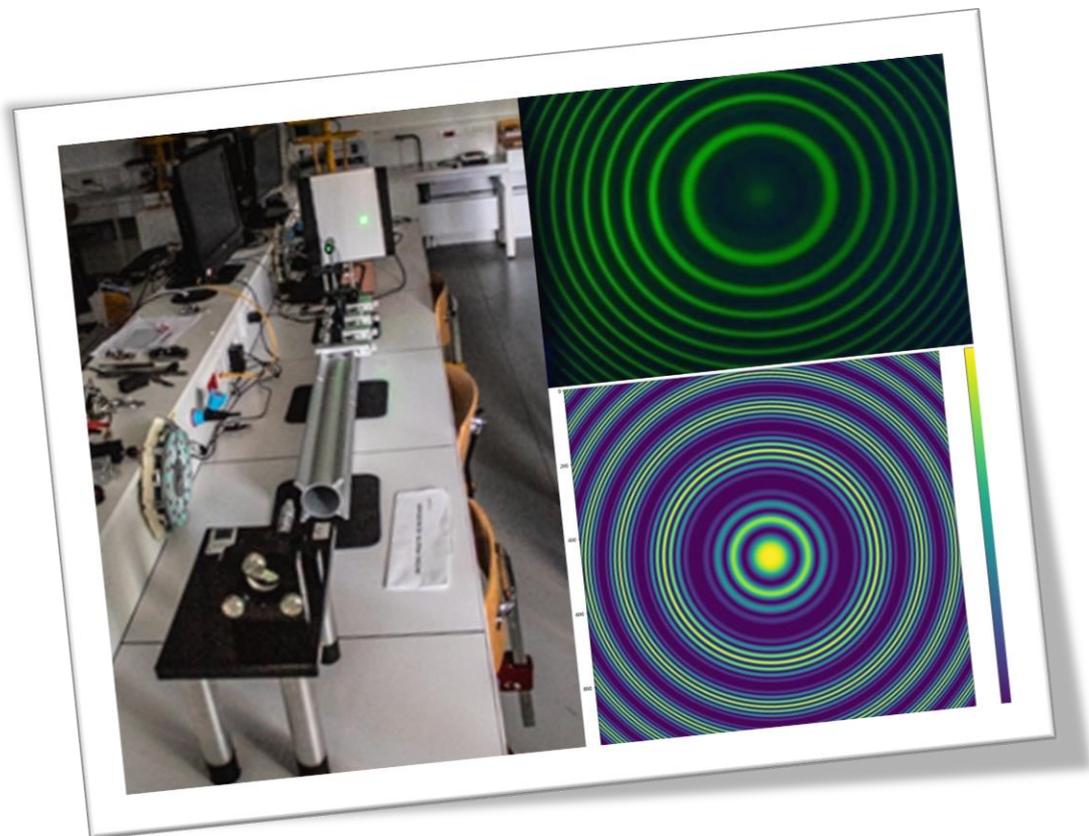


**Interféromètres à division d'amplitudes :
Fabry-Pérot, Michelson, Mach-Zehnder...**



Etudiants :

Maxime DANJOU

Louis PAUCHET

Adrien GAILLIGUE

Cathy STAES

Adrian MARSZALEK

**Léa Subidsha
SUMANTHIRAN**

Enseignant-responsable du projet :

David HONORE

Date de remise du rapport : **12/06/2021**

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 16**

Intitulé du projet : **Interféromètres à division d'amplitudes : Fabry-Pérot, Michelson, Mach-Zehnder...**

Type de projet : **expérimental et bibliographique**

Objectifs du projet :

Le premier objectif de ce projet était d'améliorer nos connaissances sur les interféromètres et de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement. Ensuite, le projet avait pour but de nous permettre de prendre en main les interféromètres. Enfin, le dernier objectif du projet était de nous donner la possibilité d'établir des protocoles, de réaliser et exploiter des expériences, et d'interpréter et commenter des résultats.

Mots-clefs du projet : **interférométrie, division d'amplitude**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **N.A.**

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	3
2	METHODOLOGIE ET ORGANISATION	4
3	ETUDES D'INTERFEROMETRES A DIVISION D'AMPLITUDE	5
3.1	INTERFEROMETRE DE FABRY-PEROT	5
3.1.1	<i>Histoire et Applications</i>	5
3.1.2	<i>Principe et fonctionnement</i>	6
3.1.3	<i>Expérience n°1 : Mesure du coefficient de réflexion énergétique</i>	8
3.1.4	<i>Expérience n°2 : Etudes des figures d'interférences à partir des photographies</i>	9
3.2	INTERFEROMETRE DE MICHELSON	13
3.2.1	<i>Caractéristiques et Applications</i>	13
3.2.2	<i>Histoire.....</i>	13
3.2.3	<i>Expérience n°3 : Détermination du coefficient de transmission d'une lentille semi-réfléchissante.....</i>	14
3.2.4	<i>Expérience n°4 : Juxtaposition de deux interféromètres de Michelson.....</i>	15
3.3	OUVERTURE ET REMARQUES.....	16
3.3.1	<i>Interféromètre de Mach-Zehnder.....</i>	16
3.3.2	<i>Problèmes rencontrés.....</i>	19
4	CONCLUSION.....	20
5	BIBLIOGRAPHIE	21
	ANNEXE 1 : DIAGRAMME DE GANTT.....	24
	ANNEXE 2 : ANNEXES GENERALES FABRY-PEROT.....	25
1.	ETUDE DU DEPHASAGE.....	25
2.	ETUDE DE LA REPARTITION DE L'ECLAIREMENT	26
3.	CALCUL DE LA FINESSE, SEPARATION DE DOUBLETS SPECTRAUX	27
4.	EXPLOITATION EXPERIMENTALE DES MESURES A PARTIR DES PHOTOGRAPHIES	28
5.	DETERMINATION DU COEFFICIENT R.....	30
	ANNEXE 3 : PROTOCOLE D'ALIGNEMENT DES LAMES DE L'INTERFEROMETRE DE FABRY-PEROT 31	
1.	MATERIEL NECESSAIRE :	31
	ANNEXE 4 : EXPERIENCE N°1.....	33
1.	PHOTOGRAPHIES ET ILLUSTRATIONS	33
2.	MATERIEL NECESSAIRE :	33
3.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL :	33
4.	PROTOCOLE DE TRAITEMENT DES DONNEES :	34
5.	RESULTATS	35
	ANNEXE 5 : EXPERIENCE N°2.....	38
1.	PHOTOGRAPHIES ET ILLUSTRATIONS	38
2.	BUT DE L'EXPERIENCE :	39
3.	MATERIEL NECESSAIRE :	39
4.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL :	39
5.	PROTOCOLE DE MESURE DES RAYONS DES CERCLES :	40
6.	PROTOCOLE DE TRAITEMENT DE DONNEES :	40
7.	RESULTATS	43
	ANNEXE 6 : EXPERIENCE N°3.....	45

1. PHOTO DU MONTAGE.....	45
2. BUT DE L'EXPERIENCE.....	45
3. MATERIEL NECESSAIRE	45
4. PROTOCOLE	45
5. MESURE DES COEFFICIENTS	46
6. RESULTATS	46
ANNEXE 7 : SIMULATION DE LA FIGURE D'INTERFERENCE AVEC LES DEUX INTERFEROMETRES DE MICHELSON	47
7. SIMULATION.....	47
8. NOTEBOOK DE CALCUL.....	51
ANNEXE 8 : INTERFERENCES A 4 ONDES AVEC DEUX INTERFEROMETRES DE MICHELSON 53	
1. BUT DE L'EXPERIENCE :	53
2. SCHEMA DE PRINCIPE :.....	53
3. MATERIEL NECESSAIRE :	53
4. PROTOCOLE :	53
5. RESULTATS	54

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet physique à réaliser durant notre formation, nous avons été amenés à travailler sur les interféromètres à division d'amplitude. Nous avons réalisé ce projet encadré par M. David Honoré enseignant-chercheur en optique à l'INSA Rouen Normandie.

Tout d'abord, le but principal du projet est de nous permettre de réaliser des expériences portant sur les interféromètres de Michelson et de Fabry-Pérot. Par la présence de l'optique dans de nombreux domaines, nous sommes invités à nous rendre compte de l'importance de ces systèmes au sein du monde scientifique. Ce travail doit comporter de nombreuses recherches, afin que nous puissions prendre connaissance des avancées scientifiques que nous devons à ces interféromètres, et d'observer leur utilité pratique dans certains domaines.

Par ailleurs, ce projet doit nous permettre d'étoffer nos connaissances scientifiques dans le domaine de l'optique et d'améliorer notre capacité à mener une expérience à son terme. Par conséquent, un autre objectif est d'apprendre à manipuler les différents éléments optiques, et d'élargir notre regard sur les phénomènes et contraintes pouvant interférer sur une expérience. Ainsi, ce travail est aussi une opportunité d'enrichir nos connaissances scientifiques dans le domaine de l'optique, en étudiant concrètement et expérimentalement des interféromètres, ce domaine étant jusqu'alors assez théorique à nos yeux.

En outre, par l'ampleur du projet et par sa durée, ce projet a aussi pour finalité d'améliorer nos capacités organisationnelles et notre aptitude à travailler en autonomie ou en groupe. Nous sommes incités à bien communiquer avec le groupe, notamment sur l'avancée de nos tâches, et à privilégier la concertation aux initiatives personnelles. Ainsi, cette expérience de groupe doit nous être utile et nous apporter des pistes en vue de projets similaires que nous pourrions avoir à mener dans nos futures carrières professionnelles.

Dans un premier temps, nous exposerons la méthodologie que nous avons appliquée tout au long de ce projet. Puis, dans un second temps, nous consacrerons une partie à l'étude de l'interféromètre de Fabry-Pérot. Une troisième partie sera accordée à l'analyse de l'interféromètre de Michelson. Pour ces deux études principales, nous commencerons par une approche historique et théorique, puis nous effectuerons un travail plus pratique à l'aide des expériences réalisées au cours du projet. Par ailleurs, au sein d'une ultime partie, nous nous aborderons l'interféromètre de Mach-Zehnder (que nous n'avons pas pu étudier expérimentalement), ainsi que sur les points communs ou les différences entre les différents interféromètres, et sur les divers problèmes que nous avons rencontrés.

2 METHODOLOGIE ET ORGANISATION

Afin de mener notre projet à son terme, de manière efficace et rigoureuse, nous avons dû nous organiser et nous répartir les multiples tâches.

Tout d’abord, nous avons eu recours à un diagramme de Gantt (**ANNEXE 1** :). Cet outil nous a permis de planifier de manière claire et concise toutes les opérations à effectuer, de nous donner des délais précis à tenir pour chaque travail, et de nous indiquer qui devait réaliser les différentes tâches. Ainsi, nous avons des objectifs personnels clairs à respecter. Chacun savait ce qu’il avait à faire, et nous ne nous sommes pas éparpillés dans des recherches personnelles inutiles, ce qui aurait pu s’avérer être une perte de temps non négligeable.

Par ailleurs, ce diagramme n’est pas resté identique tout au long de notre projet. En effet, toutes les deux semaines, nous organisons des réunions Zoom afin de faire un point sur l’avancée des différents travaux par rapport à la planification initiale, et de modifier le diagramme de Gantt en conséquence. Comme nous l’expliquerons ultérieurement, certaines tâches expérimentales se sont avérées plus longues que prévu, et une adaptation de notre calendrier a été nécessaire à maintes reprises.

En outre, notre projet portant principalement sur l’étude de deux interféromètres, nous avons divisé notre groupe en deux équipes de travail. Chaque équipe était spécifique à un interféromètre et cette distribution des tâches nous a permis d’avancer plus rapidement. Nous nous sommes répartis ainsi :

Tableau 1 : Répartition du travail

Interféromètre de Michelson	Interféromètre de Fabry-Pérot
Cathy STAES Louis PAUCHET Maxime DANJOU	Léa Subidsha SUMANTHIRAN Adrian MARSZALEK Adrien GAILLIEGUE

Pour chaque équipe, l’un d’entre nous travaillait sur des calculs, pendant que d’autres rédigeaient les protocoles expérimentaux. Nous avons procédé de la même façon durant nos expériences. Certains s’occupaient de la modification des paramètres expérimentaux pendant que d’autres pouvaient commencer à exploiter des résultats ou prendre en notes des valeurs ou des observations. De plus, du fait que nous n’étions que trois par équipe, nous nous sommes tous sentis concernés et impliqués dans l’étude de notre interféromètre respectif.

Dans l’optique de mettre en commun nos différents résultats et analyses, nous avons eu recours à un “SharePoint”. Ceci nous a permis de nous renseigner sur les avancées des autres membres du groupe en temps réel, sans être obligés de planifier d’innombrables réunions. Grâce à cet outil interactif, nous pouvions relever à distance des commentaires sur les multiples travaux des uns et des autres. De plus, cela s’est avéré être un gain de temps au moment de la rédaction de ce rapport. En effet, chacun a pu apporter sa contribution en temps réel, et soulever directement par écrit des remarques quant à certains aspects de celui-ci.

Pour conclure, nous avons tous pris le temps de bien communiquer entre nous sur l’avancée de nos tâches. Cette bonne communication nous a évité toute incompréhension et a permis à chacun de travailler sereinement.

3 ETUDES D'INTERFEROMETRES A DIVISION D'AMPLITUDE

3.1 Interféromètre de Fabry-Pérot

3.1.1 Histoire et Applications

1.1.1.1. Histoire

Cet interféromètre doit son nom aux deux physiciens français Charles Fabry et Alfred Pérot.

Charles Fabry est un physicien français né le 11 juin 1867 à Marseille décédé le 11 décembre 1945 à Paris spécialiste des travaux dans le domaine de l'optique. On lui doit notamment de nombreux appareils optiques tels qu'un micro-photomètre, une solution pratique de la photométrie hétérochrome en 1913 ou encore un photomètre sans écran diffusant en 1920. Mais on retient surtout de son œuvre la co-invention avec Alfred Pérot en 1899 de l'interféromètre de Fabry-Pérot. Avec Henri Buisson, Charles Fabry étudie en 1913 les spectres lumineux du soleil et découvre, à l'aide de l'interféromètre de Fabry-Pérot, qu'une partie importante des rayons ultra-violetts devant être émise par le soleil, n'atteint pas la surface terrestre. Ils ont alors émis l'hypothèse qu'il existait une couche gazeuse particulière dans l'atmosphère qui filtrait les rayons ultra-violetts. Dans un premier temps, on associa ce gaz à de l'ozone. Le physicien météorologiste Gordon Dobson le confirmera, et approfondira les recherches sur l'ozone. [1] [2] [3]

Alfred Pérot est un physicien français né le 3 novembre 1863 à Metz et décédé à l'âge de 62 ans le 27 novembre 1925 à Paris. Durant sa carrière scientifique, Pérot avait pour qualité, en plus d'être un bon physicien, d'être capable de construire les appareils nécessaires à ses recherches. En 1888, alors qu'il préparait son agrégation à Marseille, il rencontre Charles Fabry. Quelques années plus tard, la réunion des recherches de Fabry et de la créativité de Pérot débouchera sur la co-invention de l'interféromètre à onde multiples appelés interféromètre de Fabry-Pérot. Il découlera de cette découverte plus de 250 publications ainsi que des honneurs et des prix. A la fin de sa carrière, Pérot aura aussi développé durant la première guerre mondiale la téléphonie sans fil, ou encore la lampe à trois électrodes. [4] [5]

L'interféromètre de Fabry-Pérot a permis de nombreuses découvertes scientifiques dans de nombreux domaines. Il a permis des avancées sur la vérification expérimentale de l'effet de Michelson, sur l'effet Doppler-Fizeau, sur la mesure des petites épaisseurs ou encore sur la détermination précises des longueurs d'ondes (spectrométrie). Ainsi l'interféromètre de Fabry-Pérot a contribué à faire progresser la science dans de nombreux domaines. [6]

1.1.1.2. Applications

L'interféromètre de Fabry Pérot a ouvert la voie à beaucoup de domaines d'études et d'innovations. Par exemple, la réalisation de cavités laser, le contrôle de la longueur d'onde des signaux pour certaines télécommunications (grâce à la grande précision de l'interféromètre), et la spectrométrie sont des domaines d'application de l'interféromètre.

En astronomie, l'interféromètre de Fabry-Pérot est utilisé en raison de sa grande supériorité sur les réseaux de diffraction en ce qui concerne le produit résolution-luminosité. En effet, pour observer correctement le profil des raies d'absorption interstellaires il faut atteindre un pouvoir résolvant de 10^5 , ce qui n'est en général pas le cas avec les télescopes européens (ils peuvent attendre un pouvoir résolvant de 10^4). Ainsi, après avoir couplé un interféromètre de Fabry-Pérot à un spectrographe ou à un télescope, on peut atteindre un pouvoir résolvant de 10^5 avec une faible perte de lumière. [7]

L'interféromètre de Fabry Pérot est aussi très utile pour l'observation solaire sur la raie H_{α} . Ceci permet de distinguer divers phénomènes se produisant à la surface du soleil (protubérances, convection des gaz, taches sombres etc.). Sans filtre, ou avec un simple filtre densité neutre, on ne pourrait pas les observer. Il est tout à fait possible d'adopter la même méthode pour isoler des longueurs d'onde différentes. Pour n'observer qu'une longueur d'onde, on couple l'interféromètre avec un filtre dichroïque. On peut adopter cette méthode pour observer d'autres longueurs d'onde. [8]

3.1.2 Principe et fonctionnement

L'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux lames semi-réfléchissantes parallèles à haut coefficient de réflexion. C'est ce qu'on appelle une cavité optique plane. Le facteur de réflexion énergétique est caractéristique de l'interféromètre, il correspond au produit des coefficients de réflexion des deux lames. Pour un interféromètre de Fabry-Pérot, R est fréquemment supérieur à 0,90. Lorsqu'une onde lumineuse entre dans la cavité, à chaque réflexion sur l'une des lames, une partie est réfléchie et une autre transmise. Ainsi, on obtient une série d'ondes faisant des allers-retours dans la cavité. En sortie, on obtient une série d'ondes parallèles $\vec{E}_1, \vec{E}_2 \dots \vec{E}_n$. Une étude théorique de l'interféromètre montre qu'un aller-retour dans la cavité induit successivement à chacun des rayons sortants un déphasage de $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} ne \cos \alpha'$, et compte tenu du phénomène de réflexion, chaque onde \vec{E}_n , a une amplitude R fois moins élevée que l'onde \vec{E}_{n-1} . (L'expression du déphasage est démontrée en **ANNEXE 2** :). [7] [8] [9]

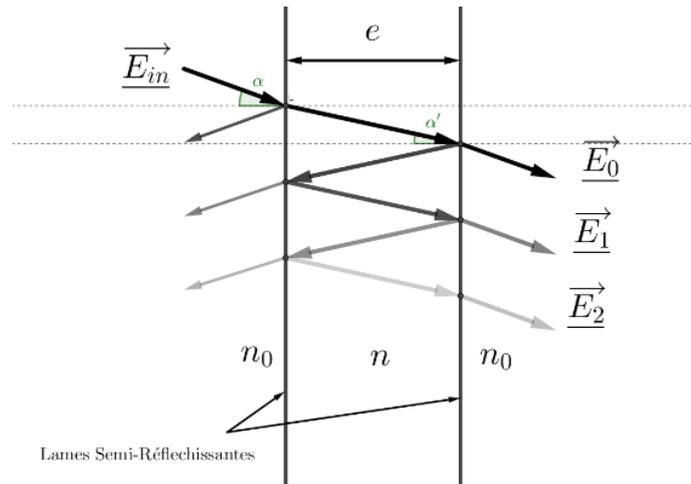


Figure 1 : Principe de fonctionnement

Une fois que tous les rayons $\vec{E}_1, \vec{E}_2 \dots \vec{E}_n$ sont réunis en un même point, ils interfèrent. On montre que l'intensité lumineuse relative en ce point, dépend de ϕ et R , et suit la répartition suivante [10] :

$$A(\phi) = \frac{I_{total\ sortie}}{I_{entrant}} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\phi}{2}} \quad (1)$$

(La démonstration de cette formule est disponible en **ANNEXE 2** :)

C'est une répartition dite d'Airy. La courbe de $A(\phi)$ est constituée de pics périodiques. En l'occurrence, plus R est proche de 1, plus les pics sont fins. (Voir **Figure 2**) C'est une spécificité de cet interféromètre, il produit des interférences constructives très marquées et localisées.

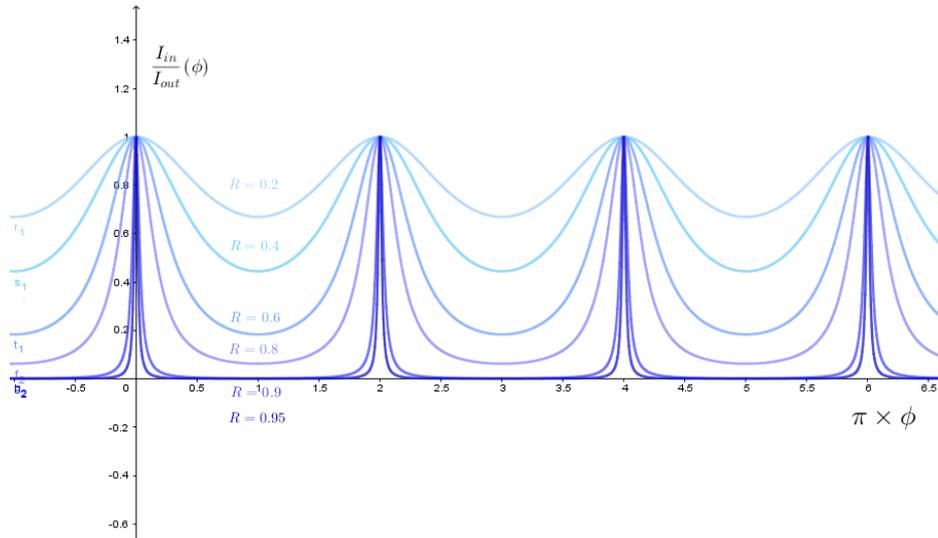


Figure 2: Courbe de $A(\phi)$ en fonction de la valeur de R

L'interféromètre de Fabry-Pérot peut être exploité de plusieurs manières. Nous en présentons deux.

1.1.1.3. Avec des lentilles et une source diffuse :

Derrière l'interféromètre de Fabry-Pérot, on place une source lumineuse (lampe à décharge) suivie d'un dépoli. Entre le dépoli et l'interféromètre, on place une lentille qui renvoie à l'infini la lumière diffusée par le dépoli. En sortie de l'interféromètre, on place une autre lentille qui vient focaliser les rayons sur un écran.

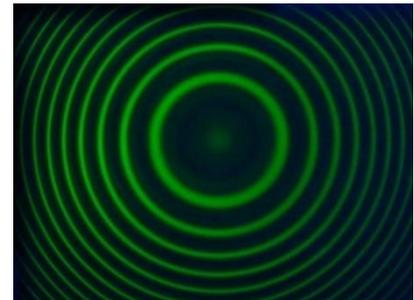


Figure 3 : figure d'interférence obtenue avec une lentille et une source diffuse

Ainsi selon l'angle d'incidence des rayons sur l'interféromètre, une fois focalisées, les rayons forment sur l'écran soit des interférences constructives soit destructives. Avec une lentille sphérique cela se manifeste sous forme d'anneaux lumineux (Voir **Figure 3**). On montre que le carré du diamètre des franges lumineuses suit la loi suivante :

$$D^2 = N \frac{4f'^2 \lambda}{n_0 e} + K \tag{2}$$

f' est la longueur focale de la lentille en sortie de l'interféromètre. λ est la longueur d'onde étudiée. e est l'épaisseur de cavité (distance entre les lames réfléchissantes). n_0 est l'indice du milieu optique entre les lames. K est une constante. N est le numéro de l'anneau 1 étant le plus petit, N étant le plus grand. [11] (La démonstration de cette formule est disponible en ANNEXE 2 :)

Pour la suite du rapport on notera a le coefficient directeur : $a = \frac{4f'^2 \lambda}{n_0 e}$

1.1.1.4. Avec un laser :

On place un laser en entrée de l'interféromètre, et une photodiode en sortie. On peut ainsi étudier l'évolution de l'éclairement en fonction de l'épaisseur de cavité, et tenter d'observer la répartition d'Airy.

L'écart entre deux pics à la valeur suivante : $(e_2 - e_1) = \frac{\lambda}{2n_0 \cos \alpha}$

Avec des lasers en lumière visible, il faudrait pouvoir déplacer les lames avec une précision de l'ordre du nanomètre pour pouvoir faire de telles mesures. Ce n'est pas possible avec le matériel à notre disposition. Cependant, sur le marché, il existe des interféromètres qui utilisent des cristaux piézo-électriques pour faire varier l'épaisseur de cavité de manière très précise.

3.1.3 Expérience n°1 : Mesure du coefficient de réflexion énergétique

Le but cette expérience est de déterminer le coefficient de réflexion énergétique de l'interféromètre R .

Pour ce faire, nous avons utilisé un laser vert avec un plateau micrométrique, l'interféromètre de Fabry-Pérot et un capteur CCD Caliens connecté à un ordinateur. Nous avons commencé par aligner les éléments optiques en suivant le protocole d'alignement que nous avons établi en amont.¹ Après l'alignement, nous avons placé la barrette CCD au niveau du laser, en sortie de l'interféromètre. En désaxant les lames de l'interféromètre, on fait apparaître une série de points correspondant à $\vec{E}_1, \vec{E}_2 \dots \vec{E}_n$ de manière distincte. Une fois que celle-ci se trouvait dans l'axe du capteur nous avons lancé l'acquisition. Nous remarquons que le signal se compose d'une série de pics décroissants. Pour que ces pics soient bien distincts, nous avons modifié le parallélisme entre les miroirs de l'interféromètre et joué sur l'épaisseur de la cavité. Après avoir obtenu un signal correct, nous avons exploité les valeurs enregistrées. La tension étant proportionnelle à l'intensité, nous avons relevé et tracé dans un graphique l'intensité lumineuse relative V_n de chaque pic numéroté n . Comme $\ln(V_n) = Cste + 2 \ln(R) n$, nous avons obtenu après une régression linéaire de $(n, \ln(V_n))$ un coefficient directeur $Q = 2 \ln(R)$ qui nous a permis d'en déduire $R = \exp\left(\frac{Q}{2}\right)$. [11]

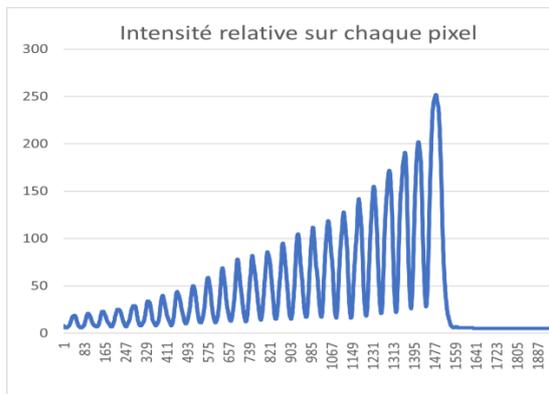


Figure 4 : signal du capteur

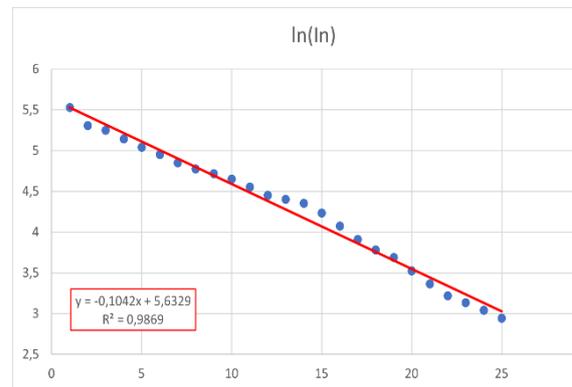


Figure 5 : Régression linéaire $(n, \ln(V_n))$

Tableau 2 : Résultats expérimentaux

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_{moyen}	$R_{\text{constructeur}}$
0.95	0.74	0.94	0.81	0.80	0.89	0.85	> 0.97

Notre protocole complet et des résultats plus exhaustifs sont disponibles à l'ANNEXE 4 : . Nous avons remarqué durant l'expérience que l'éclairement semble bien suivre une loi géométrique, car les points obtenus étaient le plus souvent bien alignés. Néanmoins, nous constatons que nos valeurs de R sont trop éloignées de la valeur annoncée par le constructeur.

¹ La réalisation de l'alignement avec le plateau micrométrique a permis un alignement précis entre les éléments optiques. Durant l'alignement, sur la figure d'interférence derrière l'interféromètre, nous avons observés que l'intensité lumineuse était parfois forte et parfois faible, témoignant le phénomène d'interférence constructives et destructives.

Nous remarquons aussi que nos mesures manquent de précision car R varie trop, avec un écart-type de 0.07.

Nous avons cherché à améliorer notre protocole. Nous avons pensé que le problème pouvait venir de la précision de l'alignement du capteur CCD avec la série de points lumineux. En effet, pendant l'alignement, il nous est parfois arrivé d'obtenir des répartitions de pics en cloche, ou d'avoir des décroissances trop fortes, car tous les points n'étaient pas bien sur la barrette CCD. C'est pourquoi, nous avons envisagé d'utiliser un autre plateau micrométrique pour aligner le capteur CCD.

3.1.4 Expérience n°2 : Etudes des figures d'interférences à partir des photographies

Le but de cette expérience est d'obtenir des photographies de figures d'interférences pour vérifier la relation $D^2 = N \frac{4f'^2\lambda}{n_0e} + K$ (2). Nous avons utilisé un interféromètre de Fabry-Pérot, des lampes, un appareil photo avec un téléobjectif, un dépoli, un laser avec un plateau micrométrique pour l'alignement et enfin, dans un premier temps, une lentille convergente. (Voir **Figure 6**) (Une photographie du montage en **ANNEXE 4** :)

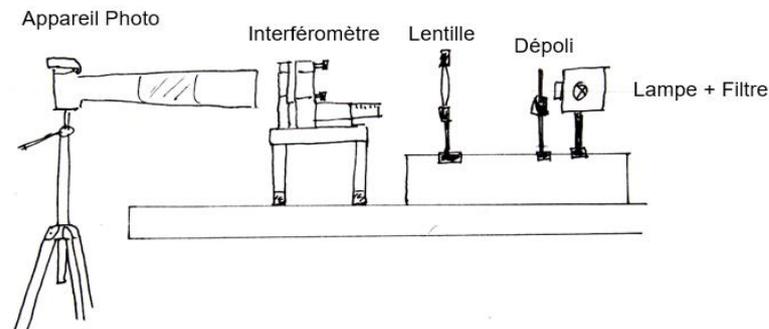


Figure 6 : Schéma du montage

Pour commencer, nous avons aligné les lames de l'interféromètre², ainsi que la lentille. Ensuite, nous avons remplacé le laser par une lampe à mercure. Des filtres nous ont permis d'isoler des longueurs d'ondes émises par la lampe, pour étudier les figures d'interférences qu'elles produisent.³

Lors de nos premières expériences, nous avons constaté que les figures d'interférences sur nos photos ne contenaient que 2 ou 3 franges lumineuses. Nous avons alors décidé d'enlever la lentille convergente, car comme elle avait un diamètre trop petit, elle occultait la source diffuse. Pour que l'image reste à l'infini, nous avons disposé la lampe et le dépoli à une distance plus importante de l'interféromètre qu'auparavant.

Concernant la prise de vue des photos, nous avons choisi d'utiliser un appareil photo reflex avec un téléobjectif. Le reflex nous a permis d'avoir le contrôle sur tous les paramètres de

² Le bon alignement des éléments optiques était indispensable pour que les rayons émis par la source lumineuse arrivent bien en incidence normale sur l'interféromètre. Il fallait notamment bien aligner les lames de l'interféromètre et ensuite les lentilles. Nous avons donc suivi étape par étape le protocole d'alignement.

³ Nous avons commencé nos premières expériences avec une lampe à sodium puis nous avons utilisé dans un second temps une lampe à mercure. De plus, en lumière blanche, nous avons constaté qu'on n'obtient qu'une tache uniforme.

prise de vue, quant au téléobjectif, il nous a permis d'obtenir des figures plus grandes sur les photographies. En l'occurrence, il fut important de fermer le diaphragme de l'objectif pour que les franges des figures d'interférences soient moins larges.

Nous avons pris plusieurs séries de photos, où nous avons fait varier l'épaisseur de cavité à l'aide d'une vis micrométrique. Nous avons remarqué sur nos photos que les figures obtenues étaient similaires aux figures d'interférences théoriques. Nous avons aussi constaté que lorsque les miroirs s'éloignaient, les franges se resserraient (et inversement, lorsque les miroirs se rapprochaient, les franges s'écartaient).

Concernant l'objectif de l'expérience, pour chaque photo, nous avons mesuré en pixels les rayons des cercles à l'aide du logiciel GIMP. Nous avons ensuite rentré ces valeurs dans un tableur, qui convertit entre autres les rayons en pixels en *mm*. Nous avons tracé le diamètre réel au carré (D^2) d'un anneau en fonction de son numéro (N). Une régression linéaire nous permet alors d'obtenir un coefficient directeur expérimental a_{exp} , tel que $D^2 = a_{exp} N + K$. (Nous détaillons davantage notre processus de traitement à l'**ANNEXE 5** :).

Nous aurions pu calculer $a_{théorique} = \frac{4f^2\lambda}{n_0e_{théorique}}$, et ensuite comparer avec a_{exp} . Néanmoins nous ne pouvons pas obtenir l'épaisseur théorique à l'aide des graduations de la vis micrométrique, la vis donnant une valeur relative et non absolue.

Ainsi, on peut seulement comparer $e_{exp} = \frac{4f^2\lambda}{a_{exp}}$ et $e_{molette}$ l'écart relatif entre les lames, indiqué par la vis micrométrique.

Pour chaque série de photos, nous avons alors tracé e_{exp} en fonction de $e_{molette}$. Après avoir fait une régression linéaire, nos points étaient censés se trouver sur une droite de type

$$e_{exp} = \gamma e_{molette} + e_{ref}, \text{ avec } \gamma = -1.$$

(Etant donné que sur notre interféromètre, +1 mm en graduation équivaut à -1 mm d'épaisseur de cavité.)⁴

Nos résultats sont les suivants : (les graphiques sont disponibles dans l'annexe en ANNEXE 5 :)

Tableau 3 : Résultats expérimentaux

Focale (mm)	Longueur d'onde (nm)	Coefficient directeur γ	Ordonnée à l'origine e_{ref}	Coefficient de détermination R^2
200	532 (Vert)	-1,110	23.439	0.9982
200	578 (Jaune)	-1,076	22,808	0.9954
70	532 (Vert)	-0.9154	19.364	0.9995
70	578 (Jaune)	-0.9340	19.590	0.9997
49	434 (Bleu)	-0.9006	19.894	0.9831
Toutes Série Confondues		-0.9554	20,649	0.8956

⁴ Après avoir exploité plusieurs photos, nous avons obtenu la somme de l'épaisseur expérimentale entre les deux miroirs et de la position relative de la vis dans un tableau. Notre première idée était de comparer cette somme. Celle-ci étant presque constante, nous en avons déduit que l'épaisseur expérimental obtenu était cohérente.

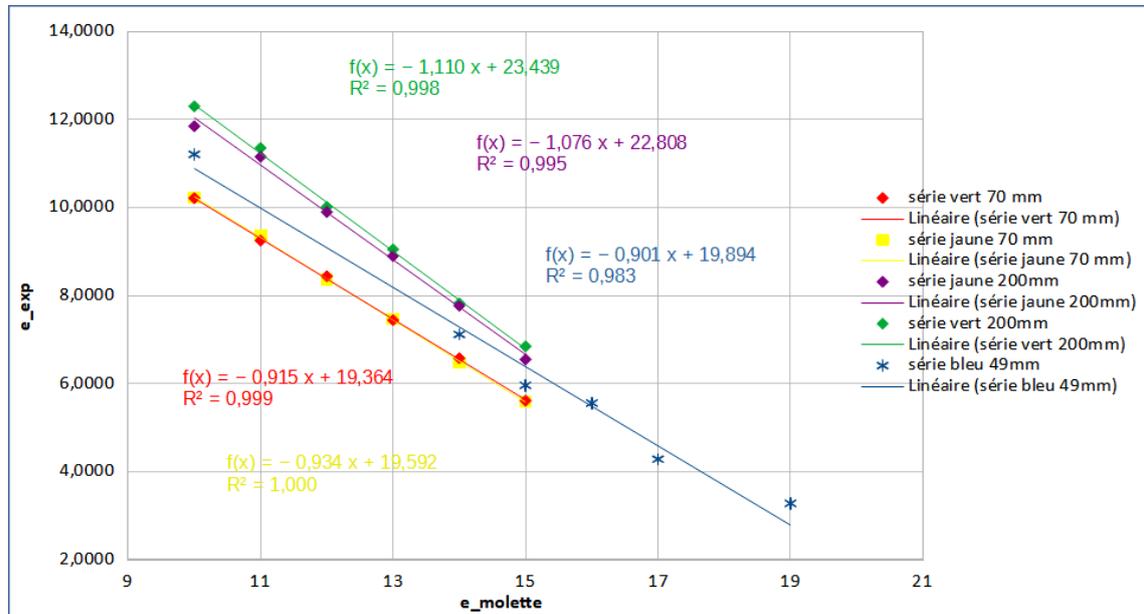


Figure 7 : Régression linéaire à partir des rayons des cercles

Nous constatons, que globalement nos coefficients directeurs γ sont proches de -1. Malgré tout, nos expériences mettent aussi en avant des erreurs potentielles, d'où la nécessité de réaliser des calculs d'incertitudes. Nous allons maintenant interpréter ces résultats en distinguant les cas.

Sur toutes les séries confondues l'ensemble des points est regroupé autour d'une droite dont le coefficient directeur est -0.9554, ce qui est proche de -1, notre résultat théorique. Néanmoins, les points restent assez dispersés autour de cette droite, le coefficient de corrélation de 0.8956 en témoigne.

En distinguant les séries de photos une par une (Voir **Figure 7**), nous remarquons que les points sont très bien alignés. En revanche, les coefficients directeurs ont tendance à s'éloigner de -1 de manière significative.

Lorsque nous regardons deux séries de même focale et de longueur d'onde différentes, les points sont quasiment confondus. Par conséquent, nous vérifions que notre relation est vérifiée pour λ . Si nous prenons deux séries de focale différente et de longueurs d'onde identiques, on remarque que les séries sont assez écartées. Ceci nous amène à penser que nos principales sources d'erreur sont sur f' , ou a_{exp} .

Voyons alors les sources d'erreurs potentielles. Toutefois, il est à noter que nous avons dû faire face à plusieurs contraintes, et qu'il a fallu parfois faire des compromis.⁵

Tout d'abord, notre source n'était pas parfaitement située à l'infini, ce qui pouvait influencer l'incidence des rayons sur l'interféromètre, et par conséquent les images finales. Nous pourrions placer la source lumineuse plus loin de l'interféromètre.

Ensuite, notre téléobjectif a été centré à la main sur un trépied. Bien qu'on ait essayé de faire de notre mieux, les figures ne sont pas exactement au centre de l'image. Nous pouvons nous demander si des phénomènes de parallaxe entrent en jeu, et font que la figure d'interférence est déformée. Par ailleurs, comme notre relation est valable pour un objectif

⁵ Voir notes expérimentales.

équivalent à une lentille mince, on peut aussi se demander s'il est approprié d'utiliser ce modèle.

Finalement, nous constatons que les incertitudes sur $e_{molette}$ sont très faibles, contrairement à celles sur e_{exp} qui sont assez élevées. Cela montre que notre méthode de mesure manque de précision. Ceci est principalement dû à l'incertitude sur a_{exp} . Nous pouvons en déduire que c'est dû à nos franges lumineuses qui sont trop épaisses. En théorie, nous pouvons améliorer ce point en fermant davantage le diaphragme et en mettant la lampe plus loin, mais cela compliquerait beaucoup la prise de vue dans notre cas (trop peu de lumière).

En conclusion, les erreurs semblent être principalement dues à des phénomènes d'optique géométrique.

3.2 Interféromètre de Michelson

3.2.1 Caractéristiques et Applications

L'interféromètre de Michelson fut inventé par Albert Abraham Michelson et Edward Morley. C'est un dispositif optique, créé en 1887 qui permet de visualiser des interférences par division d'amplitude. Il est composé de deux miroirs, d'une lame semi-réfléchissante (voir **Figure 8**), ainsi que d'une source lumineuse. La source lumineuse peut être un laser, une lumière polychromatique, une lampe au sodium ou encore au mercure. Les franges d'interférences sont localisées à l'infini, et peuvent donc être visibles à l'œil nu, ou à l'aide d'une lentille convergente.

L'étude de l'éther luminifère par Michelson et Morley a permis de développer la notion d'élasticité, et de prévoir certains résultats expérimentaux en considérant la lumière comme une onde transmise par un éther. Ici, l'éther est considéré comme un fluide avec plusieurs propriétés.

De nos jours, le Michelson est utilisé dans de nombreux domaines. Tout d'abord, pour la visualisation de spectres cannelés avec le calcul de la différence de marche. Nous pouvons aussi avoir recours à son utilisation pour réaliser des tests de qualité en optique, tels que la planéité des miroirs ou d'autres surfaces. Il est également utilisé en imagerie médicale – pour la tomographie par exemple - ou encore pour détecter des ondes gravitationnelles. [12] [13] [14]

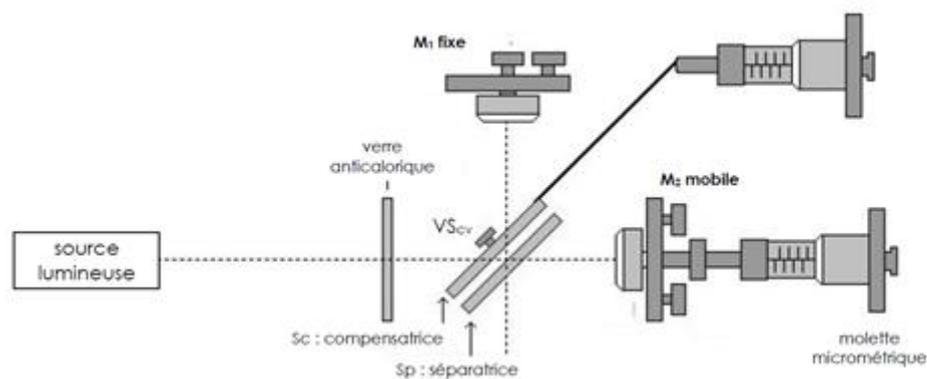


Figure 8 : Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson (vue de dessus)

3.2.2 Histoire

L'interféromètre de Michelson fut mis au point lors l'expérience de Michelson-Morley. Cette expérience permet d'abord de montrer que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépendait pas du référentiel d'observation, puis que l'éther luminifère n'existait pas.

1.1.1.5. **Albert A. Michelson (1852-1931)**



*Figure 9 :
Photograph of Nobel
Laureate Albert A.
Michelson [27]*

Albert Abraham Michelson est un physicien américain, reconnu internationalement pour ses travaux en optique. Il naît en 1852 dans la ville de Strelno, dans l'ancienne Prusse. Alors qu'il est âgé de deux ans, sa famille émigre vers les Etats-Unis. Il y passera la majorité du reste de sa vie. Il étudie dans de nombreuses universités prestigieuses, telles que l'Ecole Navale des Etats-Unis, l'Université de Berlin, ou encore le Collège de France et l'Ecole Polytechnique. Par la suite, il enseignera dans de plusieurs universités, notamment à Chicago, à Worcester et à Cleveland. [15] [16]

1878 marque l'année de sa première expérience renommée, avec une première approximation de la vitesse de la lumière. Au fil des années, ses travaux se concentreront sur cette thématique. En 1881, il réalise la « première expérience de Michelson », destinée à prouver l'existence de l'éther luminifère. Après une première tentative infructueuse, il perfectionnera son interféromètre aux côtés d'Edward Morley en 1887. Cependant, les deux physiciens ne parviennent toujours pas à mettre en exergue le déplacement de la Terre par rapport à l'éther. Cette expérience (*expérience de Michelson et Morley*) est aujourd'hui considérée comme l'une des plus importantes du XIXème siècle, car en dépit d'avoir été concluante, elle a notamment initié la réflexion sur la théorie de la relativité formulée en 1905 par Albert Einstein.

Par ailleurs, il serait incomplet de réduire Michelson à une unique expérience, puisqu'il contribua à de nombreuses autres avancées physiques. Nous pouvons citer comme exemples l'évaluation de la dimension du mètre en longueur d'onde lumineuse, diverses approximations de la vitesse de la lumière, ou encore la mesure du diamètre de l'étoile Bételgeuse. Pour toutes ses contributions à la physique, Albert Michelson a été décoré de la médaille Copley et a reçu le Prix Nobel de Physique en 1907. [17] [18]

1.1.1.6. **Edward Morley (1838-1923)**



*Figure 10 :
Edward Williams
Morley [28]*

Edward Morley (1838-1923) est un physicien américain, dont la notoriété est principalement due à sa collaboration avec Albert Michelson lors de l'expérience de Michelson et Morley. Diplômé de la Western College en 1860, il enseigna dans plusieurs universités dans le Massachussets et dans l'Ohio. C'est par ailleurs à Cleveland (*Ohio*) qu'il rencontra Albert Michelson afin de perfectionner son expérience.

En outre, même si ses recherches sont parfois réduites à cette collaboration, il travailla sur la composition des gaz de l'atmosphère terrestre, et sur le rapport entre la masse de l'oxygène et de l'hydrogène. Pour ses travaux, il reçut la médaille Davy en 1907 et le prix Willard-Gibbs en 1917.

3.2.3 **Expérience n°3 : Détermination du coefficient de transmission d'une lentille semi-réfléchissante**

L'objectif de cette expérience est de déterminer le coefficient de transmission de la lame semi-réfléchissante que nous inclurons ultérieurement dans le montage avec les deux interféromètres de Michelson.

En suivant le protocole joint en annexe, nous avons aligné un laser bleu avec une photodiode, puis relevé la tension totale et la tension de référence en éteignant le laser. A

l'aide d'un penta prisme, nous disposons la lame semi-réfléchissante à 45° par rapport au faisceau incident. Le penta prisme renvoie le faisceau lumineux incident avec un angle de 90°. Il est important de le tenir le plus droit possible et parallèle au sol. Une fois le faisceau dévié, nous disposons deux repères sur le parcours du faisceau. Pour positionner la lame à 45°, nous prêtons bien attention à ce que le faisceau réfléchi passe par les deux repères.

Ensuite, nous mesurons la tension Totale ainsi que la tension de référence. Puis, nous relevons la tension obtenue par la photodiode en incidence normale avec le faisceau transmis. De même, nous réitérons l'expérience en positionnant cette fois-ci la photodiode en incidence normale avec le faisceau réfléchi par la lame. Nous obtenons les résultats expérimentaux suivant :

Tension totale	U_{Totale}	400 mV		
Tension de référence	U_0	11 mV		
			Faisceau transmis	Faisceau réfléchi
Tension	U_{Lame}		267 mV	141 mV

En soustrayant la tension de référence aux valeurs expérimentales trouvées, nous observons les résultats suivants :

$$\text{Coefficient de transmission} : \frac{256}{389} = 0,658 \approx 66\%$$

$$\text{Coefficient de réflexion} : \frac{130}{389} = 0,334 \approx 33\%$$

Ces résultats semblent cohérents, puisque l'addition des deux coefficients approxime 100%. Nous en déduisons que la lame semi-réfléchissante transmet environ deux tiers du faisceau lumineux incident, et en réfléchit un tiers. Il existe plusieurs sources d'erreurs pour cette expérience, qui peuvent notamment expliquer le petit écart relatif d'1% obtenu entre la somme des coefficients théorique et la somme des coefficients expérimentaux. Tout d'abord, il est très difficile de maintenir le penta-prisme droit et parallèle au sol, et donc de positionner la lame semi-réfléchissante pour que le faisceau incident soit réfléchi avec un angle d'incidence parfaitement égal à 45°. De plus, la pièce n'était pas parfaitement plongée dans le noir complet, la tension de référence peut très légèrement varier à deux endroits de mesure différents.

3.2.4 Expérience n°4 : Juxtaposition de deux interféromètres de Michelson

Pour cette expérience, nous nous sommes demandé quel type d'interférences pouvions-nous observer en juxtaposant deux interféromètres de Michelson. Nous avons au préalable fait les calculs et les modélisations des figures d'interférences obtenues avec la superposition de quatre ondes lumineuses. (ANNEXE 7 :)

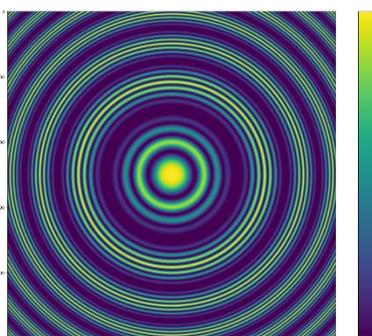


Figure 11 : Figure d'interférence théorique pour le montage avec les deux interféromètres de Michelson

Bien que de nombreuses simplifications ont été faite pour réaliser cette simulation, cela permet d'avoir une idée de la figure d'interférence.

On constate qu'il y a en réalité deux figures d'interférences, une première avec la période faible qui est modulée par une deuxième avec une période plus grande.

Après avoir aligné et réglé les deux interféromètres à l'aide de notre protocole (ANNEXE 8 :), nous avons observé les interférences suivantes :

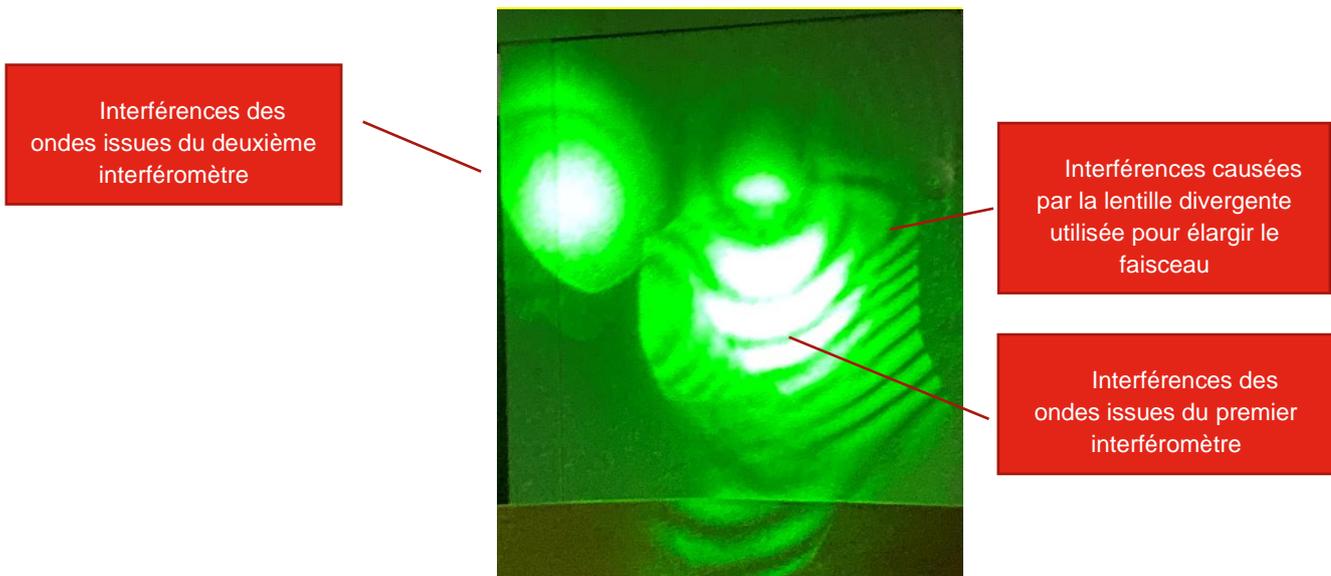


Figure 12 : Figure d'interférence obtenue avec les deux interféromètres de Michelson

Nous pouvons voir sur la photo que les interférences de l'interféromètre 1 ne se superposent pas, et ne sont pas alignées à celles du second interféromètre. Nous pouvons expliquer ce résultat par plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'indépendance des différents éléments du montage n'est pas adaptée à la précision requise pour ces mesures. Il aurait été judicieux d'avoir une table optique afin d'aligner, de stabiliser et de mettre au même niveau les interféromètres.

En outre, le problème principal provient de notre lame semi-réfléchissante. Premièrement, le fait qu'elle ne soit pas fixée à l'interféromètre engendrait un nombre de degrés de liberté trop conséquent. Par ailleurs, le coefficient de réflexion de la lame trouvé à l'expérience 3 montrait que seulement un tiers de l'intensité du faisceau incident était dirigé sur le deuxième interféromètre, ce qui est insuffisant pour avoir une figure d'interférences observable au vu des distances parcourues trop importantes. Il aurait alors fallu utiliser des filtres à densité neutre (ND) pour atténuer le faisceau issu du premier interféromètre.

Pour conclure, nous n'avons pas pu remédier à ces contraintes par manque de temps et de moyens. Toutefois, cette expérience nous a permis d'élargir nos connaissances sur les interféromètres, et sur la précision nécessaire pour manipuler ces derniers.

3.3 Ouverture et Remarques

3.3.1 Interféromètre de Mach-Zehnder

1.1.1.7. Présentation du système

L'interféromètre de Mach-Zehnder a été créé en 1891 par Ludwig Mach avec l'aide de Ludwig Zehnder. Il est constitué de deux miroirs et de deux miroirs semi-réfléchissants ou deux lames séparatrices. C'est un interféromètre à deux ondes qui a été développé à partir de l'interféromètre de Michelson afin d'offrir un grand volume pour placer les objets étudiés.

Il est éclairé en lumière parallèle monochromatique. Un faisceau de lumière cohérente est divisé en deux, puis ces deux faisceaux peuvent interférer entre eux à l'aide d'un miroir semi-réfléchissant. [19] [20]

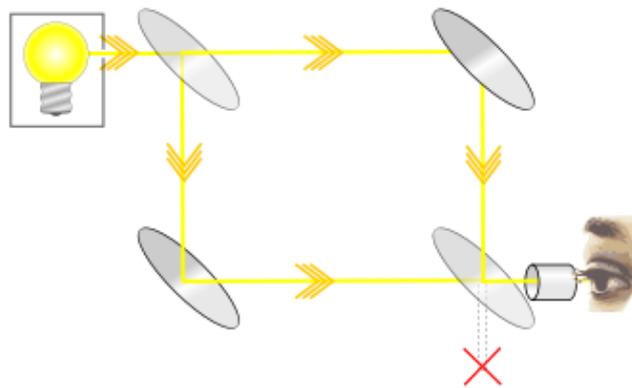


Figure 13 : Principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder

1.1.1.8. Présentation de ses inventeurs

Ludwig Louis Albert Zehnder est un physicien suisse né le 4 mai 1854 à Illnau et décédé le 24 mars 1949 à Oberhofen am Thunersee. Il a produit les premières images du squelette humain en faisant briller des rayons X à travers le corps humain. [21]

A l'aide des travaux réalisés par Ludwig Zehnder en 1891, il a créé un instrument sous le nom d'interféromètre de Mach-Zehnder. Il a aussi utilisé la photographie pour collecter des données visuelles rationalisées dans le domaine de l'aérodynamique.

Ludwig Mach est un médecin et chimiste autrichien né le 8 novembre 1868 à Prague et décédé en septembre 1951. Il est le fils de Ernst Mach, un physicien et philosophe autrichien. [22]

1.1.1.9. Utilisation de l'interféromètre

L'interféromètre de Mach-Zehnder est souvent utilisé dans les domaines de l'aérodynamique, de la physique des plasmas et du transfert de chaleur pour mesurer les variations de pression, de densité et de température des gaz.

L'une des premières utilisations de cet interféromètre est de permettre de déterminer les déphasages entre deux faisceaux.

De plus, la figure d'interférences obtenue permet de réaliser des mesures précises sur la source de lumière. On peut mesurer un défaut de parallélisme des faces d'une lame de verre ou un défaut de planéité ou de sphéricité.

Cet interféromètre est aussi très utilisé dans les expériences de mécanique quantique. En effet, il permet de mettre en évidence l'aspect ondulatoire ou corpusculaire du photon. Le photon interfère avec lui-même lorsqu'il est sous sa forme ondulatoire dans l'interféromètre, ainsi seule une voie de sortie est activée.

Il est également utilisé dans des modulateurs électro-optiques, des dispositifs utilisés dans la communication par fibre optique. L'interféromètre est incorporé dans des circuits intégrés monolithiques et offre des réponses électro-optiques en amplitude et en phase à large bande passante et bien comportées sur une plage de fréquences de plusieurs gigahertz. [23]

1.1.1.10. Comparaison des différents interféromètres

Les deux interféromètres étudiés sont très différents de conception :

1. L'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué d'une cavité optique permettant de séparer en de multiples faisceaux le rayon incident et de les faire interférer. Il permet donc de produire des interférences, théoriquement, à $n \rightarrow \infty$ ondes.
2. Le Michelson est constitué d'une lame semi réfléchissante permettant de séparer le front d'onde en deux et de faire interférer les ondes.

Cette différence fondamentale se traduit par des applications très différentes par leurs échelles.

L'interféromètre de Fabry Perrot est principalement utilisé pour étudier les ondes électromagnétiques. La capacité du Fabry-Pérot à distinguer les longueurs d'onde est caractérisée par la Finesse. Elle se définit comme suit :

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\phi}{\delta\phi} = \frac{\text{largeur d'une période}}{\text{largeur des pics à mi - hauteur}}$$

Ainsi, plus \mathcal{F} est grand plus les pics sont fins. Pour l'interféromètre de Fabry-Pérot, on montre que son expression pour R proche de 1 est $\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$. Plus R est proche de 1, plus la valeur est importante, et \mathcal{F} tend vers l'infini. Ainsi, pour les applications en spectrométrie, à l'aide d'un développement limité de $\delta\phi$, on peut en déduire l'écart de longueur d'onde minimal distinguable entre deux ondes très proches : $\Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda^2}{2 \mathcal{F} n e \cos \alpha'}$.

Par exemple, le doublet du sodium correspond à une paire d'ondes de longueurs d'onde très proches, situées à 589,5924 et 588,9950 nm. Grâce à un interféromètre de Fabry-Pérot, on peut voir ce doublet séparé, alors qu'elles ne sont séparées que de 0,5974 nm.

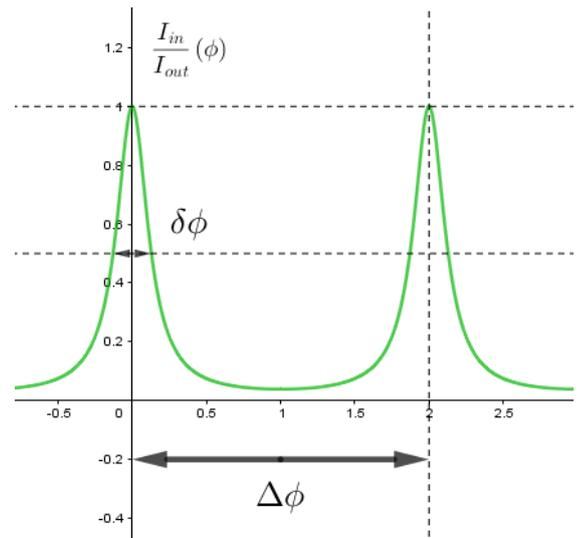


Figure 14 : illustration de la finesse

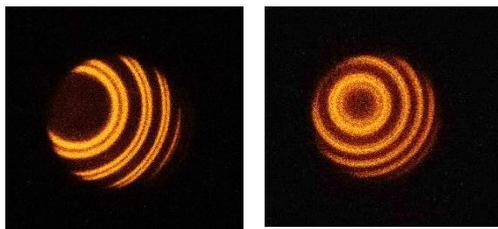


Figure 15 : Photographies de figures d'interférences créées par une lampe au sodium et un interféromètre de Fabry-Pérot

Pour un Interféromètre de Michelson la répartition d'éclairement en fonction du Déphasage suit simplement une loi sinusoïdale, et par conséquent, sa finesse sera toujours de 2. En laboratoire, certains interféromètres de Fabry-Pérot ont des Finesses si élevées qu'ils permettent d'observer des effets Zeeman (subdivisions de raies spectrales), ou des effets Doppler-Fizeau (blue-shift, red-shift).



Figure 16 : Expérience Virgo [25]

L'interféromètre de Michelson quant à lui a des applications à bien plus grandes échelles, et permet de détecter des variations de distances extrêmement faible de l'ordre de $10^{-21} m$ dans le cadre d'expériences telles que celles de Ligo et Virgo, expérience ayant permis de détecter les ondes gravitationnelles en 2016 [24]. Cette application est à très grande échelle car chacun des bras de l'interféromètre mesure plusieurs kilomètres de long pour que le signal soit suffisant.

Le principe de l'interféromètre de Michelson est également utilisé dans les interféromètres optiques à longue base permettant d'augmenter le pouvoir de résolution des télescopes. En effet, il fait interférer les ondes captées par deux télescopes distants de l'objet à observer d'une différence de marche δ .

3.3.2 Problèmes rencontrés

Au cours de nos expériences, nous avons rencontré de nombreuses difficultés. Ces complications nous ont parfois retardées dans notre calendrier, que nous avons donc modifié tout au long de notre projet.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'interféromètre de Michelson, nous avons passé plus de temps que prévu sur les réglages initiaux. En effet, les réglages à faire sont très précis, et peuvent bouger au cours de la semaine. Ainsi, nous avons à les vérifier et donc potentiellement à les refaire à chaque début de séance. Ensuite, il a fallu trouver le matériel adéquat à nos expériences. Par exemple, nous avons dû trouver une table assez grande pour pouvoir positionner les deux interféromètres, les paillasses de la salle étant trop petites. De même pour aligner les deux interféromètres et placer la lame semi-réfléchissante. Il fallait premièrement mettre les positionner à la même hauteur, pour que le faisceau de lumière puisse passer au bon endroit. Pour cela, nous avons trouvé des planches de bois que nous avons superposées. Deuxièmement, nous nous sommes servis d'un prisme, et de deux repères pour pouvoir positionner correctement la lame semi-réfléchissante, c'est-à-dire pour que le faisceau réfléchi soit bien dirigé dans le deuxième Michelson. Il nous a fallu trouver de quoi surélever le prisme tout en le gardant à plat, pour diriger la lumière bien perpendiculairement.

En ce qui concerne l'interféromètre de Fabry-Pérot, nous avons eu des difficultés à aligner l'ensemble des éléments optiques. Nous sommes partis de l'interféromètre seul, donc il nous a fallu réfléchir à toutes les caractéristiques et parties du montage. Nous avons mis beaucoup de temps à réussir à élaborer un protocole d'alignement adéquat. Ensuite, nous avons rencontré des problèmes pour placer correctement le capteur CCD lors de l'expérience 1. Enfin, dans l'expérience 2, nous avons dans un premier temps eu du mal à exploiter nos photos car nous n'avions pas trouvé de solution pour mesurer le rayon des cercles. Nous avons finalement résolu le problème en utilisant l'outil mesure du logiciel Gimp.

Par ailleurs, d'autres petites expériences non prévues ont dû être réalisées, telle que la mesure du coefficient de réflexion de la lame semi-réfléchissante pour le Michelson, ce qui a pu légèrement retarder notre calendrier.

De plus, notre projet repose essentiellement sur des expériences. Ainsi, pendant les vacances scolaires de février et d'avril, nous nous sommes concentrés sur la rédaction du rapport, soit en rédigeant des protocoles et des calculs, soit en faisant des recherches.

Ainsi, pour chaque expérience nous avons rencontré de petites complications, que ce soit pour trouver le matériel requis, ou pour la difficulté des réglages qui ont pu nous retarder dans notre planning initialement prévu. Cependant, nous nous sommes adaptés à chaque situation, pour pouvoir procéder au mieux à nos expériences.

4 Conclusion

Ce projet nous a permis de découvrir différents interféromètres à division d'amplitude, aussi bien sur le plan théorique que pratique et expérimental.

Pour notre travail bibliographique, nous avons compris comment fonctionnent les interféromètres de Mach-Zehnder, Michelson, et de Fabry-Pérot. Nous avons particulièrement approfondi nos recherches sur les interféromètres de Fabry-Pérot et de Michelson, et nous avons remarqué qu'ils sont fondamentaux pour l'étude et l'exploitation des phénomènes d'interférences.

Dans un autre temps nous nous sommes concentrés sur les parties expérimentales, et nous avons ainsi mis en application nos recherches et connaissances théoriques. Ce fut un véritable travail d'organisation et d'imagination. En effet, il a fallu parfois élaborer nous-même nos protocoles expérimentaux et de traitement de données. De plus, nous avons dû aussi gérer diverses complications, notamment sur l'alignement des éléments optiques.

Deux de nos expériences concernaient des mesures de coefficients de réflexion, à l'aide de photodiodes. Alors que la mesure des coefficients de réflexion et de transmission d'une lame semi-réfléchissante s'est avérée très satisfaisante, la mesure du facteur de réflexion énergétique pour l'interféromètre de Fabry-Pérot a été moins réussie.

Avec l'interféromètre de Fabry-Pérot, nous avons exploité des photographies de figures d'interférences, afin de vérifier si celles-ci correspondaient expérimentalement à ce qui était attendu. Les résultats de cette expérience se sont révélés satisfaisants.

En outre, nous avons essayé de mettre en juxtaposition deux interféromètres de Michelson pour créer des figures d'interférences à 4 ondes. Cependant, en raison de contraintes techniques et de temps, cette expérience ne s'est pas avérée concluante.

Enfin, nous tenons tous à vivement remercier notre professeur-encadrant M. David Honoré, pour sa bienveillance, et l'aide qu'il nous a apportée tout au long du projet. Nous avons bénéficié d'un accompagnement personnalisé, et nos questions ne sont jamais restées sans réponse.

5 BIBLIOGRAPHIE

- «Wikipédia l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Fabry. [Accès le 23 02 2021]
- «Universalis,» [En ligne]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/charles-fabry/>. [Accès le 23 02 2021]
- «Britannica,» [En ligne]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Charles-Fabry>. [Accès le 23 02 2021]
- «Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Alfred_Perot. [Accès le 27 02 2021]
- «Larousse,» [En ligne]. Available:
5] https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Alfred_Perot/103059. [Accès le 27 02 2021]
- [En ligne]. Available: <https://www.groupeastronomiespa.be/fabryperot.pdf> . [Accès le 27 02 2021]
- «Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Fabry-Perot#Applications. [Accès le 23 02 2021]
- «OpenEdition Journals,» [En ligne]. Available:
8] <https://journals.openedition.org/sabix/839>. [Accès le 05 03 2021]
- [En ligne]. Available:
9] https://marchettibenjamin.files.wordpress.com/2019/04/lp_interferometrie_a_division_d_amplitude.pdf p11. [Accès le 05 03 2021]
- IUT Saint Nazaire Département Mesures Physiques, «INTERFERENCES SUR
10 LAMES MINCES Configuration de « Fabry-Pérot »,» [En ligne]. Available:
] http://mpsn.free.fr/opt3/c_td/S3_ch6_Fabry-Perot_14.pdf. [Accès le 03 06 2021].
- LEGT Saint-Louis, «TP Phy N°15,» [En ligne]. Available:
11 http://sti.mermoz.free.fr/Phy/Opt_Phy/TP_Phy/TS1/15_Fabry-Perot.pdf. [Accès le 03 06 2021].
- «Universalis,» [En ligne]. Available:
12 <https://www.universalis.fr/encyclopedie/interferometre-de-michelson/> . [Accès le 22 02 2021]
- [En ligne]. Available: http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M02_C05/co/Contenu_23.html . [Accès le 22 02 2021]
- «Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
14 https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Michelson#:~:text=Comm
]

e%20d%C3%A9j%C3%A0%20cit%C3%A9%20dans%20%22configuration,filtres%2C%20des%20dichro%C3%AFques%2C%20etc. . [Accès le 22 02 2021]

«Larousse,» [En ligne]. Available:
15 https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Albert_Abraham_Michelson/133095.
] [Accès le 28 02 2021]

«Universalis,» [En ligne]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/albert-abraham-michelson/> . [Accès le 28 02 2021]
]

«Nobel Prize,» [En ligne]. Available:
17 <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1907/michelson/facts/> . [Accès le 28 02 2021]
]

«Britannica,» [En ligne]. Available: <https://www.britannica.com/biography/A-A-Michelson> . [Accès le 03 03 2021]
]

«Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
19 https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Mach-Zehnder. [Accès le
] 23 03 2021]

«Sites Unice,» [En ligne]. Available:
20 <http://sites.unice.fr/site/aristidi/optique/exam/dec2008/index.html>. [Accès le 23 03 2021]
]

«Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
21 https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Zehnder. [Accès le 23 03 2021]
]

«Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
22 https://fr.qaz.wiki/wiki/Fabry%E2%80%93P%C3%A9rot_interferometer . [Accès le 27 02
] 2021]

[En ligne]. Available:
23 https://fr.nipponkaigi.net/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder_interferometer. [Accès le 27 02
] 2021]

D. Louapre, «Les ondes gravitationnelles,» 12 02 2016. [En ligne]. Available:
24 <https://scienceetonnante.com/2016/02/12/les-ondes-gravitationnelles/>. [Accès le 25 05
] 2021].

T. V. collaboration, «The Virgo collaboration,» [En ligne]. Available:
25 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45263649>. [Accès le 25 05 2021].
]

«Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available:
26 https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Fabry-Perot. [Accès le 27
] 02 2021]

B. a. E. Wikipedia, «Photograph of Nobel Laureate Albert A. Michelson.,» 2006.
27 [Accès le 28 02 2021]
]

U. author, «Edward Williams Morley (January 29, 1838 - February 24, 1923),» circa
28 1880. [Accès le 28 02 2021]
]

[En ligne]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Edward-Williams-Morley>.
29 [Accès le 28 02 2021]
]

ANNEXE 1 : DIAGRAMME DE GANTT

Projet de Physique : Interféromètre à division d'amplitude

24 mars 2021

Diagramme de Gantt

4



ANNEXE 2 : ANNEXES GENERALES FABRY-PEROT

1. Etude du déphasage

L'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux lames semi-réfléchissantes parallèles. Ces deux lames sont séparées d'une distance e , et on considère qu'entre les deux se trouve un milieu transparent d'indice de réfraction n . L'interféromètre de Fabry-Pérot est une cavité optique plane. On néglige l'épaisseur des lames semi-réfléchissantes.

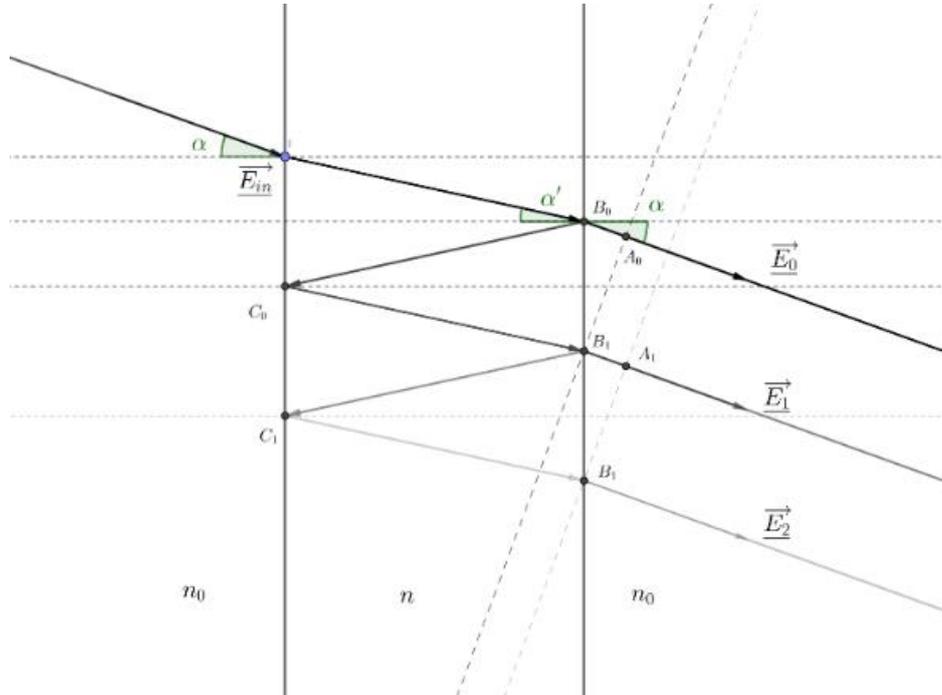


Figure 17 : Principe de l'interféromètre de Fabry-Pérot

Soient T_1, T_2 et R_1, R_2 qui sont respectivement les coefficients de transmission et de réflexion des lames semi réfléchissantes 1 et 2. On pose $T = T_1 T_2$, $R = R_1 R_2$, et on admet que $T + R = 1$.

Soit \vec{E}_{in} l'onde électromagnétique arrivant sur le premier miroir avec une incidence de α . L'onde transmise à travers les deux miroirs est $\vec{E}_0 = \vec{E}_{in} \times T_1 T_2 \times e^{-j\gamma}$, avec γ le déphasage du a la traversée des deux miroirs, et à l'arrivée de l'onde au point A_0 . Aux points B_0 et C_0 , une partie de l'onde entrante est réfléchi, ainsi, en A_1 , on obtient l'onde $\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \times R_1 R_2 \times e^{-j\phi}$, ϕ étant le déphasage entre les ondes \vec{E}_1 et \vec{E}_0 .

Ici, la différence de marche ici vaut

$$\delta = (B_0 C_0) + (C_0 A_1) - (A_0 B_0)$$

$$(B_0 C_0) = (C_0 B_1) = \frac{ne}{\cos(\alpha')}$$

$$(A_0 B_0) = 2e n_0 \tan(\alpha') \sin(\alpha) = 2en \frac{\sin^2 \alpha'}{\cos \alpha'}$$

$$\delta = 2ne \left(\frac{1 - \sin^2 \alpha'}{\cos \alpha'} \right) = 2ne \cos \alpha'$$

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} ne \cos \alpha'$$

Si $n = n_0 = 1$, $\alpha = \alpha'$, et on aura : $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 e \cos \alpha$. C'est cette expression du déphasage que l'on gardera pour la suite car elle correspond à notre dispositif.

2. Etude de la répartition de l'éclairement

Pour les ondes suivantes $\vec{E}_2, \vec{E}_3 \dots \vec{E}_n$. On remarque que $\vec{E}_n = \vec{E}_{n-1} \times R_1 R_2 \times e^{-j\phi}$. On en déduit la formule générale suivante :

$$\vec{E}_n = \vec{E}_0 \times (R_1 R_2 \times e^{-j\phi})^n$$

Une fois que ces ondes sont focalisées en un même point, elles s'additionnent. L'onde sur l'écran, sera :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{total} &= \sum_{i=0}^{\infty} \vec{E}_i = \vec{E}_0 \sum_{i=0}^{\infty} (R_1 R_2 e^{-j\phi})^i = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\vec{E}_0 \cdot \frac{1 - (R_1 R_2 \times e^{-j\phi})^n}{1 - (R_1 R_2 \times e^{-j\phi})} \right) \\ &= \vec{E}_0 \left(\frac{1}{1 - (R_1 R_2 \times e^{-j\phi})} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Car } |R_1 R_2 \times e^{j\phi}| < 1.$$

On en déduit l'éclairement total :

$$I_{total} = \frac{a_e}{2} \vec{E}_{total} \cdot \vec{E}_{total}^*$$

$$I_{total} = \frac{a_e}{2} (\vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0^*) \cdot \left(\frac{1}{(1 - (R_1 R_2 \times e^{j\phi})) \times (1 - (R_1 R_2 \times e^{-j\phi}))} \right)$$

Or précédemment on a vu que $\vec{E}_0 = \vec{E}_{in} \times T_1 T_2 \times e^{j\gamma}$, donc $I_{in} = \frac{a_e}{2} \vec{E}_{in} \cdot \vec{E}_{in}^*$, ainsi :

$$\begin{aligned} I_{total} &= (I_{in} \times (T_1 T_2)^2) \times \left(\frac{1}{1 + R_1 R_2 - R_1 R_2 (e^{j\phi} + e^{-j\phi})} \right) = \frac{I_{in} \times (T_1 T_2)^2}{1 + R_1 R_2 - 2 R_1 R_2 \cos \phi} \\ &= \frac{I_{in} \times (T_1 T_2)^2}{1 + (R_1 R_2)^2 - 2 R_1 R_2 + 2 R_1 R_2 - 2 R_1 R_2 \cos \phi} \\ &= \frac{I_{in} \times (T_1 T_2)^2}{(1 - R_1 R_2)^2 + 2 R_1 R_2 (1 - \cos \phi)} = \frac{I_{in} \times (T_1 T_2)^2}{(1 - R_1 R_2)^2 + 4 R_1 R_2 \sin^2 \frac{\phi}{2}} \end{aligned}$$

Soit finalement :

$$\frac{I_{total}}{I_{in}} = \frac{(T_1 T_2)^2}{(1 - R_1 R_2)^2 + 4 R_1 R_2 \sin^2 \frac{\phi}{2}}$$

$$A(\phi) = \frac{I_{total}}{I_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\phi}{2}}$$

L'éclairement suit une loi d'Airy. Sa représentation est constituée de pics périodiques.

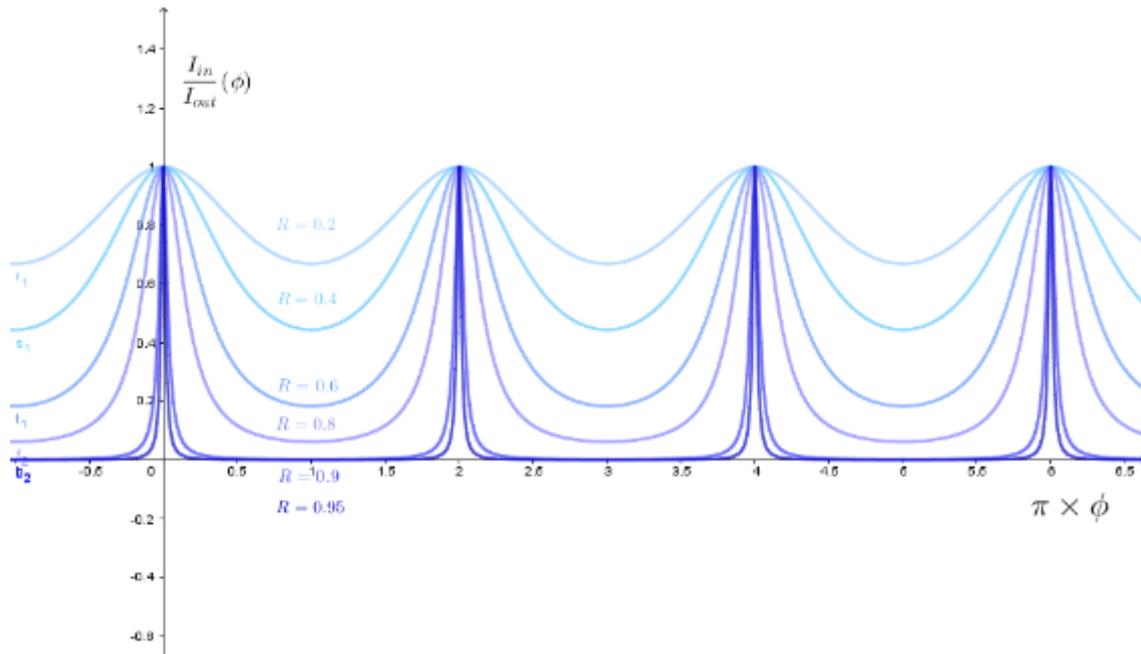


Figure 18 : Courbe de $A(\phi)$ en fonction de la valeur de R

Comme $A(\phi)$ varie inversement à $\sin^2 \frac{\phi}{2}$, on en déduit que les maximums et les minimums de A sont en :

$$\phi_{max} = 2m \pi$$

Les minimums sont en :

$$\phi_{min} = 2(m + 1)\pi$$

3. Calcul de la Finesse, Séparation de doublets spectraux

L'interféromètre de Fabry-Pérot est connu pour sa capacité à séparer deux ondes de fréquences très proches. La grandeur qui mesure cette capacité de séparation est la Finesse \mathcal{F} .

Elle se définit comme suit.

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\phi}{\delta\phi} = \frac{\text{largeur d'une période}}{\text{largeur des pics à mi-hauteur}}$$

On note $M = \frac{4R}{(1-R)^2}$.

Nous calculons d'abord la largeur des pics à mi-hauteur $\delta\phi$. On cherche ϕ tel que :

$$\frac{1}{2} = \frac{A(\phi)}{A(\phi_{max})} = \frac{1}{1 + M \sin^2 \frac{\phi}{2}}$$

$$2 = 1 + M \sin^2 \frac{\phi}{2} \Leftrightarrow 1 = M \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\sqrt{\frac{1}{M}} = \sin \frac{\phi_1}{2} \quad \text{ou} \quad -\sqrt{\frac{1}{M}} = \sin \frac{\phi_2}{2}$$

Etant donné que ϕ est proche d'un maximum c'est-à-dire de $2m \pi$, par développement limité sur la fonction sin nous obtenons :

$$\phi_1 = \frac{2}{\sqrt{M}} + m\pi \text{ et } \phi_2 = \frac{-2}{\sqrt{M}} + m\pi$$

Donc

$$\delta\phi = |\phi_1 - \phi_2| = \frac{4}{\sqrt{M}}$$

Or $\Delta\phi = 2\pi$ (largeur d'une période)

Donc

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\phi}{\delta\phi} = 2\pi \times \frac{\sqrt{M}}{4} = \frac{\pi\sqrt{M}}{2} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Cette expression de la finesse peut aussi nous aider à savoir si deux ondes proches seront visibles comme séparer ou uniques dans l'interféromètre.

On sait que $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} ne \cos \alpha'$. Et donc si on considère de petites variations de ϕ et δ on a :

$$\delta\phi = -\frac{4\pi ne \cos \alpha'}{\lambda^2} \delta\lambda$$

Soit,

$$\mathcal{F} = \frac{2\pi}{\delta\phi} = \frac{2\pi}{\frac{4\pi ne \cos \alpha'}{\lambda^2} \delta\lambda} = \frac{\lambda^2}{2 ne \cos \alpha' \delta\lambda}$$

Si on considère que $\delta\lambda = \Delta\lambda_{min}$, grâce à la relation précédente on trouve :

$$\Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda^2}{2 \mathcal{F} ne \cos \alpha'}$$

Avec

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \text{ ou } \frac{\pi\sqrt{M}}{2}$$

$\Delta\lambda_{min}$ est l'écart maximal théorique entre deux longueurs d'ondes autour de λ pour que la séparation soit visible sur la figure d'interférence.

4. Exploitation expérimentale des mesures à partir des photographies

On cherche à savoir comment se répartissent les anneaux lumineux sur les photographies en fonction des paramètres de l'expérience.

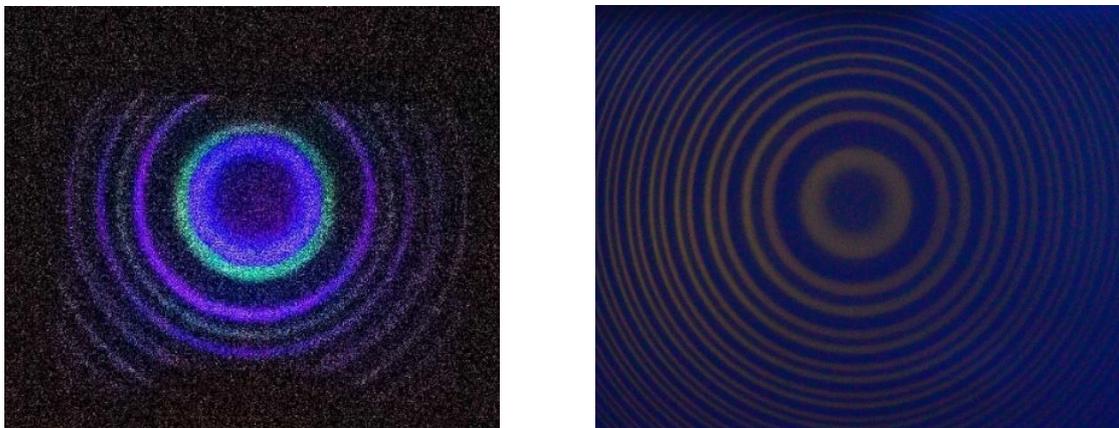


Figure 19 : Exemples de photos obtenues qui ont été exploités

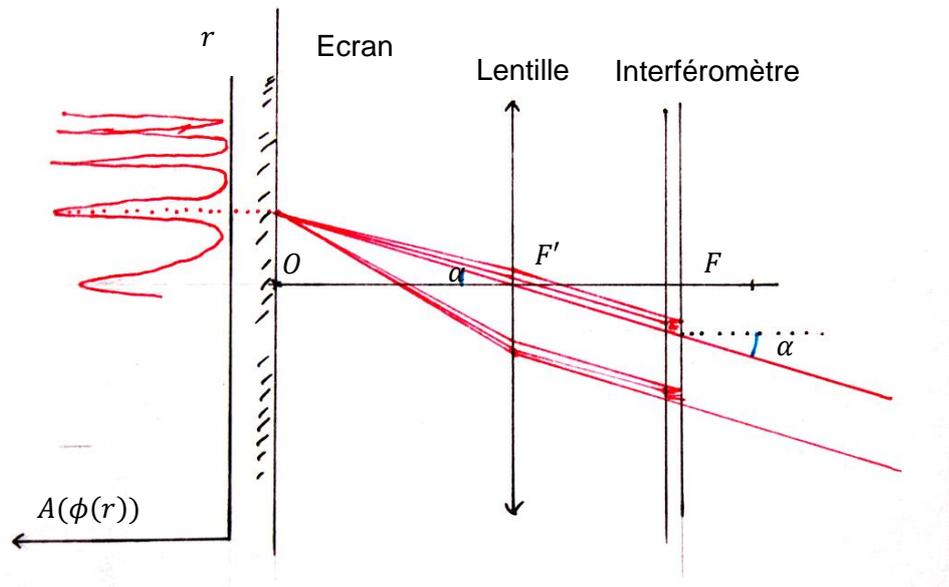


Figure 20: Schéma optique du phénomène

On sait que $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 e \cos \alpha$, et que les franges lumineuses sont telles que :

$$\phi_{max} = 2m\pi$$

On utilise un développement limité de $\cos(\alpha)$ en 0.

$$2m\pi = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 e \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right)$$

$$\frac{\alpha^2}{2} = 1 - \frac{\lambda m}{2n_0 e}$$

$$\alpha^2 = 2 - \frac{\lambda}{n_0 e} m$$

D'après la Figure 20, et en utilisant l'approximation de Gauss sur $\tan(\alpha)$ en 0, on a :

$$\tan(\alpha) = \alpha = \frac{r}{f'}$$

$$r^2 = f'^2 \left(2 - \frac{\lambda}{n_0 e} m\right)$$

Si on passe au diamètre :

$$D^2 = 4f'^2 \left(2 - \frac{\lambda}{n_0 e} m\right)$$

On constate que D^2 en fonction de k est décroissant, donc si k_0 correspond à l'anneau central, $k_{-1} = k_0 - 1$ correspondra à l'anneau qui l'entoure etc. Ainsi le $N^{ième}$ anneau sera $k_N = k_0 - N + 1$.

Par conséquent, on peut dire que les diamètres se répartissent selon la loi suivante :

$$D^2 = 4f'^2 \left(2 - \frac{\lambda}{n_0 e} (k_0 + 1) + N \frac{\lambda}{n_0 e} \right)$$

Soit, K une constante, on aura alors :

$$D^2 = N \frac{4f'^2 \lambda}{n_0 e} + K$$

5. Détermination du coefficient R

Les intensités lumineuses successives sont telles que :

$$\vec{E}_n = \vec{E}_{n-1} \times R_1 R_2 \times e^{-j\phi}$$

$$I_n = \frac{a_e}{2} (\vec{E}_n \times \vec{E}_n^*) = \frac{a_e}{2} (\vec{E}_{n-1} R_1 R_2 e^{-j\phi}) \cdot (\vec{E}_{n-1}^* R_1 R_2 e^{+j\phi})$$

$$I_n = I_{n-1} R^2$$

$$I_n = I_1 (R^2)^{n-1}$$

On a une décroissance géométrique de raison R^2 . En passant l'équation au logarithme on a :

$$\ln(I_n) = \ln(I_1 (R^2)^{n-1})$$

$$\ln(I_n) = \ln(I_1) + 2(n-1) \ln(R)$$

$$\ln(I_n) = Cst + 2 \ln(R) n$$

Ainsi, expérimentalement on devrait avoir :

$$\ln(I_n) = Cst + Q n$$

On peut ainsi mesurer le coefficient Q, et en déduire une valeur de R.

$$e^{\frac{Q}{2}} = R$$

Lorsqu'on utilise un capteur qui mesure une valeur $V_n = \beta I_n$ (β étant un coefficient de proportionnalité), alors on a $\ln(V_n) = \ln(I_n) + \ln(\beta)$, soit :

$$\ln(V_n) = Cst + Q n.$$

ANNEXE 3 : PROTOCOLE D'ALIGNEMENT DES LAMES DE L'INTERFEROMETRE DE FABRY-PEROT

1. Matériel nécessaire :

1. L'interféromètre de Fabry-Pérot
2. Un laser avec un plateau micrométrique
3. Deux petits rails
4. Un écran

Au lieu de mettre tous les éléments optiques et de chercher à les aligner entre eux, les ajouter un par un en cherchant à les aligner respectivement entre eux, chacun l'un après l'autre.

Pour bien aligner les éléments optiques, suivre ces différentes étapes méthodiquement :

- Positionner l'interféromètre de Fabry-Pérot. **On ne devra plus toucher à cette position.**
 - De préférence, le mettre en bout de table pour pouvoir mettre un appareil photo avec un trépied à la sortie.
- Positionner un écran derrière l'interféromètre, à sa sortie ou se servir du mur derrière l'interféromètre.
- Placer le plateau micrométrique et fixer le laser sur le plateau micrométrique.
- Placer un écran derrière le laser.
 - Celui-ci nous aide à effectuer l'alignement, en repérant l'endroit de la réflexion.
- Aligner le laser avec l'interféromètre de Fabry-Pérot de sorte que la lumière du laser revienne sur sa source. Il faut donc que la lumière du laser revenant sur l'écran soit cachée par le laser. Pour ce faire :
 1. Modifier la hauteur et l'emplacement du laser à l'aide des vis micrométriques du plateau micrométrique.
 2. On pourra déplacer avec beaucoup d'attention le rail, ou l'interféromètre si le plateau micrométrique ne permet pas de se déplacer suffisamment.
 3. S'il y a plusieurs points lumineux réfléchis, il faudra se concentrer sur le plus lumineux.
 - **Ne plus toucher au laser.**
 - Lorsque les lames ne sont pas parallèles, l'image du laser par le Fabry-Pérot, est une série de points. En modifiant le parallélisme

des miroirs à l'aide des vis dédiées, on peut ramener cette série des points en un seul. Alors les lames seront parallèles

- **Ne plus toucher au montage qui est normalement aligné, et réaliser l'expérience voulue !**

ANNEXE 4 : EXPERIENCE N°1

1. Photographies et illustrations

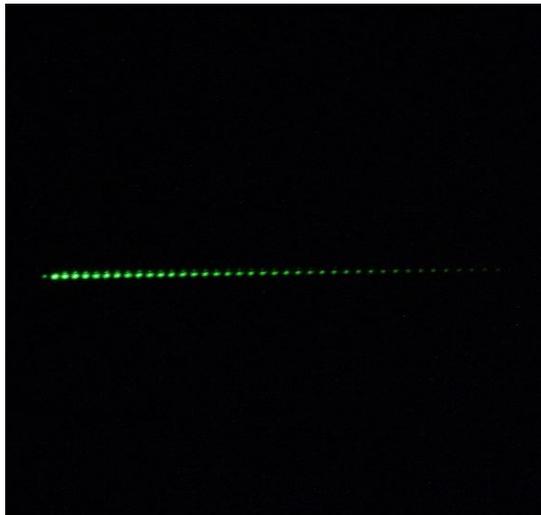


Figure 21 : Figure produite par un laser avec des lames désaxées



Figure 22 : Photographie du montage

Quand on envoie un laser sur l'interféromètre alors que les deux lames sont désaxées, on observe cette figure en sortie. C'est une série de points dont l'éclairement décroît, à chaque point lumineux correspond à une des ondes $\vec{E}_1, \vec{E}_2 \dots \vec{E}_n$.

2. Matériel nécessaire :

1. L'interféromètre de Fabry-Pérot
2. Un laser
3. Une lentille convergente
4. Un capteur CCD Caliens

3. Protocole expérimental :

- Placez les différents éléments optiques en suivant **le protocole d'alignement**.
- Enlevez l'écran derrière l'interféromètre et placez le capteur CDD à sa place (*bien évidemment, si au lieu d'utiliser un écran on a utilisé le mur pour l'alignement, il suffit juste d'ajouter le capteur à l'emplacement prévu*).
- Allumer le capteur CCD, lancer le logiciel Caliens et afficher la courbe en temps réel.

- Repérez le faisceau laser en sortie de l'interféromètre. Déplacez le capteur CCD pour que le faisceau du laser arrive sur le capteur sans saturer le signal.
- Modifier le parallélisme des miroirs du Fabry-Pérot à l'aide des vis de celui-ci, afin d'obtenir une série de points le long de la barrette CCD.
- Une fois le signal correct, sauvegarder les valeurs d'intensité de chaque pixel.

4. Protocole de traitement des données :

- Ouvrir dans un tableur la série de données du signal du capteur, puis tracer la courbe de celui-ci
- Pour chaque pic de la courbe, en extraire la valeur d'intensité V_n . On associe à chaque pic un numéro, le 1 étant le plus intense et le N^{ieme} étant le moins intense.
- Calculer $\ln(V_n)$.
- Réaliser la régression linéaire de la série de données $(n, \ln(V_n))$.
- Extraire de la régression linéaire le coefficient directeur expérimental Q
- En déduire $R = \exp\left(\frac{Q}{2}\right)$

5. Résultats

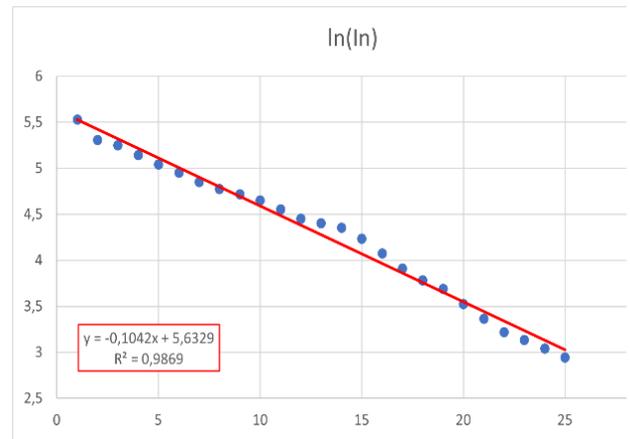
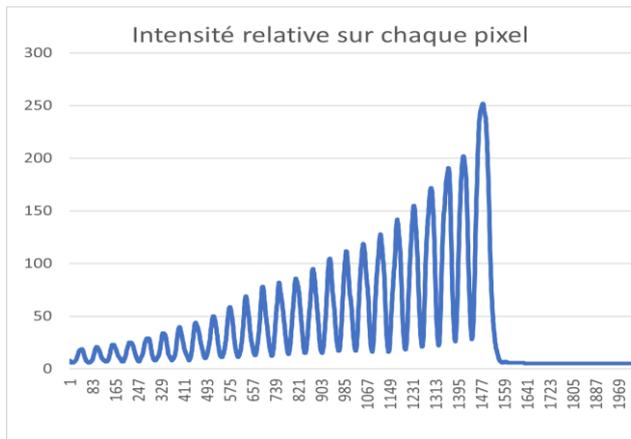


Figure 23 : détermination de R_1

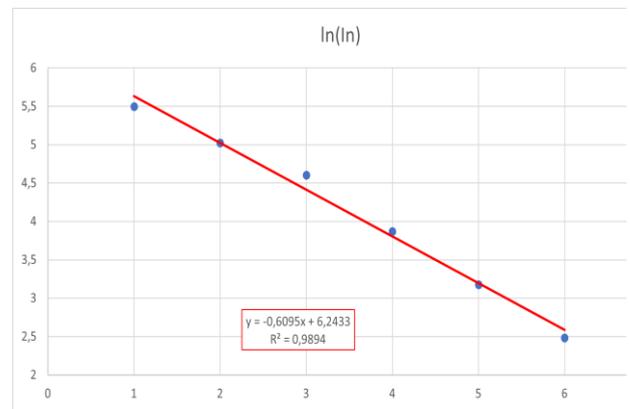
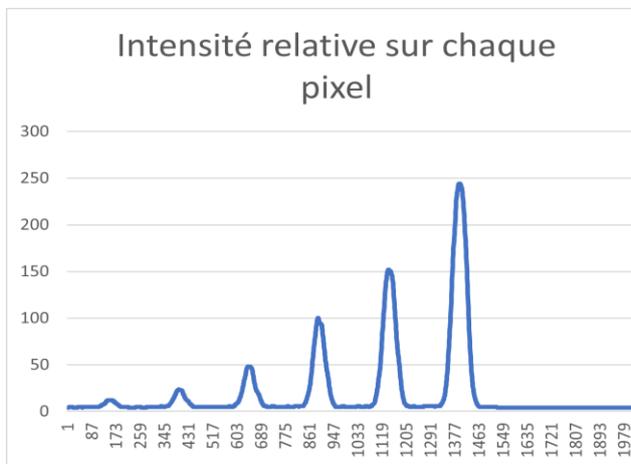


Figure 24 : détermination de R_2

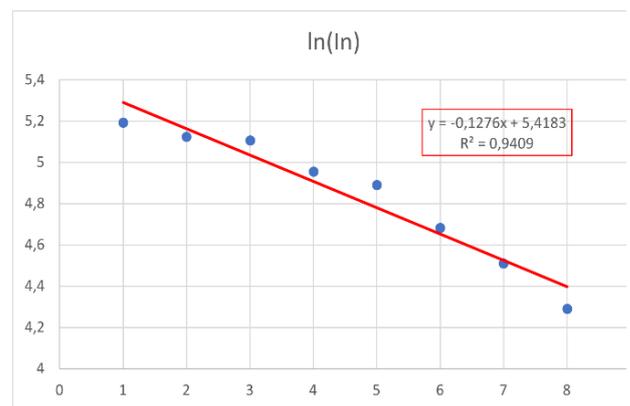
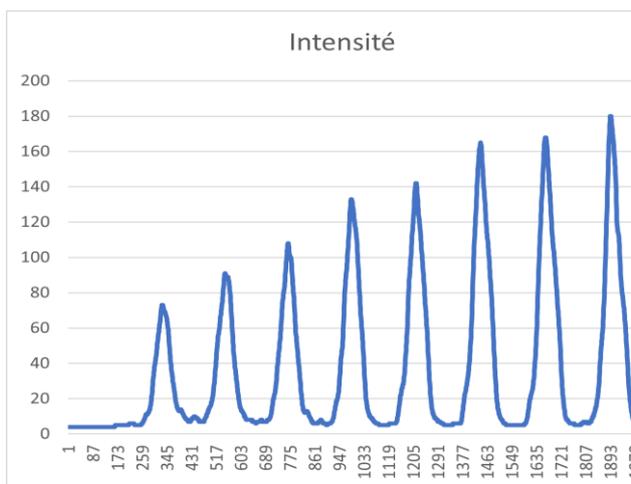


Figure 25 : détermination de R_3

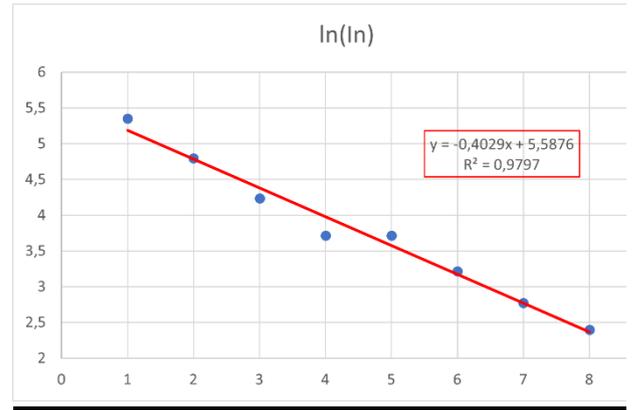
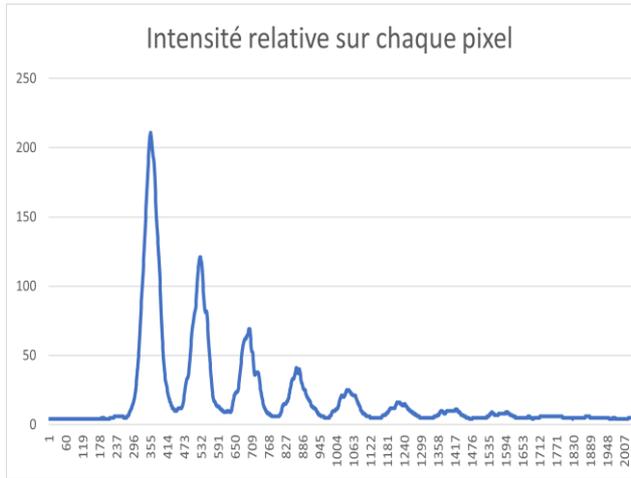


Figure 26 : Détermination de R_4

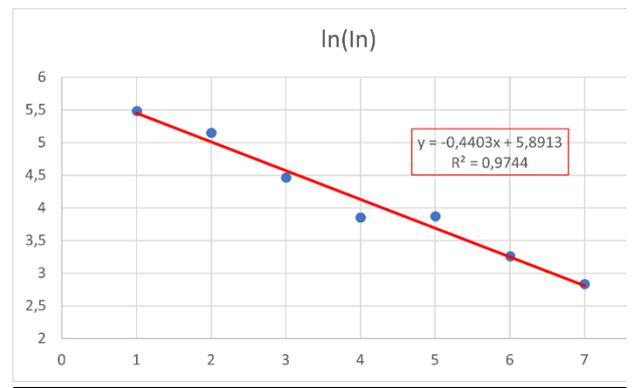
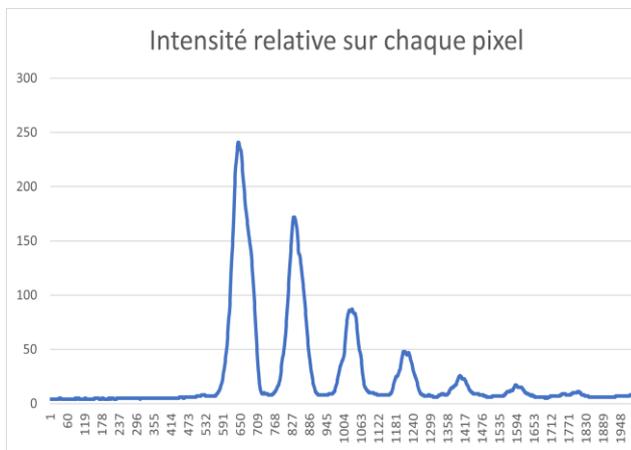


Figure 27 : Détermination de R_5

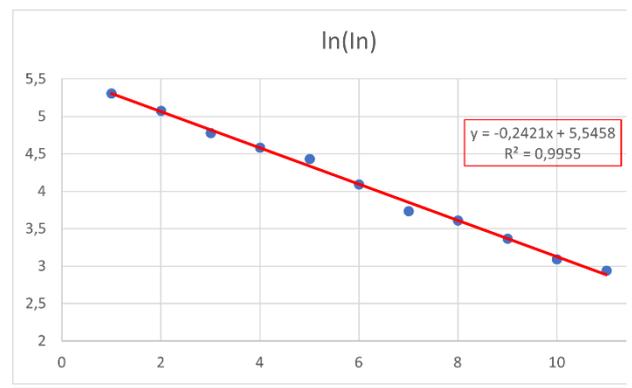
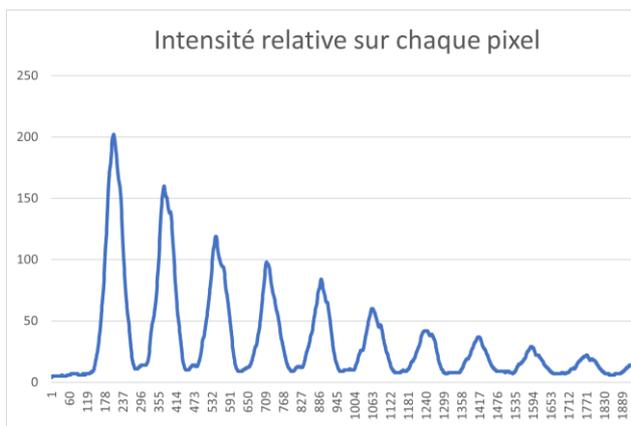


Figure 28 : Détermination de R_6

Tableau 4 : Synthèse des résultats de l'expérience 1

Expérience	Coefficient directeur expérimental Q	Coefficient de détermination (r^2)	Coefficient de réflexion énergétique R
1	-0.1042	0.9869	0,949
2	-0.6095	0.9894	0,737
3	-0.1276	0.9409	0,938
4	-0.4029	0.9797	0,807
5	-0.4403	0.9744	0,802
6	-0.2421	0.9955	0,886
		R_{moyen}	0,853
		Ecart-type	0,085
		$R_{constructeur}$	> 0,97

ANNEXE 5 : EXPERIENCE N°2

1. Photographies et Illustrations



Figure 29: Photographie du montage expérimental

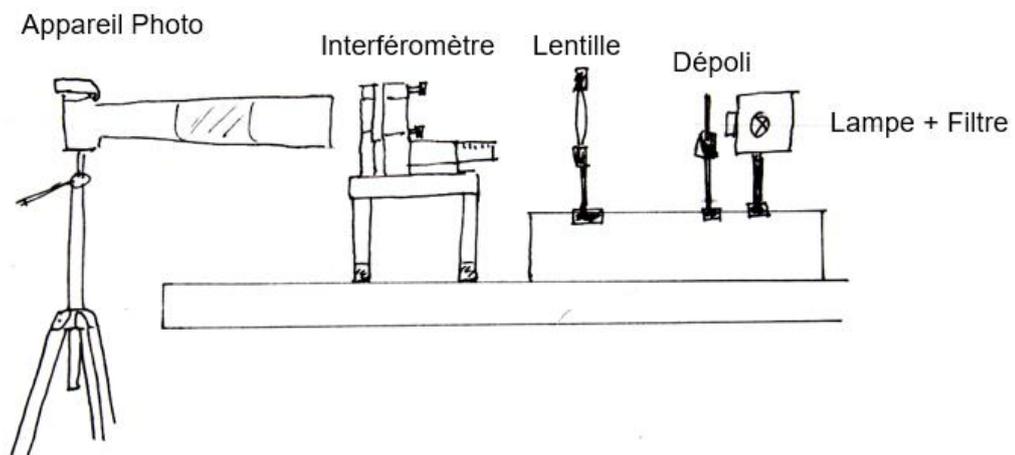


Figure 30 : Schéma du montage

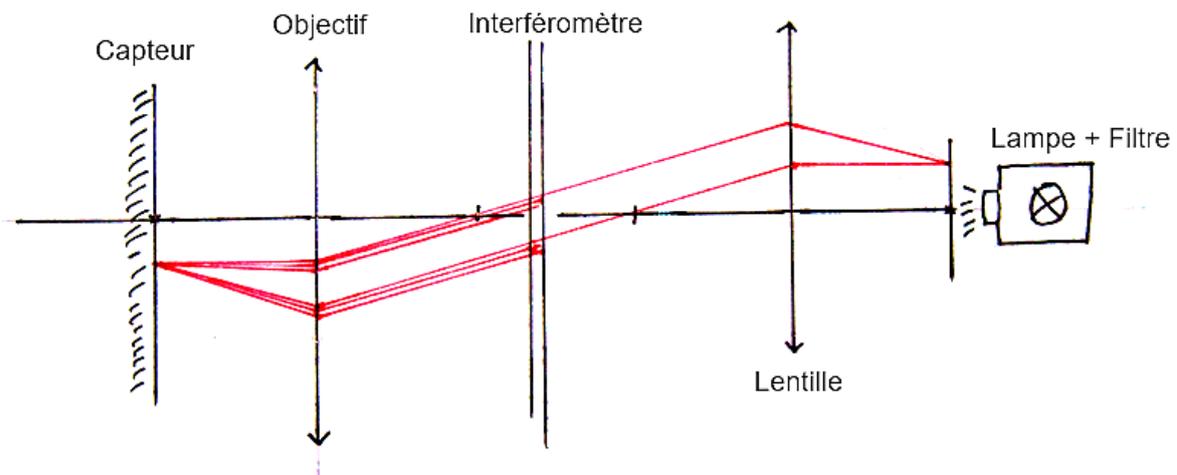


Figure 31 : Schéma optique du montage

2. But de l'expérience :

- Obtenir une figure d'interférence et comparer e_{exp} avec $e_{molette}$, pour vérifier

$$D^2 = \frac{4f'^2\lambda}{n_0e} N + K$$

3. Matériel nécessaire :

- Interféromètre de Fabry-Pérot
- Appareil photo reflex
- Une lentille convergente et un dépoli
- Deux petits rails
- Un laser
- Une lampe à sodium ou une lampe à mercure

4. Protocole expérimental :

1. Suivre le **protocole d'alignement** des lames de l'interféromètre
 - Avant de positionner le laser sur le deuxième rail, prévoir de la place pour ajouter la lentille, le dépoli et la lampe à sodium devant le laser.
 - Avec un crayon, repérez sur l'écran en sortie de l'interféromètre le point lumineux issu du laser.
2. A l'aide du laser, aligner la lentille.
 - On recommande de placer la lentille sur un deuxième rail à part
3. Lors de l'ajout de la lentille, on observe des figures circulaires en sortie et une figure dans la réflexion de l'interféromètre.

4. Le centre de la figure en sortie doit se trouver sur le point repéré en 1. Le centre de la figure réfléchi, doit se trouver sur la source du laser.
5. Pour cela, déplacer délicatement la lentille jusqu'à obtenir cette configuration.
6. Une fois cela fait, on peut enlever l'écran derrière l'interféromètre.
 - Comme dit dans le corps du rapport nous avons finalement enlevé la lentille.
7. Placer devant le laser la lampe, le porte filtre et le dépoli.
8. Placer l'appareil photo sur un trépied en sortie de l'interféromètre.
 - Régler la mise au point à l'infini, et observer l'image obtenue sur l'écran de l'appareil photo.
 - Si besoin déplacer l'appareil photo pour que la figure d'interférences soit au centre.
 - Avec l'appareil photo en mode manuel, fermer le diaphragme aux alentours de $f/8$, ou plus.
 - Choisir la sensibilité et le temps d'exposition pour avoir une image bien exposée, et pas trop bruitée.
9. Prendre plusieurs photos en faisant varier l'épaisseur de la cavité à l'aide de la vis micrométrique. Notez à chaque photo prise la valeur de l'écart relatif $e_{mollette}$, indiquée sur la vis micrométrique de l'interféromètre.

5. Protocole de mesure des rayons des cercles :

- Ouvrir une photo sur Gimp.
- Repérer le plus grand cercle lumineux,
- L'encadrer avec des repères verticaux et horizontaux tangents.
 - Ces repères forment alors un carré
- Avec l'outil crayon, tracer les diagonales de ce carré (modifier en amont les paramètres du crayon pour avoir des traits fins).
- L'intersection de ces diagonales correspond au centre du cercle, noter sa position.
- Pour chaque frange lumineuse :
 - A l'aide de l'outil mesure, mesurer le rayon minimal d'une frange lumineuse, puis le rayon maximal d'une frange lumineuse (Penser à cocher la case « utiliser la fenêtre d'exploitation »)
 - Reporter ces valeurs dans une feuille de tableur.

6. Protocole de traitement de données :

Concernant l'organisation des tableurs, on a utilisé un fichier tableau par série de photos. Dans chaque fichier il y a plusieurs feuilles, une feuille pour chaque photo, et une feuille récapitulative. Dans les feuilles correspondant aux photos, on y rentre les valeurs des rayons maximum et minimum de chaque frange mesurée. Le tableur calcule ensuite a_{exp} et son incertitude à partir des données rentrées. Une fois que toutes les photos ont été exploitées on

rentre dans le fichier récapitulatif, les données sur les conditions de prise de vue de chaque photo avec a_{exp} et Δa_{exp} en plus.

Une fois toutes les séries de photo exploitées, on centralise le tout dans un fichier unique. On en déduit ainsi e_{exp} et Δe_{exp} , et on peut tracer les points $(e_{molette}, e_{exp})$.

Nous avons détaillé davantage les étapes de traitement des données dans le diagramme suivant :

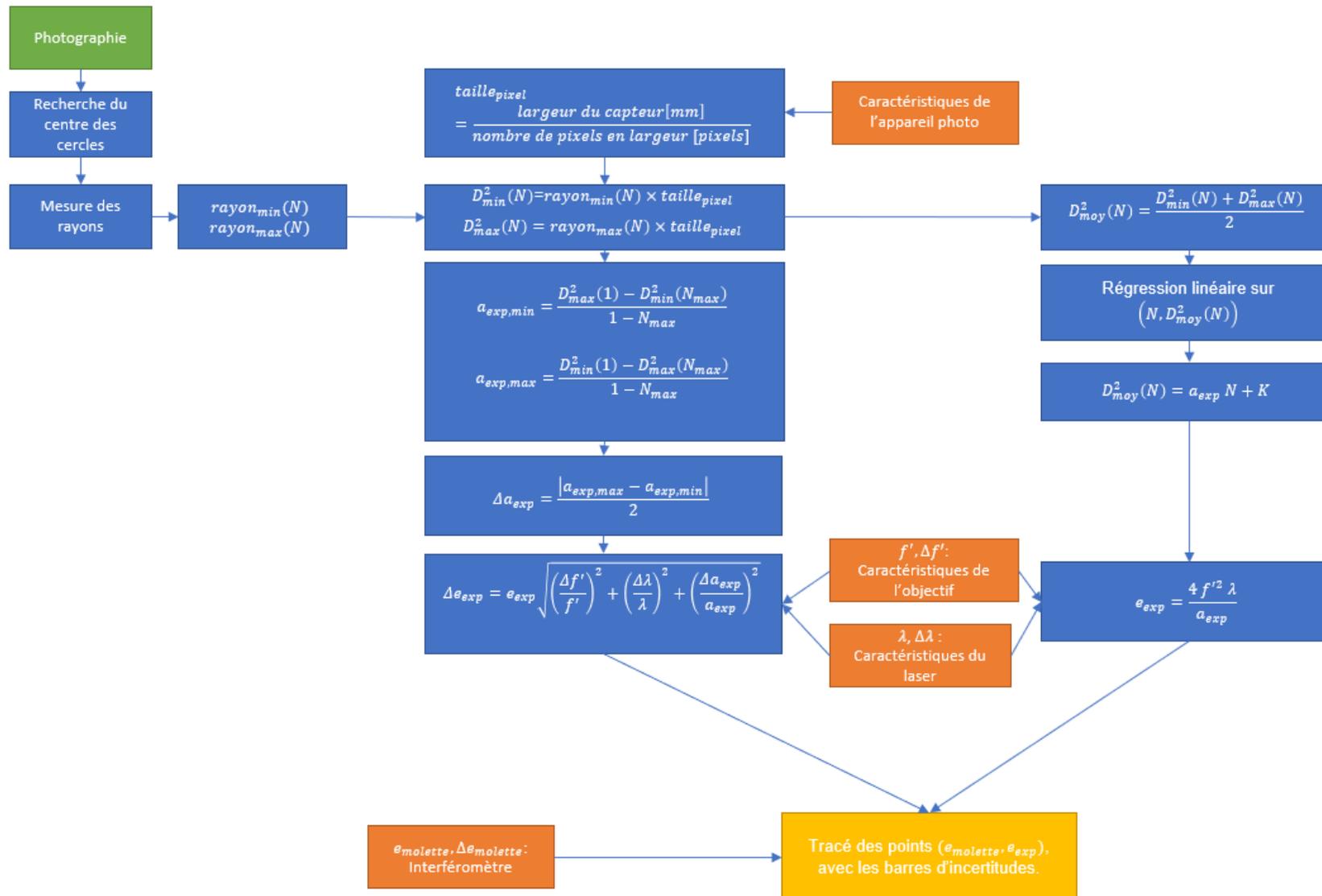


Figure 32 : Diagramme résumant le processus de traitement et d'exploitation des photos

7. Résultats

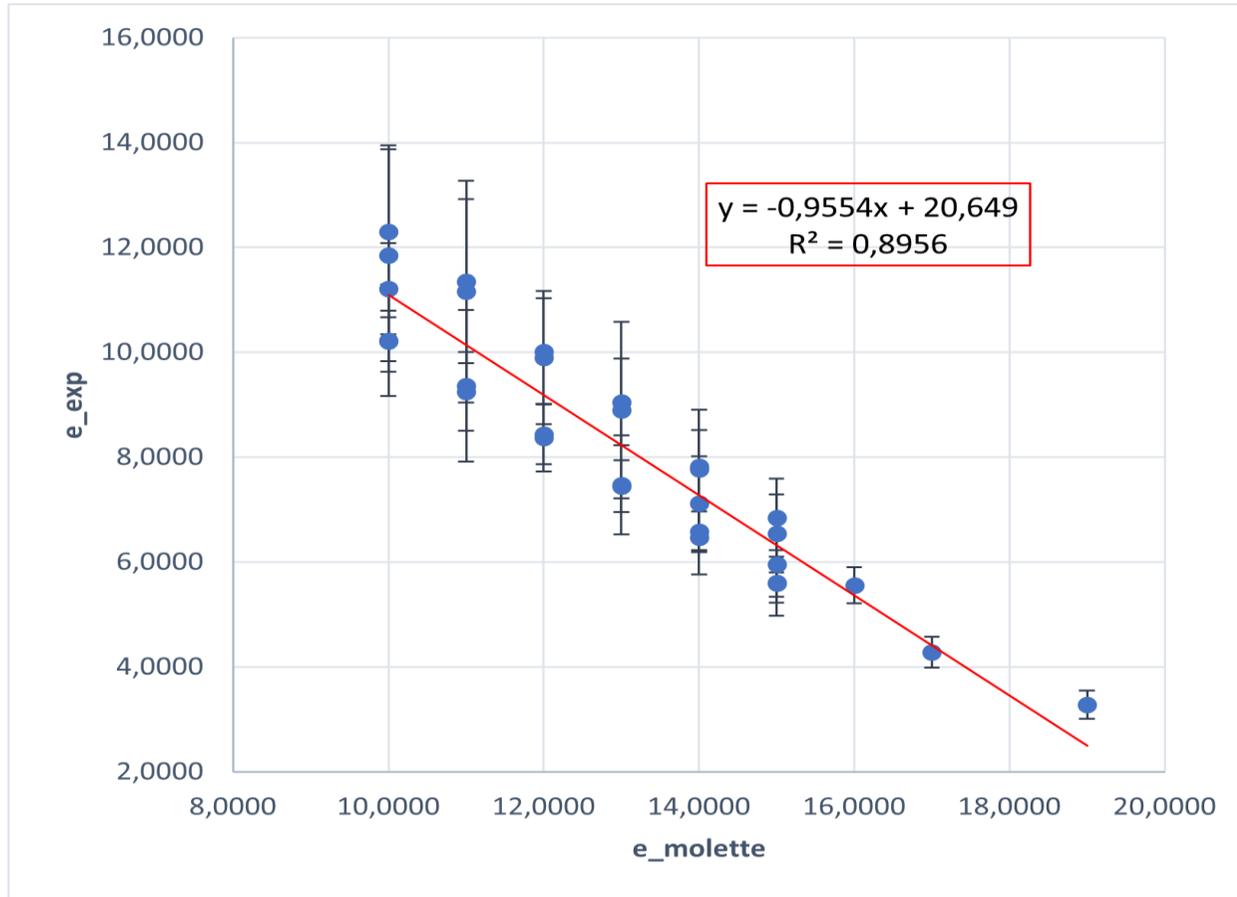


Figure 33 : Comparaison entre épaisseur de cavité déduite (e_{exp}) et épaisseur de cavité relative ($e_{molette}$) indiquée par l'interféromètre

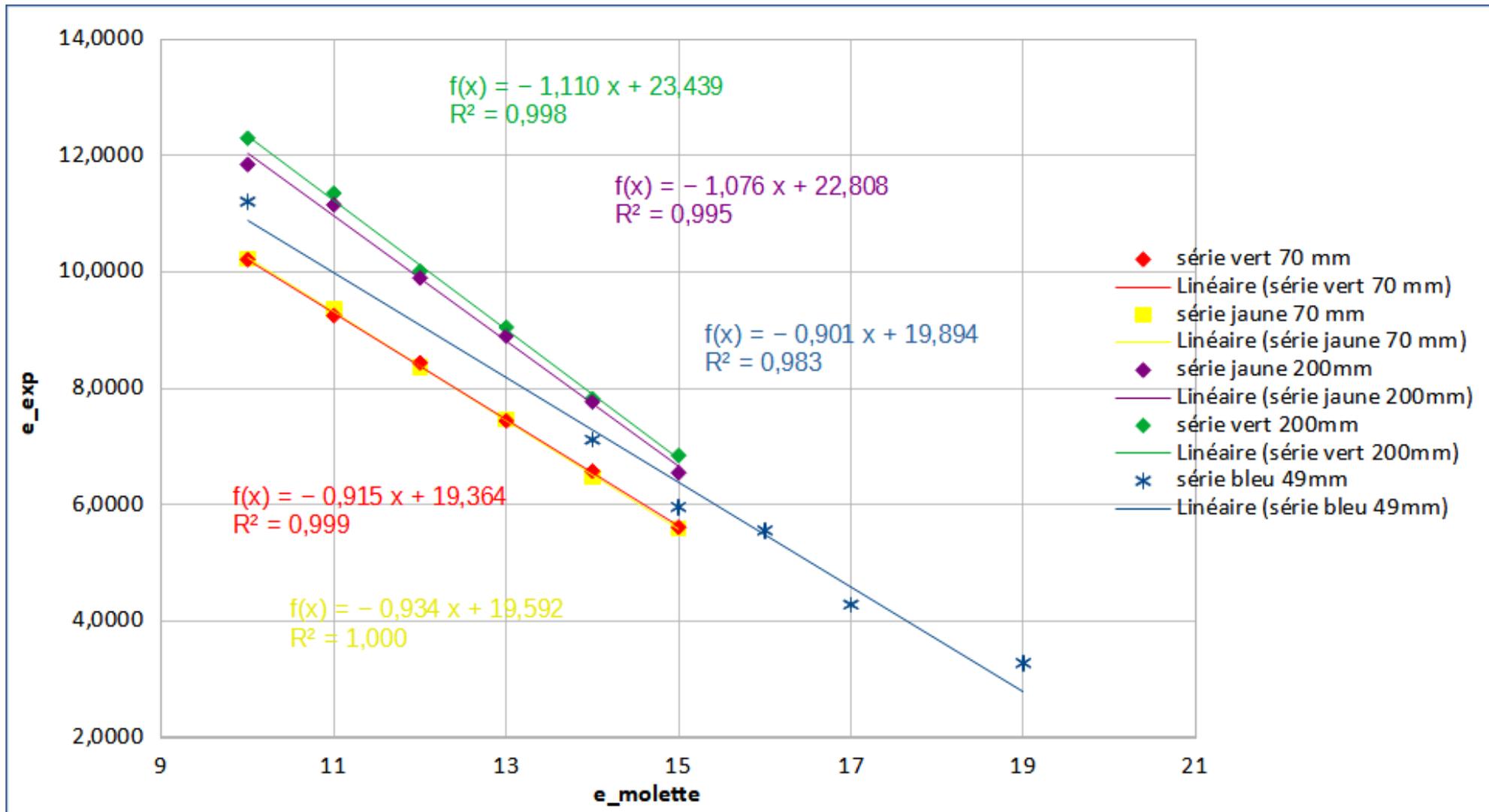


Figure 34 : Comparaison ($e_{molette}$, e_{exp}) par série de photos

ANNEXE 6 : EXPERIENCE N°3

1. Photo du montage

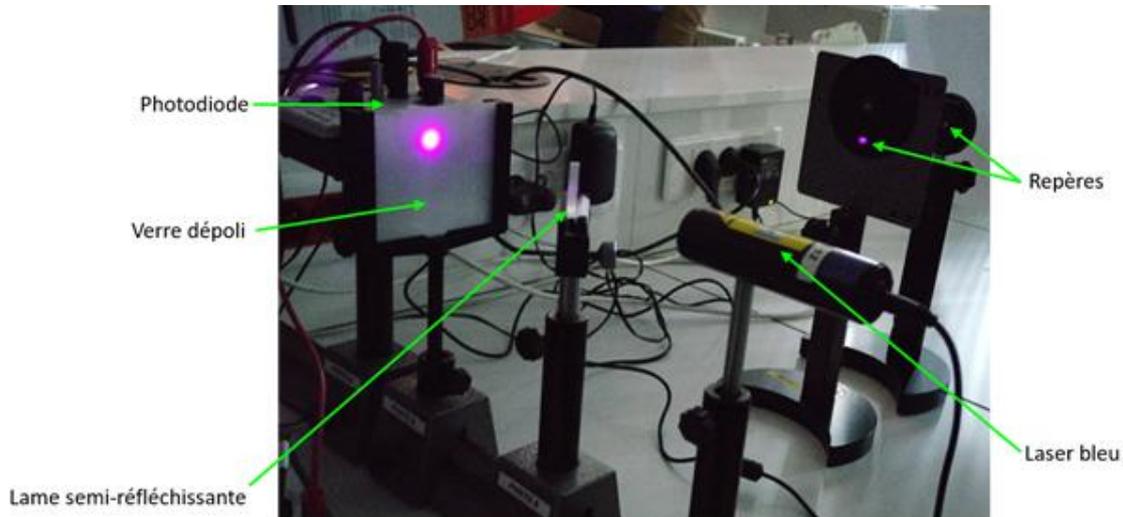


Figure 35 : Photographie du montage expérimental

2. But de l'expérience

- Déterminer le coefficient de transmission de la lame semi-réfléchissante lorsque le faisceau lumineux a une incidence de 45° .

3. Matériel nécessaire

- un laser
- une photodiode
- un voltmètre
- deux diaphragmes
- une plaque de verre dépoli
- une lame semi-réfléchissante de coefficient de transmission inconnu

4. Protocole

1. Aligner la photodiode avec la source laser.
2. Brancher la photodiode à un voltmètre sur calibre 2V.
3. Positionner le verre dépoli devant la photodiode afin d'atténuer l'intensité lumineuse du faisceau laser.
4. Ajuster le gain afin d'avoir des mesures assez précises sans laisser passer trop de bruit.
5. Faire une première acquisition sans allumer le laser afin de déterminer la tension de référence du milieu environnant (bruit).
6. Faire une seconde acquisition en allumant le laser afin de déterminer la tension obtenue lorsque tout le faisceau est dirigé sur la photodiode.
7. A l'aide d'un penta prisme, positionner deux repères (diaphragmes) permettant d'avoir un faisceau réfléchi à 90° du faisceau incident.
8. Positionner la lame semi-réfléchissante avec un angle d'incidence de 45° grâce aux repères précédemment positionnés.

9. Faire une troisième acquisition afin de déterminer la tension obtenue avec le faisceau transmis lorsque le faisceau est en partie réfléchi par la lame.
10. Soustraire aux deux dernières tensions mesurées la tension de référence et faire le rapport entre les deux afin d'obtenir le coefficient de transmission.
11. Répéter l'acquisition en alignant cette fois-ci la photodiode avec le faisceau réfléchi pour déterminer le coefficient de réflexion.

5. Mesure des coefficients

Afin de mesurer les coefficients de transmission et de réflexion, nous devons dans un premier temps déterminer les tensions Totale et de Référence. La tension Totale correspond à la tension lorsque l'entière du faisceau lumineux est dirigée sur la photodiode. La tension de Référence est la tension relevée lorsque le laser est éteint et qu'il n'y a aucun faisceau lumineux incident, c'est-à-dire la faible tension due à la faible luminosité environnante. Nous notons ces tensions U_{Totale} et U_0 .

Ensuite, nous relevons les tensions U_{Lame} obtenues avec la lame semi-réfléchissante, sur le faisceau transmis puis réfléchi.

Les tensions observées au voltmètre ne prennent pas uniquement en compte le faisceau lumineux créé par le laser. En effet, la photodiode perçoit également la faible luminosité de la pièce environnante. Ainsi, pour chaque mesure de tension "réelle", il faut soustraire U_0 à la valeur de la tension trouvée :

$$U_{Tot Réelle} = U_{Totale} - U_0 \quad \text{et} \quad U_{Lame Réelle} = U_{Lame} - U_0$$

Par conséquent, afin de déterminer le coefficient de transmission (*si la photodiode est positionnée en face du faisceau transmis*) ou de réflexion (*si la photodiode est positionnée en face du faisceau réfléchi*), nous utilisons la formule suivante :

$$\text{Coefficient} = \frac{U_{Lame Réelle}}{U_{Tot Réelle}}$$

6. Rappel des résultats

Tableau 5 : tensions expérimentales obtenues

Tension totale U_{Totale}	400 mV		
Tension de référence U_0	11 mV	Faisceau transmis	Faisceau réfléchi
		267 mV	141 mV

	Faisceau transmis	Faisceau réfléchi
Tension U_{Lame} réelle	267-11=256 mV	150-11=141 mV

$$\text{Coefficient de transmission} : \frac{256}{389} = 0,658 \approx 66\%$$

$$\text{Coefficient de réflexion} : \frac{130}{389} = 0,334 \approx 33\%$$

Figure 36 : coefficients de la lame semi-réfléchissante

ANNEXE 7 : SIMULATION DE LA FIGURE D'INTERFÉRENCE AVEC LES DEUX INTERFEROMETRES DE MICHELSON

7. Simulation

Pour déterminer la forme de la figure d'interférence lorsque les 2 interféromètres de Michelson sont installés l'un avec l'autre, on commence par calculer la différence de marche.

On modélisera les miroirs alignés sur l'axe optique pour simplifier les calculs.

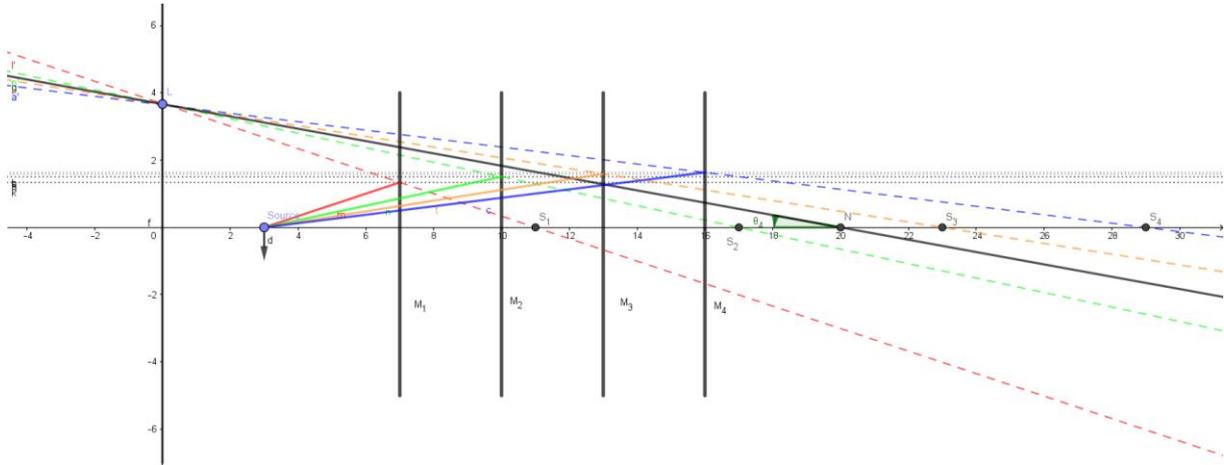


Figure 37 : Schéma d'aide aux calculs

Si l'on note e_2 la distance séparant les miroirs M_1 et M_2 , alors la distance entre l'image de la source par rapport à M_1 et l'image de la source par rapport à M_2 , c'est-à-dire la distance S_1S_2 , est égale à

$$S_1S_2 = 2e_2$$

La même relation lie les autres distances entre le miroir M_1 et le miroir M_n .

On a alors, en notant e_n la distance entre M_1 et M_n :

$$S_1S_3 = 2e_3$$

$$S_1S_4 = 2e_4$$

On introduit alors les angles $(\theta_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ correspondant aux angles $\left(\widehat{SS_{n, \frac{1}{2}}L}\right)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ où le point $\left(S_{n, \frac{1}{2}}\right)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ est placé à la distance $(e_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ de S_1 sur l'axe \vec{x} .

On peut alors exprimer les différences de marche $(\delta_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ entre les différents rayons lumineux où n correspond au numéro du miroir qui a réfléchi l'onde :

$$\delta_2 = 2n_{air}e_2 \cos \theta_2$$

$$\delta_3 = 2n_{air}e_3 \cos \theta_3$$

$$\delta_4 = 2n_{air}e_4 \cos \theta_4$$

(Avec $n_{air} = 1$ l'indice optique de l'air)

De plus, on peut exprimer l'angle $(\theta_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ en fonction du point visé sur l'écran L (plus exactement en fonction de la distance $r = OL$ et de la distance $D_n = S_{n, \frac{1}{2}}O$).

On a alors

$$\theta_n = \tan \frac{r}{D_n}$$

On cherche maintenant à établir l'éclairement sur l'écran en fonction de $(e_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$, de $(D_n)_{n \in \llbracket 2,4 \rrbracket}$ et de r . Pour cela on a d'abord besoin de connaître l'expression des ondes qui se superposent au point L.

Commençons par exprimer la phase des ondes issues des miroirs 2, 3 et 4. On prend le miroir 1 comme référence ainsi $\Phi_1 = 0$.

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_2 \cos \theta_2 \\ \Phi_3 &= \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_3 \cos \theta_3 \\ \Phi_4 &= \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_4 \cos \theta_4\end{aligned}$$

On prend alors une onde lumineuse d'expression

$$\underline{E}_n = A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \Phi_n)}$$

On en déduit alors

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})} \\ \underline{E}_2 &= A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_2 \cos \theta_2)} \\ \underline{E}_3 &= A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_3 \cos \theta_3)} \\ \underline{E}_4 &= A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_4 \cos \theta_4)}\end{aligned}$$

On somme alors ces quatre ondes pour avoir l'onde résultante.

$$\begin{aligned}\underline{E}_r &= A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})} + A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_2 \cos \theta_2)} + A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_3 \cos \theta_3)} \\ &\quad + A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{air} e_4 \cos \theta_4)}\end{aligned}$$

L'éclairement est alors défini par

$$I = \frac{a_e}{2} \text{Re} \left(\underline{E}_r \cdot \underline{E}_r^* \right)$$

Les calculs ont ensuite été réalisés grâce au logiciel de calcul formel SageMath dans un jupyter-notebook car ceux-ci devenaient vraiment fastidieux à faire à la main.

On obtient alors l'expression suivante de l'éclairement :

$$\begin{aligned}2 \cos\left(\frac{2\pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2\pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0} + \frac{2\pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2\pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0} + \frac{2\pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2\pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2\pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0} + \frac{2\pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2\pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 4\end{aligned}$$

En exprimant en fonction (e_n) , (D_n) , r et λ on obtient l'expression suivante pour l'éclairement :

Équation 1 : Eclairement en fonction de l'éloignement de l'axe optique et de la distance à S_0

$$\begin{aligned}
 & 2 \cos \left(\frac{2 \pi e_2 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_2} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_2} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 2 \cos \left(- \frac{2 \pi e_2 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_2} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_2} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_3 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 2 \cos \\
 & \left(- \frac{2 \pi e_2 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_2} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_2} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 2 \cos \left(\frac{2 \pi e_3 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 2 \cos \\
 & \left(- \frac{2 \pi e_3 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 2 \cos \left(\frac{2 \pi e_4 n \cos \left(\frac{\sin \left(\frac{2r}{D_3} \right)}{\cos \left(\frac{2r}{D_3} \right) + 1} \right)}{\lambda_0} \right) + 4
 \end{aligned}$$

On peut maintenant créer un petit code Python permettant de calculer la figure d'interférence et de la tracer :

```

Entrée [27]: dim = 10000
fig = np.empty((dim, dim))
fig.shape
e2, e3, e4 = 2, 4, 6
D2, D3, D4 = 20, 22, 24

for i in range(dim):
    for j in range(dim):
        r = sqrt((i-(dim/2))**2+(j-(dim/2))**2)
        fig[i,j] = I(r, e2, e3, e4, D2, D3, D4)
    
```

```

Entrée [28]: plt.figure(figsize=[20,15])
plt.imshow(fig)
plt.colorbar()
    
```

On obtient alors la figure d'interférence suivante :

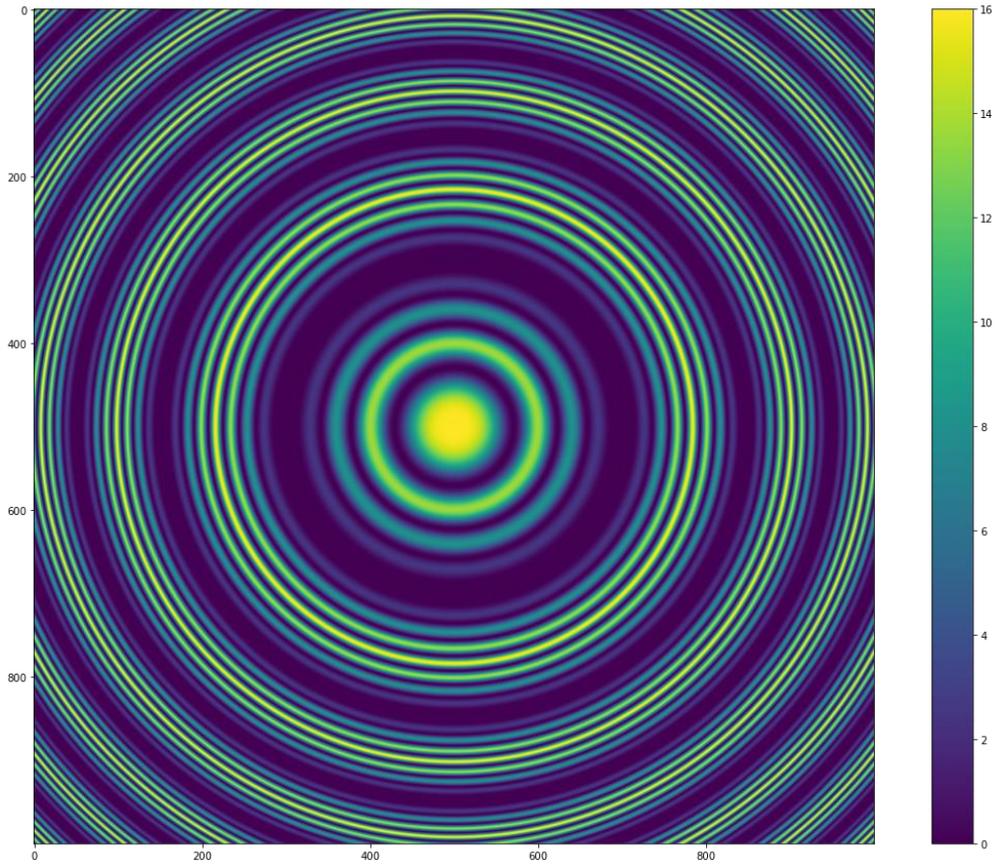


Figure 38 : Figure d'interférence à l'échelle obtenu à 5m de S_1

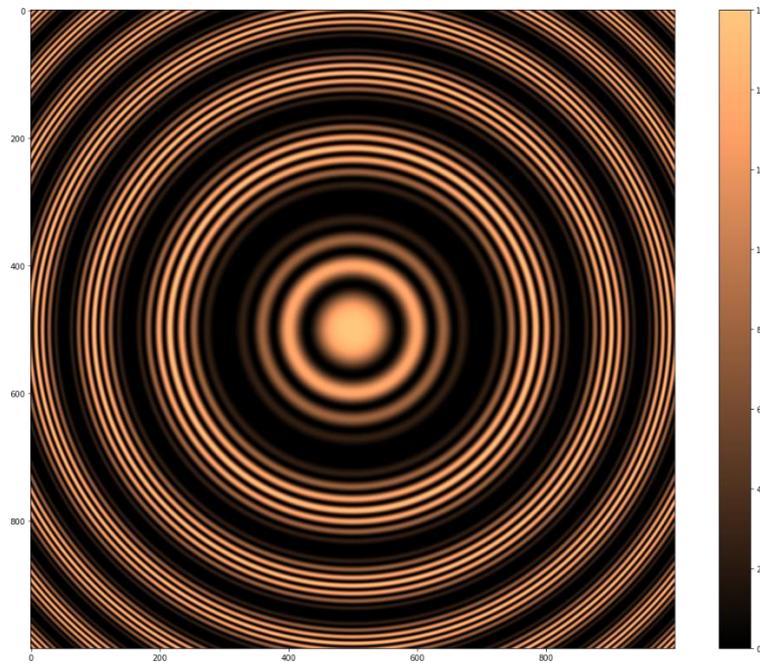


Figure 39 : Figure d'interférence obtenu à 5m de S_1 avec une échelle de couleur « réaliste »

8. Notebook de calcul

Calcul formel

```
In [1]: pretty_print default(True)
var('omega t k x lambda0 n e2 e3 e4 theta2 theta3 theta4')
```

Out[1]: $(\omega, t, k, x, \lambda_0, n, e_2, e_3, e_4, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$

```
In [2]: E = (exp(I*(omega*t - k*x))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e2 * cos(theta2) / lambda0))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e3 * cos(theta3) / lambda0))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e4 * cos(theta4) / lambda0)))
```

```
In [11]: simplify ( real(E * E.conjugate()))
```

Out[11]:
$$2 \cos\left(\frac{2 \pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_2 n \cos(\theta_2)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2 \pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_3 n \cos(\theta_3)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2 \pi e_4 n \cos(\theta_4)}{\lambda_0}\right) + 4$$

```
In [5]: var('r D2 D3 D4')
```

Out[5]: (r, D_2, D_3, D_4)

```
In [6]: Ef = (exp(I*(omega*t - k*x))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e2 * cos(tan(r/D2)) / lambda0))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e3 * cos(tan(r/D3)) / lambda0))
+ exp(I*(omega*t - k*x + 2 * pi * n * e4 * cos(tan(r/D3)) / lambda0)))
```

```
In [8]: simplify (real ( Ef * Ef.conjugate()))
```

Out[8]:
$$2 \cos\left(\frac{2 \pi e_2 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_2}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_2}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_2 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_2}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_2}\right)+1}\right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_3 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_2 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_2}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_2}\right)+1}\right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2 \pi e_3 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(-\frac{2 \pi e_3 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0} + \frac{2 \pi e_4 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 2 \cos\left(\frac{2 \pi e_4 n \cos\left(\frac{\sin\left(\frac{2r}{D_3}\right)}{\cos\left(\frac{2r}{D_3}\right)+1}\right)}{\lambda_0}\right) + 4$$

```
In [9]: pretty_print default(False)
simplify (real ( Ef * Ef.conjugate()))
```

Out[9]:
$$2^* \cos(2^* \pi * e_2^* n * \cos(\sin(2^* r / D_2) / (\cos(2^* r / D_2) + 1)) / \lambda_0) + 2^* \cos(-2^* \pi * e_2^* n * \cos(\sin(2^* r / D_2) / (\cos(2^* r / D_2) + 1)) / \lambda_0 + 2^* \pi * e_3^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0) + 2^* \cos(-2^* \pi * e_2^* n * \cos(\sin(2^* r / D_2) / (\cos(2^* r / D_2) + 1)) / \lambda_0 + 2^* \pi * e_4^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0) + 2^* \cos(2^* \pi * e_3^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0) + 2^* \cos(-2^* \pi * e_3^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0 + 2^* \pi * e_4^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0) + 2^* \cos(2^* \pi * e_4^* n * \cos(\sin(2^* r / D_3) / (\cos(2^* r / D_3) + 1)) / \lambda_0) + 4$$

Simulation

```
In [1]: import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from math import sqrt, cos, sin, pi

def I(r, e2, e3, e4, D2, D3, D4):
    lambda0 = 640e-9
    n = 1
    pi = pi
    I_ = 2*cos(2*pi*e2*n*cos(sin(2*r/D2)/(cos(2*r/D2)+1))/lambda0) + 2*cos(-2*pi*e2*n*cos(sin(2*r/D2)/(cos(2*r/D2)+1))/lambda0 + 2*pi*e3*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0) + 2*cos(-2*pi*e2*n*cos(sin(2*r/D2)/(cos(2*r/D2)+1))/lambda0 + 2*pi*e4*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0) + 2*cos(2*pi*e3*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0) + 2*cos(-2*pi*e3*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0 + 2*pi*e4*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0) + 2*cos(2*pi*e4*n*cos(sin(2*r/D3)/(cos(2*r/D3)+1))/lambda0) + 4
    return I
```

```
In [2]: dim = 1000
echelle = 1/5000

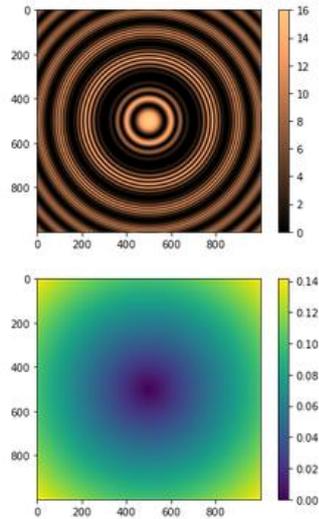
fig = np.empty((dim, dim))
rayon = np.empty((dim, dim))
fig.shape
D = 5 #Distance entre 0 et S1
e2, e3, e4 = 1e-2, 8e-2, 9e-2
D2, D3, D4 = D + 2*e2, D + 2*e2, D + 2*e2

for i in range(dim):
    for j in range(dim):
        r_ = sqrt(((i * echelle - (dim * echelle/2))**2 + ((j * echelle - (dim * echelle/2))**2))
        rayon[i, j] = r_
        fig[i, j] = I(r_, e2, e3, e4, D2, D3, D4)
```

```
In [3]: plt.figure()
plt.imshow(fig, cmap = 'copper');
plt.colorbar()

plt.figure()
plt.imshow(rayon);
plt.colorbar()
```

Out[3]: <matplotlib.colorbar.Colorbar at 0x7fe36bb54bb0>



5. Placer le deuxième interféromètre sur la table de sorte que les rayons réfléchis par la lame (P) soient captés par le deuxième interféromètre.
6. Ajuster grossièrement le niveau du deuxième interféromètre grâce aux calles
7. Aligner grossièrement le second interféromètre avec le premier en faisant passer le faisceau lumineux dans chaque miroir.
8. Se placer à la sortie du deuxième interféromètre, et faire les réglages sur celui-ci à l'aide d'un écran (ne pas regarder le faisceau laser à l'œil nu).
9. Visualiser la figure d'interférence à la sortie du premier Michelson avec un écran.
10. Ajuster chaque réglage avec précision si nécessaire pour bien superposer les figures d'interférences des deux interféromètres : aligner le deuxième interféromètre et ajuster sa hauteur, ajuster la position de la lame semi-réfléchissante.
11. Ajouter si nécessaire une lentille divergente à la sortie du laser pour augmenter le rayon du faisceau lumineux.

5. Résultats



Figure 40 : Interférence obtenue avec le montage avec les deux interféromètres de Michelson

Malheureusement, nous n'avons pas pu parfaitement aligner les deux interféromètres pour avoir des interférences à 4 ondes. Ainsi, ce que nous avons obtenu de mieux est constitué des figures d'interférences des deux interféromètres sur un même écran mais pas superposés.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Principe de fonctionnement.....	6
Figure 2: Courbe de $A(\Phi)$ en fonction de la valeur de R	7
Figure 3 : figure d'interférence obtenue avec une lentille et une source diffuse.....	7
Figure 4 : signal du capteur.....	8
Figure 5 : Régression linéaire $n, \ln(Vn)$	8
Figure 6 : Schéma du montage.....	9
Figure 7 : Régression linéaire à partir des rayons des cercles.....	11
Figure 8 : Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson (vue de dessus).....	13
Figure 9 : Photograph of Nobel Laureate Albert A. Michelson [27].....	14
Figure 10 : Edward Williams Morley [28].....	14
Figure 11 : Figure d'interférence théorique pour le montage avec les deux interféromètres de Michelson.....	15
Figure 12 : Figure d'interférence obtenue avec les deux interféromètres de Michelson ...	16
Figure 13 : Principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder.....	17
Figure 14 : illustration de la finesse.....	18
Figure 15 : Photographies de figures d'interférences créées par une lampe au sodium et un interféromètre de Fabry-Pérot.....	18
Figure 16 : Expérience Virgo [25].....	19
Figure 17 : Principe de l'interféromètre de Fabry-Pérot.....	25
Figure 18 : Courbe de $A(\Phi)$ en fonction de la valeur de R	27
Figure 19 : Exemples de photos obtenues qui ont été exploités.....	28
Figure 20: Schéma optique du phénomène.....	29
Figure 21 : <i>Figure produite par un laser avec des lames désaxées</i>	33
Figure 22 : <i>Photographie du montage</i>	33
Figure 23 : <i>détermination de R_1</i>	35
Figure 24 : <i>détermination de R_2</i>	35
Figure 25 : <i>détermination de R_3</i>	35
Figure 26 : <i>Détermination de R_4</i>	36
Figure 27 : <i>Détermination de R_5</i>	36
Figure 28 : <i>Détermination de R_6</i>	36
Figure 29: Photographie du montage expérimental.....	38
Figure 30 : Schéma du montage.....	38
Figure 31 : Schéma optique du montage.....	39

Figure 32 : Diagramme résumant le processus de traitement et d'exploitation des photos	42
Figure 33 : Comparaison entre épaisseur de cavité déduite (e_{exp}) et épaisseur de cavité relative ($e_{molette}$) indiquée par l'interféromètre	43
Figure 34 : Comparaison ($e_{molette}$, e_{exp}) par série de photos	44
Figure 35 : Photographie du montage expérimental	45
Figure 36 : coefficients de la lame semi-réfléchissante	46
Figure 37 : Schéma d'aide aux calculs	47
Figure 38 : Figure d'interférence à l'échelle obtenu à 5m de $S1$	50
Figure 39 : Figure d'interférence obtenu à 5m de $S1$ avec une échelle de couleur « réaliste »	50
Figure 40 : Interférence obtenue avec le montage avec les deux interféromètres de Michelson	54