

Certains élèves nous rapportent que le Michelson est en grande partie réglé quand ils arrivent. On demande de savoir faire une autocollimation et de connaître la technique de la respiration. Cela ne retire pas l'importance de savoir le régler complètement car on constate qu'il est facilement déréglable. Mais cela montre que l'examineur attache plus d'importance à la **compréhension** du phénomène physique, à son **explication** et à l'**esprit critique** du candidat.

1 Mesure du doublet du Sodium

- Michelson en lame d'air
 - Lumière incidente avec beaucoup d'angles d'incidence
 - Anneaux d'égale inclinaison
 - Localisation des interférences à l'infini
 - Visualisation des interférences soit sur un écran éloigné soit projetées sur un écran à l'aide d'une grande focale (1 m)
- Eclairage : lampe au sodium
- Mesure : chariotier pour passer d'un brouillage à l'autre ; relever la distance Δx_n parcourue par le chariot pour passer d'un brouillage au n^{ieme} suivant.
- Rappel du calcul (qu'on ne vous donnera pas le jour du concours) : d'un brouillage à l'autre, la longueur d'onde λ_1 la plus courte du doublet a subi une variation de différence de marche égale à $(p+1)\lambda_1$ alors que la longueur d'onde λ_2 la plus grande a subi une variation de différence de marche de $p\lambda_2$. Sur le trajet optique du Michelson cela correspond à $2\Delta x_1$.
- Résultat : $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\Delta x_1} = \frac{n\lambda^2}{2\Delta x_n}$ ($\lambda_1 \simeq \lambda_2 = \lambda$ et $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$)
- (élève à Centrale) : Michelson déjà réglé en coin d'air éclairé par une lampe à vapeur de mercure devant laquelle on met un filtre orange + diaphragme+collimateur déjà réglé à l'infini. On observe 4 à 5 franges sur l'écran. Donner l'expression du déphasage φ_1 et φ_2 correspondant à chaque longueur d'onde du doublet jaune du sodium λ et $\lambda + \delta\lambda$ en fonction de θ l'angle d'inclinaison des miroirs, x la longueur qui sera chariotée par la suite et y la position du faisceau sur le miroir comptée à partir de l'arête des deux miroirs. L'éclairement est la somme des éclairagements correspondant à chaque longueur d'onde. Montrer que $E = 2E_0(1 + \cos((\varphi_1 + \varphi_2)/2) \cos((\varphi_1 - \varphi_2)/2))$. Donner les variations de $\cos((\varphi_1 - \varphi_2)/2)$ en fonction de x en supposant que $\delta\lambda/\lambda \ll 1$ et $\theta y \delta\lambda/\lambda^2 \ll 1$. Quelle est la distance entre deux annulations de contraste ? En déduire $\delta\lambda$ en faisant des mesures . Calculer l'incertitude. Mêmes calculs en prenant la distance séparant k annulations de contraste. Avec l'aide de l'examineur on entre dans un logiciel les valeurs des abscisses x_k des différentes annulations de contraste et on fait tracer x_k en fonction de k . Celui-ci fournit une modélisation $x_k = ak + b$ et la moyenne quadratique des écarts (racine carrée de la moyenne des carrés des écarts). Interpréter a et la moyenne quadratique des écarts. Conclure.
- *éléments de réponse*: La manip est celle du TP de l'année sauf que le Michelson est en coin et non en lame d'air; $\varphi_1 = (2x + 2\theta y)2\pi/\lambda$ et $\varphi_2 = (2x + 2\theta y)2\pi/(\lambda + \delta\lambda)$; $E = s_0^2(1 + \cos \varphi_1 + 1 + \cos \varphi_2) = 2s_0^2(1 + \cos((\varphi_1 + \varphi_2)/2) \cos((\varphi_1 - \varphi_2)/2)$; le contraste s'annule quand le cosinus lent s'annule, soit pour $(\varphi_1 - \varphi_2)/2 = (2k+1)/2$ ce qui mène à $x2\pi\delta\lambda/\lambda^2 = (2k+1)\pi/2$ après approximations suggérées; la distance entre deux annulations de contraste est donc $\lambda^2/2\delta\lambda$.

2 Mesure d'une longueur d'onde

- (élève aux CCP) Un Michelson déjà réglé pour observer des franges d'égale inclinaison, une lunette d'observation réglée à l'infini, une lentille de focale 250 mm , un filtre rouge, une lumière blanche, une lampe au Cadmium et un écran font partie du matériel mis à disposition. Il n'est permis de toucher qu'à la vis de chariotage de M_1 . Déterminer la relation $\lambda = \frac{(e-e_0)}{f^2}(r_{k+1}^2 - r_k^2)$ où e est l'abscisse de M_1 , e_0 celle de M_1 à la teinte plate, r_k le rayon de l'anneau k et f la distance focale de la lunette. Observer 4 anneaux dans une lunette (avec $e \simeq 14,00\text{ mm}$). Mesurer le diamètre des 4 anneaux et introduire dans un tableau excel les mesures du rayon ainsi que le calcul de $(r_{k+1}^2 - r_k^2)$. Déterminer $e - e_0$ en expliquant la méthode pour trouver e_0 . Déterminer λ_{rouge} du Cadmium.
- *éléments de réponse*: Le Michelson est réglé en lame d'air puisqu'on observe les franges à l'infini avec une lunette réglée comme tel et qu'on parle ensuite de rayon à mesurer ce qui correspond aux anneaux d'égale inclinaison; la teinte plate correspond à $\delta = 0$; lorsque M_1 est à l'abscisse e le Michelson présente donc une lame d'air d'épaisseur $(e - e_0)$; la différence de marche est donc $\delta = 2(e - e_0) \cos i$; cf cours pour la démonstration de $r/f = \sqrt{(p_{\text{centre}}/p)^2 - 1}$; or $(p_{\text{centre}}/p)^2 - 1 = (p_{\text{centre}}/p - 1)(p_{\text{centre}}/p + 1)$; dans la manip on est libre d'avoir un centre brillant ce qui donne un ordre au centre p_{centre} entier et l'ordre de l'anneau k égal de ce fait à $p_k = p_{\text{centre}} - k$; on sait que les ordres sont très élevés quand on n'est pas tout proche de la teinte plate ce qui est certainement le cas pour bien observer des anneaux; alors $(p_{\text{centre}}/p + 1) \simeq 2$ et $(p_{\text{centre}}/p - 1) \simeq k/p_{\text{centre}}$; d'où $r_k/f \simeq \sqrt{2k/p_{\text{centre}}}$; avec $2(e - e_0) = p_{\text{centre}}\lambda$ on obtient $r_k^2 = kf^2\lambda/(e - e_0)$; on écrit de même pour l'anneau $(k + 1)$; par différence on obtient la relation demandée; e_0 se mesure en translatant M_1 jusqu'à observer la teinte plate; pour obtenir une position précise du miroir on remplace la lampe par de la lumière blanche et on translate M_1 très précautionneusement jusqu'à observer les irisations; comme on ne peut pas toucher à autre chose qu'à la vis de chariotage et faire un coin d'air par exemple pour observer la frange rectiligne centrale blanche bordée de franges irisées, on s'arrête là et on peut alors relever e_0 ; la moyenne des $r_{k+1}^2 - r_k^2$ donne λ .

3 Mesure de l'angle entre les 2 miroirs du Michelson

- Michelson en coin d'air
 - Lumière incidente parallèle
 - Franges d'égale épaisseur
 - Localisation des interférences sur les miroirs
 - Visualisation des franges sur un écran conjugué des miroirs à l'aide d'une focale de 20 cm environ.
- Eclairage : lampe au sodium ou lampe spectrale quelconque avec filtre (pour n'avoir qu'une seule longueur d'onde)
- Mesures : mesurer la distance D entre un nombre n suffisant de franges observées sur l'écran; mesurer le grandissement γ (rapport des distances lentille-écran/lentille-miroir)
- Calcul (qu'on ne vous donnera pas le jour du concours) de l'interfrange sur les miroirs : $i = D/n\gamma$; l'angle α du coin d'air se déduit des relations de base $2e = p\lambda$ et $e = \alpha x$.
- Résultat (à savoir retrouver): $\alpha = \frac{\lambda}{2i}$

4 Mesure de l'épaisseur d'une lame de microscope

- Michelson en coin d'air (cf 3)
- Eclairage : lampe blanche
- Mesures : se placer d'abord sans la lame au contact optique; puis placer la lame sur un des bras du Michelson; observer la disparition des franges; chariotier d'une distance D dans le bon sens afin de récupérer les franges.
- Rappel du calcul (qu'on ne vous donnera pas le jour du concours): avant introduction de la lame, la différence de marche est $\delta_{2/1} = 0$ au contact optique. Après avoir placé la lame, elle devient $\delta'_{2/1} = \delta_{2/1} + 2ne - 2e - 2D = 0$ si on a placé la lame sur le bras 2 et donc déplacé le miroir 2 d'une distance D (vers la séparatrice) d'où $D = (n - 1)e$ où n est l'indice de la lame.
- Résultat : $e = D/(n - 1)$

5 Variations autour de la différence de marche nulle

- (élève à Centrale) Michelson déjà réglé, miroir **non chariotable** pendant tout le TP, un système d'autocollimation déjà fait à l'entrée avec un éclairage de lampe à mercure + filtre vert. Le but est de régler l'appareil à une différence de marche **nulle**. : Quel type de franges observe t'on ? Localisation ? Comment observer sans projection sur écran ? Sur quel élément doit-on jouer pour obtenir la différence de marche nulle ?
- *éléments de réponse*: Manifestement si le miroir n'est pas chariotable, c'est qu'on est très près du contact optique et que les 2 miroirs sont en coin d'air. On doit donc observer les franges du coin d'air; elles sont localisées sur les miroirs lorsque l'incidence est normale ce qui est réalisé ici avec l'auto-collimation; on les observe à l'oeil nu en accommodant sur le miroir; pour obtenir la d.d.m nulle il faut agir sur le parallélisme parfait ce qui mène au contact optique, il faut donc jouer sur la vis qui fait pivoter un miroir en élargissant de plus en plus l'intervalle entre les franges rectilignes; on va donc passer des franges parallèles à une teinte plate.
- (élève à Centrale) Michelson déjà réglé, miroir **non chariotable** pendant tout le TP, un système d'autocollimation déjà fait à l'entrée avec un éclairage de lampe à mercure + filtre vert. Tout petit trou source. On part de la différence de marche nulle, voir point précédent. Placer un doigt au-dessus d'une des voies du Michelson. Qu'observe t'on ? Expliquer. Estimer les paramètres physiques dont dépend la différence de marche. On donne la variation de l'indice de l'air avec la température $\frac{dn}{dT} = 10^{-6} K^{-1}$. Conclure. En jouant sur un des miroirs observer 5 à 6 franges verticales, remettre le doigt sur une voie, qu'observe t'on ? Estimer la différence de marche introduite.
- *éléments de réponse*: La présence du doigt chauffe l'air d'une voie et modifie l'indice donc la différence de marche. Pour une variation de $1^\circ C$ la variation relative d'indice est de 10^{-6} . Partant de la différence de marche nulle, cela entraîne un déséquilibre des longueurs optiques des deux voies, à savoir une différence de $2dn$ où e est l'épaisseur de la zone chauffée par le doigt ; on peut estimer $e \simeq 5 \text{ cm}$ d'où une valeur de $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ ce qui représente environ $0,15\lambda$, ce qui peut être détectable. Pour voir quelques franges on doit donner un coin d'air en faisant pivoter un des miroirs; si avec le doigt on voit une frange se décaler d'un interfrange cela signifie que la différence de marche a varié d'une longueur d'onde.

6 Questions posées sur le réglage

- (élèves à Centrale) Le Michelson est déjà réglé avec un éclairage en lumière parallèle avec une lampe spectrale munie d'un filtre vert suivie d'un collimateur, ç-à-d d'un diaphragme plus lentille qui assure le faisceau parallèle incident. L'élève doit suivre le protocole : se placer avec le plus petit trou source possible. Placer une feuille sur un des miroirs. Qu'observe t-on ? Que peut-on alors régler ? Enlever la feuille. Que voit-on ? Que peut-on régler ? On voit des franges. Où les observe t-on ? Quel type de franges ?
- *éléments de réponse* : lire d'abord le paragraphe 7.4 à "réglages si on ne dispose pas d'un laser". Lorsque un des miroirs est caché on observe les réflexions multiples sur la séparatrice et compensatrice et un miroir. On peut régler le parallélisme entre séparatrice et compensatrice en jouant sur les vis de réglage qui leur sont liées. Quand on enlève la feuille qui cache un miroir on observe alors les réflexions sur les deux miroirs . On peut alors régler le parallélisme grossier des deux miroirs en agissant sur les vis de réglage grossier d'inclinaison liées au miroir mobile jusqu'à ne voir qu'une seule tache. On voit des franges assimilables aux franges d'égale inclinaison si ce sont des anneaux. Si le trou source est étendu alors les anneaux sont localisés à l'infini.

7 Mémo sur le réglage du Michelson

7.1 Réglage en lame d'air (ou franges d'égale inclinaison) , si on dispose d' un laser

- 1) A l'aide d'une règle graduée, placer le miroir chariotable à égale distance de la séparatrice que le miroir fixe.
 - 2) Placer les vis de réglage fin à mi-course.
 - 3) Placer le laser orthogonalement à la séparatrice et régler celle-ci de façon à ce que les taches se superposent. On règle ainsi le parallélisme entre la compensatrice et la séparatrice.
 - 3) Placer le laser face au miroir mobile et utiliser les vis de réglage grossier d'inclinaison du miroir mobile afin de superposer les taches. On règle ainsi le parallélisme grossier des deux miroirs.
 - 4) Éclairer l'interféromètre à l'aide d'une lampe à vapeur de sodium équipée d'un diffuseur (papier calque) pour ne pas être ébloui. Observer à l'œil la sortie de l'interféromètre : des franges rectilignes ou déjà circulaires doivent apparaître sinon recommencer au 1). Si on utilise une lampe à vapeur de sodium penser qu'on peut être malencontreusement sur un brouillage dû au doublet du sodium et ne rien voir; chariotier avant de recommencer à 1).
 - 5) Si on voit des traits et pas des anneaux, modifier délicatement le réglage **grossier** des miroirs dans le sens qui fait **augmenter l'interfrange** en jouant successivement sur les deux vis. Le centre des anneaux doit alors apparaître. Si ceux-ci sont trop fins et trop nombreux, déplacer le miroir mobile pour en avoir moins (une dizaine).
 - 6) A l'aide des vis de réglage fin, supprimer la respiration.
 - 7) Supprimer le diffuseur et le remplacer par un condenseur ou une lentille de faible focale. Veiller à bien éclairer les miroirs en condensant la lumière sur ceux-ci . Placer en sortie de l'interféromètre une lentille de grande focale et placer l'écran à son foyer.
- Vous observez à ce stade les franges dites d'égale inclinaison.**
- Pour les obtenir, il a fallu éclairer l'interféromètre avec de nombreux angles d'incidence différents car $\delta = 2e \cos i$ d'où un éclairage convergent
 - elles sont localisées à l'infini pour une source étendue

7.2 Lumière blanche et teintes de Newton

8) Déplacer le miroir mobile dans le sens qui diminue le nombre d'anneaux, ce qui revient à faire rentrer les anneaux. Se placer **avant** le contact optique ($e = 0$) et mémoriser le sens de chariotage permettant de passer par le contact optique.

9) Remplacer la lampe à vapeur de sodium par une lampe blanche.

10) Continuer le chariotage **lentement dans le bon sens**. Des couleurs doivent apparaître : il s'agit des teintes de Newton. Si ce n'est pas le cas, reprendre au 8).

7.3 Réglage en coin d'air (ou franges d'égale épaisseur)

11) Se placer au contact optique soit à l'aide d'une lampe blanche (cf 8 à 10), soit simplement en lumière à vapeur de sodium en maximisant la taille de la frange centrale.

12) **Modifier l'éclairage** : avec une lentille de focale moyenne, former un collimateur à l'aide d'un diaphragme et du miroir mobile (qu'on utilise alors comme simple miroir plan).

13) **Modifier le mode d'observation** : projeter le miroir fixe sur un écran à l'aide d'une lentille de focale moyenne

ATTENTION : la distance objet - écran doit être supérieure à $4f'$

14) Introduire un angle entre les miroirs à l'aide d'une vis de réglage fin. Des franges rectilignes doivent apparaître à l'écran.

Vous observez à ce stade les franges dites d'égale épaisseur. Pour les obtenir il faut :

- éclairer l'interféromètre sous incidence quasi normale avec une source étendue
- la différence de marche vaut : $\delta = 2\alpha x$
- elles sont localisées sur les miroirs pour une source étendue

7.4 Réglage si on ne dispose pas d'un laser

Il se peut que vous ne disposiez pas d'un laser ou bien qu'on vous impose une autre méthode (cf **6** "questions posées sur le réglage") pour faire les réglages du tout début. Il faut donc la connaître, la voici :

1) et 2) identiques

3) L'idée est de réaliser un faisceau de lumière parallèle incidente. Placer la lampe spectrale suivie d'un dépoli (pour ne pas être ébloui dans l'observation) suivi d'un diaphragme (trou) assez petit pour former un trou source, suivi d'une lentille de focale "normale" (10 cm par exemple) et on fait une autocollimation pour former un faisceau parallèle incident. On cache alors un des miroirs avec une feuille de papier. On agit sur les vis liées à la séparatrice et à la compensatrice de façon à superposer les nombreuses taches lumineuses qui sont dues aux réflexions multiples. On règle alors le parallélisme entre la séparatrice et la compensatrice.

4) On enlève alors le cache. On agit sur les vis de réglage grossier d'inclinaison du miroir mobile de façon à superposer les taches lumineuses dues à la réflexion sur chaque miroir. On règle alors le parallélisme grossier des deux miroirs.

5) On agrandit le diaphragme et on fait le même réglage qu'au 5) et 6) . On atteint alors le réglage en lame d'air, mais pour voir le mieux possible ce phénomène des franges en lame d'air, on retire l'éclairage parallèle (çà-d tout ce qui réalisait le faisceau parallèle incident), et on continue sur 7) afin d'obtenir le maximum d'angles d'incidence.