

L'INTERFEROMETRE DE MICHELSON ET QUELQUES APPLICATIONS.

L'interféromètre de Michelson est un interféromètre à deux ondes, à deux faisceaux bien séparés, permettant, par ses différents réglages, d'observer de manière très souple de nombreux aspects des phénomènes d'interférence. Il permet également d'accéder à des mesures très précises dans des domaines très variés (mesure précise de distance par exemple).

Le but de cette séance consiste à présenter cet interféromètre, à apprendre à le régler et à s'en servir d'une part pour visualiser des phénomènes d'interférence, d'autre part pour mesurer des grandeurs spectrales (écart d'un doublet, largeur spectrale d'un filtre interférentiel...).

Bibliographie :

"Optique expérimentale" (Collection enseignement des sciences Hermann) Sextant (ouvrage collectif de la préparation à l'agrégation de Montrouge)

"Agrégation de sciences physiques, expériences d'optique" (Bréal 2^{ème} édition) de R. Duffait, p 64-91

B.U.P. :

- 1988 : n°709 « **A propos de l'expérience de Michelson** »
- 1994 : n°767 « **Mesure d'une longueur d'onde avec le Michelson** »
- 1995 : n°779 « **Concours général 1995 : sujet et corrigé** »
- 1997 : n°794 « **Cavité acoustique, LASER et ... système bouclé** »
- 1997 : n°795(2) « **Interféromètre de Michelson, quelques idées simples** »
- 1997 : n°795(2) « **L'interféromètre de Michelson, quelques aspects théoriques et expérimentaux** »
- 1997 : n°799 « **Introduction à l'holographie** »
- 1997 : n°799 « **Observation d'un spectre cannelé avec des interféromètres à division du front d'onde** »
- 1997 : n°799 « **Concours général 1996 : sujet et corrigé** »
- 1998 : n°809 « **Une application du langage Maple à la physique : la simulation d'interférences lumineuses, de la diffraction à l'infini et de son couplage avec les interférences.** »
- 1999 : n°811 « **Réglage de l'interféromètre de Michelson (Sopra)** »
- 1999 : n°815(2) « **Interféromètre de Michelson : effet d'un dérèglement de la lame compensatrice sur les anneaux d'égal inclinaison.** »
- 2001 : n° 831 « **Vers l'optique atomique cohérente** »

Liens internet intéressants :

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/enseignement/tp/> : à voir absolument

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/biblgene.html> : des simulations en Cabri Géomètre très intéressantes.

<http://www.scientillula.net/>: site portail de physique et chimie, tout niveau fait par notre collègue Nathalie BONNIN du Lycée La Martinière Monplaisir, à mettre absolument dans vos signets favoris de travail.

1. Description de l'interféromètre de Michelson.

1.1. Historique.

A la fin du XIX^e siècle, les physiciens furent confrontés à la contradiction que constituait la validité des deux hypothèses suivantes :

- la loi classique de composition des vitesses,
- la formulation identique des équations de Maxwell dans tout référentiel galiléen.

En outre, il semblait difficile d'imaginer la propagation d'un phénomène ondulatoire sans milieu matériel pouvant vibrer.

On imagina alors d'attacher un référentiel absolu - dans lequel la vitesse de la lumière serait rigoureusement c - à un milieu hypothétique appelé éther.

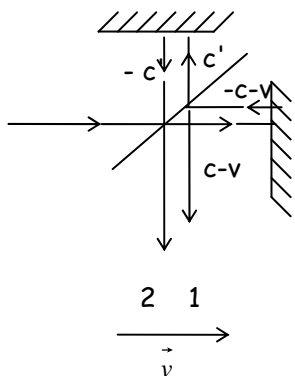
Les expériences d'Albert Michelson (Berlin 1881), puis d'Albert Michelson et Edward Morley (Cleveland 1887) étaient destinées à mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther immobile.



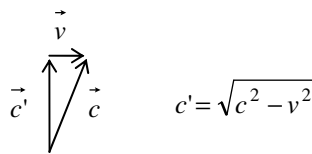
Soit R , le référentiel absolu.

Soit R' , le référentiel galiléen lié à la Terre, de vitesse d'entraînement $v \approx 30 \text{ kms}^{-1}$ par rapport à R .
Michelson, Einstein et Morley

Position 1 : dans R' on a



Les rayons sur le dessin ont été séparés pour plus de lisibilité.



Position 2 : Rotation de 90°, de manière à interchanger les directions des deux miroirs.

La différence de marche entre les rayons 1 et 2 étant échangée, les franges d'interférences devraient défiler lors de la rotation de l'interféromètre.

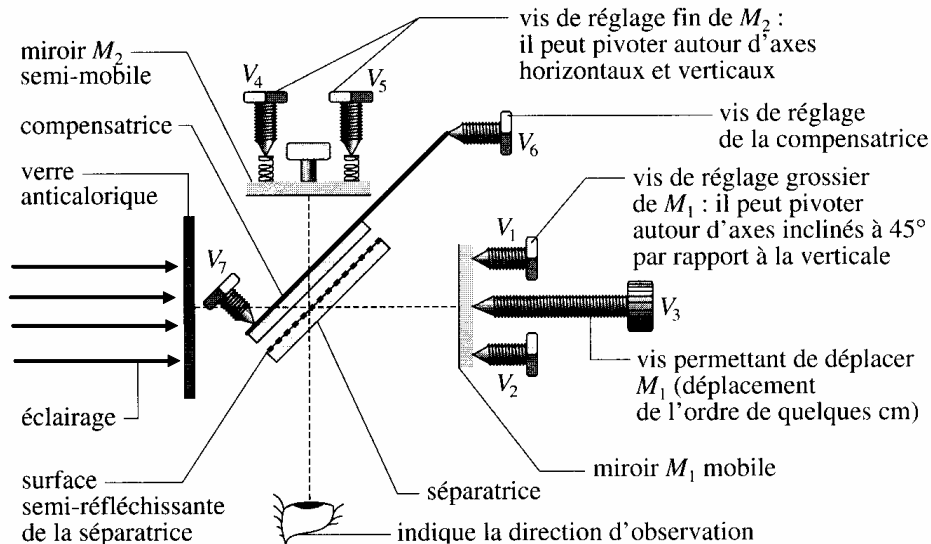
L'expérience, réalisée de nombreuses fois, à des moments différents de l'année, ne donna aucun défilement mesurable des franges.

Pour interpréter ce résultat, Henri Poincaré formula, en 1899, le principe suivant, qu'il appela principe de relativité : "Selon le principe de relativité, les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes pour un observateur fixe et pour un observateur en mouvement de translation uniforme relativement au premier, de telle sorte que nous n'ayons pas, ou que nous ne puissions avoir aucun moyen de discerner si oui ou non nous suivons un tel mouvement".

En 1905, Albert Einstein postula l'invariance de c dans tout référentiel galiléen.

L'expérience de Michelson et Morley est donc à l'origine de la théorie de la Mécanique Relativiste.

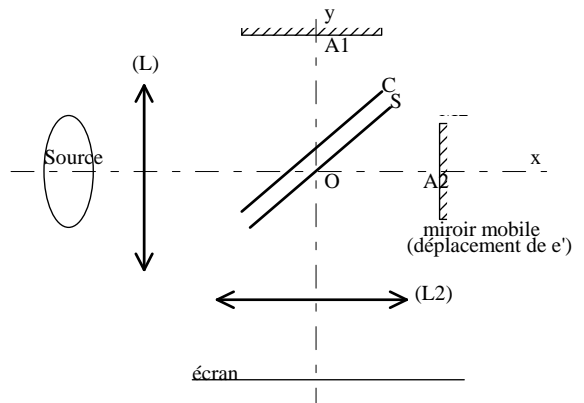
1.2. Schémas.



Interféromètre de Michelson de type Sopra

Schéma simplifié :

- S séparatrice semi - réfléchissante
 - C compensatrice,
 - M_2 miroir fixe, réglages fins
 - M_1 miroir réglable en position (déplacement du chariot mobile par un tambour) et en inclinaison (vis de réglages semi-fins)
 - L lentille d'entrée (non fournie)
 - L_2 lentille de projection (non fournie)
 - L'écran sert à l'observation de la figure d'interférence
- Les vis de réglage ne sont pas représentées sur le schéma ci-contre.



Un interféromètre de Michelson idéal serait constitué :

- d'une lame semi-réfléchissante sans épaisseur, avec des coefficients de réflexion et de transmission égaux à 0,5, à 45° des axes Ox et Oy , n'introduisant aucun déphasage.
- de deux miroirs parfaitement plans, qui dans leurs positions $M_{1,0}$ et $M_{2,0}$ sont symétriques par rapport à la lame semi-réfléchissante. De plus, ces miroirs peuvent tourner autour des axes A_1 et A_2 perpendiculaires au plan de la figure.
- M_1 peut se translater parallèlement à lui même le long de l'axe Ox .

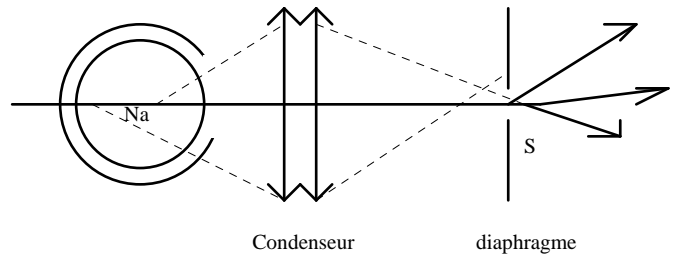
Q1) Préciser alors le rôle de la compensatrice dans le montage réel.
 Q2) Dans la pratique est-on certain d'avoir la lame semi - réfléchissante à 45° des miroirs ? Est-ce important ?
 Q3) Pourquoi le coefficient de réflexion de la lame doit-il être de 0,5 ? Que se passe-t-il si sa valeur est différente de 0,5 ?

1.3. Le Michelson utilisé en lumière cohérente.

Une source cohérente est une source monochromatique ponctuelle (ou donnant un faisceau de lumière parallèle: faisceau LASER par exemple)

a) Réalisation d'une source lumineuse cohérente

On utilise une source monochromatique (par exemple une lampe à vapeur de sodium). Grâce à un condenseur, on effectue l'image de la source. Au voisinage de la position de l'image, on installe un diaphragme de faible section. La source ainsi obtenue est une source ponctuelle monochromatique donc cohérente.



b) Montages équivalents

Soit S une source ponctuelle, qui émet une onde lumineuse monochromatique.

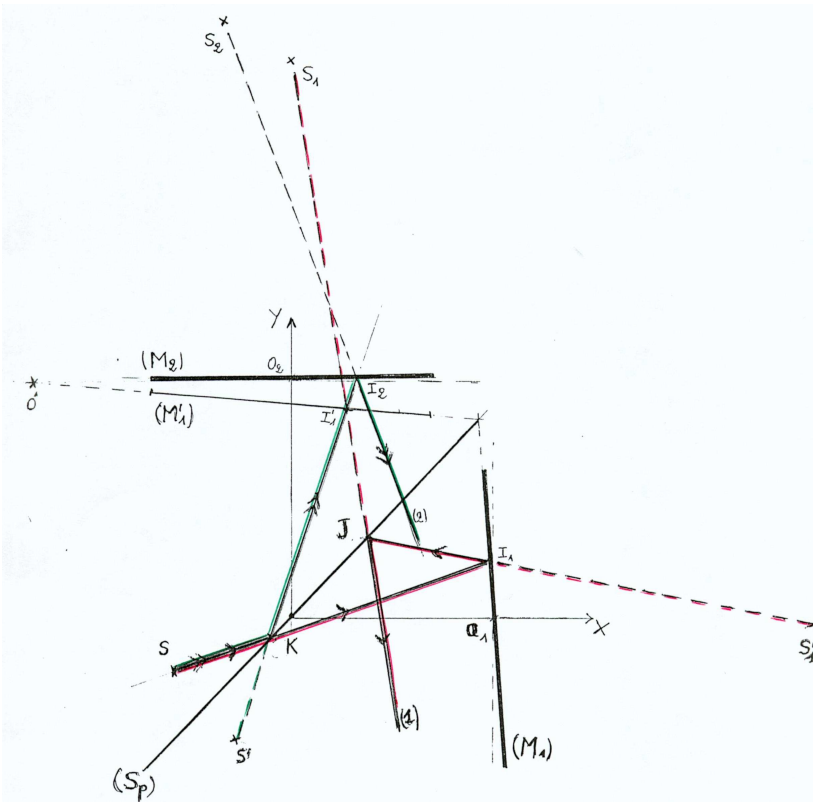
Un rayon incident SK est divisé en deux par la séparatrice (Sp) : une partie traverse (Sp) et suit la voie (1) ; une autre partie se réfléchit sur (Sp) et suit la voie (2).

voie (1) $S \xrightarrow{(M_1)} S'_1 \xrightarrow{(S_p)} S_1$

voie (2) $S \xrightarrow{(S_p)} S' \xrightarrow{(M_2)} S_2$

Une source ponctuelle et son image par un miroir plan sont symétriques par rapport à ce miroir.

A une source ponctuelle primaire S', image de S par la séparatrice (Sp), correspondent deux sources secondaires cohérentes S₂ et S₁, images de S' respectivement par les miroirs M₂ et M'₁, symétrique de M₁ par rapport à (Sp).



c) Les trous d'Young

Le système est équivalent au montage des trous d'Young quand les sources S₂ et S₁ sont à la même côte sur l'axe Oy, perpendiculaire à S₁S₂. Ceci signifie que les miroirs M₂ et M'₁ se coupent au voisinage de l'axe Oy. On a affaire pratiquement au contact optique lors de ce montage (épaisseur e nulle). On observe sur l'écran la figure d'interférence des trous d'Young avec des franges parallèles (perpendiculaires au schéma) car le plan d'observation est parallèle à la droite S₂S₁. La distance D est la distance de S₂ à l'écran et la distance a est celle existant entre S₂ et S₁.

d) La lame à faces parallèles

Lorsque les miroirs M_2 et M'_1 sont parallèles, les sources S_2 et S_1 sont portées par l'axe Oy , distantes de $2.e$. On observe sur l'écran des anneaux concentriques car le plan d'observation est perpendiculaire à la droite S_2S_1 .

e) Cas général

Nous observons des arcs d'hyperboles ou d'ellipses comme on peut l'expliquer avec le montage des trous d'Young.

f) Interféromètre éclairé par une source étendue.

Nous voyons que si nous translatons la source S en S^* , la figure d'interférence ainsi réalisée sera modifiée. Lorsque le montage réalisé est celui équivalent aux trous d'Young, la distance $a = S_1S_2$ est modifiée et la figure d'interférence est translatée. Si le déplacement est faible par rapport à l'interfrange, on observe encore la figure d'interférence contrastée. Dans le montage en lame à faces parallèles, il y a simplement translation de la figure d'interférence. Pour que la figure reste nette, il suffit que le rayon des anneaux soit grand par rapport à l'extension de la source, ce qui est réalisé quand le plan d'observation est rejeté à l'infini (ou dans le plan focal d'une lentille convergente).

2. Le réglage de l'interféromètre de Michelson avec une source étendue.

Précautions d'utilisation de l'interféromètre de Michelson et tout matériel d'optique en général :

- Les traitements des miroirs et de la séparatrice de l'interféromètre sont **très fragiles**. Il est donc impossible de les frotter sans risque de détérioration. Le seul nettoyage possible est d'éliminer les poussières à l'aide d'une poire ou d'une soufflette. Par conséquent, **NE JAMAIS FROTTER ET NE JAMAIS TOUCHER** les différentes pièces optiques.
- La mécanique est **fragile**. **NE JAMAIS BLOQUER UNE VIS**. Si vous n'arrivez pas à faire un réglage à cause d'une vis bloquée, ne forcez pas et appelez le professeur.
- Le prix actuel d'un Michelson est de 7000 € environ. Les générations futures vous remercient du soin que vous en prendrez.
- **NE JAMAIS REGARDER DIRECTEMENT AVEC SON ŒIL LE FAISCEAU LUMINEUX D'UN LASER**. Veiller en particulier à protéger et avertir les autres personnes se trouvant dans la même salle. Se méfier des réflexions parasites.

2.1. Principes généraux.

Le réglage se décompose en quatre étapes :

- Réglage géométrique du parallélisme entre la séparatrice et la compensatrice, la séparatrice étant fixe. Ici la compensatrice est réglée au laboratoire : on n'agira donc pas sur elle.

- Réglage géométrique de l'orientation des miroirs pour qu'ils soient perpendiculairement entre eux et à 45° de la séparatrice. Ces deux premiers réglages s'effectuent à l'aide d'un point source, d'un faisceau Laser ou d'une mire.

- Obtention des franges d'égale épaisseur, dite de coin d'air. Le principe du réglage consiste alors à régler dans la pratique l'orientation des deux miroirs de façon à obtenir un coin d'air de très petit angle α (de l'ordre de la minute d'angle).

- Obtention des franges d'égale inclinaison et recherche du contact optique avec la lampe à vapeur de sodium. La différence de marche δ au centre étant égale à $2.e$, on agit sur le chariot du miroir M_1 de façon à rendre e très faible et à se rapprocher du contact optique, ce qui est nécessaire pour observer les franges en lumière blanche.

Ces réglages peuvent être dégrossis à l'aide de l'optique géométrique (2.2). Les réglages plus fins passent par l'observation d'interférences (2.3.).

Ne jamais oublier que pour observer des interférences, il faut des sources cohérentes entre elles, ce qui impose en particulier que la différence de marche reste inférieure à la longueur de cohérence de la source.

Conséquence : pour observer des figures d'interférence avec le Michelson, il faudra être d'autant plus près du contact optique que la longueur de cohérence est faible. Un principe possible pour régler l'interféromètre, consiste à passer progressivement du Laser à la lampe spectrale à vapeur de sodium, puis mercure avant de pouvoir observer des interférences en lumière blanche.

2.2. Réglages grossiers : optique géométrique.

a) Utilisation d'une mire.

Vérifier visuellement que les miroirs sont à peu près perpendiculaires et à égale distance de la face traitée de la séparatrice, (sans toucher à la surface des miroirs) puis positionner les vis de réglage de M_1 et M_2 à mi-course. Ce réglage est très important si le réglage doit s'effectuer sans Laser.

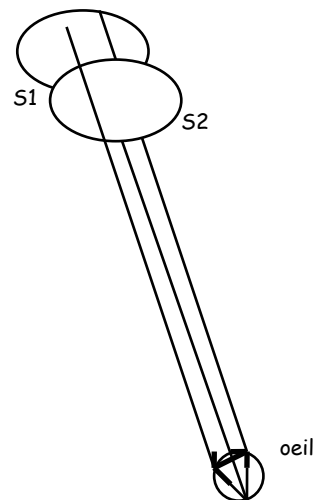
Eclairer le Michelson à l'aide d'une source à vapeur de sodium suffisamment éloignée de la face d'entrée afin d'éviter d'être aveuglé (éventuellement, diaphragmer la source) en plaçant une mire dessinée sur une feuille de calque sur le trajet du faisceau.

Effectuer l'observation directe (à la place de l'écran), observer les images de la mire à travers le Michelson, grâce aux réflexions sur les miroirs. Faire superposer les deux images de la mire. Quand les images se superposent, ceci signifie que les miroirs M_2 et M'_1 sont quasi parallèles et l'on observe la figure d'interférence étudiée plus haut, des franges rectilignes. On est dans la configuration du coin d'air. Si les franges ne sont pas très nettes on peut agir sur le chariot V_3 pour déplacer le miroir M_1 et se placer autour de la valeur indiquée sur chaque appareil. Si les franges sont trop resserrées, translater ou faire pivoter les miroirs pour augmenter l'interfrange.

NE JAMAIS RALLUMER UNE LAMPE SPECTRALE DONT L'AMPOULE EST ENCORE CHAUDE pour ne pas porter atteinte à sa durée de vie. Par conséquent, ne pas éteindre les lampes entre deux manipulations.

b) L'œil joue le rôle de diaphragme

Les images de la source étendue sont assez éloignées de l'œil qui n'accommodé alors presque pas. Nous observons directement les faisceaux de lumière émergeant du Michelson. En chaque point de la rétine n'arrivent que des faisceaux de lumière de faible ouverture angulaire provenant de points conjugués. Il se forme alors la figure d'interférence et elle est nette malgré l'extension de la source car l'œil a diaphragmé les faisceaux qui sont alors cohérents. En un point de l'œil arrive la lumière provenant que de peu de points conjugués, d'où la cohérence et la figure d'interférence. Il est à noter qu'il faut tout de même que



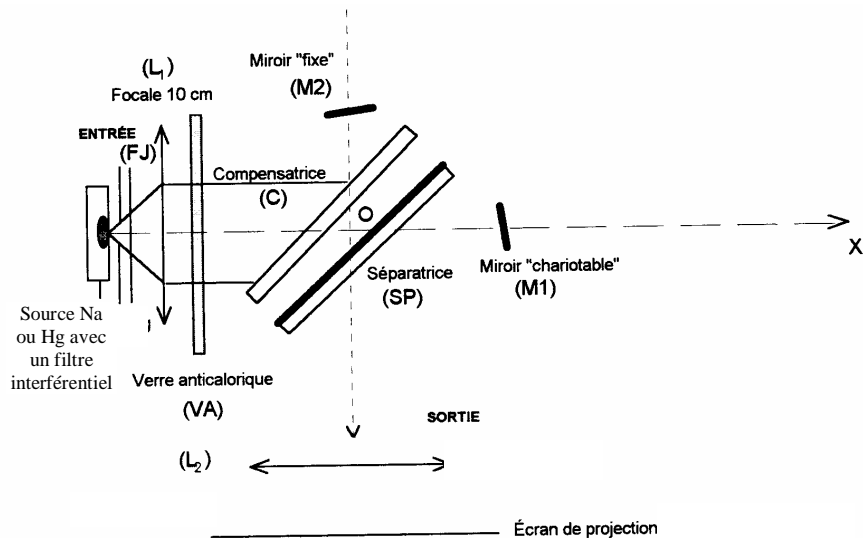
les sources S_2 et S_1 soient pratiquement superposées pour arriver à faire coïncider les points conjugués de la source.

Lorsque nous déplaçons l'œil, la figure d'interférence est modifiée comme nous l'avons vu, sauf si la lame est rigoureusement à faces parallèles.

2.3. Premiers réglages interférentiels : réglage en coin d'air.

a) Nature et localisation des franges :

Avec le réglage en coin d'air, les franges d'interférences sont rectilignes et parallèles à l'arête des miroirs. Lorsque la source est large, et à grande distance, les franges sont localisées très près des miroirs et ne sont nettes que pour les très faibles différences de marche, donc au voisinage de l'arête des miroirs (ordre d'interférences petit).



b) Eclairage

Placer la lentille L_1 proche du verre anti-calorique. Placer la source à proximité du foyer de la lentille L_1 . Les miroirs doivent être bien éclairés. La source étant étendue, on n'est pas en lumière parallèle, mais le rayon moyen est confondu avec l'axe optique de la lentille L_1 . On a un faisceau quasi-parallèle, éclairant les miroirs sous incidence quasi-normale.

c) Projection de la figure d'interférences sur un écran :

On fait avec (L_2) l'image du miroir M_2 sur l'écran (E). S'en assurer en cherchant l'image nette d'un bord ou d'une poussière du miroir M_2 .

- Q4) Comment choisir la lentille L_2 pour avoir une image assez grande sur l'écran ?
 Q5) Quel lien doit-il exister entre f_2 et la distance miroir-écran pour pouvoir observer l'image ?

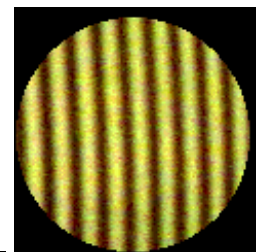
d) Première observation

Avec un peu de chance, on voit tout de suite apparaître des franges rectilignes, sinon on retouche très doucement à la vis de "chariotage" V_3 pour que les franges rentrent dans le champ de vision et soient bien contrastées. **Noter la position I du miroir M_1** sur la vis micrométrique correspondant à un maximum de contraste.

3. Interféromètre de Michelson en coin d'air ou les franges rectilignes d'égale épaisseur.

3.1. Observation des franges.

Mesurer les distances lentille L_2 - écran et miroir M_2 - L_2 , puis calculer le grandissement γ de la lentille. En déduire la valeur de l'interfrange sur la surface de localisation, puis l'inclinaison α des deux miroirs (à exprimer en minutes d'angles).



- Q6) En agissant doucement sur les vis V_1, V_2 , on modifie l'interfrange ainsi que l'orientation des franges. Pourquoi ?

3.2. Problème de la localisation des franges de coin d'air.

Réaliser une source ponctuelle monochromatique (cf §1.2.) avec un diaphragme à iris.

Pour une grande ouverture du diaphragme, repérer avec un écran en carton mobile et chiffrer la zone spatiale d'observation de franges vues nettes.

Prendre l'expérience avec une petite ouverture ; conclure.

3.3. Brouillage des franges.

Q7) En tradant M_1 à l'aide de la vis V_3 les franges se brouillent. Pourquoi ?

4. Interféromètre de Michelson en lame d'air à faces parallèles ou les anneaux, franges d'égale inclinaison.

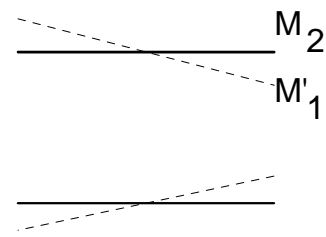
4.1. Teinte plate :

Revenir au montage 2.3.b, afin de voir les franges du coin d'air avec un bon contraste.

Agir alternativement sur V_1 et V_2 (orientation de M_1), afin de faire croître l'interfrange.

Si l'interfrange diminue, cesser d'agir sur la vis, et passer à l'autre.

On arrive alors à un éclairage uniforme appelé "teinte plate". Elle s'observe lors du contact optique, c'est à dire à la superposition entre les miroirs M_2 et l'image M'_1 du miroir M_1 .



Q8) Il ne faut pas confondre brouillage et teinte plate. Quelle est la différence?

4.2. Anneaux à l'infini :

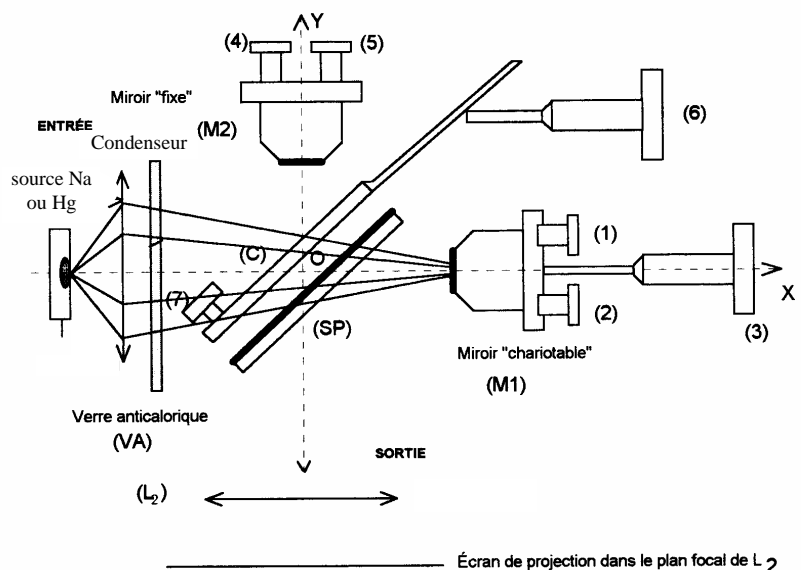
a) Nature et localisation des franges :

Dans ce cas, les franges d'interférences sont des anneaux localisés à l'infini lorsque la source est étendue, et la largeur de cohérence spatiale de la source est infinie.

b) Eclairage :

Dans un premier temps on remplace L_1 par un écran diffuseur translucide. Son rôle est d'envoyer la lumière dans toutes les directions. En effet, l'observation des anneaux complets suppose qu'il y ait symétrie de révolution par rapport à l'axe du système. On enlève L_2 et on observe à l'oeil nu. En déplaçant délicatement M_1 à l'aide de V_3 on doit voir apparaître des anneaux.

Essayer de « stabiliser », par rapport à des déplacements de tête, la figure d'interférence dans les directions verticales et horizontales grâce aux vis du miroir M_1 . Un peu de patience et beaucoup de doigté permettent d'arriver rapidement à une figure d'interférence dont le centre ne voit



pas varier son intensité ni son rayon lors d'un hochement de tête. Dans ces conditions le Michelson est réglé en lames d'air à faces parallèles.

Enlever l'écran diffuseur et opérer en lumière convergente à l'aide d'un condenseur et d'une lampe à vapeur de sodium (ou de mercure plus tard) non diaphragmée. S'assurer de la convergence approximative du faisceau sur les miroirs et d'un éclairage uniforme.

c) Observation des anneaux d'interférences :

On peut observer les anneaux, soit sur un écran lointain, sans lentille de projection, soit dans le plan focal d'une lentille (anneaux plus lumineux et mieux contrastés). La distance focale de (L₂) est choisie en conséquence.

Agir sur V₃ (translation de M₁) pour améliorer le contraste.

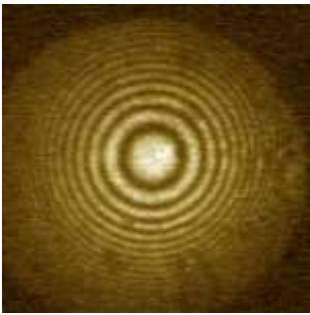
Noter alors la position II de M₁

Q9) Doit-on prendre une lentille L₂ de grande ou petite distance focale pour avoir une projection d'assez grande dimension ?

Remarques : Retouche éventuelle du parallélisme de (Sp) et (C) avec le Michelson de type DIDALAB.

On diminue l'épaisseur de la lame d'air en translatant le miroir M₁. Les anneaux s'enfoncent dans le centre, augmentent de rayon et s'écartent les uns des autres (on pourra développer la théorie de cette remarque...). Devenant plus gros, les anneaux peuvent être déformés et avoir l'allure d'ellipses à grand axe oblique. Cela est dû à un mauvais réglage du parallélisme entre la séparatrice et la compensatrice :

- Si les franges sont hyperboliques, agir assez fortement (c'est la seule fois!) sur V₆ pour les rendre elliptiques. Sinon, passer au point suivant.
- Agir sur V₇ pour que les axes des ellipses soient horizontaux et verticaux.



Terminer le réglage en agissant sur V₆ pour rendre les anneaux circulaires.

Avec les vis de rotation de la compensatrice on redresse le grand axe et on rectifie l'excentricité des ellipses jusqu'à l'annuler. On rend les anneaux bien ronds.

Q 10) Comparer le contraste des anneaux de faible rayon et de ceux de rayon élevé. Quelle est l'origine de ce phénomène?

d) Mesure de l'épaisseur de la lame d'air à faces parallèles.

Rappels de l'étude théorique :

On définit l'ordre d'interférence par : $p = \delta/\lambda = 2.e.\cos(i)/\lambda$ avec les notations du cours (i angle d'inclinaison des rayons émergeant à l'infini).

Pour $i = 0$ au centre, $\delta_0 = 2.e = p_0.\lambda$

Pour l'angle i, $\delta = 2.e.\cos(i) = p.\lambda$

On a $p_0 - p = \frac{2e}{\lambda} [1 - \cos(i)] \approx \frac{ei^2}{\lambda} \Rightarrow i = \sqrt{\frac{\lambda(p_0 - p)}{e}}$

Supposons le centre F' sombre ($p_0 = \frac{1}{2}$ entier), p sera $\frac{1}{2}$ entier quand $p_0 - p = q$ sera entier (naturel). Le point étudié sera associé à un anneau sombre de rayon $R_q = f'.i = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{q}$

Dans le cas général, le centre n'est ni brillant, ni sombre. Dans ces conditions, on peut écrire $p_0 = E(p_0) + \Delta p$ où Δp est l'excédent fractionnaire. Le premier anneau brillant sera associé à l'ordre $p = E(p_0)$, son rayon sera

$$\text{noté } R_0 = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{\Delta p}$$

Le deuxième anneau de rayon R_1 sera associé à $p = E(p_0) - 1$, d'où $R_1 = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{\Delta p + 1}$

De manière générale, on a le rayon R_n du $(n+1)^{\text{ième}}$ anneau qui vaut : $R_n = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{\Delta p + n}$

La courbe reliant les deux variables ($x=n$ et $y=R_n^2$) est une droite de pente $f'^2 \cdot \lambda / e$ et dont l'abscisse à l'origine est $-\Delta p$.

La mesure de la pente et de l'abscisse à l'origine, par une **régression linéaire graphique**, nous permet de déterminer l'épaisseur e et l'excédent fractionnaire.

On notera que p_0 n'est pas connu, mais on connaît $p_0 - E(p_0)$!

e) Battelements optiques : notions de coïncidence et d'anti-coïncidence.

La source lumineuse du sodium comporte doublet de radiations de longueur d'onde $\lambda' = 589,0$ nm et

$\lambda'' = 589,6$ nm voisines. On note $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda''$, l'écart, très faible de longueurs d'onde. Les deux ondes sont alors incohérentes.

En faisant varier e , on fait varier δ . L'enregistrement de l'éclairement en F' , foyer image de la lentille L_2 , donne le phénomène de battements optiques du doublet du sodium.

Par translation du miroir M_1 , mesurer la distance entre plusieurs anti-coïncidences, et en déduire la différence $\Delta\lambda$ entre les deux raies du doublet jaune du sodium. **Estimer l'incertitude** associée à cette mesure.

On rappelle qu'entre deux anti-coïncidences : $\Delta\lambda = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta e}$, où λ_m est la longueur d'onde moyenne, et Δe , la distance de translation.

Rappel de la démonstration :

Si les ordres p'_0 et p''_0 sont tels que $p'_0 - p''_0$ soit un entier relatif, alors les anneaux brillants (ainsi que les anneaux sombres) sont superposés.

Si les ordres p'_0 et p''_0 sont tels que $p'_0 - p''_0$ soit un demi entier, alors les anneaux sont brouillés (les anneaux sombres d'une longueur d'onde sont superposés aux anneaux brillants de l'autre longueur d'onde).

Pour le brouillage 1, on a $p'_{10} - p''_{10} = 2 \cdot e_1 \cdot (1/\lambda' - 1/\lambda'') = \Delta p_1$.

Pour le brouillage 2, on a $p'_{20} - p''_{20} = 2 \cdot e_2 \cdot (1/\lambda' - 1/\lambda'') = \Delta p_2$.

Les deux brouillages sont consécutifs, donc $\Delta p_2 = \Delta p_1 + 1 \Rightarrow 2 \cdot e_2 \cdot (1/\lambda' - 1/\lambda'') = 2 \cdot e_1 \cdot (1/\lambda' - 1/\lambda'') + 1$

$$\Rightarrow 2 \cdot (e_2 - e_1) \cdot (1/\lambda' - 1/\lambda'') = 2 \cdot (e_2 - e_1) \cdot (\Delta\lambda / \lambda^2) = 1 \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta e}$$

Expérimentalement, on mesure $\Delta e = 0,29$ mm.

4.3. Observation avec la lampe à vapeur de mercure :

Remplacer la lampe à vapeur de sodium par une lampe à vapeur de mercure.

Q 11) Que peut-on alors dire du contraste des anneaux ? Quelle en est la raison ?

5. Passage à l'ordre zéro en lumière blanche et expériences associées.

5.1. Teintes de Newton en lames d'air :

A partir du dispositif précédent (lampe à vapeur de mercure), rapprocher M_1 de manière à faire croître le rayon des anneaux qui, pendant l'opération, disparaissent au centre. Atteindre la teinte plate.

Noter alors la position III de M_1 .
(Elle doit être voisine de la position I).

Passer en lumière blanche.

Déplacer **TRES LENTEMENT** M_1 à l'aide de la vis V_3 : on observe différentes teintes appelées teintes de Newton. **ATTENTION: le réglage est très précis.**

Rechercher la teinte centrale : elle est blanche, pas toujours très lumineuse. On peut même avoir extinction si une différence de marche de $\lambda/2$ est introduite par le traitement de la lame séparatrice.

Noter alors la position IV de M_1 .

(Elle correspond au contact optique, avec une grande précision).

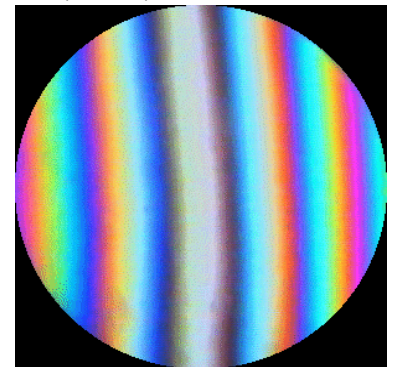
Déplacer très légèrement le chariot et noter les valeurs extrêmes x_1 et x_2 encadrant la position IV qui correspondent aux dernières teintes perceptibles avant le « blanc d'ordre supérieur ».

Montrer que la « longueur de cohérence » en lumière blanche est donnée par : $\delta = 2(x_2 - x_1)$.

5.2. Passage en coin d'air :

Faire l'image de M_2 sur l'écran à l'aide de la lentille L_2 utilisée dans la partie 2.3. et adapter les conditions d'éclairage pour avoir une incidence quasi-normale.

Jouer **TRES DOUCEMENT** sur V_1 et V_2 jusqu'à observer les franges rectilignes du coin d'air.



5.3. Blanc d'ordre supérieur :

Déplacer M_1 à l'aide de la vis V_3 : les franges défilent, puis se brouillent. Il s'agit ici d'une incohérence temporelle. L'aspect de l'écran est blanc, mais il s'agit d'un blanc d'ordre supérieur.

Si cela n'a pas été vu en TP-cours, on peut observer le spectre cannelé en plaçant au centre du champ la fente verticale du collimateur d'un spectroscopie.

Lorsque l'on pointe la fente d'un spectroscopie dans la région blanche, on observe la décomposition de la lumière et le spectre obtenu est cannelé car certaines raies sont éteintes. Si le spectroscopie est calibré, on peut alors déterminer les longueurs d'onde des cannelures sombres et vérifier les propriétés de l'interférence lumineuse (voir en annexe).

Q12) Observer que le nombre de cannelures diminue quand on se rapproche du contact optique. Quelle peut être une application de cette observation ?

Application possible : Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre.

On cherche à mesurer l'épaisseur e d'une lame de verre d'indice $n_0 = 1,520$ pour une longueur d'onde $\lambda_0 = 570$ nm et dont l'indice varie selon une loi de Cauchy de type : $n(\lambda) = A + B/\lambda^2$ avec $B = 10,6 \cdot 10^{-3} (\mu\text{m})^2$ que l'on admet. On part du contact optique.

Quand on insère la lame de verre (montée sur support) du côté du miroir fixe M_2 , on déplace le miroir mobile M_1 d'une distance d_1 pour observer à nouveau les franges rectilignes au contact optique.

Pour ne pas être limité par la cohérence spatiale, les angles d'incidence doivent être faible : les miroirs sont éclairés par un faisceau de lumière quasi-parallèle. Les miroirs sont quasiment au contact optique, en faisant un angle faible α entre eux.

On montre que la distance d_1 dont il faut déplacer le miroir mobile M_1 est $d_1 = (n_0 - 1) e$.

Q13) Dans quel sens faut-il déplacer M_1 pour retrouver un ordre d'interférence nul au centre de la figure d'interférence ?

De plus, l'indice n de la lame dépend de la longueur d'onde suivant la loi de Cauchy, et la frange que nous observons en présence d'une lame est une **frange achromatique** qui ne correspond pas exactement à la différence de marche nulle. Si nous connaissons l'épaisseur de la lame, nous ne pourrions que déterminer une valeur approchée de l'indice moyen.

On ne peut donc pas repérer la frange d'ordre nul mais la frange achromatique, pour laquelle l'ordre d'interférence ne dépend pas au premier ordre de la longueur d'onde, soit $\left(\frac{dp}{d\lambda}\right)_{\lambda_0} = 0$; ainsi l'ordre

d'interférence est quasi-identique pour toutes les longueurs d'onde de la source et le contraste maximum.

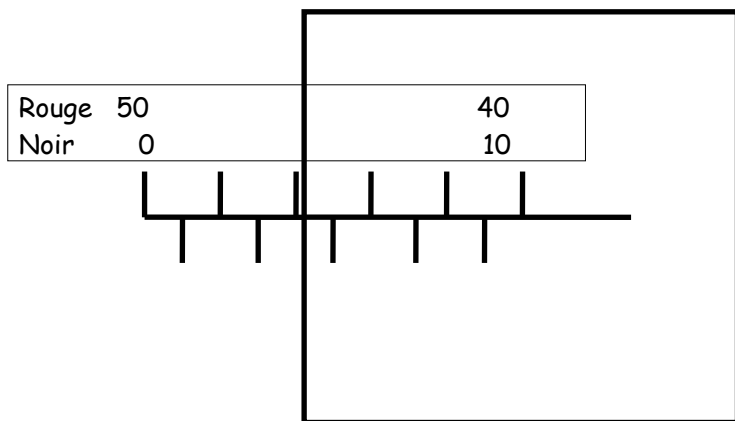
Montrer qu'il faut déplacer le miroir M_1 d'une distance $d_2 = (A + 3B/\lambda_0^2 - 1) e$ pour que la frange achromatique soit au centre de la figure d'interférence. Préciser le sens du déplacement.

Le calcul montre que l'écart $|d_1 - d_2|$ correspond à une vingtaine de franges. Préciser l'incertitude sur la mesure de e correspondante.

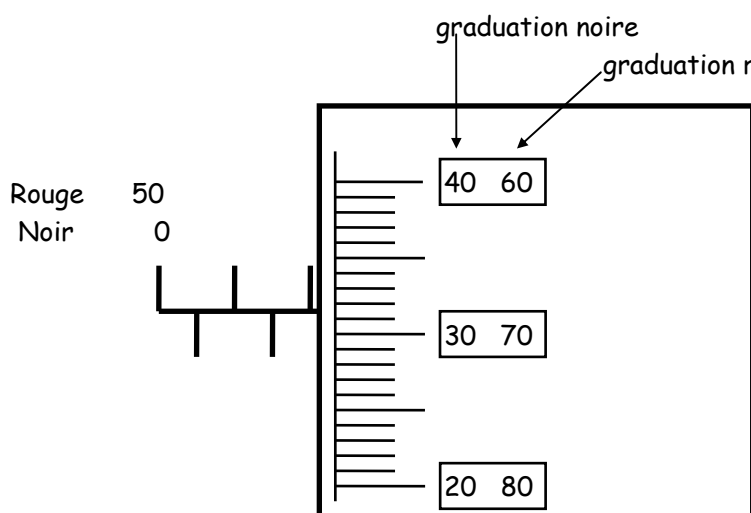
Annexes.

Utilisation du vernier sur Michelson DIDALAB : Un système de démultiplication permet d'obtenir une avancée du miroir d'un millimètre pour un tour de tambour. Par conséquent la lecture du vernier s'effectue ainsi :

Vernier principal :



Vernier secondaire :



LECTURE : 45,685 mm (rouge)
ou 4,315 mm (noir)

Comment et où voir ce qu'il faut voir au Michelson

Il n'y a que deux situations facilement explicables (et observables) :

Quoi	Où	Comment	
		ÉCLAIRER ?	OBSERVER ?
Coin d'air : franges rectilignes	sur les miroirs	lumière parallèle (lampe au foyer objet d'une lentille)	<ul style="list-style-type: none"> à l'œil nu lentille CV à la sortie (+20 cm) écran conjugué à 1 m environ
Anneaux	à l'infini	lumière convergente : image de la lampe <u>sur les 2</u> <u>miroirs</u> (lampe à 2 f de la lentille à 2 f des miroirs)	<ul style="list-style-type: none"> à l'œil nu sur un écran <u>loin</u> (au moins 1 m) dans le plan focal image d'une lentille CV de grande focale

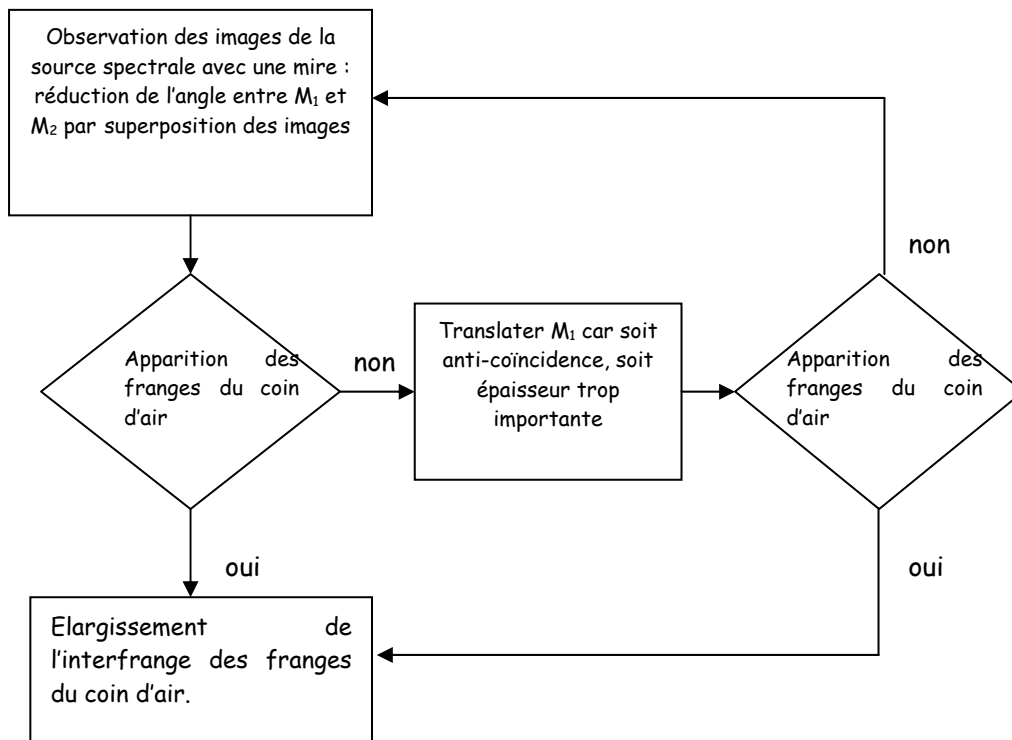
On ne peut pas voir les anneaux en lumière blanche : il y a brouillage avant que les anneaux apparaissent ; on ne peut espérer qu'un éclaircissement coloré plus ou moins uniforme en fonction de la planéité et du parallélisme des miroirs.

Au cours du réglage, on cherche :

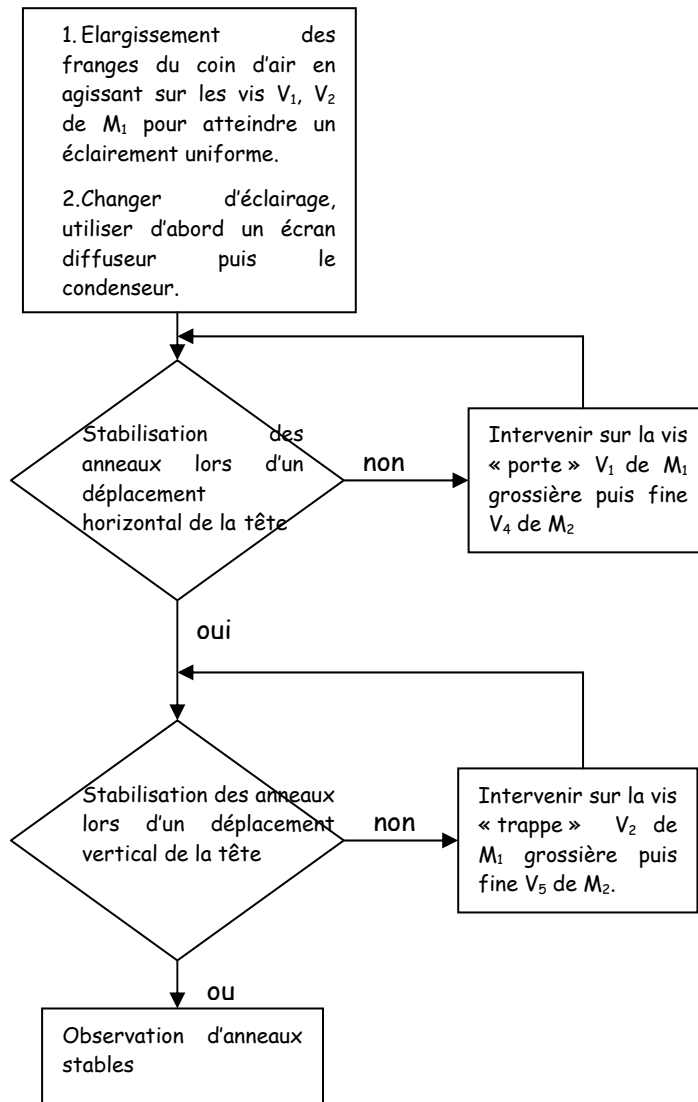
- **d'abord** à avoir les franges du coin d'air (observation à l'œil nu à travers un papier calque)
- **puis** les anneaux par réglage du parallélisme des miroirs
- **puis** l'épaisseur nulle par translation des miroirs.
- revenir éventuellement en coin d'air en dérégulant le parallélisme des miroirs.

Parallélisme grossier entre M_1 et M_2 : observation des franges du coin d'air avec une lampe à vapeur de sodium

On utilise alors les réglages grossiers de rotation du miroir mobile M_1 (vis V_1 et V_2)

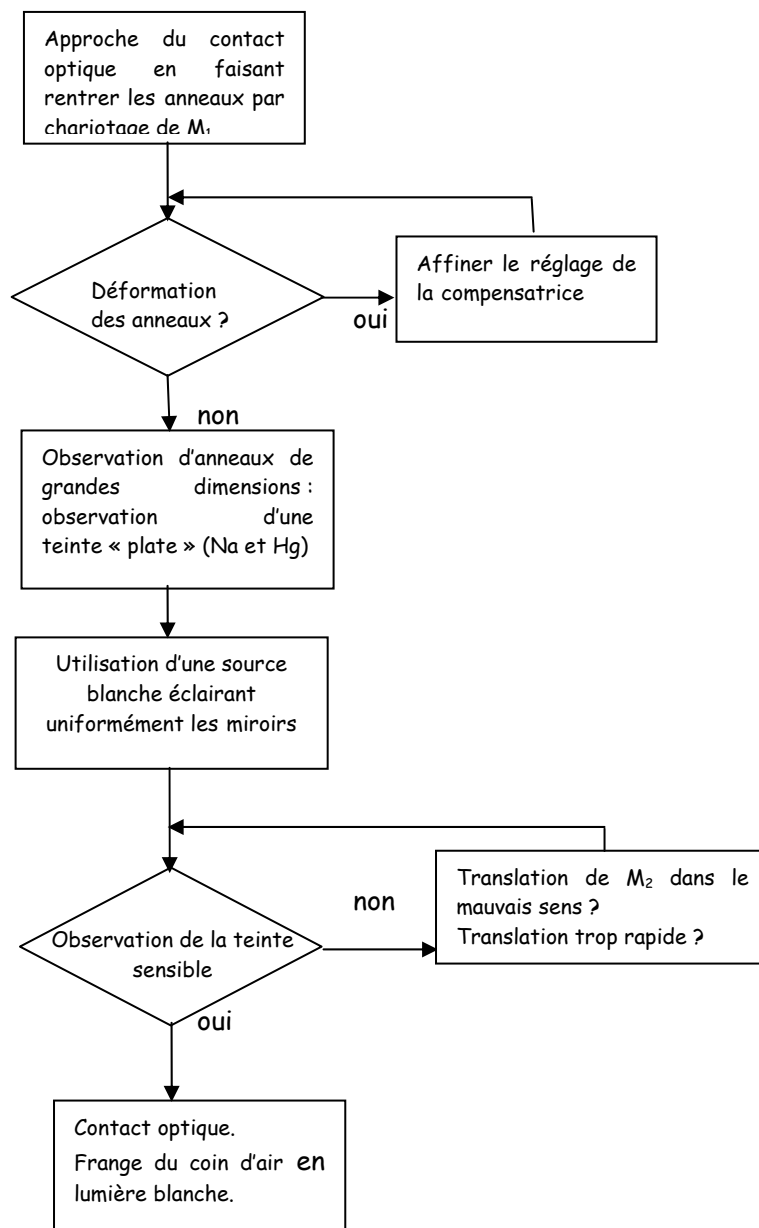


Réglage précis du parallélisme des miroirs M_1 et M_2 . : observation des franges d'égalé inclinaison



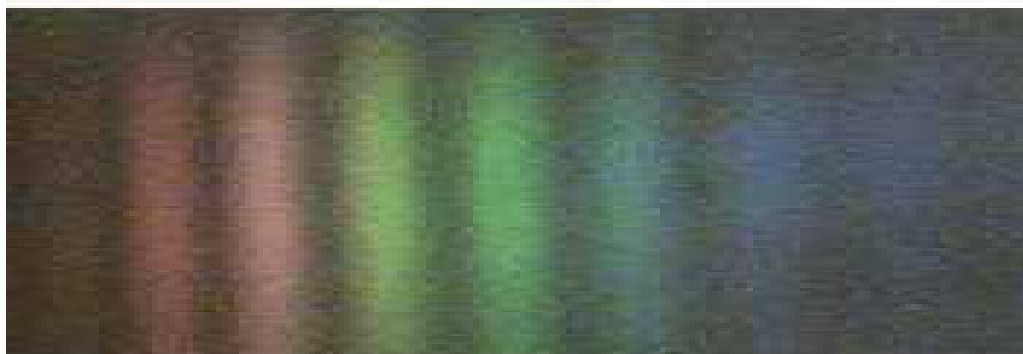
Si les anneaux obtenus ne sont pas circulaires, il est nécessaire d'agir sur la compensatrice. Le Michelson est réglé en lame à faces parallèles. La projection des anneaux peut être effectuée.

Recherche du contact optique



Il est parfois nécessaire d'intervenir sur la compensatrice

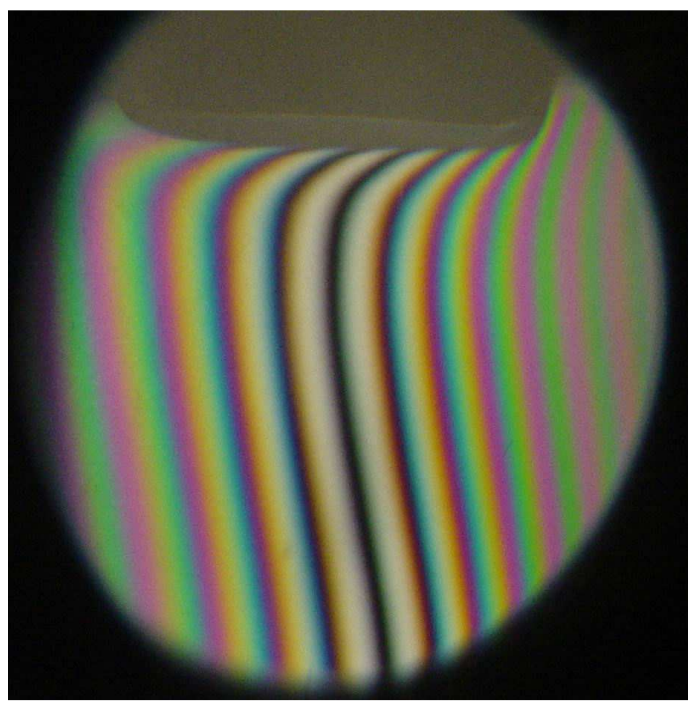
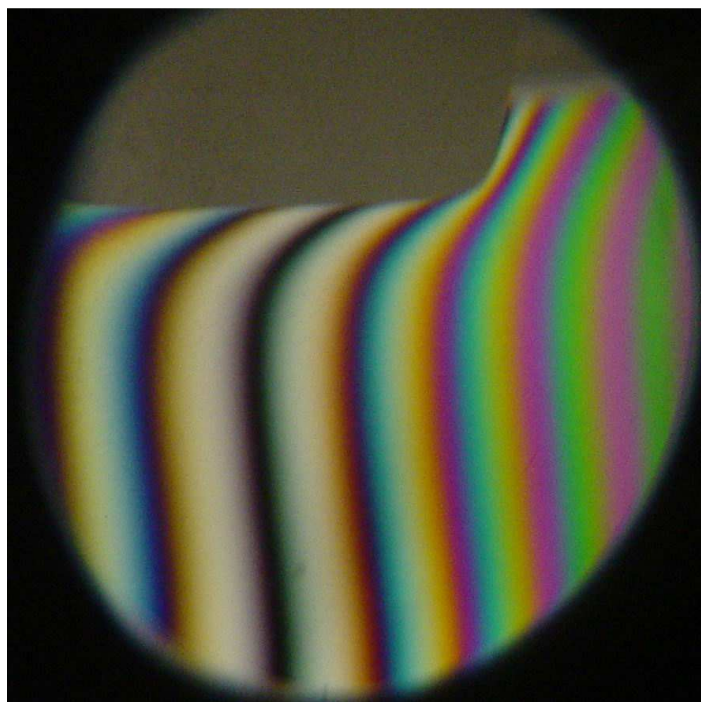
SPECTRES CANNELES



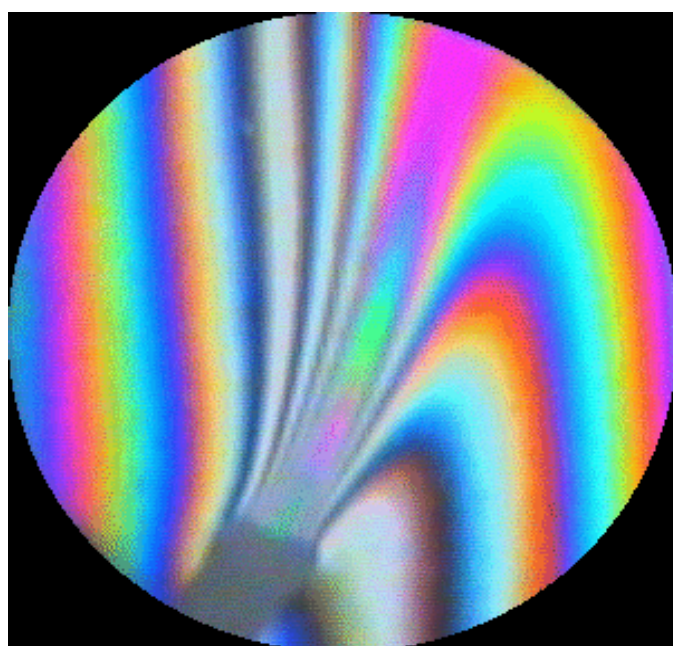
Quelques expériences en couleur avec un Michelson.



spectre cannelé observé au réseau : ordres zéro, un, deux.



glaçon placé sur l'un des bras du Michelson (coin d'air, lumière blanche).



jet de gaz en coin d'air

SONDAGE SUR L'INTERFEROMETRE DE MICHELSON.

- A.1) Quel est le rôle de la lame à faces parallèles (VA) située à l'entrée de l'interféromètre ?
- 2) Détailler les analogies et les différences entre les deux lames (C) et (SP). Quels rôles joue la compensatrice ?
- 3) Détailler le rôle des vis notées (1) à (7) sur le schéma.
- B.1) Une méthode de préréglage de l'appareil dite « géométrique » consiste à l'éclairer par une source lumineuse à vapeur de sodium ou de mercure, quasi-ponctuelle à l'infini. On constate alors en sortie, à l'infini, la présence de nombreuses images du trou source, dont quatre sont nettement plus lumineuses que toutes les autres. Expliquer la provenance de ces quatre images particulières.
- 2) Comment assure-t-on, en pratique l'éclairage et la projection dans l'expérience précédente ?
- 3) On agit sur les vis (6) et (7) pour confondre les 4 images en deux images seulement, puis sur (1) et (2) pour arriver à une seule image. On dit qu'on alors réaliser le « réglage géométrique 4-2-1 ». Quelle est, théoriquement, la configuration géométrique de, (C), (SP), (M_1) et (M_2) à la site de ce réglage supposé parfait ?
- 4) Expérimentalement, on apprécie la confusion des images à l'œil. Quelle est, de ce fait, la configuration géométrique relative réelle de (C), (SP), (M_1) et (M_2) ?
- C.1) La suite du réglage géométrique précédent, on élargit spatialement le trou-source à l'infini. On constate alors en mettant au point sur l'un des miroirs du Michelson, avec un peu de chance, la présence de franges rectilignes d'interférence, équidistantes si on a équipé la lampe à vapeur de mercure d'un filtre vert. Avec un peu moins de chance, les franges rectilignes précitées n'apparaissent qu'au prix d'un déplacement du miroir (M_1). Expliquer pourquoi cette façon de procéder expérimentalement nécessite une bonne compréhension des conséquences de la cohérence temporelle de la source ? Quel est l'intérêt du chariotage dans cette manipulation ?
- 2) Comment passe-t-on expérimentalement du réglage précédent dit « coin d'air » à celui dit « en lame d'air à faces parallèles » ? On précisera soigneusement, dans ce cas, les conditions pratiques d'éclairage et de projection.
- 3) En chariotant, on constate que les anneaux « s'enfoncent » dans le centre de la figure d'interférence. En déduire, avec justification, le sens de variation de l'épaisseur de la lame d'air.
- 4) Qu'appelle-t-on teinte plate d'interférence avec le Michelson ?
- 5) Imaginons qu'on vous demande d'obtenir de la façon la plus précise possible le « contact optique » des deux miroirs du Michelson. Utiliserez-vous en final, un laser He-Ne, une lampe à vapeur de mercure ou une lampe blanche ? Pourquoi ?

l'interféromètre de Michelson et quelques applications. 1

1. Description de l'interféromètre de Michelson. 2

1.1. Historique. 2

1.2. Schémas. 3

1.3. Le Michelson utilisé en lumière cohérente. 4

a) Réalisation d'une source lumineuse cohérente. 4

b) Montages équivalents 4

c) Les trous d'Young 4

d) La lame à faces parallèles 5

e) Cas général 5

f) Interféromètre éclairé par une source étendue 5

2. Le réglage de l'interféromètre de Michelson avec une source étendue. 5

2.1. Principes généraux. 5

2.2. Réglages grossiers : optique géométrique. 6

a) Utilisation d'une mire. 6

b) L'œil joue le rôle de diaphragme. 6

2.3. Premiers réglages interférentiels : réglage en coin d'air. 7

a) Nature et localisation des franges : 7

b) Eclairage 7

c) Projection de la figure d'interférences sur un écran : 7

d) Première observation 7

3. Interféromètre de Michelson en coin d'air ou les franges rectilignes d'égale épaisseur. 7

3.1. Observation des franges. 7

3.2. Problème de la localisation des franges de coin d'air. 8

3.3. Brouillage des franges. 8

4. Interféromètre de Michelson en lame d'air à faces parallèles ou les anneaux, franges d'égale inclinaison. 8

4.1. Teinte plate : 8

4.2. Anneaux à l'infini : 8

a) Nature et localisation des franges : 8

b) Eclairage : 8

c) Observation des anneaux d'interférences : 9

d) Mesure de l'épaisseur de la lame d'air à faces parallèles. 9

e) Battements optiques : notions de coïncidence et d'anti-coïncidence. 10

4.3. Observation avec la lampe à vapeur de mercure : 11

5. Passage à l'ordre zéro en lumière blanche et expériences associées. 11

5.1. Teintes de Newton en lames d'air : 11

5.2. Passage en coin d'air : 11

5.3. Blanc d'ordre supérieur : 11

Annexes. 13

Parallélisme grossier entre M_1 et M_2 : observation des franges du coin d'air avec une lampe à vapeur de sodium 15

Réglage précis du parallélisme des miroirs M_1 et M_2 . : observation des franges d'égale inclinaison 16

Recherche du contact optique 17

SONDAGE sur l'interféromètre de Michelson. 20

i Rép :

A.1.) Cette lame est un verre anti-calorique : elle évite l'échauffement, et donc d'éventuelles déformations de couches métalliques réfléchissantes des miroirs M_1 et M_2 .

2) (C) et (SP) sont des lames à faces parallèles faites du même verre, de même taille, de même indice.

Sur une des faces, (SP) est traitée par une couche diélectrique semi-réfléchissante.

(C) compense les absorptions (même épaisseur de verre traversée) et permet d'ajuster finement les différences de marche, pour une bonne utilisation en lumière blanche notamment.

- 3) -(1) et (2) : vis de rotation rapide autour d'axes horizontal et vertical.
 -(3) : vis de translation rectiligne.
 -(4), (5), vis de rotation rapide autour d'axes horizontal et vertical.
 -(6) réglage « porte » et (7) réglage « trappe » de la compensatrice.

B.1) Les images sont celles du trou-source après réflexion sur : (M_1) et (C), (M_1) et (SP), (C) et (M_2), (SP) et (M_2).

- 2) -à l'entrée : source dans le plan focal objet d'une lentille mince convergente ($f'=10\text{cm}$ par ex), réglage par auto-collimation.
 -à la sortie : soit avec l'œil au Punctum Remotum (sans accommodation), soit avec un écran placé dans le plan focal image d'une lentille mince convergente ($f' = 1\text{m}$).

- 3) - vis (6) puis (7) : les images (M_1)(C) et (M_1)(SP) , puis (M_2)(C) + (M_2)(SP) se confondent : (C) et (SP) sont alors parallèles ;
 - vis (1) et '2) : les images (M_1)(C)(SP) et (M_2)(C)(SP) se confondent : la direction de plan de (M_1) est symétrique de celle de (M_2) par rapport à celle (commune) de (C) et (SP).

On a alors théoriquement une lame d'air à faces parallèles.

- 4) L'œil possède une limite de résolution de quelques minutes d'arc. On a en réalité fabriqué un coin d'air.

C.1) Les franges de coin d'air sont d'égale épaisseur ($\delta = 2e$) ; or, par cohérence partielle

($\delta < c\tau_R$) les franges sont localisées au voisinages de l'arête du coin d'air (cf th. de localisation), d'où le dispositif de projection avec une lentille mince convergente ($f' = 20\text{ cm}$ par ex).

Pour les voir, il faut ramener l'arête dans le champ de vision d'où le chariotage.

- 2) En élargissant l'interfrange $i = \lambda/2\alpha$, par action sur (M_1) et (M_2).

On éclaire en lumière convergente, car on va obtenir des franges d'égale inclinaison ($\delta = 2e\cos i$).

On regarde « dans le plan de l'infini » (plan focal image d'une lentille de grande focale) car les franges circulaires sont localisées à l'infini.

- 3) Ordre d'interférences : $p_{\text{centre}} = p_{\text{max}} = 2e/\lambda$. Quand les anneaux s'enfoncent, l'ordre au centre diminue, donc e diminue.

- 4) Si $e = 0$, p est uniforme et égal à 0 (pour tout i et tout λ), d'où une teinte uniforme, dite « plate ».

5) Il faut prendre la source la moins cohérente, donc la lampe blanche, ce qui exige donc les meilleurs réglages pour une plus grande précision.