?

Nous disposons de deux types de lasers (rouge) : un modèle commercial HeNe, alimenté en 220V, et de petites diodes laser achetées sur un site chinois, alimentées avec une tension continue de 4V.

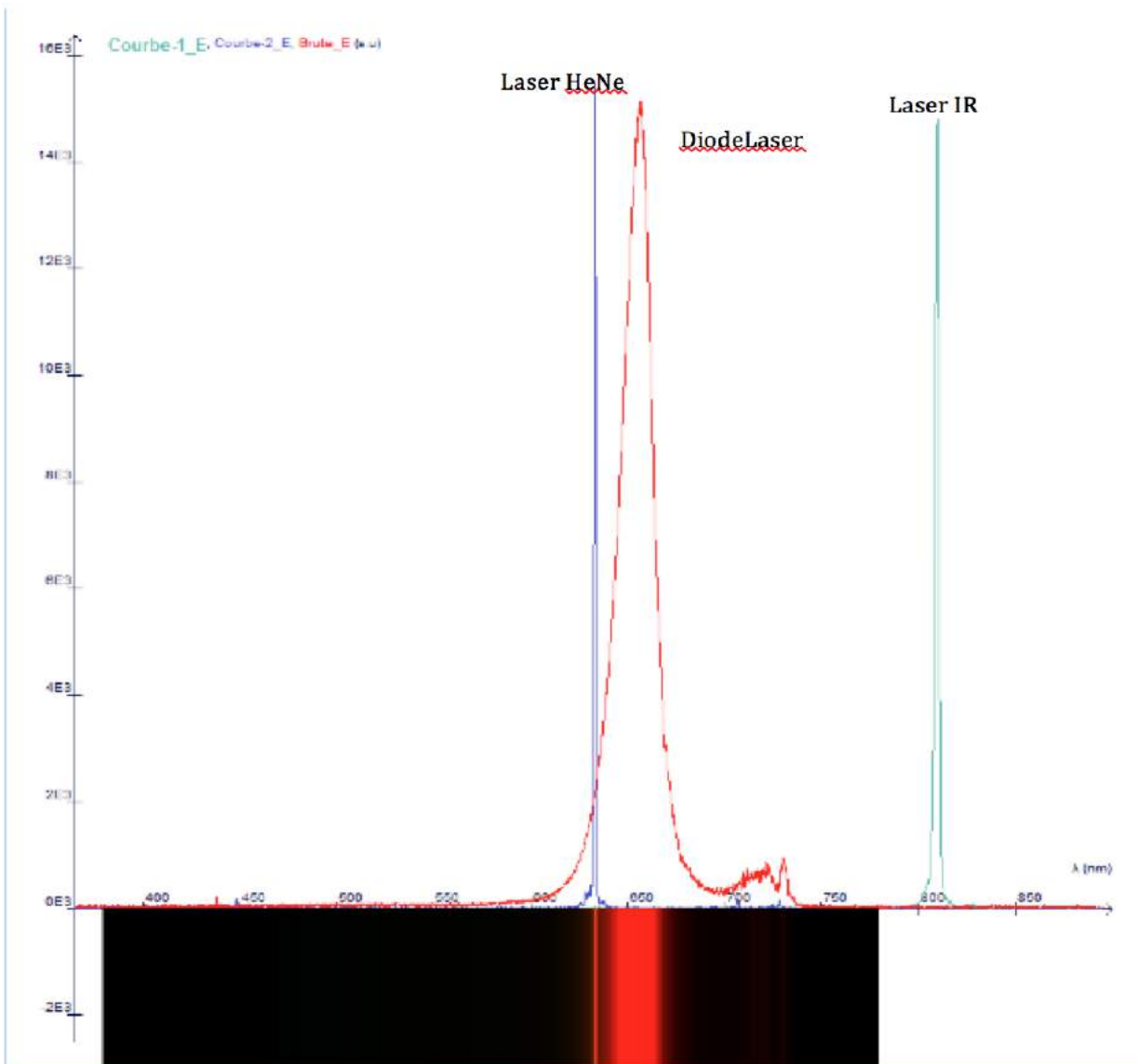


Nous avons mesuré leurs caractéristiques pour savoir lequel choisir.

Les caractéristiques d'un laser sont :

- sa longueur d'onde
- sa puissance
- sa divergence.

Nous avons mesuré les spectres grâce au logiciel Spectrovisio :



La puissance émise a été mesurée à l'aide d'un petit wattmètre.

Mesures à $D = 1,0$ m du laser

Laser HeNe : $P = 0,85 \pm 0,05$ mW

Diode laser : $P' = 4,1 \pm 0,1$ mW.

La divergence a été calculée en mesurant à l'aide d'une caméra CCD Caliens la largeur d de la tache laser pour différentes distances D laser-écran.

Mesures :

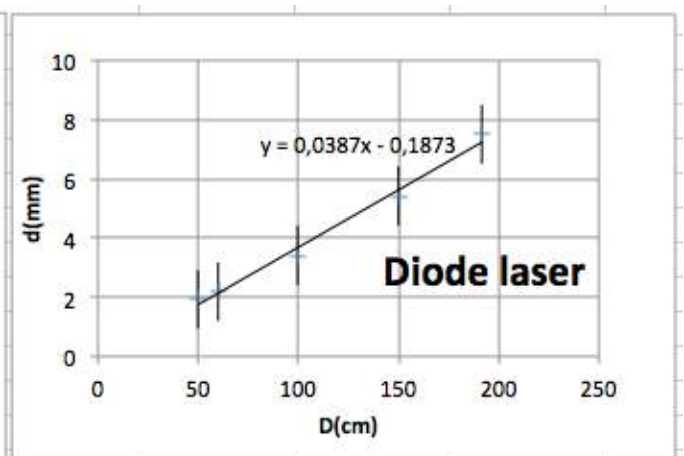
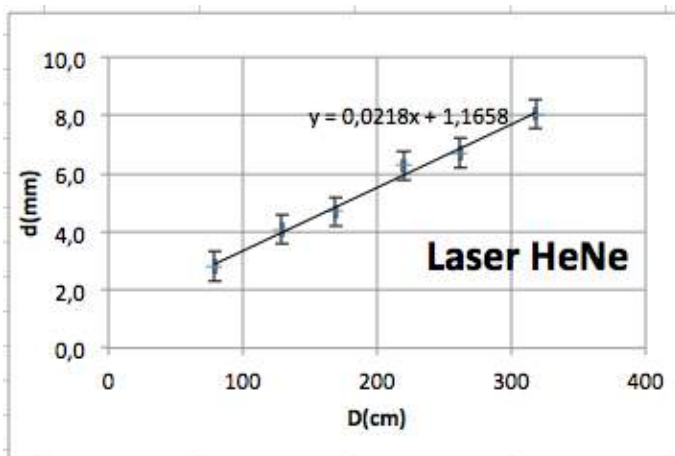
Laser HeNe 1		Diode laser (4V)	
D (cm)	d (mm)	D (cm)	d (mm)
169	4,7		1,94
129	4,07	60	2,2
220	6,28	100	3,4
318	8,05	150	5,4
262	6,7	192	7,5
79	2,8		

On peut estimer l'erreur sur D à 1 cm.

Pour le laser HeNe : $\Delta d = 0,5$ mm

Pour la diode : $\Delta d = 1$ mm

L'erreur sur d est plus grande pour la diode laser car la tâche n'est pas circulaire.



On constate que les angles de divergence sont :

Laser HeNe : $\theta = 2,2 \text{ mrad}$

Diode laser : $\theta' = 3,9 \text{ mrad}$

En conclusion, le laser HeNe, bien que moins puissant que la diode laser, diverge moins.

En conclusion de ces mesures, nous avons choisi d'utiliser la diode laser à grande distance pour sa puissance, l'étalement du faisceau n'étant pas un problème pour le dispositif.

Remarque : nous avons au cours de ces mesures constaté que l'intensité du laser HeNe fluctuait beaucoup au cours du temps. De plus, nous avons également mis en évidence un fort bruit à $f = 100\text{Hz}$, que nous avons tenté de corriger partiellement par un filtrage coupe-bande. Deux autres raisons qui nous ont fait préférer la diode laser.

2.4. Quel capteur choisir ?

Les caractéristiques d'un capteur sont sa sensibilité spectrale et sa sensibilité au flux lumineux.

Notre choix premier fût d'opter pour une photodiode BPW 21, dont les caractéristiques sont les suivantes:

Characteristics ($T_A = 25 \text{ °C}$)

Kennwerte

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Spectral sensitivity Fotoempfindlichkeit ($V_R = 5 \text{ V}$, standard light/Normlicht A, $T = 2856 \text{ K}$)	S	10 (≥ 5.5)	nA/lx
Wavelength of max. sensitivity Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit	$\lambda_{S \text{ max}}$	550	nm
Spectral range of sensitivity Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit	$\lambda_{10\%}$	350 ... 820	nm

L'éclairement lumineux dû au laser sur l'écran peut être estimé à $E = 10^4$ à 10^5 lx , soit un **photocourant de l'ordre de 10 à 100 μA** .

Le maximum de sensibilité est dans le vert .

Nous avons ensuite testé un phototransistor PS5132, dont les caractéristiques sont :

Electro-Optical Characteristics

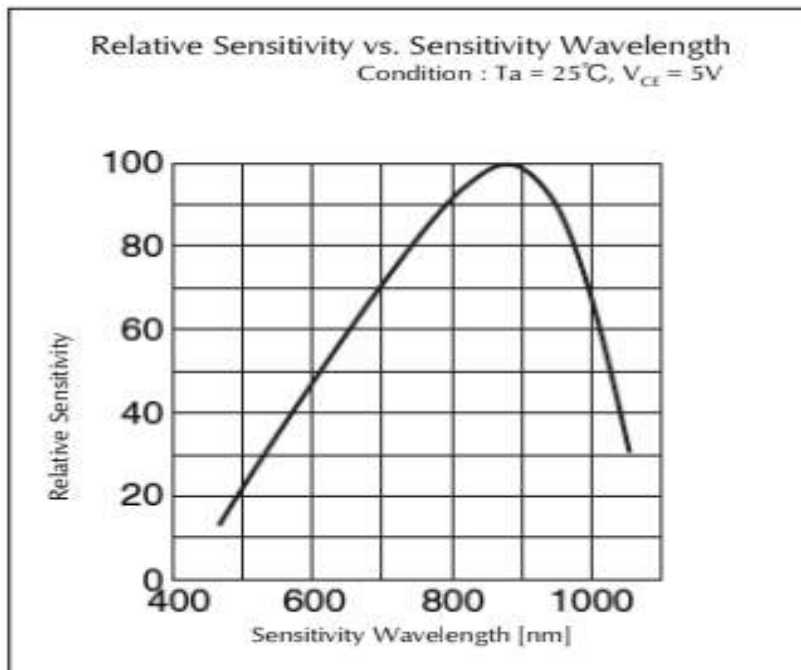
($T_a=25^\circ\text{C}$)

Item	Conditions	Symbol	Characteristics		Unit
			Min.	TYP.	
Photo Current	$V_{CE}=5\text{V}$, $E_e=10\text{mW}/\text{cm}^2$ *1	I_c	Min.	2.1	mA
			TYP.	6.3	mA
Response Time	$V_{CE}=10\text{V}$, $I_c=2\text{mA}$, $R_L=100\Omega$ *1	t_r/t_f	TYP.	5	μs
Dark Current	$V_{CEO}=10\text{V}$	I_{CEO}	Max.	0.2	μA
Peak Sensitivity Wavelength	$V_{CE}=5\text{V}$	λ_p	TYP.	880	nm
Spatial Half Width	$V_{CE}=5\text{V}$	$\Delta\theta$	TYP.	122	deg.

*1 Color temperature is 2,856K. Employs a standard tungsten lamp.

On constate que le **photocourant est de l'ordre du mA** pour un éclairage énergétique de $10\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, ce qui est l'ordre de grandeur de l'éclairage du laser : le phototransistor est donc beaucoup plus sensible, ce que nous avons constaté expérimentalement.

Le maximum de sensibilité est dans l'infrarouge proche.

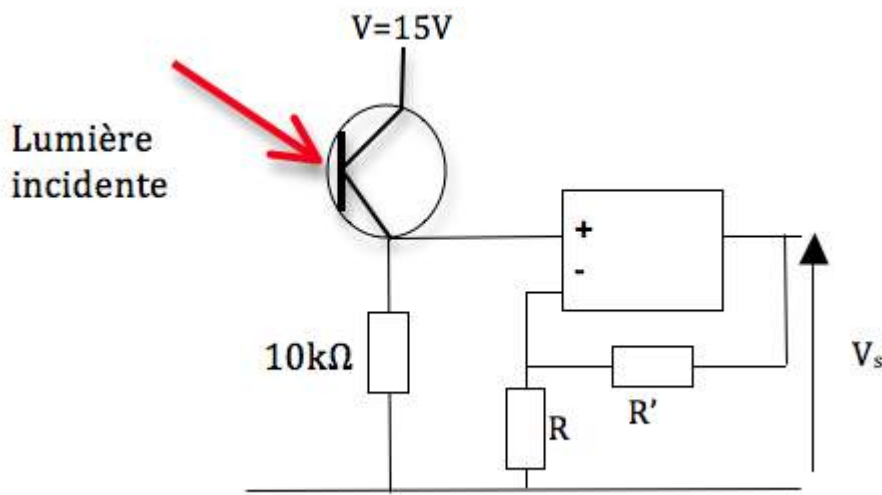


On observe que le phototransistor offre une sensibilité bien meilleure que la photodiode (environ 200 fois plus), c'est donc pour cela que notre choix s'est porté sur le phototransistor.

2.5. Amplificateur :

Le courant délivré par le phototransistor traverse une résistance de 10 k Ω ; la tension aux bornes de cette résistance doit être amplifiée. Pour cela nous avons utilisé un ALI TL 081.

Le montage est le suivant :



Le gain de l'amplificateur est $G = 1 + R'/R$. Nous avons choisi $R = 10 \text{ k}\Omega$ et $R' = 200 \text{ k}\Omega$ soit un gain d'environ $G = 20$.

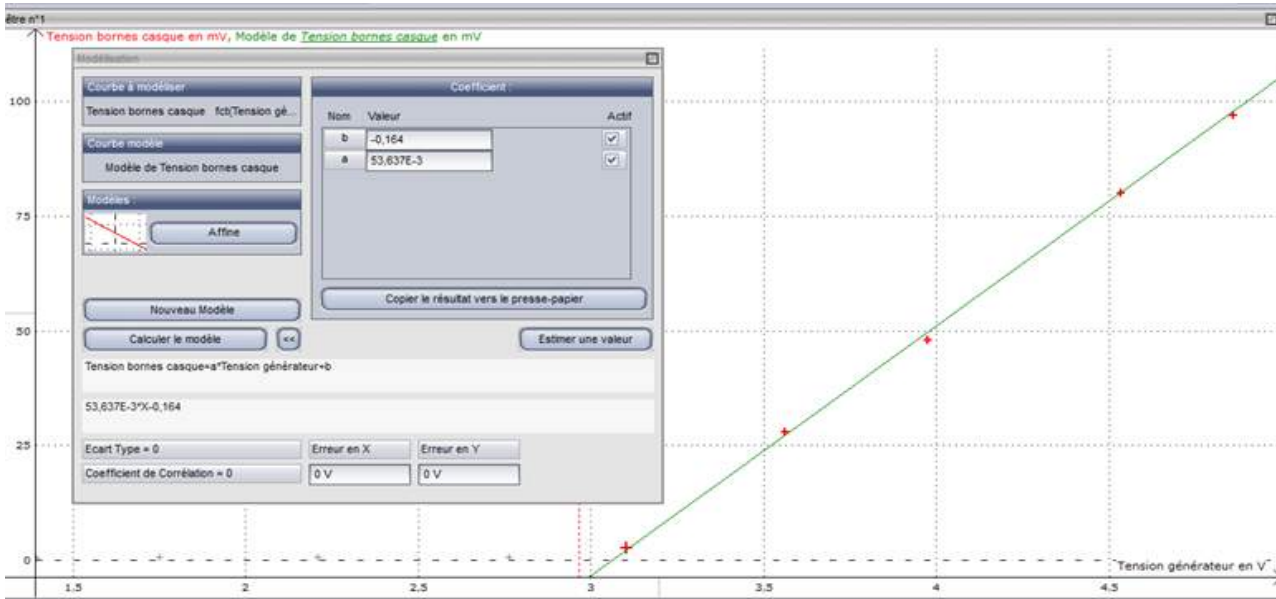
Remarque : Pour supprimer un peu de ronflement grave, nous avons placé entre le phototransistor et l'entrée de l'amplificateur un filtre passe haut de fréquence de coupure $f_c = 300 \text{ Hz}$ qui n'apparaît pas sur ce schéma.

2.6. Choix de la tension aux bornes de la diode laser :

Le son est également plus fort si le laser est plus intense : nous devons mesurer ce phénomène pour choisir une tension d'alimentation de la diode laser.

Pour une configuration donnée du système, nous mesurons la tension aux bornes du casque U_{casque} et celle qui alimente la diode laser U .

La courbe obtenue est la suivante :



Nous choisissons de travailler à $U = 4 \text{ V}$.

3. Le problème de la vitre :

Le but est de remplacer le miroir par une vitre.

3.1. Augmentation de la sensibilité :

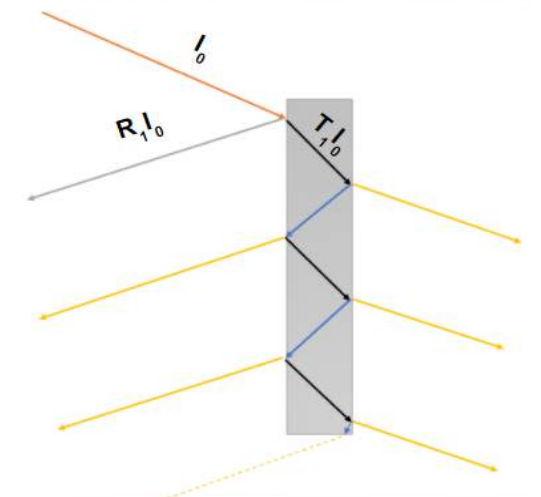
Le miroir possède un coefficient de réflexion environ égal à 1, tandis que la vitre possède un coefficient de réflexion du dioptré air/verre avec n_1 (air) = 1 et n_2 (verre) = 1,5 égal à :

$$R_1 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = 0,04$$

On effectue un calcul un peu plus précis, car en réalité la lumière transmise à la première interface peut être réfléchié à la deuxième interface.

Si T_1 est le coefficient de transmission tel que : $T_1 = 1 - R_1$, on a :

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_1 T_1^2 + R_1^3 T_1^2 + \dots = R_1 \left(1 + T_1^2 \sum_{i=0}^{\infty} R_1^{2i} \right) \\ &= R_1 \left(1 + T_1^2 \frac{1}{1 - R_1^2} \right) = 0,077 \end{aligned}$$



Pour augmenter la sensibilité du système, il faut donc la multiplier par $1/0,077 = 13$. Il suffit alors d'augmenter le gain de l'amplificateur. Aussitôt formulé, aussitôt fait !

3.2. Essais :

Après l'augmentation de la sensibilité, nous sommes passés aux essais ! Nous nous sommes placés à quelques mètres d'une vitre de la salle (c'était un double vitrage) et avons installé le système. Après les tests, nous avons remarqué que la voix, même si elle est transmise, est fortement modifiée et n'est pas intelligible. De plus, le rayon réfléchi est très diffus.

Pour comprendre l'origine des problèmes liés aux vitres, nous décidâmes de faire un montage modèle. Il consistait à suspendre une vitre à l'aide de ressorts.

Il était maintenant l'heure du test, mais il ne fut pas concluant, le rayon réfléchi était très diffus et le son toujours modifié. Le principal problème était le fait que les ressorts étaient trop lâches, donc lorsque quelqu'un parlait, la vitre bougeait trop et le signal n'arrivait plus jusqu'au capteur.

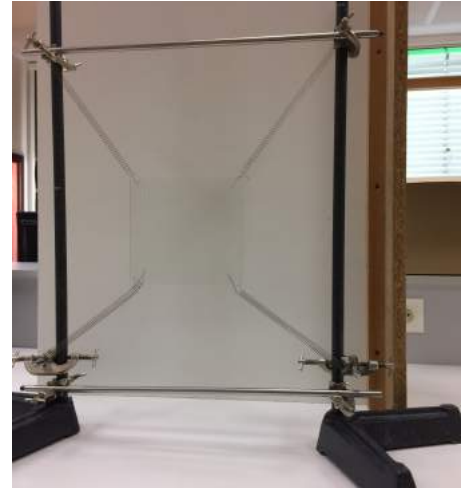
Pour pallier au problème des ressorts, nous décidâmes de suspendre le miroir à l'aide d'élastiques. Le résultat était légèrement meilleur mais toujours pas satisfaisant.

Nous avons ensuite collé une lame de verre sur le miroir du HP, le résultat était meilleur : nous pensons que l'état de surface du verre (rayures) intervient également.

Mais l'échec du montage à élastique mettait surtout une chose en évidence : le problème n'était peut-être pas seulement la stabilité du montage. C'est pourquoi nous avons décidé de vérifier si le double-vitrage pouvait être la cause de la déformation de nos voix.

Pour cela, nous avons fixé des piézoélectriques de chaque côté d'une vitre possédant un double-vitrage, nous avons toqué sur la vitre mais ne recevions pas de signal de l'autre côté, il n'y avait donc pas une bonne transmission entre les deux côtés du double vitrage. Cette mauvaise transmission vient notamment de la couche d'air présente entre les deux vitres du double vitrage. C'est d'ailleurs pour cela que les doubles vitrages sont de bons isolateurs phoniques !

Le double-vitrage avait donc deux problèmes de taille : le rayon laser était réfracté et réfléchi plusieurs fois et si le milieu présent entre les deux vitres est très compressible et peu dense alors il y aura une mauvaise transmission du son.



En conclusion, notre système fonctionne bien avec un miroir, pas sur une vitre.

4. Essai à 35 m :

Après ces mesures, il est temps de voir plus grand.

Nous décidons donc d'éloigner le miroir de 35m du laser et de brancher le système autonome à des hauts-parleurs. L'expérience se déroule dans le noir pour éviter le bruit dû aux lampes allumées.

La distance augmente la sensibilité du dispositif : nous utilisons alors un miroir monté sur un support et non plus sur une membrane de haut-parleur (photo ci-contre).

La diode laser et le récepteur sont placés dans la salle d'optique et le miroir, lui, 5 salles plus loin. Nous procédons ensuite aux derniers ajustements : vérifier que la tache laser peut être captée par le phototransistor, allumer les hauts-parleurs et vérifier leur branchement. Le test peut maintenant commencer.

Un élève est placé à côté du miroir et récite une partie de l'appel du 18 juin du Général de Gaulle, sa voix est très bien retransmise par les hauts-parleurs situés à 35 m de là, son appel est entendu !

Cette manipulation est donc un **franc succès**, le discours est intelligible et il n'est plus nécessaire de crier pour entendre la voix de notre camarade !

Remarque : pour la présentation, nous utiliserons pour source un diapason (visible sur la photo ci-dessus derrière le miroir), et nous visualiserons le signal de sortie de l'amplificateur sur un oscilloscope, c'est plus visuel.



5. Travail en infra-rouge :

En tant qu'espions avertis, nous avons décidé de changer notre laser, en tentant de travailler avec des infrarouges... quoi de plus discret que des rayons que l'on ne voit pas à l'œil nu !

5.1. Caractéristiques du laser IR :

Nous avons donc commandé des laser IR, dont le constructeur donnait la longueur d'onde et la puissance :

$$\lambda = 808 \text{ nm} ; P = 50 \text{ mW}$$

Il était équipé d'une petite lentille.

Nous avons mesuré sa longueur d'onde à l'aide de Spectrovio (cf spectre page 10), qui est bien celle donnée par le constructeur. C'est de l'infra-rouge proche.

5.2. Mesure de puissances :

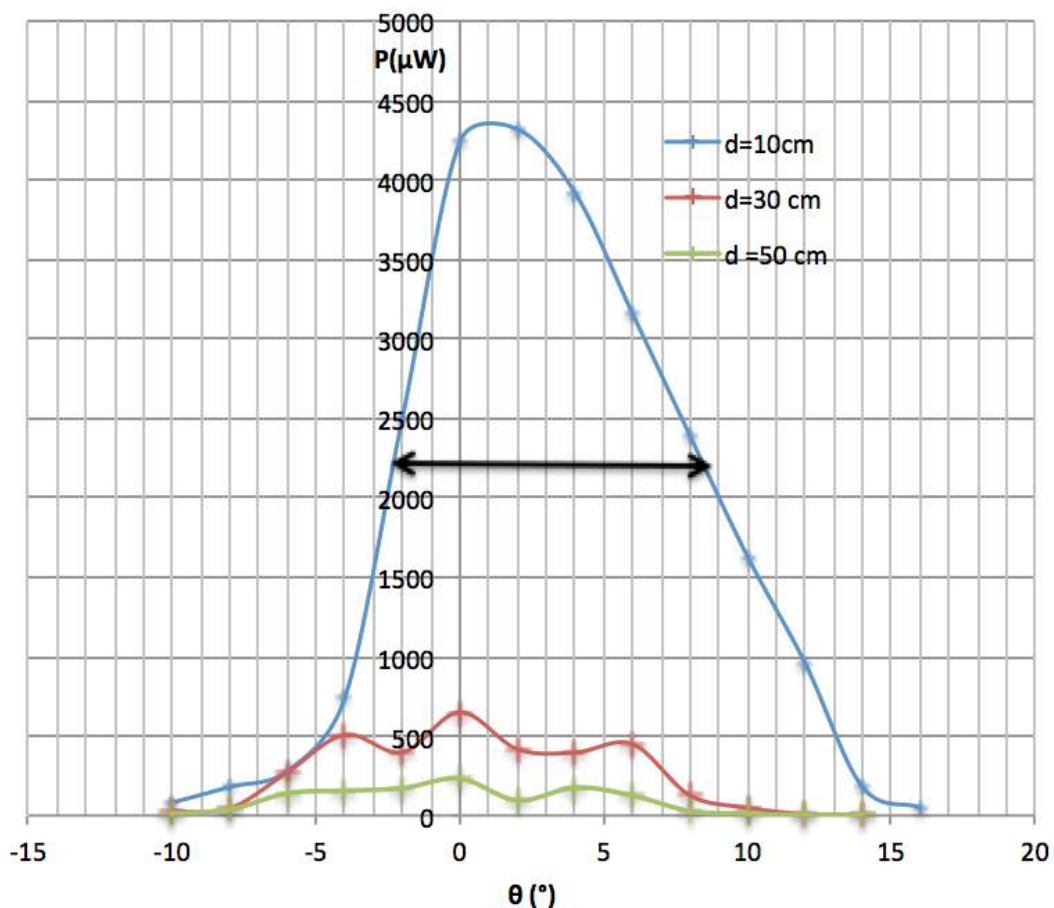
Nous avons souhaité caractériser ce laser : la première étape a été de déterminer la puissance maximale que l'on puisse obtenir avec la lentille, en utilisant un wattmètre et en changeant d'orientation celle-ci.

Nous nous sommes heurtés à un défi de taille : si ce système est invisible, nous ne pouvons également pas le voir et tenter de le régler... pas très pratique ! Ayant plus d'un tour dans notre sac, nous avons tenté de voir le faisceau à l'aide d'un objectif de téléphone portable... BINGO !! A l'aide du téléphone de la marque Honor, le rayon est visible ! Le système est malheureusement très sensible, l'orienter correctement était un véritable défi technique. Nous avons décidé de caractériser le laser sans lentille : puissance et divergence.

La mesure était cette fois impossible avec Caliens, car le signal est extrêmement bruité et fluctuant.

Nous mesurons des puissances moyennes avec le wattmètre. Pour cela nous plaçons le laser sur un support pivotant gradué en degrés, face au wattmètre.

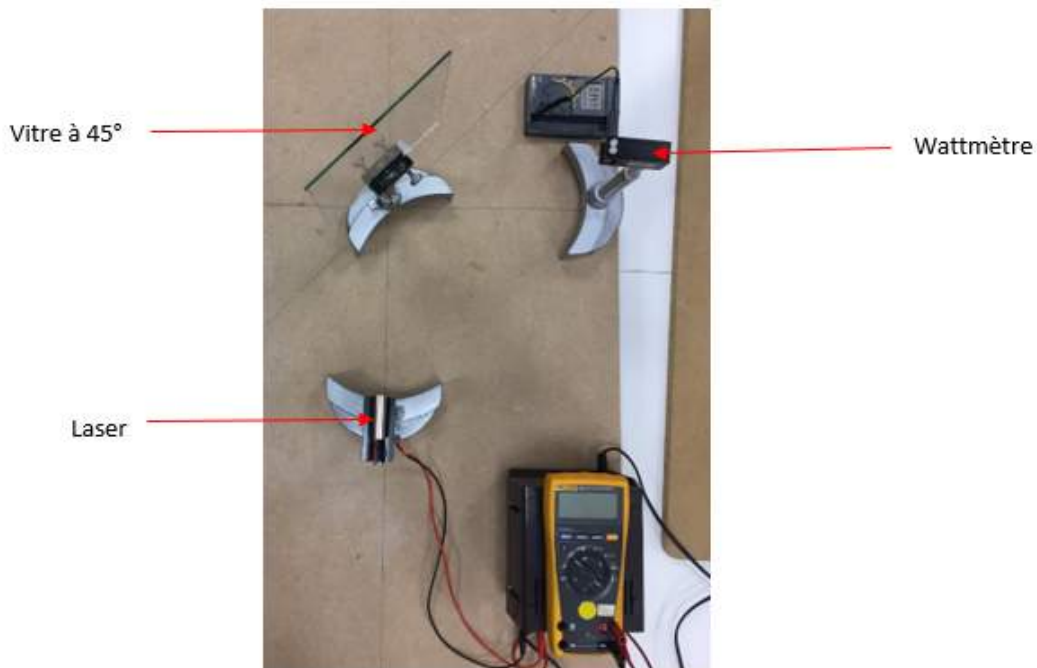
Les résultats sont les suivants :



La courbe à $d = 50\text{ cm}$ donne un angle à mi-hauteur de 10° : le laser présente une forte divergence, c'est pourquoi il doit être concentré grâce à une lentille.

5.3. Réflexion sur le verre ?

Nous souhaitons connaître le comportement par rapport au verre de vitre : les IR sont-ils réfléchis ou absorbés ?



Nous avons mesuré avec un wattmètre la puissance émise par le laser à une distance de 60 cm.

$$P = 320 \pm 5 \mu\text{W},$$

puis nous avons mesuré la puissance transmise,

$$P_t = 270 \pm 5 \mu\text{W},$$

en intercalant la vitre entre le laser et le wattmètre, puis nous avons mesuré la puissance réfléchie par la vitre en plaçant le laser infrarouge, la vitre et le wattmètre comme sur la photo ci-dessous. Nous mesurons une puissance réfléchie :

$$P_r = 24 \pm 5 \mu\text{W}$$

Le coefficient de réflexion en puissance est donc :

$$R = 0,075 \pm 0,016$$

Malgré la grande incertitude, on peut noter que l'on retrouve une valeur proche de la valeur calculée théoriquement avec un indice $n = 1,5$: le verre se comporte avec l'IR proche comme avec le rouge.

Le système pourrait donc fonctionner avec ce laser !

Fonctionnera-t-il ? Vous le saurez le 30 janvier !!

Conclusion : Partis d'une simple idée d'espionnage à l'aide d'un laser, nous voilà maintenant bien avancés sur notre projet. Après de nombreux essais et multiples recherches, nous sommes arrivés à un résultat assez concluant : nous voilà donc capables d'espionner une conversation sans que la victime ne se sente visée, ni que celle-ci crie pour obtenir des propos audibles. "Ecouter à travers les vitres", nous y sommes donc arrivés ? Hélas, non, car notre système est fonctionnel seulement avec un miroir... pas très pratique pour espionner une conversation en étant bien caché et sans se faire remarquer !! Malgré tout, les différentes péripéties traversées, de l'élaboration d'un système autonome, à l'augmentation de la sensibilité du système, en passant par les capteurs piézoélectriques, le franc succès de l'essai à 35 mètres, et en finissant par le travail en infrarouge, nous avons beaucoup appris, dont quelques mots d'alsacien !

Dàs esch a wunderbàres Erlabnis fer uns gse ! D'Olympiades de Physique han uns sehr gfàlla !!

(en alsacien : "Ce fut pour nous une expérience formidable ! Les Olympiades de Physique nous ont beaucoup plu !")

Bibliographie :

Bernard VALEUR "Sons et lumière" BELIN Collection Pour la Science

Sextant "Optique expérimentale" Editions Hermann

Sitographie :

https://www.lemonde.fr/big-browser/article/2020/06/22/le-lamphone-ou-l-espionnage-une-conversation-en-observant-l-ampoule-d-une-piece_6043767_4832693.html

<https://www.youtube.com/watch?v=iI8w2s05sd8> : Make a laser listener.

<http://lucidscience.com/pro-laser%20spy%20device-9.aspx> : un autre système plus avancé.