

TP cours et TP d'optique ondulatoire

★ ★ ★
PC

Philippe Ribière

Année Scolaire 2012-2013

Chapitre 1

Le réglage de l'interféromètre de Michelson.

L'objectif du TP cours est de vous apprendre à réaliser des mesures très précises à l'aide de l'interféromètre de Michelson.

Le première étape est donc naturellement de vous apprendre à régler l'interféromètre de Michelson. Or chaque Michelson est "unique". Le réglage proposé dans la suite convient à tous les Michelsons. Vous même, en TP, vous rencontrez deux appareils différents : la série des 4 appareils pour les manipulations fondamentales et un Michelson plus complet sur la paillasse professeur.

1.1 Les éléments constitutifs de l'interféromètre de Michelson.

Repérer par un numéro chacun des éléments de la liste ci dessous sur la figure 1.1

1. la Séparatrice (Sp) ou lame semi réfléchissante, fixe, élément essentiel du Michelson car elle divise le faisceau en deux ondes de même amplitude.
2. la Compensatrice (Cp) et ses deux réglages d'orientation $V0_1$ et $V0_2$. Un Palmer, ici représenté permet de repérer le réglage vertical. La Compensatrice sert à compenser le trajet de la lumière dans le verre de la Séparatrice.
3. le Miroir $M1$, ainsi que ces deux réglages grossiers d'orientations $V1_1$ et $V1_2$.
Ce miroir est porté par un chariot qui peut se translater avec $V1_3$ et dont le déplacement est repéré par un Palmer, qui permet une lecture à $pm0,002mm$.
4. le Miroir $M2$, ainsi que ces deux réglages fins d'orientations $V2_1$ et $V2_2$.
5. Le filtre anti-calorique.

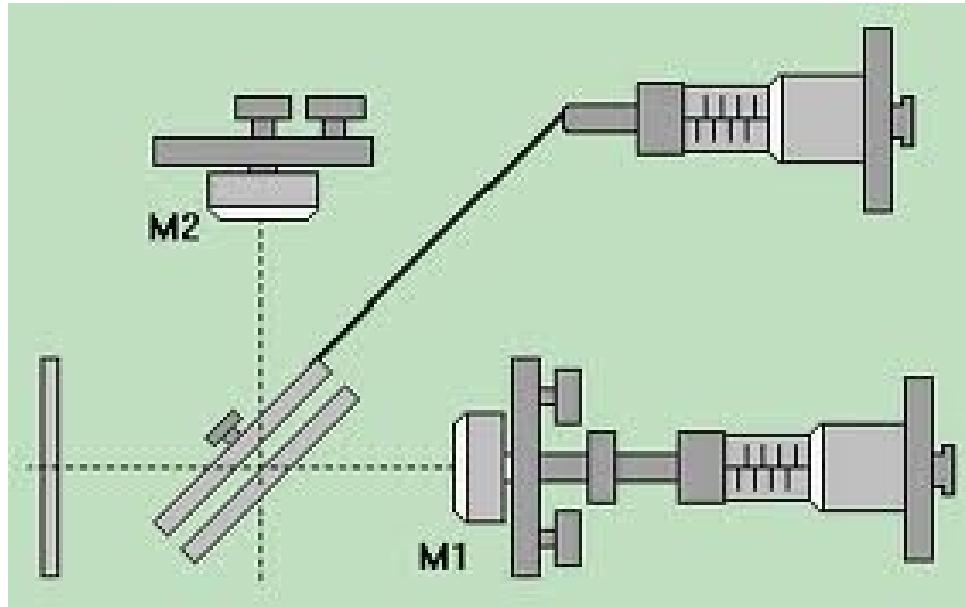


FIGURE 1.1 – Schema du Michelson.

1.2 Rappel des résultats essentiels sur le Michelson en lame d'air.

1.2.1 Equivalence du Michelson à une lame d'air.

Lorsque les deux miroirs M_1 et M_2 sont orthogonaux, le michelson est dit en lame d'air.

Pour comprendre cette appellation, il faut "déplier" le Michelson cf. figure 1.2.

M'_1 est l'image du miroir M_1 par la séparatrice (symétrie axiale).

S'_0 est l'image de la source ponctuelle S_0 par la séparatrice.

S_1 l'image de source image S'_0 par le miroir image M'_1 .

S_2 l'image de source image S'_0 par le miroir M_2 .

La situation est alors analogue à celle de la lame d'air, formée par la lame M'_1 et M_2 . L'épaisseur e est alors la distance séparant M'_1 et M_2 .

Dans le cas d'une observation à l'infini la différence de marche est alors :

$$\delta(M) = S_1 M - S_2 M = 2.e. \cos(i)$$

$$\epsilon_{tot} = 2.\epsilon_0(1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda_0}\delta(M))) = 2.\epsilon_0(1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda_0}2.e.\cos(i)))$$

Avec une source ponctuelle (comme sur le dessin ci dessus), les franges sont délocalisées (ce qui signifie que les interférences pourraient être observées en tout point de l'espace).

Mais **avec une source non ponctuelle comme on en utilise en TP, les franges d'égale inclinaison sont localisées à l'infini**. Une démonstration est certes possible mais il faut le voir

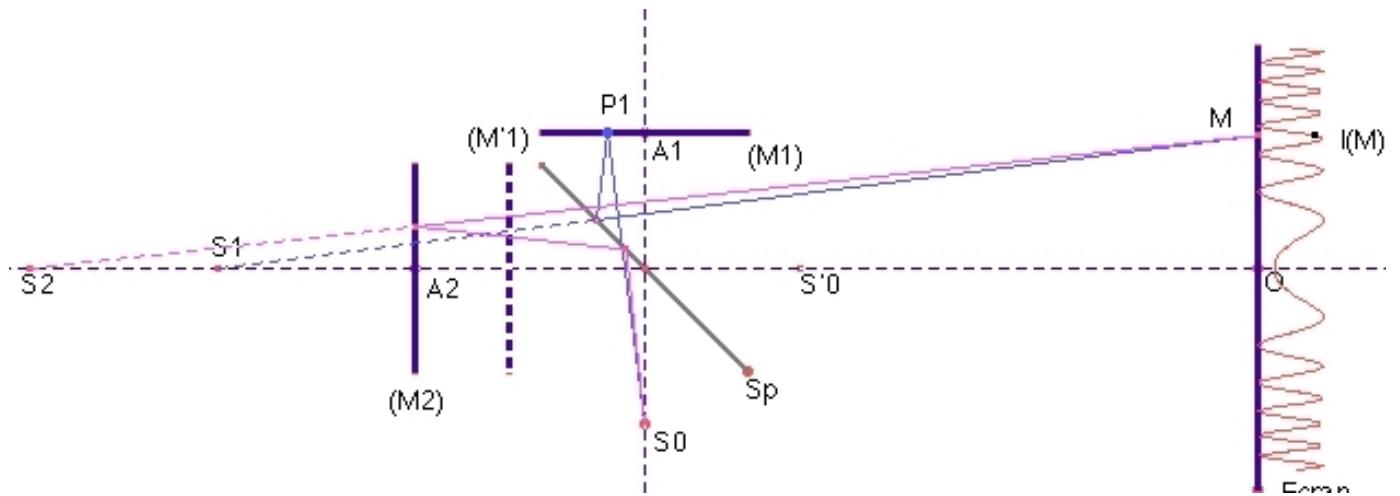


FIGURE 1.2 – Interferomètre de Michelson en lame d'air et l'éclairement.

comme le fruit d'une constatation expérimentale. Remarquons cependant que la différence de marche calculée précédemment est indépendante de la position de la source S , ce qui explique a posteriori que les franges se localisent à l'infini. Toutes les sources S donnent le même éclairement pour un point M à l'infini, les éclairements se superposent sans se brouiller.

1.2.2 Figure d'interférence : franges d'égale inclinaison.

Les figures d'égale éclairement sont les surfaces equiphasées donc à différence de marche constante, ce qui dans ce cas impose un angle d'incidence $i=cste$, ce qui reporté à l'écran donne des cercles concentriques.

Les franges d'égale éclairement sont alors appelées **franges d'égale inclinaison**, comme présentées figure 1.3.



FIGURE 1.3 – Franges d'égales inclinaison de la lame d'air.

1.3 Réglage du Michelson en lame d'air.

1.3.1 Avant de débuter...

Il ne faut jamais toucher les miroirs ou la séparatrice/compensatrice.

Vérifier que toutes les vis de réglages $V0_1$ et $V0_2$, $V1_1$ et $V1_2$, $V1_1$ et $V1_2$ ne sont pas en butée, ce qui empêcherait leur réglage ultérieur.

Régler $V1_3$ de telle manière que la distance dans chaque bras soit quasiment identique, donc se placer dans le cas où l'épaisseur e est faible. Ne pas hésiter pour cela à mesurer à la règle chacun des bras. Cela évite d'avoir des anneaux trop fins et parfois même non visibles.

1.3.2 Réglage du parallélisme compensatrice, séparatrice.

Le principe de ce réglage est le suivant :

Considérons une source ponctuelle à l'infini.

Les réflexions multiples de la lumière dans une lame à faces parallèles engendrent des rayons parallèles entre eux, qui convergent vers un seul et même point à l'infini ; cf. figure 1.4

alors que les réflexions multiples dans une lame à faces non parallèles engendrent des rayons non parallèles entre eux et donc une multitude d'images à l'infini.

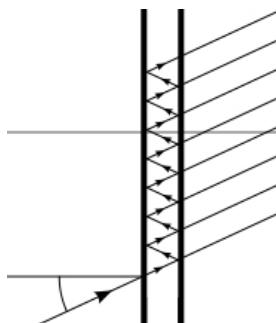


FIGURE 1.4 – Réflexion Multiple dans une lame à face parallèle.

En pratique, placer le Laser en face de la séparatrice, sous incidence quasi normale, et regarder sur un ´écran le faisceau issu de la lame formée par Compensatrice/Séparatrice.

Cherchez alors à faire coincider les taches les unes avec les autres à l'aide des vis $V0_1$ et $V0_2$.

Il ne faut plus toucher à ces vis de tout le TP.

Remarque : ce réglage est "définitif" sur la série des 4 Michelsons de TP, où séparatrice et compensatrice sont fixées définitivement. Ce réglage n'est nécessaire que sur le Micheson de la paillasse professeur.

Remarque 2 : le réglage peut être effectué non pas avec un laser mais avec un collimateur, qui une fois réglé génère un faisceau de lumière parallèle.

1.3.3 Réglage grossier du "parallélisme" des miroirs.

Les miroirs ne sont pas parallèles mais perpendiculaires. Néanmoins, nous avons montré dans le cours que le Michelson en lame d'air était équivalent à une lame d'air (!) formée par le miroir $M2$ et l'image $M'1$ du miroir $M1$ par la séparatrice.

Le principe de ce réglage est le même que précédemment.

Pour une source ponctuelle à l'infini, les réflexions multiples de la lumière dans une lame à faces parallèles engendrent des rayons parallèles entre eux, qui convergent vers un seul et même point à l'infini.

En pratique, deux solutions.

Soit vous disposez d'un laser et dans ce cas, placer le Laser face au miroir anticalorique et regarder sur un écran le faisceau issu de la lame d'air $M2/M'1$. Chercher alors à faire coïncider les taches les unes avec les autres à l'aide des vis $V1_1$ et $V2_2$ du miroir 1 (celui qui est monté sur un chariot).

Soit vous ne disposez pas d'un laser et dans ce cas, dessiner à la règle une croix sur un papier blanc et et regarder à l'oeil, dans le Michelson, la lumière issue de la lame d'air $M2/M'1$. Chercher alors à faire coïncider les images de la croix les unes avec les autres à l'aide des vis $V1_1$ et $V2_2$ du miroir 1 (celui qui est monté sur un chariot).

1.3.4 Réglage fin du "parallélisme" des miroirs.

Pour observer les franges d'égales inclinaisons, il faut qu'il y ait une grande variété d'inclinaison : l'angle i doit varier pour observer la figure d'interférence.

Utiliser un calque qui diffuse la lumière. Son avantage est de permettre des observations à l'oeil dans le Michelson car la lumière est peu intense.

En éclairant l'interféromètre avec une lampe à spectre discret, vous devez observer des anneaux circulaires.

Si ce n'est pas le cas, revenir à l'étape précédente : le réglage grossier du "parallélisme" des miroirs. Si vos franges sont légèrement elliptiques, vous pouvez retoucher très légèrement à $V1_1$ et $V2_2$ mais il faut la main légère et experte.

Le principe du réglage fin est le suivant :

Une fois les anneaux circulaires observées, déplacer la tête de bas en haut, les anneaux bougent ("ils respirent", le centre de la figure devient brillant puis sombre). Ce mouvement est dû au fait que les deux faces de la lame ne sont pas exactement parallèles et une simple différence de marche de $\lambda/2$ (soit l'épaisseur variant de $\lambda/4$) explique l'observation. Dès que les franges obtenues par une source

étendue sont localisées à l'infini, les anneaux donnent la sensation de ne plus bouger avec les mouvements de la tête (de même que lorsque vous regardez une étoile, la direction de l'étoile vous apparaît comme toujours la même pour tous les mouvements de tête.) Dès lors, le réglage est correct.

En pratique, une fois les anneaux circulaires observées, déplacer la tête de bas en haut, les anneaux bougent. En jouant sur la visse de précision $V2_1$, supprimer cette respiration.

Déplacez alors la tête de droite à gauche, les anneaux bougent. En jouant sur la visse de précision $V2_2$, supprimer cette respiration.

Les miroirs sont alors parallèles à mieux que $\lambda/4$.

Remarque : Il est possible de vérifier la qualité du réglage avec une lunette de visée de à l'infini (réglée par autocollimation). Si le réglage est bien fait, les franges d'égale inclinaison pour une source étendue sont localisées à l'infini et donc visibles par la lunette. Sinon il faut recommencer l'étape précédente, du réglage fin.

L'oeil lui voit toujours les franges qu'elles soient à l'infini ou pas .

1.3.5 Projection des franges d'égale inclinaison.

Pour bien réaliser cette ultime étape, il faut garder à l'esprit deux éléments essentiels :

1. quelles sont les "bonnes conditions" d'éclairements ?
2. où sont localisées les franges d'égale inclinaison avec une source étendue ?

Les "bonnes conditions" d'éclairements :

Pour observer les franges d'égales inclinaisons, il faut qu'il y ait une grande variété d'inclinaison : l'angle i doit varier pour observer la figure d'interférence.

En pratique, deux solutions :

Soit on utilise un condenseur (lentille très bombée, de très courte focale) pour avoir des angles importants, solution idéale en vue d'une projection. Il faut alors faire l'image de source étendue (le trou source) sur le miroir.

soit on utilise comme précédemment un calque qui diffuse la lumière. Son avantage est de permettre des observations à l'oeil dans le Michelson car la lumière est peu intense mais dans ce cas, la projection n'est pas possible car pas assez lumineuse.

Localisation des franges d'égale inclinaison :

Les franges d'égales inclinaisons se localisent à l'infini avec une source étendue.

En pratique, deux solutions :

Soit on utilise un écran loin, ce qui permet d'avoir un grand champ large mais peu lumineux.

Soit on projette dans le plan focal d'une lentille de grande focale ($f'=50\text{cm}$), cette fois ci, la figure est plus lumineuse mais le champ est limité par la taille de la lentille.

1.4 Rappel des résultats essentiels sur le Michelson en coin d'air.

1.4.1 Équivalence du Michelson à un coin d'air.

Nous avons montré dans le cours que le Michelson en coin d'air était équivalent à un coin d'air (!) formée par le miroir M_2 et l'image M'_1 du miroir M_1 par la séparatrice cf. figure 1.5.

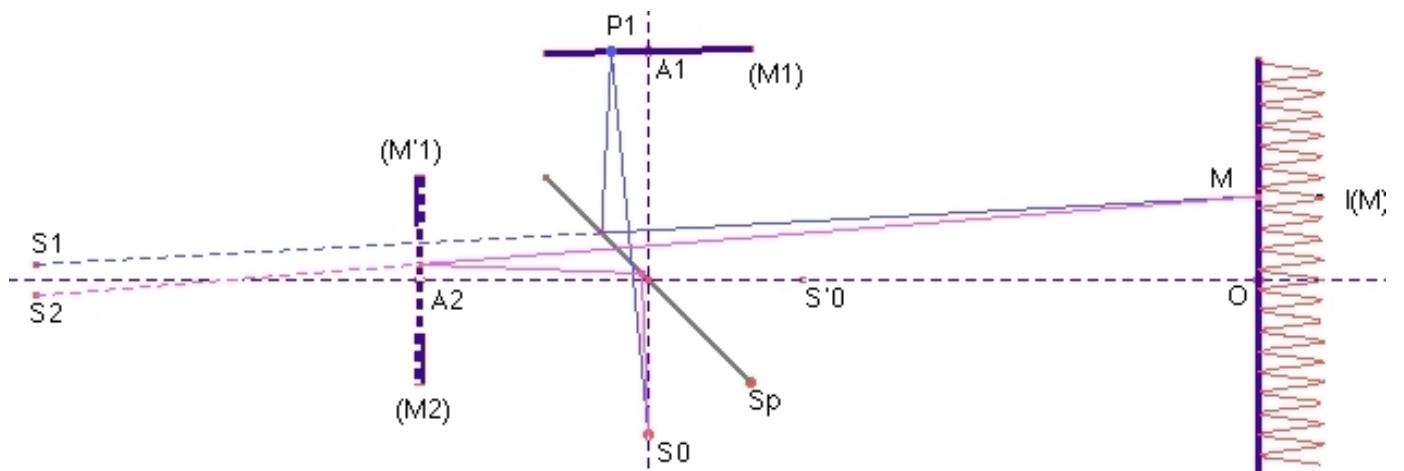


FIGURE 1.5 – Interferomètre de Michelson en coin d'air et éclairement.

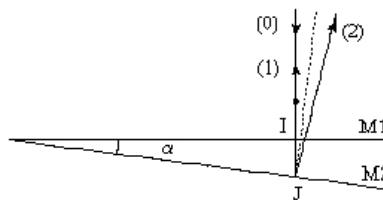


FIGURE 1.6 – Le coin d'air.

Avec une source ponctuelle, les franges sont délocalisées (ce qui signifie que les interférences pourraient être observées en tout point de l'espace). Mais **avec une source non ponctuelle comme on en utilise en TP, les franges sont localisées sur les miroirs.**

Dans le cas d'une observation sur les miroirs la différence de marche est alors :

$$\delta(M) = S_1 M - S_2 M = 2 \cdot \alpha x$$

$$\epsilon_{tot} = 2 \cdot \epsilon_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M)\right) \right) = 2 \cdot \epsilon_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} 2 \cdot \alpha x\right) \right)$$

1.4.2 Figure d'interf  ence : franges d'égale épaisseur.

Les figures d'égale éclairement sont les surfaces equiphases donc à différence de marche constante, ce qui dans ce cas impose que $x=cste$, ce qui reporté à l'écran donne des franges rectilignes équidistantes. Les franges d'égale éclairement sont alors appelées **franges d'égale épaisseur** comme présentées figure 1.7.

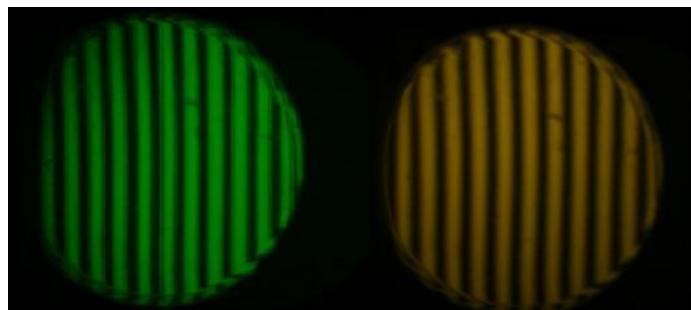


FIGURE 1.7 – Franges d'égale épaisseur du coin d'air.

1.5 Réglage du Michelson en coin d'air.

1.5.1 Recherche de la teinte plate sur le Michelson en lame d'air.

Partant du Michelson parfaitement réglé en coin d'air, on cherche à faire tendre l'épaisseur de la lame vers 0 : $e \rightarrow 0$, ce qui est appelé contact optique. Pratiquement, on cherche à faire grandir le rayon des anneaux.

La difficulté expérimentale est que les anneaux de très grand rayon sont difficilement visibles. Il faut donc déplacer le chariot du miroir lentement quand le rayon est grand pour ne pas passer le contact optique.

1.5.2 Passage de la lame d'air au coin d'air.

Placer la lampe spectrale au foyer du condenseur pour obtenir des angles d'indicidences quasi nulle sur le miroir M2. Intercaler un diffuseur pour éviter l'éblouissement et pratnt de la teinte plate, introduire un angle en jouant sur $V2_2$ pour obtenir une dizaine de franges.

Déplacer la tête de droite à gauche. contrairement au cas des anneaux qui "suivaient" les mouvements de la tête car loaclis  es à l'infini, ici les franges ne bougent pas puisqu'elles sont localisées sur les miroirs.

1.5.3 Projection des franges d'égale épaisseur.

Pour bien réaliser cette ultime étape, il faut garder à l'esprit deux éléments essentiels :

1. quelles sont les "bonnes conditions" d'éclairements ?
2. où sont localisées les franges d'égale épaisseur avec une source étendue ?

Les "bonnes conditions" d'éclairements :

Pour observer les franges d'égale épaisseur, il faut que les angles d'inclinaison soient très faibles.

En pratique, placer la lampe spectrale au foyer du condenseur pour obtenir des angles d'individus quasi nulle sur le miroir M2. (Ne plus mettre de calque pour la projection.)

Localisation des franges d'égale épaisseur :

Les franges d'égale épaisseur se localisent sur les miroirs avec une source étendue.

En pratique, on utilise une lentille de focale f' courte ($f' < D/4$ l'égalité étant la distance minimale entre objet réel et image réelle, appelée position de Silbermann, on souhaite un fort agrandissement ce qui impose la position de Bessel à choisir).

Remarque : il faut calculer le agrandissement par la lentille de projection pour relier l'interfrange mesurée sur l'écran et l'interfrange réelle i sur les miroirs.

Chapitre 2

Expérience avec le Michelson.

2.1 Réglage du Michelson en lame d'air.

Cette étape est le coeur de ce TP. Pour le réglage, vous utiliserez la lampe à vapeur de Mercure munie du filtre monochromatique vert et un écran diffusant.

Lister sur votre compte rendu les étapes du réglages du Michelson en lame d'air.
Il n'est pas nécessaire de réaliser la projection avec les Michelsons sur vos paillasses.

2.2 Mesure de longueur d'onde.

1. Faire défiler 50 franges au centre de la figure (incidence $i=0$). Mesurer alors avec le vernier (1 division = 1/500 mm) le déplacement du chariot correspondant (ainsi que l'incertitude sur ce déplacement qui est de 1 graduation.)
2. En déduire alors la longueur d'onde moyenne (avec son incertitude)
3. Comparer à la valeur tabulée : Raie du Mercure Hg Jaune Verte Intense à 546,1nm.

2.3 Mesure de l'écart du doublet Jaune du Mercure.

Un doublet est un ensemble de deux raies très voisines dans le spectre $\lambda_1 \simeq \lambda_2 \simeq \lambda_m$ tel que $\Delta\lambda \ll \lambda_m$.

1. Montrer que l'éclairement résultant du doublet est $\epsilon_{tot} = 4\epsilon_0 \cdot (1 + \cos(\frac{\pi\Delta\lambda}{\lambda_m^2}\delta(M)) \cos(\frac{2\pi}{\lambda_m}\delta(M)))$
2. Isoler le doublet Jaune du Mercure à l'aide du filtre Jaune. Observer le phénomène de battement optique comme décrit dans le TP cours. Mesurer le déplacement du chariot entre deux brouillages. Répéter cette opération 4 ou 5 fois.
3. En déduire une mesure de $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_m^2}$ avec son incertitude.
4. Comparer à la valeur tabulée : Raie double du Mercure Hg Jaune Intense à 579,1nm et 577,0nm.

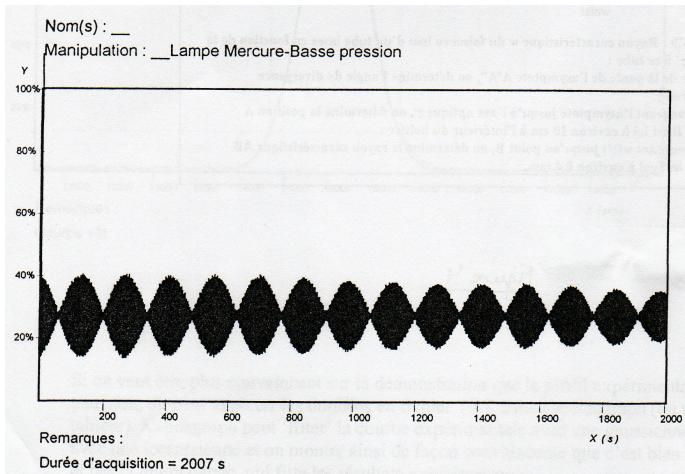


FIGURE 2.1 – Eclairement au centre de la figure d’interférence résultant d’un doublet : les battements optiques enregistré via Caliens.

2.4 Mesure de l’indice de l’air.

Une cuve de longueur intérieure $l=3,5$ cm dans lequel le vide peut être effectuée permet de mesurer par comparaison du trajet lumineux, l’indice de l’air.

Pour ne pas introduire d’autres différences de chemin optique, dues en particulier au verre de la cuve, une cellule de constitution identique est placée dans le second bras du Michelson.

1. Isoler à nouveau la raie verte intense du Mercure. Vider le tube de son air. Ouvrir alors très légèrement le robinet en observant bien les franges. Compter le défilement des franges jusqu’à ce que la cuve soit à nouveau remplie d’air.
2. En déduire la différence de chemin optique ”rajouté“ lorsque la cuve se remplit d’air.
3. En déduire une mesure de l’indice de l’air avec son incertitude.
4. Comparer à la valeur tabulée : l’indice de l’air est $n=1,0002926$ (cette valeur est prise à 20°C).

2.5 Mesure du rayon des franges circulaires : pour les plus rapides.

Cette manipulation nécessite que la figure d’interférence soit projetée sur un ´cran. Or les Michelsons de paillasse ne sont pas idéaux pour cette manipulation. Il faut donc utiliser le Michelson de la paillasse professeur.

1. Montrer que l’abscisse de la frange d’ordre p est $r_p \simeq f' \cdot \sqrt{2 - \frac{2 \cdot p \lambda_0}{2e}}$
2. Repérer sur un papier collé à l’écran les franges brillantes. Mesurer ensuite sur le papier le rayon des franges brillantes d’égale inclinaison sur l’écran.
3. A l’ordinateur vérifier la concordance théorie expérience.

2.6 Passage du Michelson en lame d'air.

Partant du Michelson parfaitement réglé en coin d'air, éclairé en lumière blanche et un filtre monochromatique, on cherche à faire tendre l'épaisseur de la lame vers 0 : $e \rightarrow 0$, ce qui est appelé contact optique. Pratiquement, on cherche à faire grandir le rayon des anneaux.

Pour le réglage fin, utiliser le filtre vert "large" qui permet une observation que si l'épaisseur e est faible.

Passer en lumière blanche pour vérifier que vous observez des anneaux colorées (teintes de Newton). Si tel est le cas, placer la lampe spectrale (avec un diffuseur pour protéger l'oeil d'une lumière trop intense) à peu près au foyer d'un condenseur. Incliner alors le miroir M2. Des franges rectilignes (colorées) apparaissent (En faire apparaître une dizaine). Observer les franges d'égales épaisseur.

Déplacer la tête de droite à gauche. contrairement au cas des anneaux qui "suivaient" les mouvements de la tête car localisées à l'infini, ici les franges ne bougent pas puisqu'elles sont localisées sur les miroirs.

Chapitre 3

Expérience d'interférence et diffraction.

3.1 Rappel sur le LASER

LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Le principe de l'émission stimulée est décrit dès 1917 par Einstein. En 1950, Alfred Kastler (ENS Paris, prix Nobel de physique en 1966) propose un procédé de pompage optique nécessaire à l'amplification du signal lumineux. Deux ans plus tard, avec Brossel, il réalise le premier prototype. (ENS Paris, le laboratoire porte leurs deux noms). Depuis le Laser ne se trouve plus uniquement dans les laboratoires de recherche ou les industries mais il a conquis notre quotidien.

Dans ce TP, vous utiliserez un Laser comme source de lumière. Le Laser émet une lumière monochromatique et donc de grande longueur de cohérence.

Néanmoins cette lumière est intense et endommage la rétine si la totalité du faisceau laser entrait dans l'oeil. Il convient donc d'être prudent lors de ces manipulations. N'observez jamais la lumière directe du laser (ne pas placer son oeil sur le trajet de la lumière) et observez uniquement la lumière diffusée par l'écran ou par les poussières de l'air. Par ailleurs, le faisceau Laser doit rester horizontal (attention aux réflexions parasites) et ne vous baissez pas dans la zone éclairée. Eteignez le laser quand les mesures sont finies.

3.2 Etude de la diffraction d'un faisceau Laser par une fente de largeur e .

3.2.1 Etude théorique

1. Enoncer avec des mots le principe de Huygens Fresnel.
2. Rappeler ce que sont les conditions de Fraunhofer. Justifier que ces conditions sont vérifiées dans le cas d'une fente de largeur e éclairée par un laser et dont l'éclairage est observé à une distance D d'environ 1m.

3. Montrer que l'éclairement résultant pour une seule fente est :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_0 \operatorname{sinc}^2(\pi(\alpha' - \alpha)e/\lambda_0)$$

4. Préciser α' en fonction de x_M la coordonnée d'un point M de l'écran dans la direction transverse à la fente et D. Que dire de α .
 5. Déterminer la taille de la tâche centrale en fonction de e, D et λ_0 .

3.2.2 Etude expérimentale.

1. Observer sur un écran ou sur le mur le phénomène de diffraction avec une fente étalonnée. Commenter.
 (Indication : mesurer la taille de la tache centrale, la taille des tâches secondaires, comparer qualitativement leur luminos  t  , leur position par rapport à la fente...)
2. Recommennez avec d'autres fentes étalonnées. Vérifier à l'ordinateur la pertinence de la formule théorique ci-dessus (indication :    partir de mesure de la tache centrale).
3. Refaire la même expérience avec le laser vert. Vérifier à l'ordinateur la pertinence de la formule théorique ci-dessus.
4. Faire pivoter la fente. Observer la forme de la figure de diffraction. Commenter.
5. Faire la diffraction par un cheveux. Commenter la figure de diffraction. En déduire la taille de du cheveux.

3.3 Diffraction et interférence d'un faisceau Laser par deux fentes de largeur e, distantes de a.

3.3.1 Etude théorique

1. Montrer que l'éclairement résultant pour une seule fente est :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_0 \operatorname{sinc}^2(\pi(\alpha' - \alpha)e/\lambda_0)(1 + \cos(2\pi(\alpha' - \alpha)a/\lambda_0))$$

2. Déterminer la taille de l'interfrange dans le système d'interférence.

3.3.2 Etude expérimentale.

1. Observer sur un écran ou sur le mur le phénomène d'interférence et de diffraction avec deux fentes étalonnées. Commenter.
2. Recommennez avec d'autres fentes étalonnées de même largeur et dont l'écartement a est diff  rent. Vérifier à l'ordinateur la pertinence de la formule théorique ci-dessus.
3. Refaire la même expérience avec le laser vert. Commenter qualitativement par comparaison la figure observée.

3.4 Prolongement pour les plus rapides

3.4.1 Diffraction et interférence d'un faisceau Laser par trois fentes de largeur e , distantes de a .

1. Calculer l'éclairement résultant de ce système interférentiel.
2. Observer sur un écran ou sur le mûr le phénomène d'interférence et de diffraction avec trois fentes étaillonnées. Commenter.

3.4.2 Diffraction et interférence d'un faisceau Laser par deux fentes de largeur e , distantes de a , étudiées avec Caliens.

L'écran CCD (Charge Coupled Device : matériau semi conducteur permettant la détection de la lumière) est couplé au logiciel d'acquisition Caliens et permet une étude quantitative complète de la figure d'interférence et de diffraction.

1. Réaliser l'acquisition de la figure d'interférence et de diffraction.
2. Modéliser sous Caliens la figure de diffraction. Commenter.
3. Modéliser sous caliens les interférences (et la diffraction) par la formule théorique proposée ci avant. Commenter.

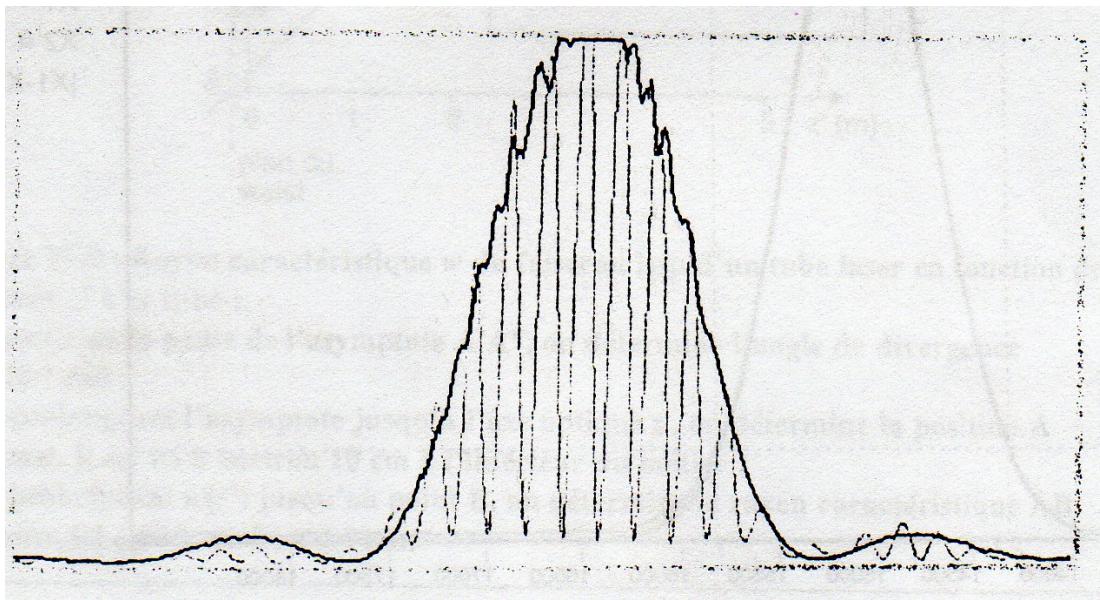


FIGURE 3.1 – Etude de la figure de diffraction.

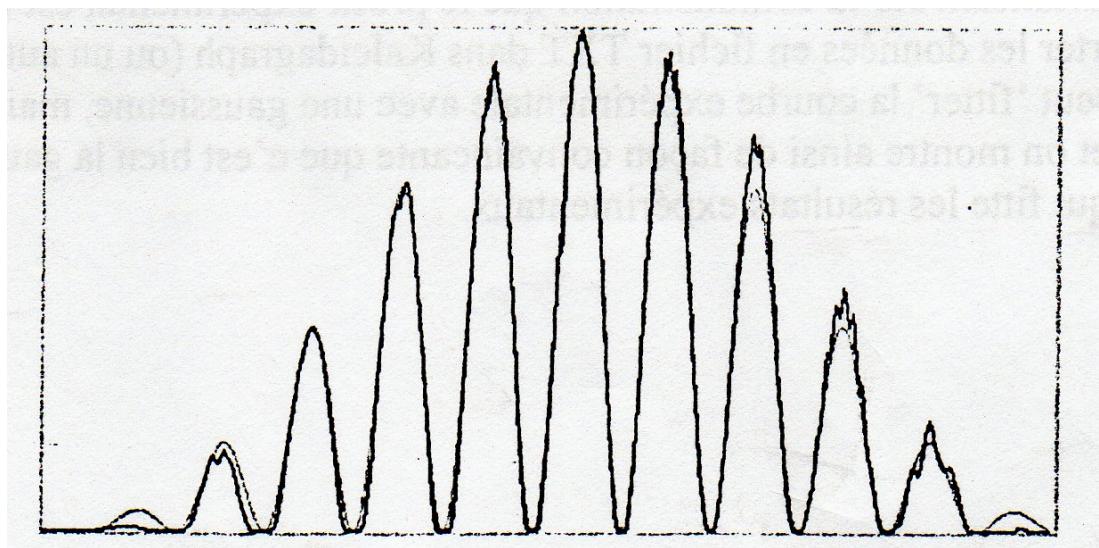


FIGURE 3.2 – Etude de la figure d’interférence dans le pic central de diffraction.

Chapitre 4

Spectrocope à réseau.

4.1 Le réseau : étude théorique.

On ne tient pas compte de la diffraction par un motif fente, on suppose la diffraction isotrope.

1. Supposer la diffraction isotrope impose quelle condition sur la largeur e de la fente ? Quelle limite y-a-t-il alors ?
2. A l'aide d'un schéma, trouver la relation du réseau, i.e. la condition d'interférences constructives en fonction de i l'angle d'incidence et i' l'angle après le réseau de la lumière, l'ordre d'interférence p et le pas a du réseau. Justifier qualitativement que cette condition est très stricte.
3. Retrouver la formule exploitant le minimum de déviation :

$$\sin\left(\frac{D_m}{2}\right) = \frac{p\lambda}{2a}$$

4.2 Le goniomètre et le réseau : étude expérimentale.

Objectifs du TP :

- Mesure précise d'angles à l'aide du vernier du goniomètre.
- Observation du minimum de déviation.
- Exploitation des mesures au minimum de déviation d'une lampe spectrale connue : étalonnage du pas a du réseau.
- Exploitation des mesures au minimum de déviation d'une lampe spectrale inconnue : détermination de longueur d'onde inconnue, analyse spectrale.

4.2.1 Première étape : Réglage de la lunette.

On souhaite réaliser une lunette de visée à l'infini à travers laquelle l'oeil emmétrope voit sans accommoder.

Comment s'appelle un tel système optique ?

Comment doivent être placées les deux lentilles ?

Rappeler les deux étapes du réglage de la lunette.

4.2.2 Seconde  tape : Réglage du collimateur.

Le **collimateur** sert à simuler un objet à l'infini à partir d'un objet. Il est mod l s  par une fente qui est éclairée par une lampe et joue le rôle d'objet et d'une lentille convergente.

Où doit être placé l'objet par rapport à la lentille du collimateur pour obtenir une image à l'infini ?

Rappeler le réglage du collimateur. (Il faut pour cela retirer le réseau.)

4.2.3 Première observation de la dispersion de la lumière.

Toutes les manipulations se font avec par exemple la première raie jaune du mercure $\lambda = 576,96$ nm.

1. Pour une incidence i donnée, observer l'angle i' pour une raie dans l'ordre 1, l'ordre 2 et si possible l'ordre 3. Commenter.
2. Partant d'un angle d'incidence nul, tracer pour la raie en question dans l'ordre 1 la courbe de la déviation D en fonction de l'angle d'incidence i . Commenter.

4.2.4 Recherche du minimum de déviation par le spectromètre à réseau.

Principe de la manipulation.

On éclaire le collimateur avec une lampe spectrale à vapeur de Mercure. Veiller à ce que l'ouverture de la fente soit faible.

On éclaire alors le réseau avec un faisceau de lumière parallèle issu du collimateur. Ce faisceau est dévié par le réseau et l'observation s'effectue à l'infini avec la lunette de visée.

On souhaite mesurer la déviation minimale D_m obtenue pour des longueurs d'onde λ connues et en déduire ainsi le pas du réseau à l'aide de la formule

$$\sin\left(\frac{D_m}{2}\right) = \frac{p\lambda}{2a}$$

Mesure du minimum de déviation pour la (première) raie jaune du mercure $\lambda = 576,96$ nm.

1. Eclairer le réseau sous incidence quasi normale.
2. Observer à l'oeil nu le rayon sortant. Placer la lunette à ce niveau et observer les raies à l'aide du viseur.
3. Rechercher le minimum de déviation, en faisant tourner le réseau afin de diminuer l'angle d'incidence. Il faut "suivre" avec le viseur (en plaçant le réticule sur la raie choisie). Lors de cette manipulation, le faisceau "s'arrête et change de sens". C'est le minimum de déviation.

4. Repérer la position de la lunette.
5. En laissant le collimateur fixe (et donc la lumière incidente fixe) repérer la seconde position du réseau (symétrique par rapport à la première) donnant le second minimum de déviation.
6. En déduire D_m avec son incertitude.
7. En déduire alors le pas du réseau connaissant la longueur d'onde $\lambda = 576,96$ nm.

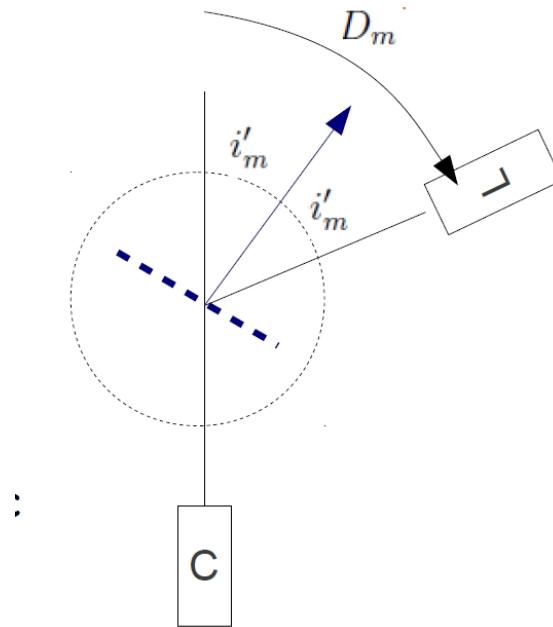


FIGURE 4.1 – Mesure de l'angle de déviation minimum avec un réseau.

4.2.5 Obtention de la courbe d'étalonnage du réseau

Mesure du minimum de déviation pour différentes couleurs.

Rechercher le minimum de déviation, en faisant tourner le prisme afin de diminuer l'angle d'incidence.

Les raies du mercure (en gras, les raies les plus intenses) :
 raie double violette : $\lambda=404,65$ nm et $407,78$ nm
 raie violette : $\lambda=435,83$ nm
 raie bleue indigo : $\lambda=491,60$ nm
 raie bleue verte : $\lambda=496,02$ nm
 raie verte : $\lambda=546,07$ nm
 raie double jaune : $\lambda=576,96$ nm et $579,07$ nm
 raie orange : $\lambda=623,39$ nm

raie rouge : $\lambda=690,75$ nm

Présenter vos résultats dans votre compte rendu sous forme de tableau :

λ	$\alpha_1(^{\circ})$	$\alpha_2(^{\circ})$	$D_m(^{\circ})$	a
-----------	----------------------	----------------------	-----------------	-----

En déduire la valeur de a avec une incertitude estimée au plus juste, à l'aide de l'ordinateur.

4.2.6 Utilisation du goniomètre    réseau en spectroscop  .

Une fois l'étalonnage effectué, remplacer la lampe à Mercure par une lampe au Sodium. Expliquer comment vous mesureriez la longueur d'onde de la raie jaune (qui est en fait un doublet). Mesurer la expérimentalement.

Chapitre 5

Spectrocope à prisme.

Ce TP est un TP de révision sur le spectroscope à prisme vu en PCSI. Il est néanmoins rédigé comme une TP indépendant du précédent. L'essentiel n'est pas de répondre à nouveau au même question, ni même de faire la partie théorique lors du TP (il reste important de la revoir à un moment donné) mais au contraire de se focaliser sur les manipulations.

5.1 Le prisme : étude théorique.

5.1.1 Déviation et décomposition de la lumière par le prisme.

On considère un prisme d'angle au sommet A , fabriqué dans un verre d'indice n placé dans l'air. On étudie la trajectoire d'un rayon lumineux, arrivant sur la face d'entrée avec une incidence i . On notera r l'angle de réfraction, r' l'angle d'incidence sur la face de sortie, et finalement i' l'angle d'émergence. On notera D la déviation du rayon par le prisme.

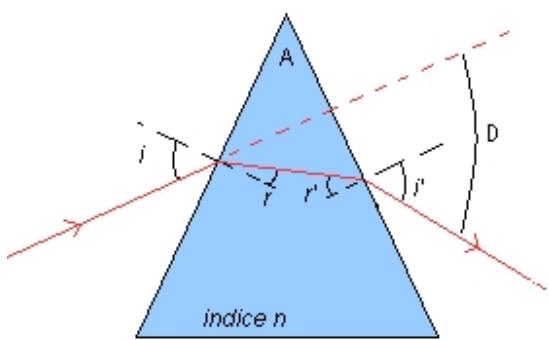


FIGURE 5.1 – Etude de la déviation de la lumière par le prisme.

5.1.2 Etude de la déviation de la lumière.

Dans cette partie, le rayon incident est constitué d'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ et le verre possède à cette longueur d'onde un indice de réfraction $n = 1,5$.

1. Refaire le schéma représentant la marche du rayon lumineux qui traverse le prisme. Faire apparaître i , r , r' , i' et D . (Ici, les angles ne sont pas alg  bris  s.)
2. Déterminer la relation liant i , r et n .
3. Déterminer la relation liant i' , r' et n .
4. Déterminer la relation liant r , r' et A .
5. Déterminer la relation liant D , i , i' et A .
6. On fait d  croire i en partant de 90° . Déterminer l'expression littérale de i_L , la valeur de i correspondant à une disparition du rayon émergent, en fonction de n et A .
7. A.N. pour $A = 60^\circ$.
8. Le graphique de D en fonction de i est donné figure 5.3. Déduire de ce graphique la valeur de i_m et D_m en degrés (valeurs des angles au minimum de déviation).
9. Quel principe élementaire de l'optique géométrique permet de montrer que le minimum de déviation est obtenue pour $i = i'$? (Explicitez clairement le raisonnement.)
10. En déduire l'expression de r_m en fonction de A .
11. En déduire la relation entre i_m , n et A .
12. En déduire l'expression de n en fonction de D_m et A .
13. Calculer numériquement r_m , i_m et D_m pour $A = 60^\circ$. Comparez au résultat précédemment obtenu.

5.1.3 Etude de la dispersion de la lumière.

Dans cette partie, le rayon incident est constitué d'une lumière polychromatique visible. Le verre constituant le prisme a un indice de réfraction n qui suit la loi de Cauchy : $n(\lambda) = n_0 + \frac{B}{\lambda^2}$ avec B une constante positive.

14. A l'aide des relations du prismes établies dans les premières questions, déterminer par un raisonnement simple dans quel sens varie l'angle de déviation D quand λ croît.
15. A quelle couleur correspondent respectivement $\lambda_1 = 400$ nm et $\lambda_2 = 700$ nm? Quelle est la raie la plus déviée?
16. En utilisant ce qui précède, faire un schéma faisant apparaître la marche des deux rayons lumineux associés à ces deux couleurs.

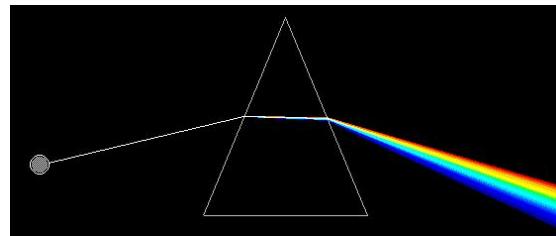
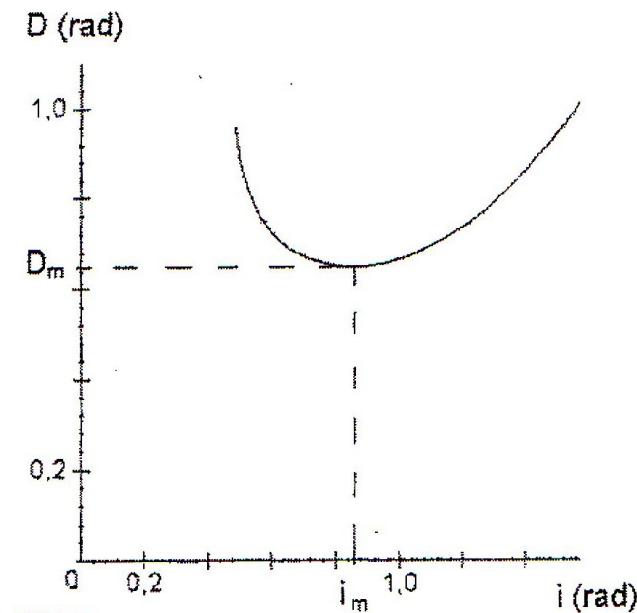


FIGURE 5.2 – Décomposition de la lumière par le prisme.

5.1.4 Réalisation d'un spectroscope à prisme.

On dispose d'un prisme placé sur un goniomètre (appareil qui permet la mesure d'angle avec une grande précision) et d'une lampe au mercure, qui possède un spectre de raie, i.e. les longueurs d'onde sont bien déterminées.

17. Indiquer dans les grandes lignes comment procéder pour déterminer numériquement l'indice n du prisme pour chaque longueur d'onde.
18. Quel graphique permettrait de vérifier si le verre constituant le prisme obéit à la loi de Cauchy ?
19. Sachant maintenant que le verre suit la loi de Cauchy, comment procéder pour déterminer la valeur d'une longueur d'onde λ inconnue ?

FIGURE 5.3 – angle de déviation D en fonction de l'angle d'incidence i .

5.2 Le goniomètre et le prisme :   tude expérimentale.

Objectifs du TP :

- Mesure précise d’angles à l’aide du vernier du goniomètre.
- Observation du minimum de déviation.
- Exploitation des mesures au minimum de déviation d’une lampe spectrale connue : réalisation de la courbe d’étalonnage du prisme.
- Exploitation des mesures au minimum de déviation d’une lampe spectrale inconnue : détermination de longueur d’onde inconnue et analyse spectrale.

Le **goniomètre** est un appareil de précision qui sert à mesurer des angles et donc des déviations de rayons lumineux par un prisme ou un réseau. Nous nous limiterons, conformément au programme de première année, à l’étude du goniomètre à prisme.

Le goniomètre est constitué d’un disque métallique D, dont l’horizontalité a été réglée, sur lequel des graduations permettent les mesures d’angles. Le disque D est gradué au demi-degré de 0° à 360° et d’un vernier au $1/30$ ou au $1/60$, chaque graduation du vernier correspond à $1'$ d’angle ($30'$ d’arc = $0,5^\circ$ degré, $60'$ d’arc = 1°). Ce système permet la mesure à une minute d’arc près $1' = \frac{1}{60}^\circ \simeq 3.10^{-4}$.

Quelques remarques pratiques avant de commencer :

- Le goniomètre est un outil de précision, il est donc fragile. Manipuler le avec précaution.
- Faire très attention au prisme, il est fragile. Il ne faut en outre pas mettre ses doigts sur les faces d’entrée et de sortie du prisme.
- Les lampes que vous utilisez sont fragiles, une fois allumées, ne pas les éteindre pour les rallumer. Une fois éteintes, il faut attendre 5mn avant de les rallumer sinon elles claquent

5.2.1 Première   tape : Réglage de la lunette.

On souhaite réaliser une lunette de visée à l’infini à travers laquelle l’oeil emm  trophe voit sans accommoder.

Comment s’appelle un tel système optique ?

Comment doivent être placées les deux lentilles ?

Rappeler les deux étapes du réglage de la lunette.

5.2.2 Seconde   tape : Réglage du collimateur.

Le **collimateur** sert à simuler un objet à l’infini à partir d’un objet. Il est mod  l  s   par une fente qui est éclairée par une lampe et joue le rôle d’objet et d’une lentille convergente.

Où doit être placé l’objet par rapport à la lentille du collimateur pour obtenir une image à l’infini ? Rappeler le réglage du collimateur. (Il faut pour cela retirer le prisme, dévissez la molette et ôtez le avec précaution.)

5.2.3 Troisième étape : Détermination de l'angle au sommet A du prisme.

Replacer avec soin le prisme sur le plateau en vérifiant que ce dernier est centré sur l'axe de rotation du plateau.

Le plateau est orienté de façon à ce que le faisceau de lumière issu du collimateur éclaire les deux faces du prismes qui forment l'angle que l'on cherche à déterminer.

Mesurer l'angle $2A$ comme indiquer sur la figure.

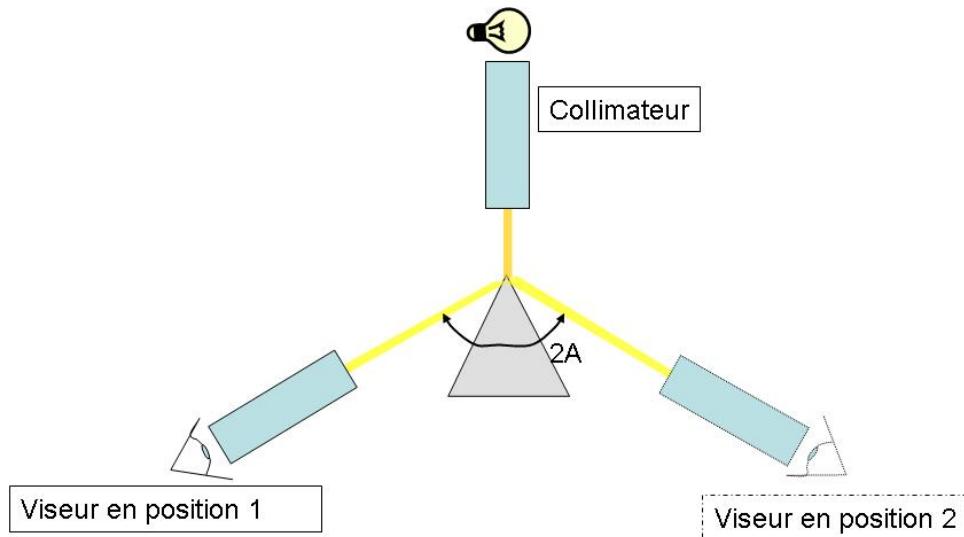


FIGURE 5.4 – Détermination de l'angle au sommet du prisme.

5.2.4 Recherche du minimum de déviation par le goniomètre à prisme.

Principe de la manipulation.

On éclaire le collimateur avec une lampe spectrale à vapeur de Mercure. Veiller à ce que l'ouverture de la fente soit faible.

On éclaire alors le prisme avec un faisceau de lumière parallèle issu du collimateur. Ce faisceau est dévié par le prisme et l'observation s'effectue à l'infini avec la lunette de visée.

On souhaite mesurer la déviation minimale D_m obtenue pour des longueurs d'onde λ connues et en déduire ainsi l'indice de réfraction du verre à la longueur d'onde considérée par la relation :

$$n(\lambda) = \frac{\sin((D_m(\lambda) + A)/2)}{\sin(A/2)}$$

Mesure du minimum de déviation pour la (première) raie jaune du mercure $\lambda = 576,96$ nm.

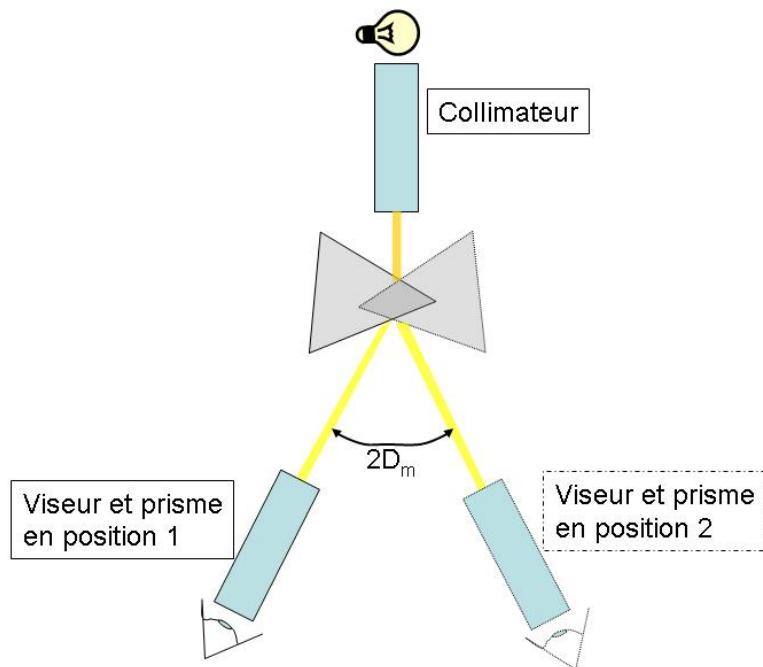


FIGURE 5.5 – Mesure de l'angle de déviation minimum.

1. Eclairer à nouveau le prisme sous incidence quasi rasante ($i_{incident} \simeq 85^\circ$).
2. Observer à l'oeil nu le rayon sortant. Placer la lunette à ce niveau et observer les raies à l'aide du viseur.
3. Rechercher le minimum de déviation, en faisant tourner le prisme afin de diminuer l'angle d'incidence. Il faut "suivre" avec le viseur (en plaçant le réticule sur la raie choisie). Lors de cette manipulation, le faisceau "s'arrête et change de sens". C'est le minimum de déviation.
4. Repérer la position de la lunette.

5. Répéter la second position du prisme, pour un faisceau incident fixe, donnant le minimum de déviation. (cf. méthode à la vidéo et figure).
6. Mesurer D_m .
7. En déduire l'indice du verre à cette longueur d'onde $\lambda = 576,96 \text{ nm}$.

5.2.5 Obtention de la courbe d'étalonnage du prisme

Mesure du minimum de déviation pour différentes couleurs.

Rechercher le minimum de déviation, en faisant tourner le prisme afin de diminuer l'angle d'incidence.

(Expliquer le principe de mesure du minimum de déviation)

Les raies du mercure (en gras, les raies les plus intenses) :

raie double violette : $\lambda=404,65 \text{ nm et } 407,78 \text{ nm}$

raie violette : $\lambda=435,83 \text{ nm}$

raie bleue indigo : $\lambda=491,60 \text{ nm}$

raie bleue verte : $\lambda=496,02 \text{ nm}$

raie verte : $\lambda=546,07 \text{ nm}$

raie double jaune : $\lambda=576,96 \text{ nm et } 579,07 \text{ nm}$

raie orange : $\lambda=623,39 \text{ nm}$

raie rouge : $\lambda=690,75 \text{ nm}$

Présenter vos résultats dans votre compte rendu sous forme de tableau :

λ	$\alpha_1(^{\circ})$	$\alpha_2(^{\circ})$	D_m $^{\circ}$	$n(\lambda)$
-----------	----------------------	----------------------	------------------	--------------

Tracé de la courbe d'étalonnage sous un tableur.

A l'aide du tableur, vérifier graphiquement la relation de Cauchy : $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$. Afficher et imprimer la courbe où apparaissent les valeurs de A et B ainsi que le coefficient de corrélation.

Comme chaque spectre est caractéristique d'une entité chimique bien précise, il est possible d'identifier les composants chimiques des vapeurs d'une lampe quelconque à l'aide de la courbe ci dessus, donc de faire de la spectrochimie.

5.2.6 Utilisation du goniomètre à prisme en spectroscope.

Une fois l'étalonnage effectué, remplacer la lampe à Mercure par une lampe au Sodium.

Expliquer comment vous mesureriez la longueur d'onde de la raie jaune (qui est en fait un doublet). Mesurer la expérimentalement.

Chapitre 6

TP cours : Polarisation de la lumière.

Connaissant la direction du champ électrique associé à l'onde électromagnétique dans le vide et la direction de propagation, il est possible de caractériser complètement l'onde électromagnétique, en particulier de calculer le champ magnétique associé à l'onde électromagnétique dans le vide. La direction de champ électrique est alors appelée direction de polarisation. L'objectif de ce TP est de mettre en évidence et de manipuler la polarisation de la lumière.

Objectifs du TP :

- Synthétiser et analyser une Polarisation Rectiligne.
- Etudier l'influence d'une lame retard $\lambda/2$ et $\lambda/4$ sur une P.R.
- Synthétiser et analyser une Polarisation Elliptique.
- Synthétiser et analyser une Polarisation Circulaire.

Dans tout ce TP la source de lumière est un lampe blanche non polarisée.

Ce TP est rédigé de manière peu directive. Cela devient une nécessité. Il faut donc que vous preniez les initiatives, que vous soyez le moteur du TP.

6.1 Rappel sur les matériaux utilisés dans ce TP.

6.1.1 Les lames retards.

Les lames retards sont constituées de milieu biréfringent, caractérisé par deux indices n_1 et n_2 , taillé selon ses directions propres (pour respecter ses symétries¹).

La lame retard possède donc deux axes neutres (deux directions propres du matériau). Ces axes neutres se caractérisent par le fait qu'une lumière P.R. arrivant suivant un de ces axes n'est pas modifiée.

1. Sur la paillasse professeur, vous trouverez un cristal biréfringent taillé de manière quelconque. Il y a alors deux rayons transmis dans le milieu, chacun correspondant à un indice de réfraction, mais l'étude générale de ce type de matériau est exclu du programme.

Enfin la lame retard introduit une diff  rencia de marche $\delta = (n_2 - n_1)e$ soit un déphasage $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 - n_1)e$ entre les deux composantes selon les directions propres, les axes neutres, de la lame. (Il faut donc ´ecrire propremen ces deux composantes sur la copie.)

On ´etudie dans ce TP deux types de lames retards, l'une telle que $\delta = (n_2 - n_1)e = \lambda/2$ soit $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \pi$ et une autre lame telle que $\delta = (n_2 - n_1)e = \lambda/4$ soit $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{\pi}{2}$.

6.1.2 Les polariseurs

Les polariseurs sont aussi des milieux anisotropes mais d'une autre nature, ils sont conducteurs et donc absorbant (effet de peau) dans une direction et diélectriques transparent dans la direction perpendicualires. (Ils sont constitués généralement de longues chaîne de molécules conductrices dans une matrice diélectrique). Les polariseurs annulent donc une composante du champ électrique et laisse passer la suivante sans modification. Le polariseur projette donc le champ électrique sur sa direction propre.

6.2 Synthèse et analyse d'une polarisation rectiligne. Loi de Malus.

1. Placer un trou face à la lampe et positionner la lentille convergente  proximité. Par autocollimation, réaliser un faisceau de lumière parallèle avec pour objet le trou source. Rappeler la relation de conjugaison de l'autocollimation.
2. Placer un premier polariseur P dans le faisceau de lumière parallèle. On note \vec{u}_p la direction privilégiée de ce polariseur . Décrire théoriquement le champ électrique après ce premier polariser. On appellera E_0 son amplitude.
3. Placer le second polariseur A (pour Analyseur) où \vec{u}_A est la direction privilégiée de ce polariseur dans le faisceau de lumière et ajouter la photorésistance à la suite de l'Analyseur.

En notant l'angle $\alpha = \widehat{\vec{u}_P, \vec{u}_A}$, montrer que l'éclairement est $I = I_0 \cos^2(\alpha)$: la loi de Malus

En faisant varier l'angle $\alpha = \widehat{\vec{u}_P, \vec{u}_A}$, mesurer la résistance de la photorésistance.

Sachant que la valeur de la résistance est inversement proportionnelle à l'éclairement reçu, valider expérimentalement la loi de Malus.

Discuter les écarts entres vos observations et la théorie.

6.3 Etude de l'effet d'une lame retard $\lambda/2$ sur une une polarisation rectiligne.

La synthèse de la polarisation rectiligne se fait comme précédemment à l'aide du polariseur P.

1. Justifier que si la polarisation incidente est suivant un axe neutre, alors la lumière reste inchangée : la lumière reste polarisée rectilignement de même direction de polarisation. Chercher expérimentalement les axes neutres (ou directions privilégiées) de la lames.

Préciser par une phrase claire la démarche expérimentale de recherche des axes neutres. (Aider vous de ce qui a été fait dans la section précédente, discuter les observations de faite à l'analyseur.)

2. Placer la lame $\lambda/2$ dans une direction quelconque, hors de ces axes neutres.
Analyser la lumière en sortie de la lame $\lambda/2$. (quelles observations faites vous sur l'analyseur ? Qu'en concluez vous ?)

6.4 Synthèse et analyse d'une polarisation elliptique et circulaire.

La synthèse de la polarisation rectiligne se fait comme précédemment à l'aide du polariseur P. Dans cette section, il est suggéré qu'un membre du binôme synthétise la polarisation et l'autre effectue son analyse.

1. Chercher les axes neutres de la lame retard $\lambda/4$
2. Rappeler les étapes de synthèse de la polarisation elliptique à l'aide d'une lame retard $\lambda/4$.
Réaliser l'expérience.
Réaliser (deuxième membre du binôme) l'analyse de la lumière. Rédiger avec soin vos observations et vos conclusions.)
3. Rappeler les étapes de synthèse de la polarisation circulaire à l'aide d'une lame retard $\lambda/4$.
Réaliser l'expérience.
Réaliser (deuxième membre du binôme) l'analyse de la lumière. Rédiger avec soin vos observations et vos conclusions.)

Chapitre 7

Onde centimétrique.

Ce TP n'est pas un TP de concours (pas pour le moment, à ma connaissance). Je vous propose donc un énoncé très libre, très peu directif. Je suggère des manipulations, sans préciser le protocole expérimental. Vous êtes le moteur du TP.

Il est exigé que les nouvelles épreuves de TP ressemblent plus à celle ci qu'aux autres très directives. Il faut donc vous essayer sur ce TP. Vous avez maintenant les acquis pour le faire. Bon TP, donc !

7.1 Description du matériel à disposition.

1. Une antenne émettrice qui émet une onde em polarisée et placée dans un cornet. Chercher les caractéristiques de cette onde dans la notice.
2. Une antenne réceptrice dans un cornet
3. Une antenne réceptrice "mobile", hors du cornet, pour l'étude des ondes stationnaires.
4. Une grille servant de polariseur (justifier)
5. Un "mini" réseau
6. des plaques métalliques pour créer des fentes de tailles réglables
7. Un support tournant pour observer le cône d'émission.

7.2 Manipulations suggérées.

Choisir parmi les manipulations suggérées. Rédigez sur le compte rendu le protocole expérimental mis en place (la manipulation réalisée), le résultat obtenu et vos conclusions (comparaison théorie expérience, regard critique sur l'expérience, limite...)

1. Faire le diagramme de rayonnement de l'antenne et déterminer le cône d'émission. (Qualitatif)
2. Etudier la polarisation de l'onde et la loi de Malus.
3. Etudier la diffraction par une fente.

4. Etudier les interférences et la diffraction par deux fentes.
5. Etudier les ondes stationnaires.
6. ...

Etonnez moi sur ce TP !