

X : Interféromètre de Michelson

Dans cette séance de travaux pratiques, on apprend d'abord à régler l'interféromètre de Michelson de manière à observer les franges localisées produites par une source étendue, puis on procède à quelques applications élémentaires.

Matériel à disposition :

- 1 interféromètre de Michelson
- 1 jeu de lentilles (100mm, 200mm, 300mm, 500mm...)
- 6 pieds d'optique de même hauteur
- 1 diaphragme à iris
- 1 miroir pour autocollimation
- 1 écran
- 1 « dépoli »
- 1 « mètre »
- 1 lampe à vapeur de sodium
- 1 laser
- 1 lampe Quartz-Iode
- Lunettes de protection laser rouge
- Lampe de poche
- lame de « Mica » tel que $n=1,58$
- 1 Filtre coloré « vert » ou « autre »
- Caliens et spectroscopie
- 1 Spid HR

I – Présentation de l'IM

I-1) Les deux IM

Au lycée Joffre, nous disposons d'interféromètres de marque Didalab et de marque Sopra (deux modèles : un récent et un plus ancien). Quel que soit le modèle, on retrouve sur ces appareils les mêmes éléments essentiels. Reportez-vous aux photographies fournies pour identifier successivement :

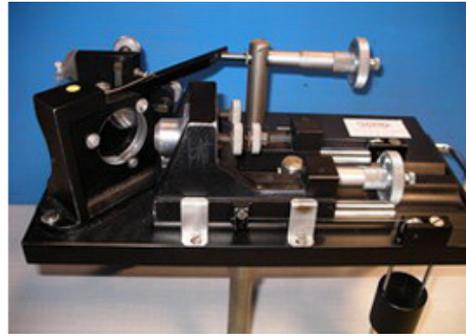
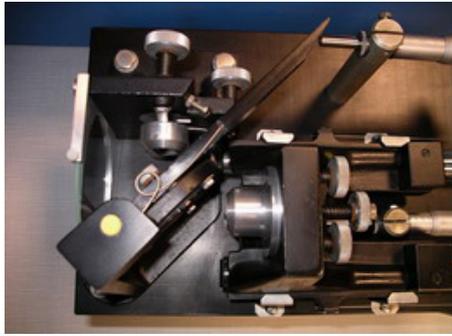
- Le verre anti calorique destiné à filtrer la lumière et protéger les miroirs ;
- La séparatrice, lame semi-réfléchissante dont une face traitée divise tout rayon incident en deux rayons d'amplitudes égales ;
- La compensatrice, lame de même épaisseur que la séparatrice mais non réfléchissante ; sa présence rend identiques les chemins optiques parcourus dans le verre sur les deux voies de l'interféromètre.

Sur les appareils Didalab, elle se trouve à plusieurs centimètres de la séparatrice. Sur les Sopra, ces deux lames se trouvent côte à côte.

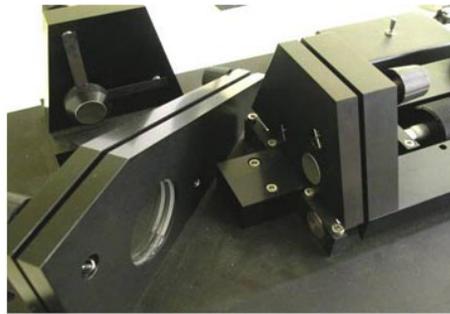
- Les miroirs M_1 et M_2 de part et d'autre de la séparatrice.



Interféromètre de Michelson de marque Didalab



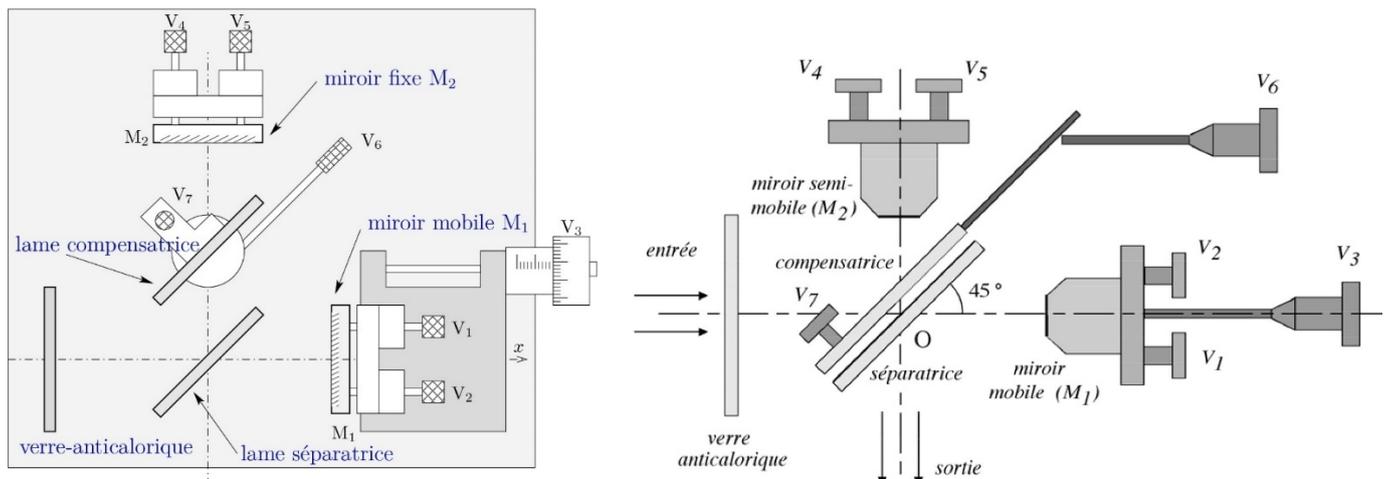
Interféromètre de Michelson de marque Sopra (Ancien)



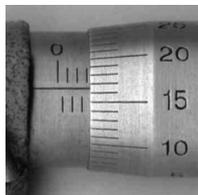
Interféromètre de Michelson de marque Sopra (Moderne)

I-2) Identification des différents réglages

- S_p : lame séparatrice : le seul élément fixe de l'interféromètre
- C lame compensatrice
- V7 : réglage « trappe » de la compensatrice (rotation autour d'un axe vertical)
- V6 : réglage « porte » de la compensatrice (rotation autour d'un axe horizontal)
- M1 miroir "mobile" ou chariotable
- M2 miroir "fixe"
- V4 et V5 réglages fins du miroir fixe : réglage du dièdre α . (*A utiliser que pour des réglages fins*)
- V1 et V2 réglages grossiers du miroir chariotable : réglage du dièdre α .
- V3 chariotage du miroir mobile M1 par butée micrométrique : pour les Sopra 1 tour du tambour correspond à 0,5mm et donc la lecture du vernier est formée de 50 graduations exprimées en μm .



Schématisation des deux IM : le Didalab à gauche et le Sopra à droite



Vernier sur lequel on lit $3,00 + 0,16_5 = 3,16\text{mm}$

II – Réglages du Michelson

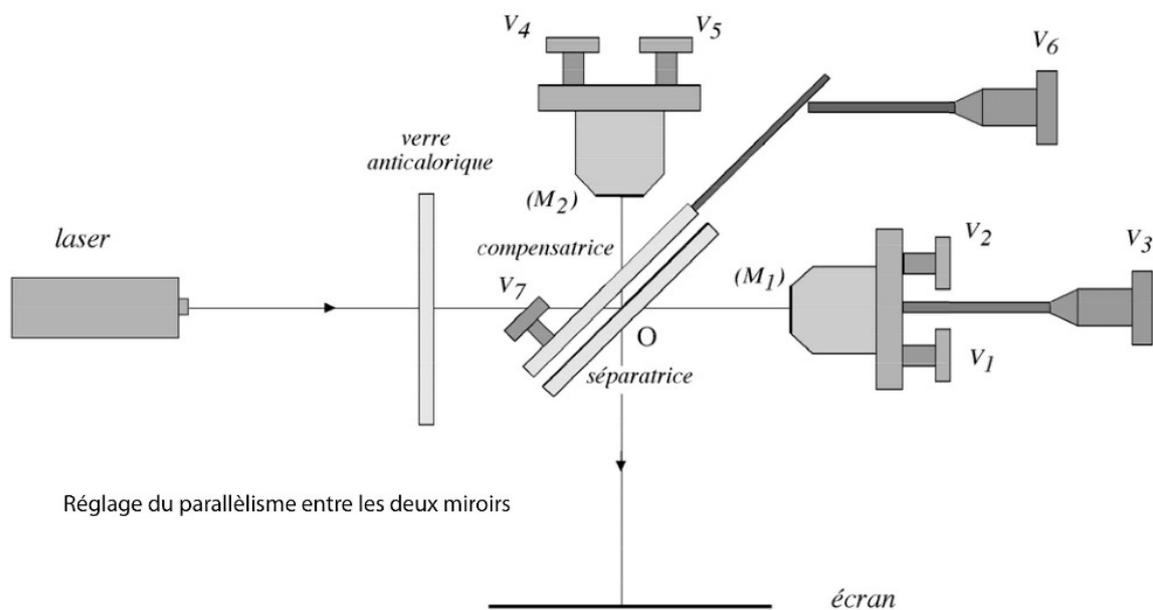
II-1) Réglages visuels

- Mettre les vis de réglage d'orientation des miroirs (V_1 , V_2 , V_4 et V_5) à mi-course.
- Ajuster à quelques mm près au maximum avec la vis V_3 l'égalité des bras du Michelson (distances comptées avec un réglét à partir de la face réfléchissante de la séparatrice).
- Régler visuellement le parallélisme séparatrice – compensatrice.

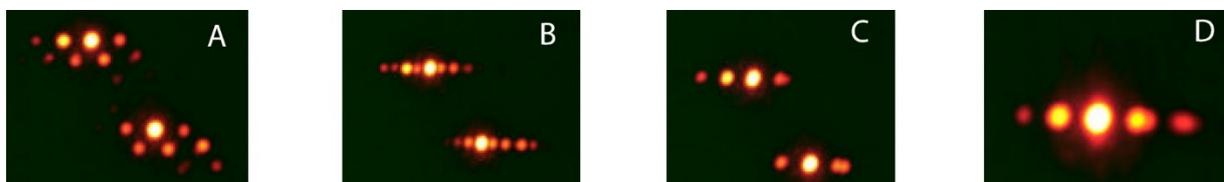
II-2) Réglages à l'aide d'un laser

a) IM Sopra

Afin de se familiariser avec le réglage sans laser qui est celui préconisé pour les concours, on va régler le Michelson à l'aide d'un laser.



- Placer une source laser à l'entrée de l'interféromètre (rayon perpendiculaire au miroir M_1) et un écran à la sortie.
- On observe 2 séries de taches, chacune donnée par un miroir provenant des réflexions multiples entre séparatrice et compensatrice
- Agir d'abord sur la compensatrice (vis V_6 et V_7) afin de regrouper au mieux les taches de chaque série $A \rightarrow B \rightarrow C$.
- Puis superposer ces 2 séries de taches en agissant sur le réglage rapide du miroir M_1 (vis V_1 et V_2) : $C \rightarrow D$ Si vous avez du mal à superposer les taches, vous pouvez placer une lentille de focale 0,5 m après l'interféromètre.

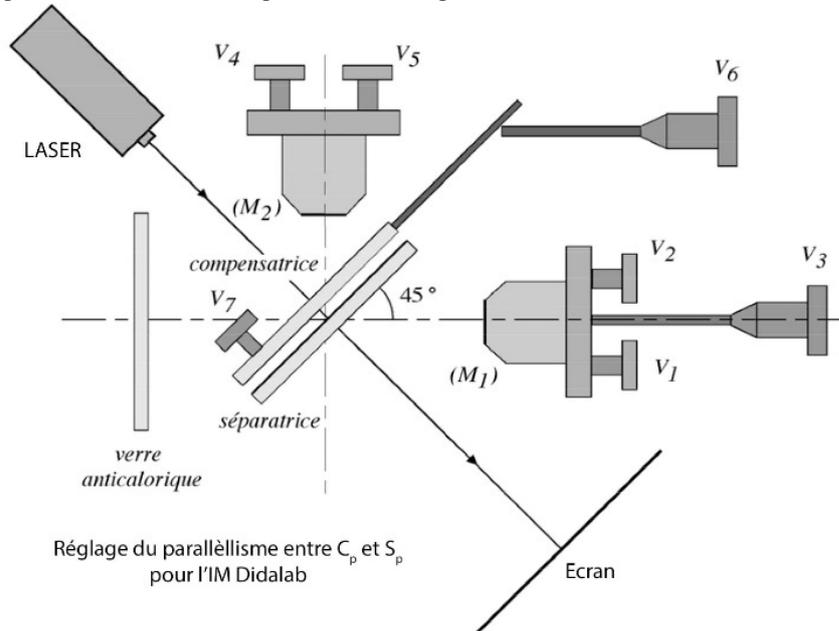


Réglage du Michelson Sopra au laser

Remarque : une astuce si on connaît la valeur du contact optique et de se placer à celui-ci, on doit alors observer des franges dans la tâche centrale du laser.

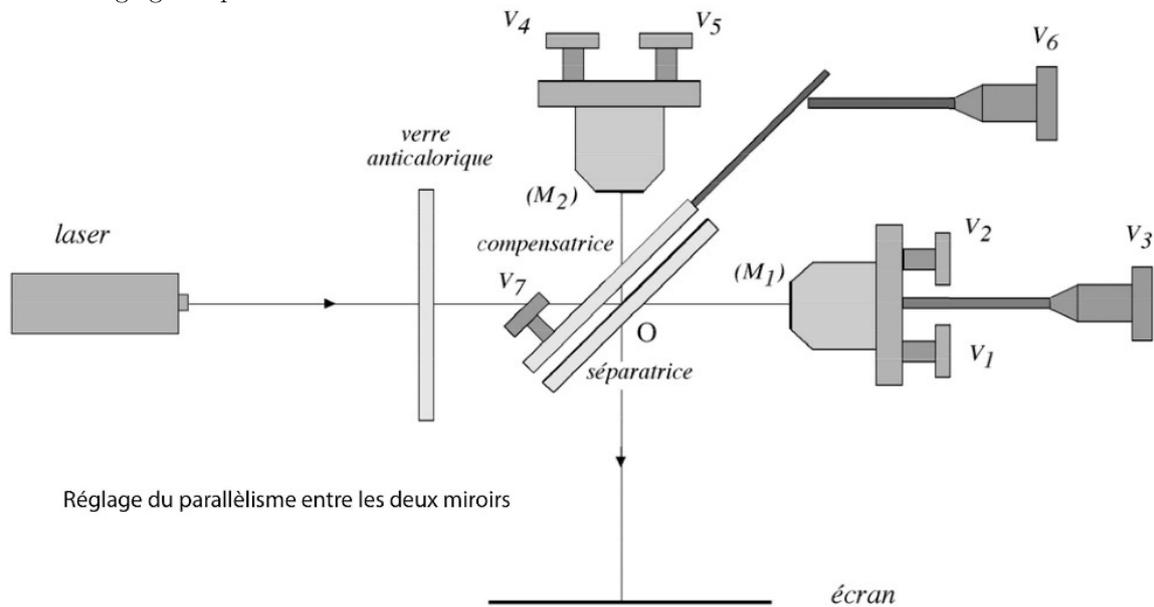
b) IM Didalab

i. Réglage du parallélisme entre compensatrice et séparatrice



- Eclairer avec le faisceau laser la compensatrice et la séparatrice sous incidence normale (se servir du rayon réfléchi pour être bien à l'incidence normale) et observer les taches sur un écran : on observe plusieurs taches dues aux réflexions multiples sur la compensatrice et la séparatrice.
- Jouer sur les vis V_6 et V_7 pour superposer les différentes taches.

ii. Réglage du parallélisme entre les deux miroirs

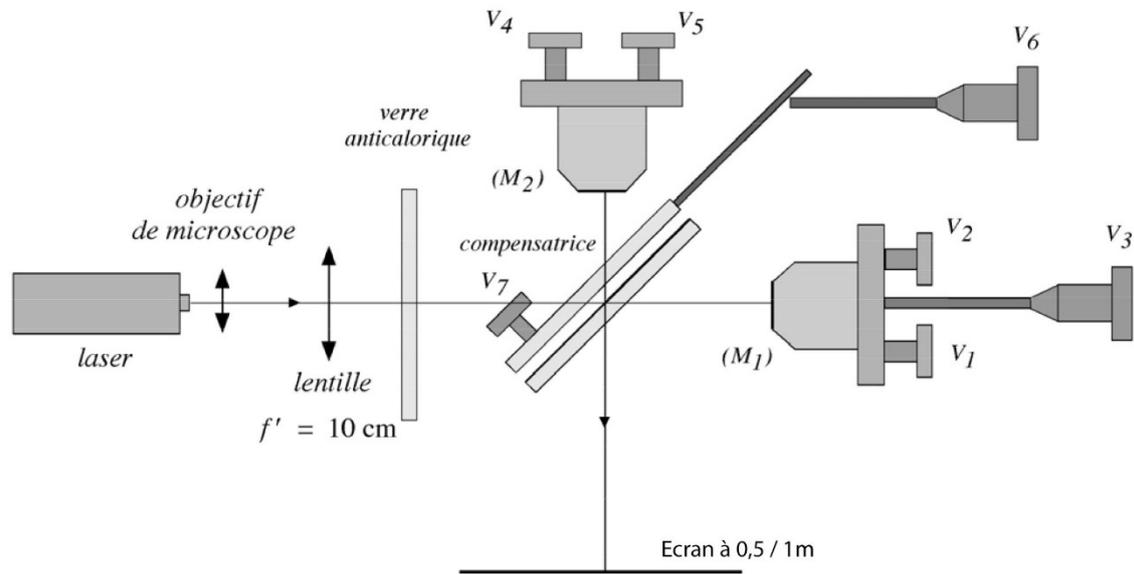


- Eclairer avec un faisceau laser le miroir M_1 sous incidence normale et observer les taches sur l'écran : On observe plusieurs taches dues aux réflexions multiples sur les miroirs M_1 et M_2 .
- Jouer sur les vis V_1 et V_2 pour superposer les deux taches.

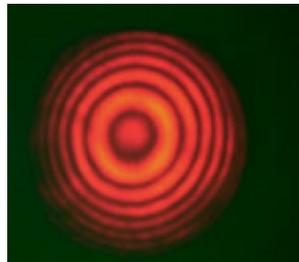
Remarque : une astuce si on connaît la valeur du contact optique et de se placer à celui-ci, on doit alors observer des franges dans la tâche centrale du laser.

c) Obtention des anneaux d'égale inclinaison

- Mettre le laser le plus en amont possible de l'interféromètre.
- Fixer sur le laser un objectif de microscope afin d'élargir le faisceau.
- Placer devant l'interféromètre une lentille convergente d'environ 10 cm pour élargir le faisceau afin de mieux focaliser la lumière sur les miroirs : veiller à ce que le faisceau éclaire bien les deux miroirs.



- Si le réglage géométrique est correct, vous devriez voir des anneaux. Agir alors sur les vis V_1 et V_2 pour amener les anneaux au centre de la figure. Il vous faudra, aussi certainement, réaligner l'ensemble laser-lentille-Miroir.
- Si vous ne voyez pas des anneaux, c'est que les miroirs ne sont pas « assez » parallèles : il faut alors revoir le réglage géométrique.
- Rapprocher vous du contact optique en diminuant l'épaisseur de la lame d'air. Pour cela à l'aide de la vis V_3 , faire rentrer les anneaux. Si le centre des anneaux « bouge » au cours du chariotage, agir sur les vis de réglage fin V_4 et V_5 afin de la stabiliser. Eviter de mettre en butée ces deux vis, pour cela on peut agir aussi sur le réglage grossier.
- Pour atteindre le contact optique, tournez la vis V_3 dans le sens d'un allongement du diamètre des anneaux (les anneaux « se déplacent » vers le centre. Vous obtenez à une position donnée un cercle unique au-delà de laquelle les anneaux réapparaissent. C'est la teinte plate. Vous êtes au contact optique.
- Le réglage obtenu servira de base à la plupart des expériences ultérieures.

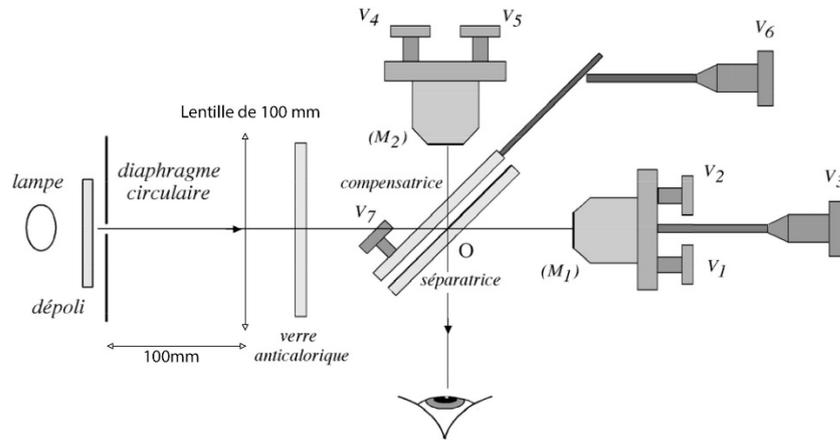


II-2) Réglages à l'aide d'une lampe spectrale (Sodium dans notre cas)

a) IM Sopra

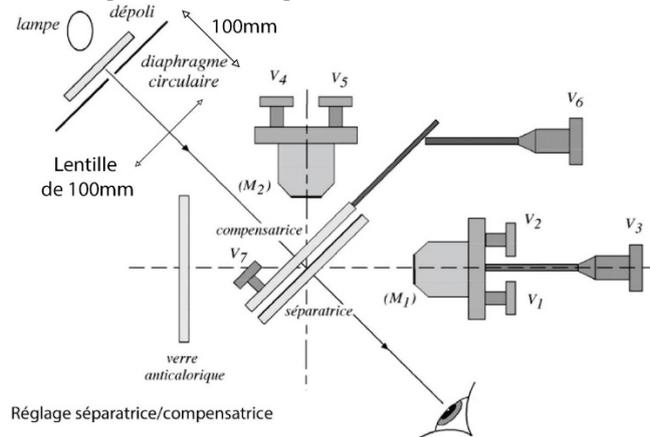
Vous n'aurez pas forcément un laser le jour de l'oral. Vous devez donc savoir régler l'interféromètre avec cette seconde méthode qui est plus délicate à utiliser.

- Placer la lampe spectrale à la place du laser.
- Placer un diaphragme à iris, faiblement ouvert, à la sortie de la lampe spectrale.
- Placer une lentille de 100mm accolée à l'entrée de l'interféromètre puis par autocollimation placer le diaphragme dans son plan focal objet. Afin de bien aligner le système essayer de faire passer l'image sur l'objet « trou ».
- Placer un écran dépoli afin d'atténuer l'intensité lumineuse sinon votre œil va souffrir.
- Observer directement à l'œil nu à la sortie de l'interféromètre.
- Agir d'abord sur la compensatrice (vis V_6 et V_7) afin de regrouper au mieux les taches de chaque série.
- Superposez au mieux les deux images obtenues en agissant sur les vis de réglage du miroir mobile (V_1 et V_2).



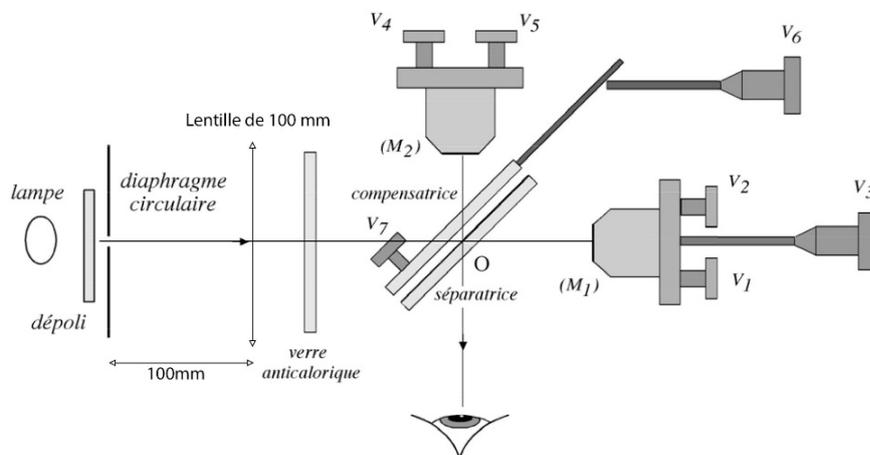
b) IM Didalab

i- Réglage du parallélisme entre compensatrice et séparatrice



- Eclairer un diaphragme très faiblement ouvert avec une lampe spectrale.
- Utiliser une lentille de courte focale proche de l'IM et placer le diaphragme dans son plan focal objet par autocollimation. Aidez-vous de l'image sur le diaphragme pour régler l'alignement des différents éléments.
- Placer un verre dépoli entre la lampe et le diaphragme afin d'en diminuer l'intensité.
- Observer à l'œil nu, à travers la séparatrice, le diaphragme selon une direction perpendiculaire à la séparatrice. On voit en général plusieurs images dues aux réflexions multiples sur la compensatrice et la séparatrice.
- Jouer sur les vis V_6 et V_7 pour superposer les différentes images.

ii- Réglage du parallélisme entre les deux miroirs



- Placer un diaphragme à iris, faiblement ouvert, à la sortie de la lampe spectrale.
- Placer une lentille de 100mm accolée à l'entrée de l'interféromètre puis par autocollimation placer le diaphragme dans son plan focal objet. Afin de bien aligner le système essayer de faire passer l'image sur l'objet « trou ».
- Observer à l'œil nu à la sortie de l'IM.
- Superposez au mieux les deux images obtenues en agissant sur les vis de réglage du miroir mobile (V_1 et V_2).

- c) Obtention des anneaux d'égalé inclinaison
- Ouvrir le diaphragme au maximum. Dans ce cas, la source n'est plus ponctuelle mais étendue.
 - Placer un écran dépoli.

Etape optionnelle :

- o En observant l'IM à l'œil nu vous devez observer des franges rectilignes, si vous êtes proches du contact optique. (cf : Annexe)
- o A l'aide des vis V_1 et V_2 augmenter l'interfrange. On réduit ainsi la taille du coin d'air.

Pour observer les anneaux on doit changer l'éclairage de l'IM :

- Focaliser la lumière sur les miroirs à l'aide de la lentille de 100mm (Bouger la lampe et coller la lentille à l'IM). Vous pouvez par exemple focaliser le filament de la lampe.
- Vous devez observer des anneaux colorés. Si ce n'est pas le cas, translater un peu le miroir mobile avec la vis V_3 de part et d'autre de la position initiale.
- Si vous ne voyez toujours pas les anneaux, recommencer le réglage géométrique. (Ou appeler votre professeur)
- Si vous voyez les anneaux, vu qu'ils sont localisés à l'infini, placer un écran dans le plan focal image de la lentille de 500mm à la sortie de l'IM. Enlever le dépoli pour une meilleure luminosité.
- Lorsque vous observez des anneaux, agir sur les vis V_1 et V_2 pour ramener les anneaux au centre de la figure.
- Augmenter au mieux le contraste à l'aide des vis V_4 et V_5 .
- Translater le miroir avec la vis V_3 de façon à diminuer l'épaisseur de la lame d'air : faire rentrer les anneaux. Arrêter la translation lorsqu'il ne reste que quelques anneaux.

Remarque :

A ce moment du réglage on peut améliorer le parallélisme des miroirs.

- *En effet, en déplaçant la tête latéralement (horizontalement puis verticalement) on constate que les anneaux restent immobiles si le réglage est bon, sinon on peut stabiliser ce phénomène à l'aide des vis V_4 et V_5 .*

Le réglage obtenu servira de base à la plupart des expériences ultérieures. Ne touchez plus aux réglages on va passer aux mesures.

Document 1 : Contact optique des différents IM du lycée Joffre

- Sopra n°1 (Ancien) : vernier = 30,65 mm
- Sopra n°2 (Moderne) : vernier = 4,79 mm
- Didalab n°3 (Ancien) : vernier = 7,67 mm
- Sopra n°4 (Moderne) : vernier = 3,27 mm
- Sopra n°5 (Moderne) : vernier = 5,28 mm
- Sopra n°6 (Moderne) : vernier = 4,55 mm
- Sopra n°7 (Moderne) : vernier = 1,17 mm
- Didalab n°8 (Moderne) : vernier = 10,78 mm
- Didalab n°9 (Moderne) : vernier = 10,89 mm
- Didalab n°10 (Moderne) : vernier = 9,89 mm
- Didalab n°11 (Moderne) : vernier = 9,65 mm

III – Expériences en « lame d'air »

III-1) Mesure du rayon des anneaux

On utilisera la lampe à vapeur de Sodium de longueur d'onde moyenne : $\lambda_0 = 589,0 \text{ nm}$

- Translater le miroir mobile pour se situer dans une zone de bon contraste avec à l'écran une dizaine (ou plus) d'anneaux.
- Positionner une frange brillante au centre. Mesurer sur l'écran les rayons des différents anneaux (on note r_k le rayon du $k^{\text{ème}}$ anneau).
- Vérifier graphiquement la loi établie dans le cours : $r_k = f' \sqrt{\frac{\lambda_0}{ne} (k + \varepsilon - "1")}$ où $n=1$ dans notre cas.
- En déduire l'excédent fractionnaire $0 < \varepsilon < 1$, et l'épaisseur de la lame.
- Noter la valeur lue sur le vernier et comparer cette valeur avec celle lue sur le vernier quand on est au contact optique. (Demandez la valeur exacte au contact optique de votre IM à votre professeur)
- Conclure

III-2) Mesure d'une longueur d'onde

Afin de gagner du temps on va rester avec la lampe spectrale au sodium, mais on peut utiliser toute source spectrale pour réaliser cette expérience munie d'un filtre interférentiel pour certaines.

- On compte de nombre d'anneaux N qui défilent au centre lorsque l'on translate le miroir mobile sur une distance correspondant à une variation de l'écart entre les deux miroirs de Δe tel que $2\Delta e = N\lambda$.
- Placez-vous près du contact optique. Compter une centaine (Avec une lampe Hg équipé d'un filtre jaune, on peut se contenter de 50) d'anneaux puis retrouver la longueur d'onde moyenne du doublet du sodium.
- Retrouver, à l'aide de votre cours, la formule $2\Delta e = N\lambda$.

III-3) Mesure du doublet de longueurs d'onde du Sodium

La lampe à vapeur de sodium émet deux raies de longueur d'onde très proches λ et λ' l'une de l'autre. Il en résulte un brouillage de la figure d'interférences lorsqu'une des longueurs d'onde donne un maximum d'intensité et l'autre un minimum. Dans ce cas, entre deux antioïncidences voisines on a N franges pour λ et $N+1$ pour λ' donc :

$$2\Delta e = N\lambda \text{ et } 2\Delta e = (N + 1)\lambda' \Rightarrow \lambda' - \lambda = \frac{\lambda'}{N} = \frac{\lambda\lambda'}{2\Delta e} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta e}$$

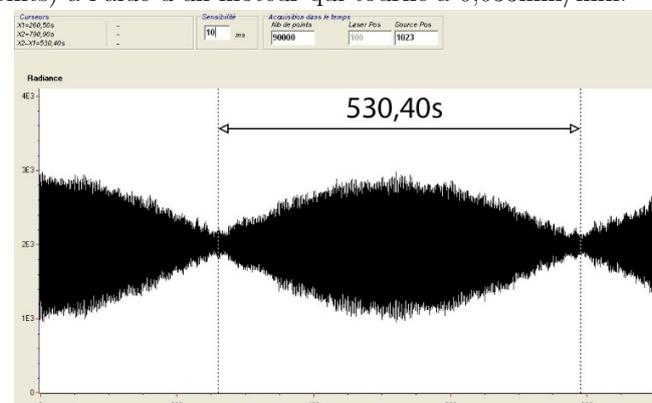
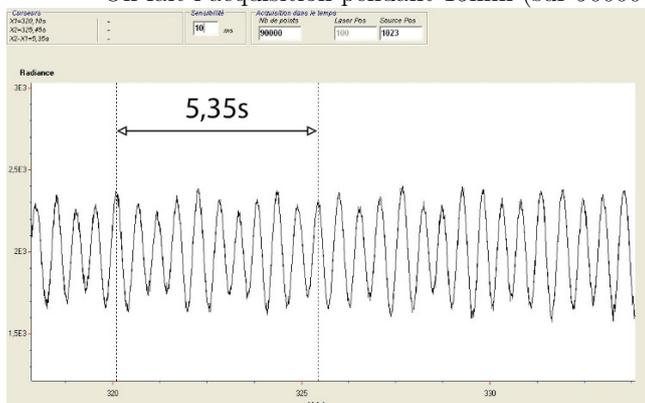
On cherche à déterminer expérimentalement, l'écart entre ces deux longueurs d'ondes $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

- Placer vous près du contact optique.
- Relever deux antioïncidences successives (zone où le contraste est très faible) puis en déduire la valeur de $\Delta\lambda$.

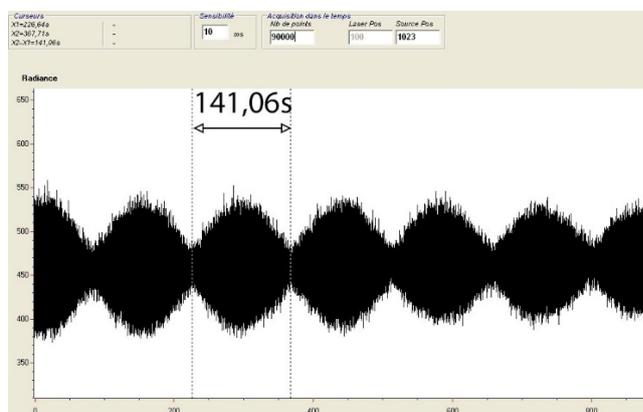
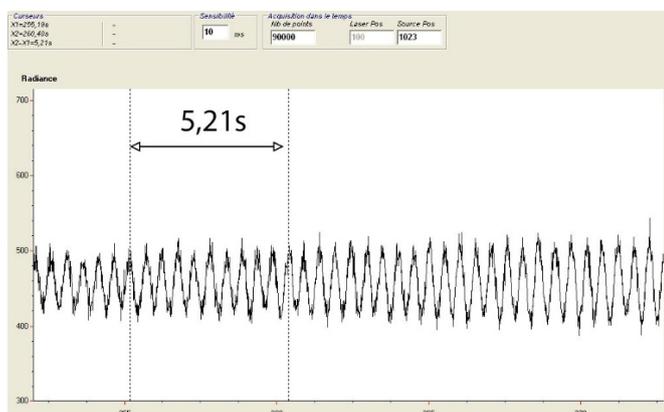
III-4) Utilisation d'un capteur CCD

Les mesures étant très précises et délicates, on utilise un système motorisé et un capteur CCD afin de réaliser les deux expériences précédentes.

- On remplace l'écran par une caméra Caliens dont on place le centre des anneaux au centre de la caméra.
- On se place au contact optique puis on lance le moteur qui est relié à la vis V_3 .
- On fait l'acquisition pendant 15min (sur 90000 points) à l'aide d'un moteur qui tourne à 0,033mm/min.



- En déduire à l'aide des graphes les valeurs de λ_0 et $\Delta\lambda$.
- Faire de même pour l'enregistrement du mercure ci-dessous. L'enregistrement a été fait avec un filtre interférentiel jaune spécifique pour le mercure.



IV – Expériences en « Coin d'air »

IV-1) Passage de lame d'air à coin d'air

On a pu voir dans le II-2-c comment passer du coin d'air à la lame d'air, il va falloir faire l'étape inverse cette fois.

- Placez-vous au contact optique en essayant de faire apparaître le minimum d'anneaux sur l'écran de projection à l'aide de la vis V_3 du miroir M_1 .
- A l'aide de la lentille, focaliser la lampe de sodium sur les miroirs.
- Placer un écran dépoli.
- Observer à l'œil nu, et jouer sur les vis V_1 et V_2 afin d'observer des franges rectilignes. (Vous pouvez jouer sur la position de la lampe afin d'améliorer l'éclairage des miroirs pour avoir des franges plus contrastées)
- Orienter verticalement vos franges pour la suite des expériences avec les vis V_1 et V_2 .
- Ne pas toucher à la vis V_3 de chariotage du miroir jusqu'au IV-3.
- Projeter à l'aide d'une lentille de 200mm à la sortie de l'IM.
- Enlever le dépoli.

IV-2) Mesure d'interfrange

- Déterminer l'interfrange i' sur l'écran.
- En déduire l'interfrange i grâce aux lois de Descartes.
- En déduire l'angle du coin d'air sachant que $i = \frac{i'}{|\gamma|} = \frac{\lambda n}{2\alpha}$

Remarque : Connaissant l'angle, si on change la lampe spectrale on peut en déduire la longueur d'onde de la nouvelle raie spectrale.

IV-3) Expérience en lumière blanche

a) Teintes de Newton

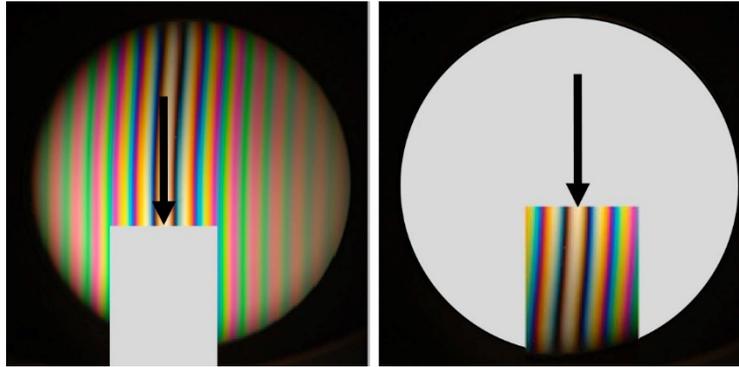
Les teintes de Newton sont délicates à obtenir, placer vous à proximité du contact optique (Si vous n'avez pas charioté le miroir M_1 dans le IV-2, c'est le cas).

- Remplacer la lampe spectrale par une source de lumière blanche.
- Enlever la lentille à l'entrée de l'IM et profiter du condenseur de la lampe pour éclairer au mieux les miroirs.
- Si vous bénéficiez d'une chance miraculeuse, vous observerez alors les franges du coin d'air en lumière blanche. Sinon, la portion du coin d'air que vous projetez sur l'écran a une épaisseur trop grande $\delta > l_c$ et vous voyez du blanc d'ordre supérieur. En chariotant *très délicatement* sur quelques centièmes de millimètres, il faut réduire encore l'épaisseur du coin d'air jusqu'à faire apparaître les franges.
- Si vous n'y parvenez pas, aidez-vous d'un filtre « coloré » afin d'augmenter la longueur de cohérence et repérez les franges voisines de l'ordre 0 : ce sont celles qui présentent le meilleur contraste.
- Enlever le filtre, si vous n'avez pas les teintes de Newton, appelez votre professeur.
- Relever la position du vernier pour lequel vous avez obtenu les teintes de Newton.

b) Epaisseur d'une lame

- Utiliser l'interféromètre en coin d'air en lumière blanche.
- Placer une lame de Mica sur un des axes de l'interféromètre.
- Marquer la position x_1 de la frange centrale sur l'écran et noter la valeur au micromètre près de la position du chariot.

- Charioter le miroir de façon à retrouver les figures d'interférences sur la zone correspondant à la lame mince et placer la frange centrale au niveau du marquage effectué précédemment. Relever la position du chariot x_2 .
- En déduire l'épaisseur de la lame e tel que : $|x_2 - x_1| = 2(n - n_{air})e$



Expérience de la lame de mica

Remarque : Afin d'avoir une bonne précision on choisira des franges rectilignes plutôt resserrées

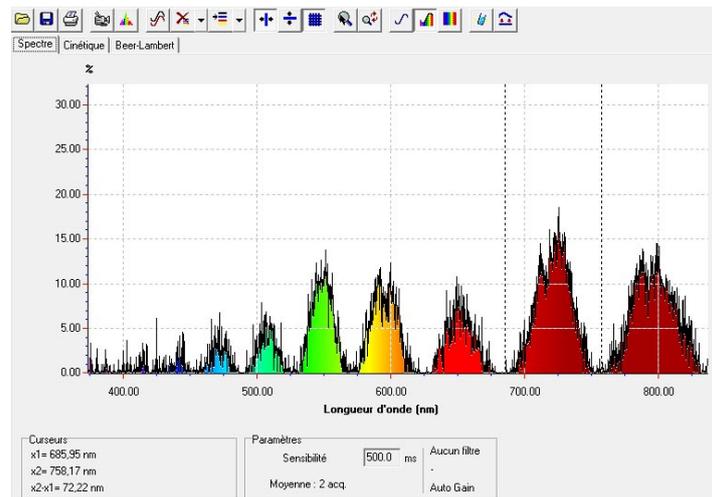
c) Spectre cannelé

- Visualisez les franges du coin d'air en lumière blanche.
- Centrer une zone du blanc d'ordre supérieur sur l'écran.
- Regarder au spectroscopie (document 2) cette zone. Conclure sur la présence d'un spectre cannelé.
- Constaté que le nombre de cannelures augmente avec l'épaisseur du coin d'air.
- Sachant que le nombre de cannelures observées, pour une épaisseur $e = \alpha x$ du coin d'air donnée, est :

$$N = Ent \left(2e \left(\frac{1}{\lambda_v} - \frac{1}{\lambda_R} \right) \right)$$

En déduire l'ordre de grandeur de l'épaisseur locale.

Ci-dessous on a réalisé le spectre du blanc d'ordre supérieur à l'aide d'un spectromètre à fibre optique et du logiciel spid-HR.



Entre 400 et 800 nm (il y en a une très proche de 400nm) on relève 8 cannelures telle que :

$$\lambda = \{421 ; 454 ; 489 ; 527 ; 572 ; 625 ; 684 ; 758 \text{ nm}\}$$

On sait que les cannelures vérifient la relation :

$$n = \frac{2e}{\lambda} \text{ où } n = m + \frac{1}{2}$$

Représenter $\frac{1}{\lambda} = f(n_{arbitraire})$, en déduire la valeur de e pour cet enregistrement. Puis en déduire les valeurs de n « réelles ».

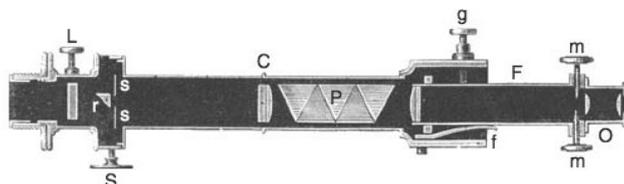
d) Longueur de cohérence

Dans le cas des franges du coin d'air, la différence de marche vaut $\delta=2e$, où e est l'épaisseur du coin. La mesure de e_{max} permettant d'observer des franges nous donnera ainsi un bon ordre de grandeur de la longueur de cohérence temporelle de la source et donc sa largeur spectrale $l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$. On ne peut parler que d'ordre de grandeur, car la mesure de e_{max} dépend

du détecteur utilisé, ici notre œil.

- Placer vous au contact optique, relever le vernier. (x_1)
- Charioter jusqu'à voir disparaître les franges rectilignes, relever le vernier. (x_2)
- En déduire la longueur de cohérence de la lumière blanche.
- Placer un filtre « coloré » à l'entrée de l'IM, et effectuer les mêmes opérations.
- Déterminer la longueur de cohérence « temporelle » de ces deux sources. Conclure.

Document 2 : Spectroscope



Un spectroscope est un système optique formé d'une fente (S), d'un prisme à vision directe (P), et de lentilles (F et C) afin d'avoir l'image de la fente à l'infini à la sortie. Ainsi l'œil verra le spectre sans avoir à accommoder.

Dans le cas de ce spectroscope de 1862 d'Hoffman, le prisme à vision directe est formé de 5 prismes dont 2 en Flint et 3 en Crown, ainsi la longueur d'onde centrale n'est pas déviée et elle est amoindrie pour les autres longueurs d'onde. De plus le pouvoir dispersif des prismes est additif, ce qui entraînera un spectre étalé et facile à observer.

Document 3 : Spectromètre à fibre optique

Un spectromètre à fibre optique est un appareil qui utilise comme détecteur de lumière une fibre optique, la fibre optique amène la lumière dans un système dispersif basé sur un réseau. Un capteur CCD permet ainsi de récupérer l'intensité de chaque longueur d'onde sur la plage d'utilisation du spectrophotomètre.

Il existe plusieurs systèmes optiques mais le plus utilisé est le Czerny-Turner :

