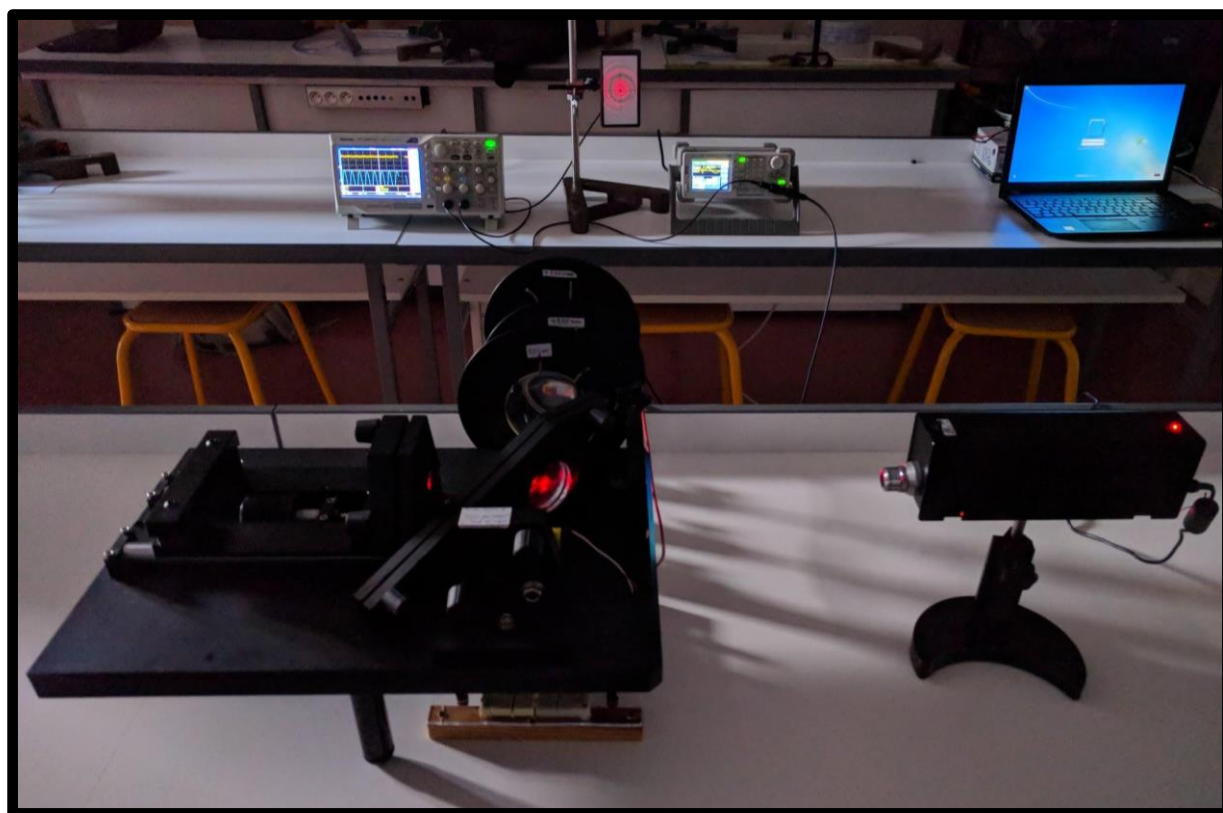


Olympiades 2019-2020

Peeeeetit Petit Petit Petit...



Ou la mesure de nano distances

Table des matières

1. Résumé :	3
2. Introduction :	4
3. Théorie :	5
3.1. L'interféromètre de Michelson	5
3.1.1. Historique	5
3.1.2. Principe	5
3.2. Le disque piézoélectrique	7
3.2.1. Historique	7
3.2.2. Principe	7
3.2.3. Intérêt pour l'expérience	8
3.3. Notre détecteur optique : la photodiode	8
3.3.1. Rapide historique	8
3.3.2. Principe	8
3.3.3. Intérêt pour l'expérience	9
4. Application :	9
4.1. Expérience	9
4.1.1. Manipulation de l'interféromètre	9
4.1.2. Montage additionnel	10
4.1.3. Expérimentations	11
4.1. Interprétation des résultats	14
5. Conclusion	17
6. Annexes :	18
6.1. L'impression 3D	18
6.1.1. Création numérique d'une pièce	18
6.1.2. Impression et installation de la pièce	18
6.1.3. Une pièce supplémentaire	19
7. Remerciements :	20

1. Résumé :

Nous sommes 5 élèves de Terminale S au lycée Bertran de Born à Périgueux.

Nous avons été conviés l'année dernière à venir rencontrer des participants de l'édition précédente des Olympiades de Physique. Nous avons choisi d'y participer et nos professeurs de physique nous ont proposé plusieurs sujets sur lesquels nous pouvions travailler.

Le projet sur lequel nous avons décidé de travailler est celui de la mise en évidence d'un déplacement nanométrique à l'aide d'un interféromètre de Michelson.

L'expérience consiste à faire vibrer l'un des 2 miroirs initialement présents sur l'interféromètre grâce à un disque de céramique piézoélectrique placé derrière ce miroir. L'application d'une tension alternative sur ce transducteur piézoélectrique crée une vibration périodique du miroir et le signal d'interférence en sortie du Michelson, notamment le point central, change d'intensité lumineuse. L'étude de cette variation montre un déplacement de la céramique piézoélectrique de l'ordre du nanomètre.

2. Introduction :

La miniaturisation est un enjeu majeur pour le développement des nouvelles technologies. Par exemple, les processeurs informatiques sont constitués de milliards de transistors de quelques nanomètres de largeur. L'interféromètre de Michelson permet grâce à l'étude des interférences de mettre en évidence des écarts de distance de l'ordre de l'Angström, pour les études les plus minutieuses.

Actuellement l'interféromètre de Michelson est utilisé en astronomie dans les télescopes, notamment le télescope Hooker en 1908, qui est le premier à être équipé d'un interféromètre pour étudier les sources lumineuses provenant de l'espace. Il est aussi utilisé pour vérifier la planéité de plusieurs surfaces, pour parfaire le rendement des panneaux solaires des satellites, ou pour vérifier la planéité des miroirs secondaires des télescopes

Nous pouvons également citer le projet "Virgo" et semblables, des dispositifs à très grande échelle. Il s'agit d'interféromètres basés sur le principe de celui de Michelson dont les deux bras perpendiculaires font 3 kilomètres de long. A l'intérieur, le faisceau lumineux circule sous vide. Il existe plusieurs de ces installations dont deux aux Etats-Unis et une en Italie, à Cascina, qui ont permis de mettre en valeur l'existence des ondes gravitationnelles, produites par des phénomènes d'une ampleur gigantesque dans le reste de l'espace comme par exemple la coalescence, la réunion systématique de deux trous noirs.

Alors que la science recherche la miniaturisation des technologies, les mesures de distance gagnent en rigueur. Les nouvelles technologies nécessitent le développement des nanotechnologies, que ce soit dans le domaine de l'optique, de la mécanique ou de la biologie.

En quoi l'étude des interférences lumineuses contribue-t-elle au domaine des nanosciences ?

Comment mesurer des nano distances ?

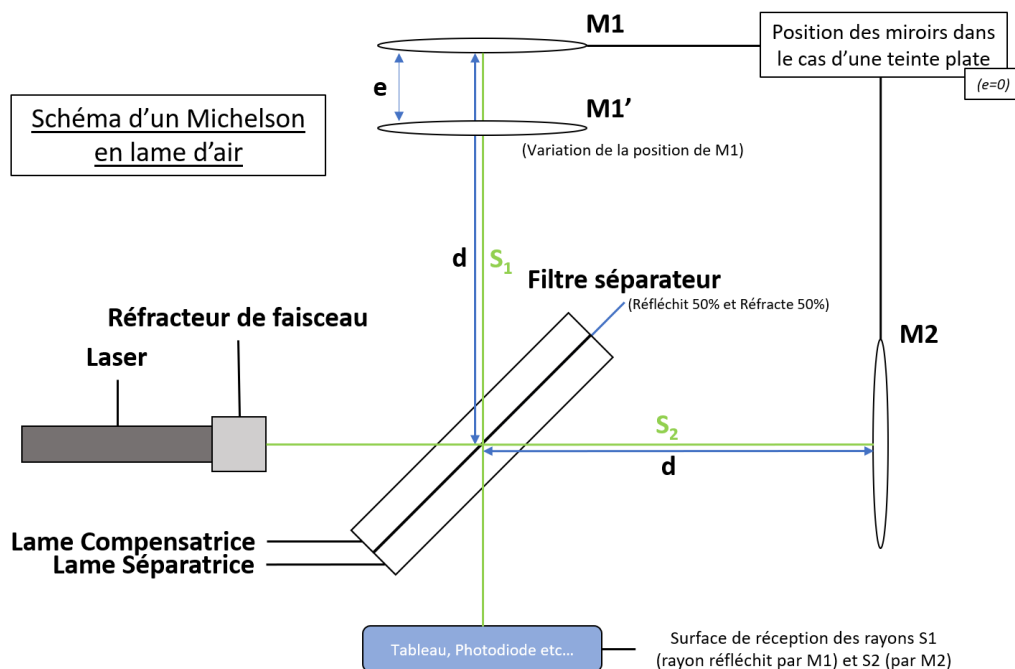
3. Théorie :

3.1. L'interféromètre de Michelson

3.1.1. Historique

Au milieu du XIX^e siècle, l'astronomie et la physique s'allient dans de nombreuses recherches. L'expérience Michelson-Morley est dite négative, car elle a donné un résultat contraire à celui recherché. Elle a pour autant apporté beaucoup à la physique expérimentale. Albert Michelson (1852-1931) est un physicien américain qui cherchait à mettre en évidence le mouvement de la Terre dans l'éther lumineux, un milieu considéré comme référentiel absolu et qui permettrait à la lumière, considérée de nature ondulatoire, de se propager. Rejoint plus tard par Edward Morley, ils essayèrent de mesurer la vitesse de la lumière de deux rayons lumineux perpendiculaires, à deux périodes espacées de six mois, grâce à un appareil de leur création, l'interféromètre de Michelson. Cependant, leur expérience fut négative puisque la vitesse de la lumière apparut comme constante par rapport au déplacement de la Terre dans l'éther. Michelson reçut malgré tout le prix Nobel de la physique en 1907 pour ses recherches.

3.1.2. Principe



Le principe d'un interféromètre de Michelson repose sur l'interférence de deux rayons lumineux issus de la même source lumineuse, à savoir un laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

D'abord le rayon laser traverse une lentille (objectif de microscope noté ici élargisseur de faisceau) pour pouvoir observer le résultat à l'œil nu. Ensuite ce rayon traverse une lame appelée "compensatrice", nommée ainsi pour son rôle dans la suite du trajet du rayon. À cette lame est "collée" (si on peut dire, puisqu'un faible volume d'air les sépare) une seconde lame, de même épaisseur et de même consistance appelée "séparatrice". Les deux lames possèdent une surface semi réfléchissante, c'est à dire qui réfléchit 50% de lumière et en réfracte 50%.

Notre rayon est donc séparé en deux rayons de même intensité au contact de ces lames. Nous appellerons S1 le rayon réfléchi et S2 le rayon réfracté.

- ❑ Intéressons-nous d'abord à S1. Celui-ci, réfléchi, va devoir traverser une nouvelle fois la lame compensatrice, être réfléchi par le miroir M1, retraverser la lame compensatrice une troisième fois et finalement traverser la lame séparatrice avant de projeter son image sur la surface disposée face à lui.
- ❑ S2, lui, doit traverser la lame séparatrice, être réfléchi par le miroir M2, retraverser la lame séparatrice, être réfléchi par celle-ci au contact de la surface semi-réfléchissante, traverser une troisième fois la lame séparatrice avant de projeter son image.

Une partie de S1 est évidemment réfléchi et une partie de S2 réfractée vers l'émetteur laser. Nous négligerons ces rayons car ils ne nous sont pas utiles.

En somme, depuis la source laser, S1 et S2 ont tous les deux traversé quatre lames, et leur parcours à travers celles-ci n'est donc en rien à l'origine d'un quelconque déphasage de ces ondes lumineuses.

Pour observer des interférences, M1 ne doit pas être à la même distance que M2 de la surface semi-réfléchissante de la lame séparatrice. Ce cas-ci s'appelle le contact optique et on observe alors une teinte plate due à une absence d'interférence. Pour en observer, il doit donc y avoir une distance e (non nulle) entre M1 et M2 par rapport à la surface semi réfléchissante. Les interférences peuvent dès lors être expliquées. Elles résident en la différence de marche, qui correspond à la différence des distances des chemins parcourus par S1 et S2 (soit $2e$, car le faisceau parcourt 2 fois la différence de marche). Aussi, le faisceau lumineux qui sort du laser, à cause notamment de l'élargisseur de faisceau, peut s'apparenter à plusieurs rayons lumineux qui ne sont pas parallèles. Leur angle d'inclinaison sur les lames compensatrice et séparatrice fera ainsi varier cette différence de marche pour chaque rayon, produisant ainsi des zones d'ombre ou de lumière dans lesquelles les ondes lumineuses sont soit en phase soit en déphasage. Deux facteurs sont alors déterminants pour voir apparaître des interférences : la distance de marche ($2e$) et l'angle d'inclinaison des rayons par rapport aux lames centrales.

On peut alors en comprendre un peu plus sur l'image que l'on obtient, et ce que l'on va pouvoir en faire. Lorsque l'on fera varier la distance de marche d'une demi longueur d'onde, on changera le phasage des ondes, c'est à dire qu'on verra un déplacement d'une raie lumineuse d'intensité maximum à une autre d'intensité minimum par exemple. En lame d'air, l'image qu'on obtient est une multitude d'anneaux situés autour d'un rond central. Chaque anneau représente donc une variation de la distance de marche d'une demie longueur d'onde. On "parcourt" une longueur d'onde entre deux anneaux de même intensité lumineuse. Lorsque le miroir bouge d'une distance d'une demie longueur d'onde, la différence d'intensité de la frange centrale est maximale par rapport à la frange centrale sans mouvement du miroir.

Ainsi, notre projet va consister à trouver un moyen de faire varier cette différence de marche d'une distance la plus petite possible, et ensuite de réussir à interpréter cette variation au niveau de l'image projetée grâce à un dispositif de mesure. Il est constitué d'une photodiode reliée par un câble à un oscilloscope nous permettant d'obtenir les valeurs d'intensité maximum et minimum de la figure d'interférence.

3.2. Le disque piézoélectrique

3.2.1. Historique

L'effet piézoélectrique fut découvert en 1880, par les frères Pierre et Jacques Curie. Travaillant sur d'anciens travaux sur la pyroélectricité découverte par Carl von Linné et Franz Aepinus (un changement de température du cristal entraîne une production d'électricité) et grâce à leurs connaissances en structure cristalline, ils montrent que l'effet d'une pression ou d'une contrainte mécanique sur certains minéraux crée une tension électrique, notamment avec du quartz, des minéraux silicatés ou encore du sel.

L'effet inverse, que nous utilisons, fut découvert plus tard par Gabriel Lippmann travaillant la thermodynamique. C'est celui-ci qui va nous intéresser.

3.2.2. Principe

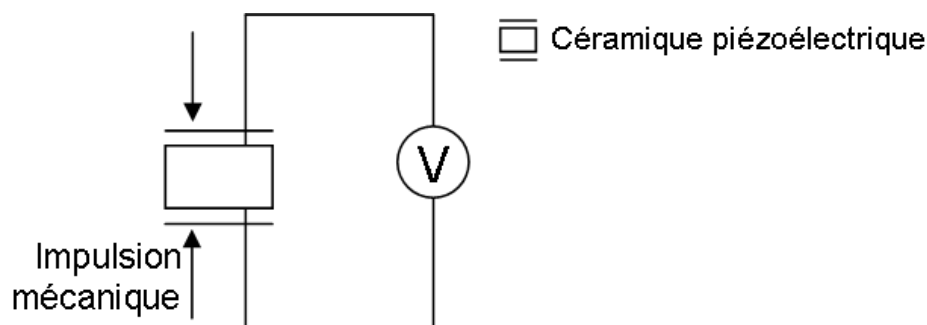


Schéma d'un voltmètre aux bornes d'un matériau piézoélectrique

Un matériau piézoélectrique possède la caractéristique de libérer une charge électrique lorsqu'il subit une contrainte mécanique (effet piézoélectrique direct). Et inversement, il se déforme lorsqu'on lui applique un champ électrique (effet piézoélectrique inverse).

On rencontre un effet piézoélectrique lorsque la structure cristalline atomique du matériau a ses barycentres de charges positives et négatives confondus. Le barycentre de plusieurs points est lui-même un point, dont les coordonnées dans un repère sont la moyenne pondérée des coordonnées de chaque point. Le barycentre des charges positives, par exemple rend compte de la moyenne de chaque charge positive, dans l'espace. La moyenne en l'occurrence peut être pondérée par l'intensité de chaque charge.

Comme les barycentres positifs et négatifs sont confondus dans un matériau piézoélectrique, lorsque l'on déforme cette structure, les barycentres se retrouvent séparés et une tension électrique est produite.

Le matériau le plus connu est le quartz, peu coûteux. Cependant, l'industrie actuelle utilise des céramiques de synthèse comme le PZT, encore moins chères.

Antoine Becquerel au début du XIXème siècle a montré la proportionnalité entre la tension produite et la pression exercée sous la forme :

$$U = k.P$$

k = constante dépendante du piezo
 P en Pascal

3.2.3. Intérêt pour l'expérience

C'est le déplacement d'un disque piézoélectrique qui va être mesuré dans notre expérience. Ce matériel, une fois fixé derrière le miroir M1, sera soumis à une tension électrique alternative. Il opérera ainsi une oscillation périodique qui aura une influence sur les interférences lumineuses obtenues grâce au Michelson. Ainsi, en analysant la variation de l'intensité lumineuse du point central, on pourra déterminer le déplacement du disque piézoélectrique et donc mesurer des nano distances.

La relation $U = k.P$ va nous assurer que pour une même tension donnée, la céramique piézoélectrique oscillera, avec la même amplitude spatiale et indépendamment de la fréquence du signal.

3.3. Notre détecteur optique : la photodiode

3.3.1. Rapide historique

En 1913, Elster et Geitel inventent le premier détecteur de lumière : le tube photoélectrique, suite aux études photoélectriques de Einstein en 1905, et aux précédentes études de Edmond Becquerel, sur l'effet photovoltaïque, en 1869

En 1940, OHL fait la découverte de la jonction P-N : il associe des cristaux de silicium de quantités d'impuretés différentes et obtient une jonction de type diode. C'est finalement Shockley qui en 1949 promulgue la théorie de cette jonction.

3.3.2. Principe

La photodiode est un composant électronique semi-conducteur, se situant entre un isolant et un conducteur en termes de conductivité électrique, qui, au contact de la lumière, produit une tension électrique grâce à l'effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque est un effet photoélectrique qui se produit lorsqu'un matériau semi-conducteur absorbe des photons et crée un courant électrique.

La photodiode est constituée de deux semi-conducteur, un avec un dopage p et un autre avec un dopage n. Un semi-conducteur avec un dopage p, possède une forte densité en trous, c'est-à-dire un déficit en électron. Une région avec un dopage n, est elle très dense en électrons.

Par effet photovoltaïque, quand les éléments de la partie possédant un dopage n reçoivent un photon issue d'un faisceau lumineux, ils éjectent un électron en direction de la partie de dopage p. Comme cette partie présente un déficit en électrons, les électrons projetés par l'effet photovoltaïque circulent et créent ainsi un courant électrique, mesurable par un oscilloscope.

Nous avons travaillé avec une photodiode Didalab POD 012000, montée avec un amplificateur opérationnel couplé à un sélecteur de résistance et des condensateurs pour filtrer le signal en sortie. Cela ne nous a pas forcément aidé car nous avons eu différents problème pour obtenir un signal sur notre oscilloscope, sans comprendre d'où venait le problème. En revanche, cette photodiode était dans un boîtier adapté au matériel de laboratoire facilitant quand même notre montage.

3.3.3. Intérêt pour l'expérience

La photodiode permet ici de mesurer l'intensité lumineuse du point central obtenu grâce une configuration en lame d'air. Cette intensité varie théoriquement à la même fréquence que le courant électrique alimentant le disque piézoélectrique.

Lorsque le miroir bouge, le point devient entièrement éclairé. Le passage d'une raie noire à une rouge (si on utilise un laser rouge) correspond à une translation du miroir égale à une demi longueur d'onde du faisceau lumineux du laser utilisé.

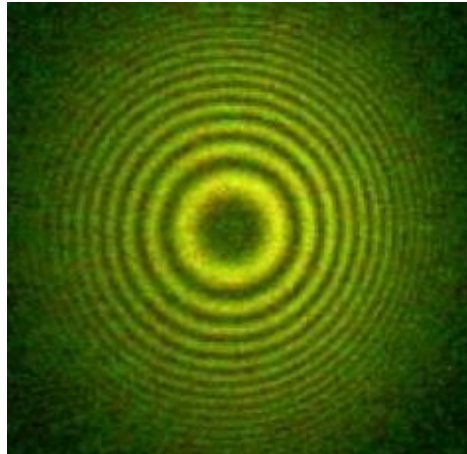


Figure d'interférence en configuration en lame d'air

Sur cette image, le point au centre est sombre. Lorsque le miroir bouge d'une distance d'une demi longueur d'onde, le point devient entièrement éclairé. Quand le point est totalement sombre, la tension délivrée par la photodiode est à son minimum (0V théorique). Quand le point est fortement éclairé, la tension aux bornes de la photodiode est à son maximum (qui sera à déterminer expérimentalement).

4. Application :

4.1. Expérience

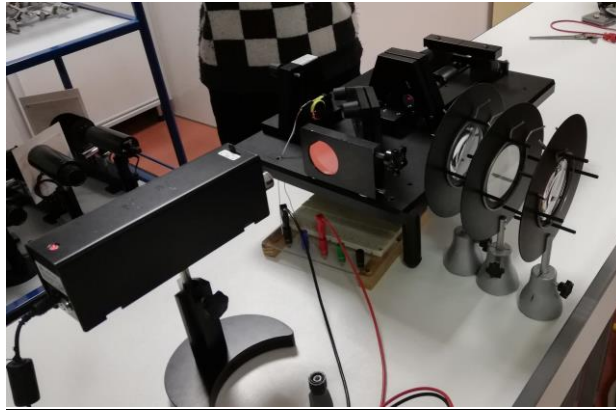
4.1.1. Manipulation de l'interféromètre

Durant nos premières séances de travail, nous avons décidé de nous concentrer sur les manipulations d'un interféromètre de Michelson classique, sans montage additionnel. En effet, il est important pour le reste de l'expérience de se familiariser avec les différents outils de réglages présents sur le système. Cela permet d'abord d'être efficace et d'identifier rapidement un quelconque souci de réglage lors des manipulations.

L'appareil se règle en plusieurs étapes.

- Il faut d'abord s'assurer du parallélisme des lames compensatrice et séparatrice. On fait alors passer un faisceau laser (dans notre cas), uniquement à travers ces 2 lames. On peut ensuite régler l'inclinaison des lames grâce à deux molettes. On essaie alors de superposer deux images produites par la réfraction du rayon lumineux.
- Ensuite, on place le laser en face du miroir M2. On peut alors régler l'inclinaison des 2 miroirs en utilisant des molettes de réglages grossiers derrière M2 et des molettes de réglages précis derrière le miroir M1. On peut faire varier la différence de marche avec

une vis micrométrique de translation derrière le miroir M2. Cette même vis ne sera pas utilisée pour le reste des manipulations car nous ferons varier la différence de marche au niveau de M1 avec une céramique piézoélectrique.



Interféromètre de Michelson et le laser rouge placé à la perpendiculaire.

Après avoir calibré l'interféromètre et placé le laser de face, perpendiculaire au miroir M2, nous avons ajouté 3 lentilles divergentes successive (image ci-jointe), entre l'interféromètre et l'image sur un tableau blanc. Cette adjonction nous a permis d'élargir la figure obtenue. Nous avons pu ainsi observer des cercles concentriques, qui forment la figure d'interférence encore immobile à ce moment-là. Il est tout de même possible de faire varier les interférences en tournant la molette fixée au miroir M2, qui va le déplacer, selon une translation dans la direction du laser. On peut voir, en faisant varier la distance du miroir M2 par rapport au laser, un enchaînement d'anneaux créant un effet visuel semblable à celui d'une vis sans fin, presque hypnotique.

La manipulation de l'interféromètre nous étant maintenant familière, nous avons pu insérer un montage additionnel.

4.1.2. Montage additionnel

Après avoir pris en main le dispositif, nous avons installé un support, imprimé à l'aide d'une imprimante 3D (le détail du processus d'impression est inclut à la fin, Cf : 6.1). Ce support est prévu pour recevoir notre disque piézoélectrique. Durant les multiples expériences que nous avons mené, nous avons utilisé deux disques piézoélectriques. Il est important de noter que nous ne connaissons ni leur composition, ni leur constante de proportionnalité Tension/Pression.

Une fois le disque piézoélectrique installé sur notre support, nous y avons fixé un petit miroir avec une pâte adhésive, puis avons appliqué une tension au premier disque piézoélectrique. Un net déplacement est observable au niveau des cercles concentriques à de basses fréquences de l'ordre du Hertz. Ces déplacements s'apparentent à ceux d'un cœur vu lors d'une échographie.

Nous avons à présent besoin d'un montage stable pour fixer un miroir de meilleure qualité. En effet, le miroir était petit, rectangulaire, comportait beaucoup d'aspérités et la fixation n'était que temporaire. Nos professeurs nous ont donc confié un miroir composé d'aluminium bien plus grand et de bien meilleure qualité. Nous avons donc conçu une autre pièce à imprimer en 3D qui pouvait être fixée sur la céramique et qui allait accueillir parfaitement le miroir (Cf : 6.1.3) Nous avons ensuite collé cette pièce sur le disque piézoélectrique.

Notre montage final étant prêt, nous pouvions débiter les expériences.

4.1.3. Expérimentations

Dans un premier temps nous avons voulu établir un lien entre le déplacement des franges d'interférence et la tension injectée dans le disque piézoélectrique.

Afin d'observer les déplacements des franges d'interférences, nous nous plaçons dans une configuration en coin d'air. Cette configuration est obtenue en changeant l'angle entre les deux miroirs, M1 et M2. Cela permet de projeter sur le mur des franges quasiment verticales, rendant les relevés expérimentaux plus faciles, et plus précis. De plus, nous projetons sur une plus longue distance l'image obtenue, monopolisant ainsi la salle ou nous étions. Nous pouvons ainsi théoriquement mesurer et voir à l'œil nu les variations du disque piézoélectrique en fonction de l'amplitude du signal. Cela nous permettrait d'établir approximativement la relation Tension injectée/Déplacement du disque piézoélectrique de manière à obtenir un ordre de grandeur de la réalité.

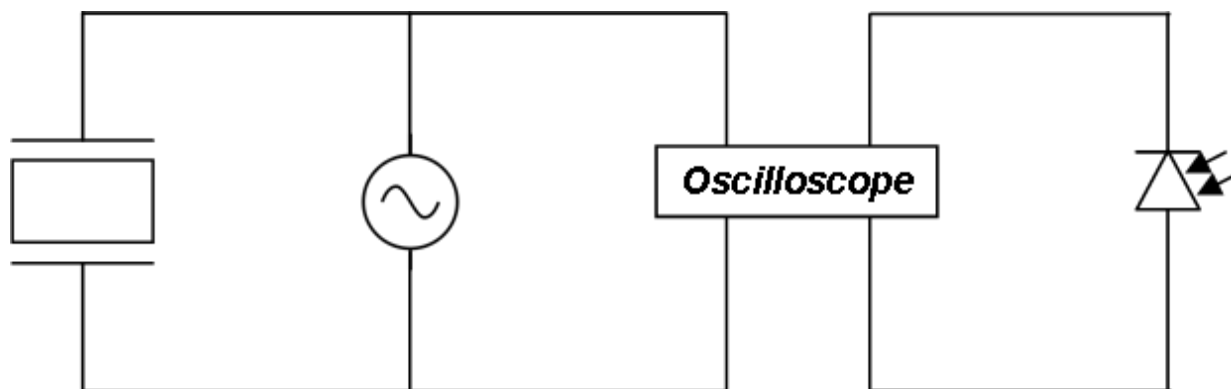
Nous avons à ce moment-là rencontré un premier problème. En effet, pour mesurer un déplacement fini et non une vibration (dans une démarche de précision), nous devons faire passer aux bornes de la céramique piézoélectrique un courant continu, de manière à n'avoir qu'un seul "étirement". Cependant, le disque n'a pas réagi à une tension continue, quelque soit l'amplitude du signal. Il n'a produit aucun déplacement dans les franges, rendant ainsi impossibles nos mesures. En effet, notre disque piézoélectrique supportait uniquement un courant alternatif.


Nous sommes donc passé à l'expérience qui nous permettrait de déterminer précisément le déplacement du disque en fonction de la tension à ses bornes. Nous avons placé notre interféromètre de Michelson dans une configuration en lame d'air. Nous avons ensuite disposé une photodiode au centre du cercle d'interférences, comme dans la photo ci-jointe, (le boîtier rectangulaire est celui de la photodiode).



Figure d'interférence (obtenue avec une configuration en lame d'air) projetée sur notre photodiode.


Tout d'abord, nous devons récupérer un signal aux bornes de la photodiode de même fréquence que le signal en sortie du générateur (qui alimente le disque piézoélectrique). Pour acquérir les signaux, nous avons utilisé un oscilloscope, qui va nous permettre de comparer directement les deux signaux. Notre montage était le suivant :



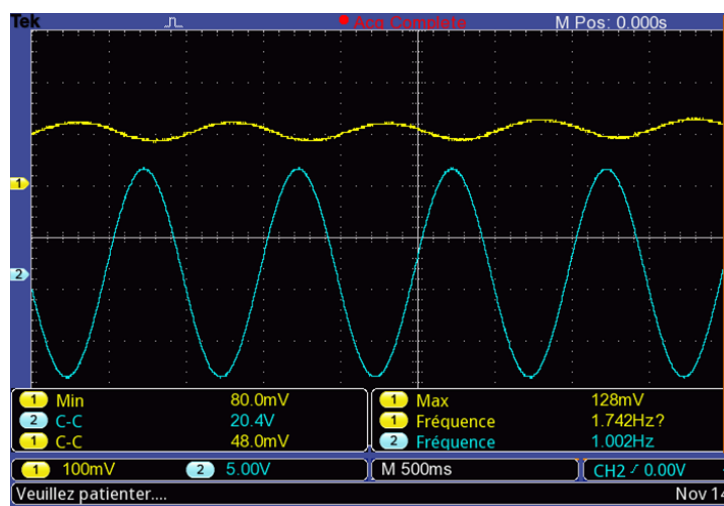
 : Générateur de Basses Fréquences

 : Disque piézoélectrique

Schéma de notre montage

 : Photodiode

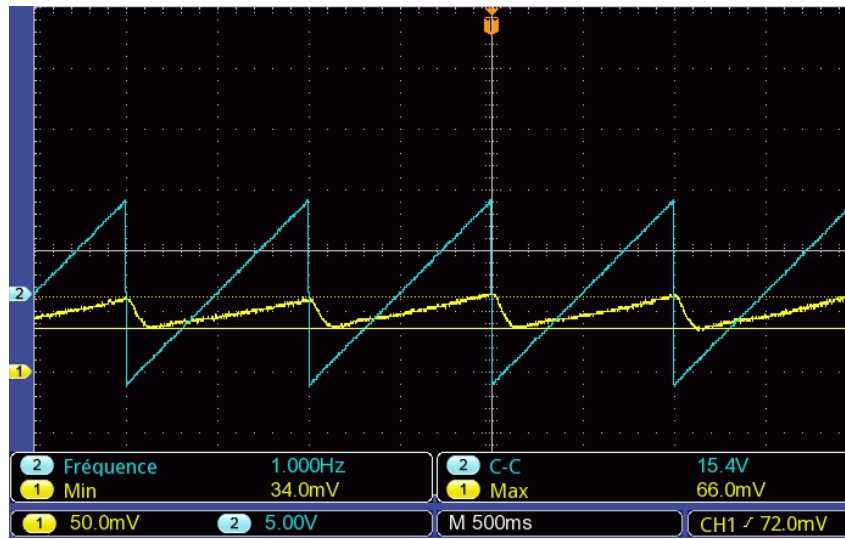
Dans un premier temps, la photodiode n'émettait aucune tension à caractère sinusoïdal. En réalité, la seule réponse obtenue était le bruit ambiant de la salle c'est à dire le signal de 50 Hz du réseau électrique. Ce n'est qu'après plusieurs heures à essayer d'obtenir un signal propre et cohérent que nous avons enfin obtenu un signal de sortie satisfaisant. Ces signaux plus satisfaisant ont été obtenu en utilisant un câble protégé pour relier la photodiode à l'oscilloscope. Les signaux sont alors les suivants :



Capture d'écran de l'oscilloscope

La courbe en bleu est la tension alternative aux bornes du générateur alimentant le disque piézoélectrique. En jaune, est représentée la tension aux bornes de la photodiode. Leurs fréquences correspondent. On sait désormais que la tension aux bornes de la photodiode rend bien compte des vibrations de la céramique piézoélectrique. Malgré l'aspect visuel notable de la figure d'interférence quand le disque est alimenté avec une tension sinusoïdale, nous avons opté pour un signal en sortie du GBF sous forme d'une de rampe de potentiel comme dans

l'image ci-après. Il possède comme avantage d'être plus précis, dans la mesure ou un signal sinusoïdal n'est pas franc dans sa variation de tension. Le problème est que l'inertie du disque piézoélectrique peut fausser, même légèrement les mesures. Le signal en dents de scie se manifeste juste par un "accoup". Il présente la meilleure option pour des mesures précises.



Capture d'écran de l'oscilloscope avec un signal en "dents de scie"

Nous devons maintenant, dans les conditions de la salle de classe où nous nous trouvons, expérimentalement déterminer les tensions U_{\max} et U_{\min} que peut produire la photodiode quand le point central du cercle d'interférence est éclairé au maximum, pour U_{\max} , et quand le point central est totalement "éteint", privé de lumière, pour U_{\min} . A ce moment de l'expérience nous n'injectons aucune tension aux bornes du disque piézoélectrique. Le miroir M1 est donc immobile.

Pour déterminer U_{\max} , il nous a fallu faire varier la distance du miroir M2, avec la molette, de manière à reconstituer la configuration pour laquelle le point central est illuminé au maximum. A la suite de plusieurs mesures, nous déterminons $U_{\max} = 338$ mV. Nous n'intégrons pas d'incertitude car c'est bel et bien la tension maximale que nous avons pu relever à la sortie de la photodiode.

Pour déterminer U_{\min} , nous avons bloqué le rayon lumineux du laser, de manière à ce qu'il n'atteigne pas la photodiode. Cela reconstitue le noir "total", qu'il est possible d'atteindre dans les conditions de notre salle, en prenant en compte les parasites lumineux des divers appareils électriques, tels que l'oscilloscope ou le générateur. Malgré la présence de certaines sources lumineuses, l'oscilloscope a affiché une tension minimale $U_{\min} = 0$ V. Il faut noter qu'il est possible de relever une tension de 0V sur l'oscilloscope sans bloquer le faisceau du laser, mais elle compliquée à obtenir.

Nos mesures vont désormais consister à relever les tensions minimales et maximales U_1 et U_2 , en sortie de la photodiode, pour une vibration du disque piézoélectrique, associée à une tension en sortie du GBF (Générateur de Basses Fréquences) donnée. Nous avons dans un premier temps fait des mesures avec un disque piézoélectrique de récupération. Le fait est que sa capacité de vibrer était fortement réduite, à cause de sa qualité. Nous avons donc décidé d'acheter un disque piézoélectrique neuf. Le bénéfice était remarquable puisqu'après de brèves estimations, nous avons conclu que le nouveau disque vibrait bien plus fort que le précédent pour une même tension.

Nous avons ainsi mesuré U_1 et U_2 sur l'oscilloscope, selon plusieurs configurations de la figure d'interférence différentes (point central plus ou moins éclairé), pour une tension aux bornes du disque de 500mV. Nous avons obtenu le tableau de données suivant :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6
U_1 (en mV)	19	194	38	112	60	120
U_2 (en mV)	88	278	94	189	118	209

Tableau répertoriant les relevés des tensions maximales et minimales relevées aux bornes de la photodiode pour un certain déplacement du miroir

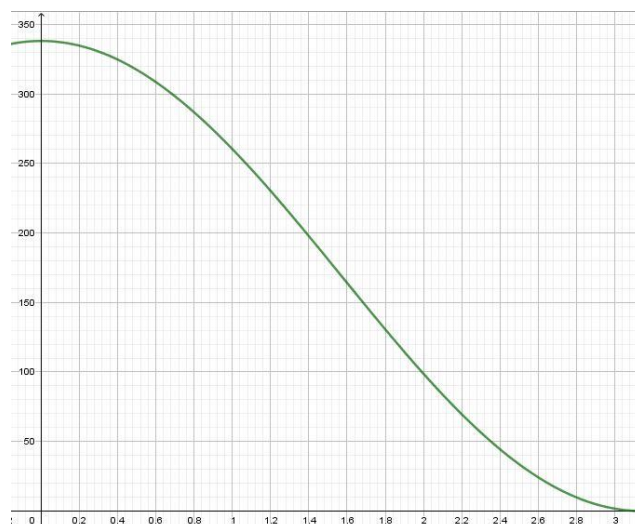
4.1. Interprétation des résultats

Nous avons donc déterminé les tensions U_{\min} et U_{\max} aux bornes de la photodiode. Grâce à cela nous avons pu créer un graphique présentant la tension aux bornes de cette photodiode, en fonction du déplacement du disque piézoélectrique. Nous pouvons modéliser ce graphique selon l'expression suivante :

$$U(x) = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \cos(x) + \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}$$

Nous avons modélisé cette fonction telle que son minimum corresponde à U_{\min} (0V dans notre cas) et son maximum à U_{\max} . Nous allons exploiter cette fonction sur $[0 ; \pi]$, ce qui correspond à une demi longueur d'onde du faisceau lumineux du Laser. Pour rappel un déplacement d'une demi longueur d'onde correspond au passage du point central de la figure d'interférence de complètement éclairé à totalement sombre. Nous pouvons exploiter la fonction sur $[0 ; \pi]$ car nous savons que le disque ne se déplace pas d'une longueur supérieure à une demi longueur d'onde. Cela se vérifie visuellement : le point central n'effectue ni de cycle (lumineux - sombre - lumineux) qui correspond à un déplacement d'une longueur d'onde ni de demi cycle (lumineux - sombre).

Notre fonction nécessite de faire une conversion : π sur l'axe des abscisses correspond ici à 316,4 nm, 632,8 étant la longueur d'onde du rayon du laser. Dans notre cas ($U_{\max} = 338$ mV et $U_{\min} = 0$ V), l'expression de la fonction est $U(x) = 169 \cdot \cos(x) + 169$ et sa courbe représentative est :



Courbe de la tension relevée aux bornes de la photodiode en fonction du déplacement du disque piézoélectrique

Le principe de notre mesure de nano distance est donc de reporter une tension minimum U_1 et maximum U_2 (mesurées lorsque la céramique piézoélectrique vibre) sur l'axe des ordonnées de la courbe préalablement modélisée. Chaque ordonnée va correspondre à une seule et unique abscisse (d'où un autre intérêt de considérer la fonction sur $[0 ; \pi]$). Une fois les abscisses reportées, nous pouvons calculer l'écart $\Delta\theta = x_1 - x_2$, (x_1 et x_2 , antécédents de U_1 et U_2 par la fonction $U(x)$ sur $[0 ; \pi]$). La grandeur θ est ici sans unité elle fait office de valeur de proportionnalité. Selon notre rapport abscisse/longueur d'onde, nous pouvons en faire la conversion en nanomètre. On sait que π sur l'axe des abscisses correspond à $316.4 \text{ nm} \left(\frac{\lambda}{2}\right)$. Ainsi, le déplacement Δx peut se calculer :

$$\Delta\ell = \frac{316,4\Delta\theta}{\pi}$$

Nous pouvons d'ores et déjà calculer les écarts de distance (du disque piézoélectrique) d'après les tensions U_1 et U_2 précédemment mesurées (Cf: 4.1.3). Tous les calculs qui en découlent sont présentés dans ce tableau (Δx arrondis au centième) :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6
$\Delta\theta$	0.59	0.55	0.43	0.46	0.39	0.53
Δx (en nm)	56.42	55.39	43.31	46.33	39.28	53.38

Tableau répertoriant les conversions des différents écarts mesurés

Après un calcul de moyenne et d'écart-type nous en concluons avoir mesuré une distance correspondant à l'amplitude du déplacement du disque piézoélectrique :

$$\mathbf{x = 56 (\pm 3) \text{ nm.}}$$

Il faut noter que cette expérience est la deuxième que nous avons effectuée. La première, que nous avons réalisée avec le disque piézoélectrique usagé et de mauvaise qualité, a été faite avec une tension en sortie du GBF de 20V (contre 0,5V pour la deuxième). Avec la céramique

usée, nous avons pu, après le même développement que celui décrit dans ce rapport, mesurer un déplacement $x = 9 (\pm 1) \text{ nm}$, ce qui montre bien que le disque était vraiment endommagé. On peut comparer en effectuant le rapport de chaque déplacement : $\frac{56 \cdot 0.50^{-1}}{09 \cdot 20^{-1}} = 2,5 \cdot 10^2$. Le disque piézoélectrique neuf se déplaçait, pour une même tension, 250 fois plus que le disque de récupération. D'un autre côté la céramique usagée nous a permis de mesurer un déplacement de l'ordre du nanomètre.

Nous pouvons maintenant calculer le rapport R tension/déplacement du disque piézoélectrique neuf que nous avons utilisé : $R = \frac{56}{0.50} = 112 \text{ nm} \cdot \text{V}^{-1}$. Il est possible de mesurer un déplacement encore plus petit en réduisant la tension en sortie du GBF, mais la précision est théoriquement censée diminuer. En effet, pour un déplacement de plus en plus petit, la photodiode va donner une amplitude de signal de plus en plus petite et l'oscilloscope aura de plus en plus de mal à rendre compte du signal.

5. Conclusion

Nous pourrions résumer ce processus expérimental à une série d'obstacles à franchir et que nous avons dû surmonter ou apprivoiser, pour atteindre notre but. L'essence même de l'expérience est problématique, car la simple volonté de capter un mouvement de l'ordre du nanomètre nous exposait au facteur de précision de nos manipulations.

La réalisation a été la plus compliquée. Nous avons procédé étape par étape en faisant quelques concessions. En effet, nous avons d'abord changé l'interféromètre de Michelson, pour pouvoir exercer des modifications dessus, puis nous avons cherché un moyen de placer notre disque piézoélectrique engendrant un premier souci : nous ne connaissions pas la référence de cette céramique car elle a été récupérée dans de vieux appareils, comme des buzzers. Ensuite, il s'est avéré que cette céramique n'était pas la plus fiable, puisqu'en la changeant nous avons constaté une drastique élévation du déplacement. Nous avons aussi été contraint d'atténuer le mouvement du disque piézoélectrique en le compressant dans le système.

Quand nous avons dû faire les mesures nous nous sommes rendu compte que plusieurs facteurs entraient en jeu, et nous n'avons pas eu de résultat immédiat. En outre, après la calibration que nous devons réaliser à chaque séance de prise de mesures, il ne fallait rien toucher, sauf l'oscilloscope. De plus, les mesures d'une séance à l'autre étaient différentes à cause des conditions extérieures. Il a donc fallu reprendre, pour ce compte rendu, les mesures les plus précises que nous avons pu atteindre. De plus, nous avons dû nous placer dans un environnement le plus sombre possible, chose assez compliquée étant donné les allers et venues des autres usagers de la salle où nous étions, perturbant la luminosité ambiante à laquelle la photodiode est très sensible.

La partie théorique n'a pas été compliquée : nous avons trouvé un moyen simple pour calculer l'amplitude du mouvement. Nous avons donc obtenu des résultats faciles à interpréter mais avec une incertitude conséquente due à tous ces facteurs.

Il est certainement possible d'aller plus loin en remplaçant certaines pièces, notamment en changeant le laser rouge avec un laser vert, bleu ou même un laser émettant dans l'ultraviolet, afin d'obtenir des mesures plus précises. La longueur d'onde étant plus petite, le passage du point central de la figure d'interférence de sombre à éclairé correspondrait par exemple, pour un laser bleu, à une distance d'une demi longueur d'onde de l'ordre de 230 nm. Ainsi, pour une même variation de l'intensité lumineuse, nous obtiendrions un déplacement plus petit du disque piézoélectrique.

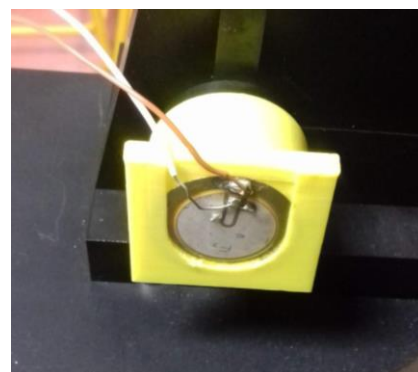
6. Annexes :

6.1. L'impression 3D

Nous avons décidé de profiter de l'imprimante 3D d'un des membres de notre équipe pour créer une pièce qui supporte la céramique piézoélectrique et qui se fixe sur l'un des miroirs du Michelson, en l'occurrence le miroir M1.

Dans un premier temps nous avons imprimé la pièce. Dans un second temps, en complément, nous avons imaginé puis imprimé un support pour le nouveau miroir, à coller sur le disque piézoélectrique. Cela nous permet d'avoir une seule épaisseur de plastique entre la céramique piézoélectrique et le miroir, qui a alors peu de chance d'altérer nos mesures.

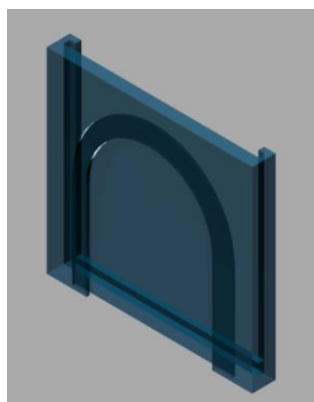
Nous avons ensuite appliqué du ruban adhésif noir sur la pièce pour avoir le minimum de reflets parasites.



6.1.1. Création numérique d'une pièce

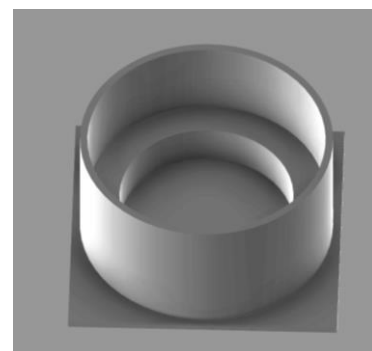
Pour créer une pièce en 3D il faut d'abord la modéliser. Cependant, il y a certaines contraintes qui doivent être respectées pour que l'imprimante puisse faire la pièce. En effet, une imprimante à dépôt de filament ne peut pas imprimer dans le vide. Cependant, la pièce à imprimer possède deux cavités : une pour la placer sur l'ancien miroir d'un côté, et une autre, pour placer la céramique piézoélectrique.

Pour modéliser cette pièce, nous l'avons divisé en 2 parties imbriquables l'une dans l'autre (schémas ci-après). En plus, cela nous a permis de séparer le disque piézoélectrique du montage lorsque nous souhaitons travailler uniquement sur celui-ci.



Sur la pièce de gauche, la seule partie dans le vide est la forme arrondie, une imprimante traditionnelle peut donc l'imprimer. Cette partie va accueillir, dans la fente créée, le disque piézoélectrique.

Sur la pièce à droite l'embase est rectangulaire, c'est ici que va se glisser la pièce de droite. La partie cylindrique va se placer sur le support du miroir d'origine de l'interféromètre de Michelson.



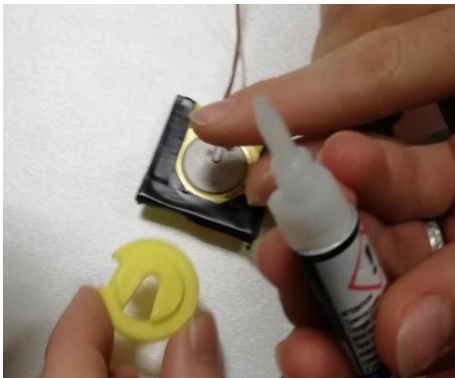
6.1.2. Impression et installation de la pièce

Le fichier informatique de la pièce à ensuite été transformé en fichier G-CODE (il s'agit d'une suite de coordonnées dans l'espace que doit suivre la buse d'impression pour appliquer le plastique fondu). L'imprimante a fonctionné pendant 1 heure environ pour une pièce de quelques grammes seulement. A cause de mesures erronées, notre premier essai était trop

large pour assurer un maintien idéal. Le second, lui était parfaitement ajusté à notre appareil, nous permettant même de mettre de côté un joint en téflon prévu à l'origine pour rentrer le support en force.

6.1.3. Une pièce supplémentaire

Après la mise en place du premier support, nous avons décidé d'imprimer un autre support, pour le miroir cette fois. Nous avons imprimé une petite pièce de 1 gramme, parfaitement adaptée au miroir que nous avons choisi pour l'expérience. Cette pièce a été conçue pour être collée sur le disque piézoélectrique, lui-même placé dans son encoche. La pièce a été volontairement ouverte sur la surface de contact avec le disque piézoélectrique, de manière à laisser passer les fils électriques (voir photographie ci-dessous).



La surface à coller au disque est ajustée pour qu'elle ne soit qu'en contact avec le disque central de la céramique. Ce point est important car si les parties dorée et argentée sont collées ensemble, l'impulsion mécanique du disque central serait impossible.

7. Remerciements :

Nous souhaitons remercier, pour avoir permis à notre projet d'arriver à terme, M. Torrens et M. Ducassou, professeurs de Physique-Chimie, qui nous ont encadrés, guidés et conseillés sur les démarches à suivre, toujours dans un esprit de bienveillance, durant ces mois de recherches et d'expérimentations.

Nous souhaiterions également remercier M. Ruamps, professeur de PC qui a su nous faire avancer, notamment lorsque nous avons été confrontés à des problèmes.

De plus, nous remercions tout le personnel présent dans les laboratoires qui ont mis à notre disposition le matériel nécessaire à l'élaboration de notre projet.

Enfin, nous remercions M. Cousturian, étudiant en sciences qui a su porter un regard critique sur notre travail.