

INTERFEROMETRE DE MICHELSON : PRINCIPES ET REGLAGES

I.	INTRODUCTION	22
II.	PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRE	22
A.	DESCRIPTION- GEOMETRIE DE L' APPAREIL.....	22
B.	DIFFERENTES GEOMETRIES	22
C.	PRINCIPES DES REGLAGES « CLASSIQUES ».....	23
1.	« Coin d'air ».....	23
a)	description.....	23
b)	Calcul de la d.d.m.	23
c)	Calcul de l'interfrange	24
2.	« lame d'air ».....	25
a)	description.....	25
b)	Calcul de la d.d.m.	25
c)	Rayon des anneaux	26
III.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	28
A.	INVENTAIRE DU MATERIEL	28
B.	DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE.....	28
1.	Vue de dessus	28
2.	Lames séparatrice et compensatrice	28
IV.	MANIPULATIONS ET MESURES	29
A.	REGLAGE AVEC LE LASER	29
B.	FRANGES DE COIN D' AIR / SOURCE SPECTRALE.....	29
C.	CONTACT OPTIQUE	30
D.	FRANGES D'EGALES INCLINAISONS / SOURCE SPECTRALE.....	30

I. INTRODUCTION

L'interféromètre de Michelson est un appareil qui permet de produire des interférences entre deux rayons lumineux, issus d'un même rayon incident. : il s'agit donc d'un **interféromètre à deux ondes**. Son principe repose sur la **division d'amplitude** d'une onde incidente, grâce à une lame séparatrice Σ semi réfléchissante, de pouvoir réflecteur $R = 0,5$.

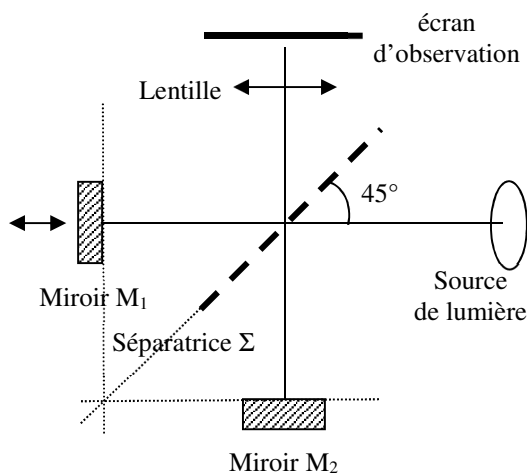
II. PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRE

A. DESCRIPTION- GEOMETRIE DE L'APPAREIL

Une représentation schématique de l'appareil est proposée dans la figure ci-contre. L'interféromètre en lui-même est constitué d'une lame séparatrice Σ et de deux miroirs (M_1 , M_2). La lame séparatrice divise l'amplitude de l'onde incidente par 2, formant ainsi deux rayons :

- Un rayon transmis vers M_1 .
- Un rayon réfléchi, à 90° , vers M_2 .

Les deux rayons subissent une réflexion sur les miroirs (M_1 , M_2) et arrivent à nouveau à la séparatrice Σ : celle-ci va à nouveau diviser chacun des 2 rayons incidents en un rayon transmis et un rayon réfléchi. Seuls les rayons transmis vers l'écran d'observation, après réflexion sur (M_1 , M_2) seront utiles pour les observations et les mesures. La moitié de l'énergie de l'onde incidente est finalement réfléchie vers la source lumineuse (et donc inutile pour l'observateur !).



La séparatrice Σ doit être à 45° de la direction du rayon incident et être dans le plan bissecteur des deux miroirs (M_1 , M_2).

B. DIFFERENTES GEOMETRIES

On peut dans un premier temps adopter un réglage parfaitement symétrique de l'interféromètre : miroirs équidistants et parfaitement orthogonaux. On appelle ce réglage le **contact optique**. On peut ensuite introduire, volontairement (ou non...), un écart à « l'idéalité » par différents moyens :

- Former avec les miroirs (M_1 , M_2) un angle dièdre différent de 90° : **coin d'air**
- Déplacer le miroir M_1 de façon à ce que (M_1 , M_2) ne soit plus équidistants : **lame d'air**.
- Changer l'indice du milieu de propagation de la lumière sur l'un des « bras »¹ de l'interféromètre

Du point de vue des interférences, chacune de ces modifications entraîne un changement de chemin optique et donc une variation de la d.d.m..

¹ On appelle bras chacun des chemins allant de la séparatrice vers l'un des miroirs (M_1 , M_2).

C. PRINCIPES DES REGLAGES « CLASSIQUES »

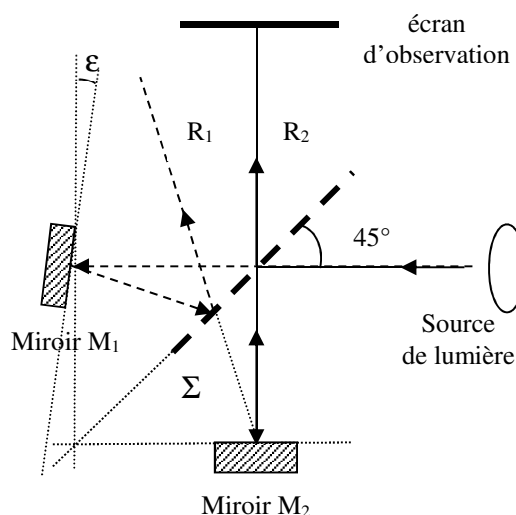
Pour simplifier cette présentation, on supposera que la source de lumière est ponctuelle et monochromatique.

1. « Coin d'air »

Ce réglage peut porter différents nom : « Coin d'air » ou « Franges d'égale épaisseur » ou « Franges de Fizeau ».

a) description

On suppose que le faisceau de lumière incident est parallèle. On « bascule » un des deux miroirs (M_1, M_2), dans le dessin ci-contre c'est le miroir M_1 , de façon à introduire un petit angle par rapport à l'orthogonalité de (M_1, M_2). Cet angle, noté ϵ est appelé angle du "coin d'air". Le rayon réfléchi sur M_1 ne sera plus colinéaire à son rayon incident et l'angle entre les 2 rayons (R_1, R_2) réfléchis respectivement par [$(M_1, \Sigma), M_2$] est de 2ϵ . Sur la figure, le support du rayon R_1 à été prolongé jusqu'au miroir M_2 .

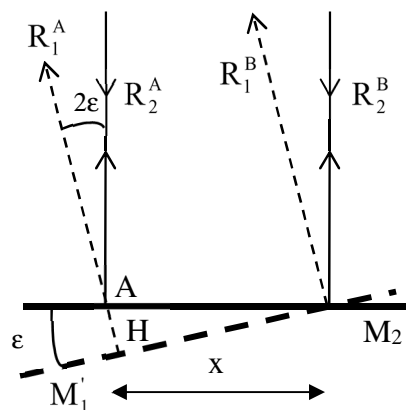


b) Calcul de la d.d.m.

Pour calculer la d.d.m., il faut envisager les interférences entre deux rayons R_1^A et R_2^A , issus de la division d'amplitude, et formant l'angle 2ϵ entre eux. R_1^A a traversé Σ , puis a subi 2 réflexions (sur M_1 puis sur Σ). R_2^A a subi 2 réflexions (sur Σ puis sur M_2).

Pour des raisons de commodité, nous n'avons représenté sur la figure que le bras relatif au miroir M_2 de l'interféromètre. Le miroir M_1 est donc figuré par M_1' , son image par la séparatrice Σ . Considérons deux rayons incidents I_A et I_B , issus de la source, parallèles entre eux. Ces rayons sont divisés par la séparatrice et forment après réflexion sur les miroirs un ensemble de quatre rayons :

- Les rayons R_2^A et R_2^B , réfléchis par Σ puis M_2 , distants de x
- Les rayons R_1^A et R_1^B , transmis par Σ , réfléchis par M_1 , puis réfléchis par Σ : on ne représente, sur le schéma, que le support de ces rayons puisqu'il ont été réfléchis par Σ .



On observe que les rayons R_1^B et R_2^B ne présentent pas de d.d.m., entre eux.

Par contre les deux rayons R_1^A et R_2^A , interfèrent avec une ddm δ , qui correspond à l'avance de R_2^A par rapport à R_1^A .

Soit $\delta = n.2.\overline{HA}$ avec : n , indice de l'air
 $\overline{HA}$ le chemin géométrique

Soit $\overline{HA} = x \sin(\epsilon)$ on trouve : $\delta = \delta(x) = n. x.2.\sin \epsilon$

δ est la différence de marche introduite par la rotation d'un des miroirs. On vérifie que pour un angle ϵ donné, la différence de marche ne dépend que de la distance x . Les conditions particulières d'interférences sont :

$$\begin{aligned} \delta &= p. \lambda && \text{interférences constructives (franges claires)} \\ \delta &= (p + 1/2). \lambda && \text{interférences destructives (franges sombres)} \end{aligned}$$

en identifiant les deux expressions de δ , on trouve la condition (franges claires) :

$$n. x.2.\sin \epsilon = p. \lambda$$

pour $n=1$ (air) et $p=1$ (ordre 1 d'interférence), et pour des angles faibles, on trouve :

$$x = \frac{\lambda}{2\epsilon} \quad \text{Où } x \text{ est la distance d'une frange claire au point } x=0 \text{ (ordre 0).}$$

On observe ainsi sur l'écran une alternance de franges rectilignes claires et sombres correspondant à des ordres p croissants (ou décroissant) et donc à des distances x entre rayons croissantes (ou décroissantes).

c) Calcul de l'interfrange

Considérons deux franges claires successives. Elles correspondent à des rayons qui interfèrent avec les différences de marche:

$$\begin{aligned} \delta_A &= n.x_A.2.\sin \epsilon = (p+1). \lambda \\ \text{et} \quad \delta_B &= n.x_B.2.\sin \epsilon = p. \lambda \end{aligned}$$

Sur le coin d'air, la valeur de l'interfrange est donc donnée par:

$$i = x_A - x_B = \frac{\lambda}{n.2.\sin \epsilon} \approx \frac{\lambda}{n.2\epsilon} \quad \text{pour } \epsilon \text{ petit}$$

Remarques:

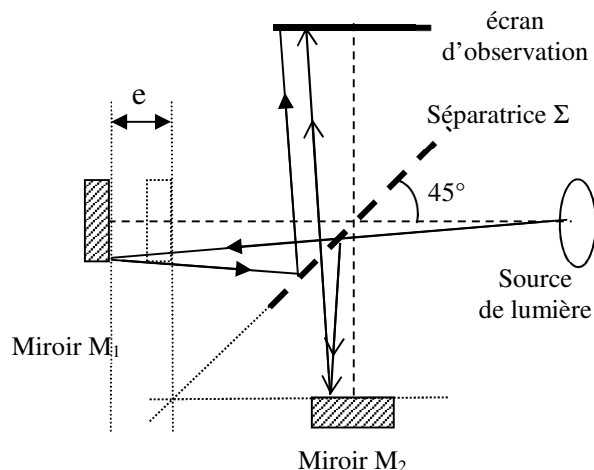
- Les franges sont rectilignes car le système présente une symétrie de translation parallèle à l'angle dièdre.
- Si ϵ est suffisamment petit, la différence de marche supplémentaire $\overline{HA}$ que présente le rayon R_1^A par rapport au rayon R_2^A , correspond simplement à l'épaisseur du coin d'air au point A. Ainsi, les rayons qui contribuent à une même frange, proviennent de régions sur le « coin d'air » de même épaisseur. C'est pourquoi les franges du coin d'air sont aussi appelées franges d'égale épaisseur.
- Les rayons R_1^A et R_2^A , sont sécant à proximité de la surface du miroir M_2 : **la figure d'interférences est donc localisée « sur le miroir M_2 », dans le cas d'une source étendue.**

2. «Lame d'air »

Ce réglage peut porter différents noms : «Lame d'air » ou « Franges d'égale inclinaison » ou « Franges de Haidinger ».

a) Description

A partir de la position du contact optique, il est également possible d'introduire une différence de marche entre les rayons réfléchis par M_1 et M_2 en traduisant l'un des deux miroirs (M_1) parallèlement à lui même. Avec cette géométrie de l'interféromètre, on forme, virtuellement, une lame d'air à faces parallèles, d'épaisseur $2e$ entre M_1' (image de M_1 par Σ) et M_2 . Pour produire des franges d'interférences, il faut cette fois éclairer l'appareil avec une source de lumière formant un faisceau divergent² comportant un grand nombre d'angles d'incidence (compris entre la normale aux



miroirs et un angle limite θ_0). La figure d'interférences se présentera sous la forme de cercles concentriques (symétrie de révolution autour de l'axe optique) : à chacun des cercles correspondra une condition particulière d'interférences et donc un angle d'incidence θ .

b) Calcul de la d.d.m.

Soit L_1 le chemin optique du rayon ayant traversé Σ puis subi 2 réflexions (sur M_1 puis sur Σ) et L_2 le chemin optique du rayon ayant traversé Σ subi 2 réflexions (sur M_2 puis sur Σ) puis ayant traversé Σ .

- Si le rayon incident est perpendiculaire au miroir M_1 , i.e. parallèle à l'axe optique, alors la d.d.m. est

$$\delta_0 = L_1 - L_2 = n \cdot (2e)$$

C'est la d.d.m. au centre de symétrie i.e. au centre de la figure.

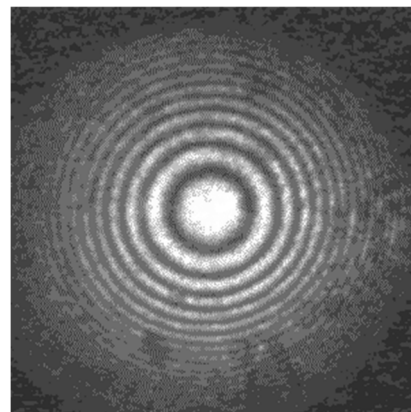
- Si le rayon incident est incliné de θ par rapport à l'axe optique, alors la d.d.m. est :

$$\delta = L_1 - L_2 = n \cdot (2e) \cos \theta$$

(Voir TP Fabry-Perot pour le calcul détaillé de la d.d.m.)

On rappelle que, dans le cas général, on appelle ordre d'interférences, le rapport de la différence de marche sur la longueur d'onde de la lumière utilisée:

$$p = \frac{\delta}{\lambda}$$



² En effet, avec un faisceau de lumière parallèle, tous les rayons se recombineraient avec la même différence de marche et donnerait lieu à un éclaircissement uniforme sur l'écran.

On peut donc calculer l'ordre d'interférence p_0 , au centre de la figure, avec $\delta = n \cdot (2e)$:

$$\text{Avec } n = 1 \quad p_0 = \frac{2e}{\lambda}$$

Remarques :

- L'ordre d'interférence au centre ne sera pas obligatoirement un nombre entier.
- L'ordre de grandeur de λ , dans le visible, étant de $0,5 \mu\text{m}$, les valeurs de p peuvent être assez grandes.

Dans le cas plus général d'une incidence θ , l'ordre d'interférences s'écrit :

$$p = \frac{2e}{\lambda} (\cos \theta) \approx \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right)$$

pour θ suffisamment petit

Remarque :

- pour une épaisseur e donnée de la lame d'air, tous les rayons ayant la même incidence θ appartiennent au même ordre d'interférences, c'est à dire à une même frange. Les **franges d'interférences** sont donc ici des **anneaux** appelés « **anneaux d'égaux inclinaisons** ». Lorsque l'ordre sera entier, on observe une frange claire (maxi d'intensité donc interférences constructives). Lorsque l'ordre sera demi-entier, on observe une frange sombre (mini d'intensité donc interférences destructives).
- Les rayons émergents du Michelson et se propageant vers l'écran d'observation sont parallèles entre eux : **la figure d'interférence est donc localisée à « l'infini »**, dans le cas d'une source étendue.

c) Rayon des anneaux³

Les rayons émergents étant parallèles entre eux on peut donc placer une lentille convergente (L), de distance focale image f , en sortie du Michelson et observer une image nette de la figure d'interférence dans le plan focal image de cette lentille. L'écran d'observation sera logiquement placé dans ce plan, pour observer les anneaux formant la figure d'interférence.

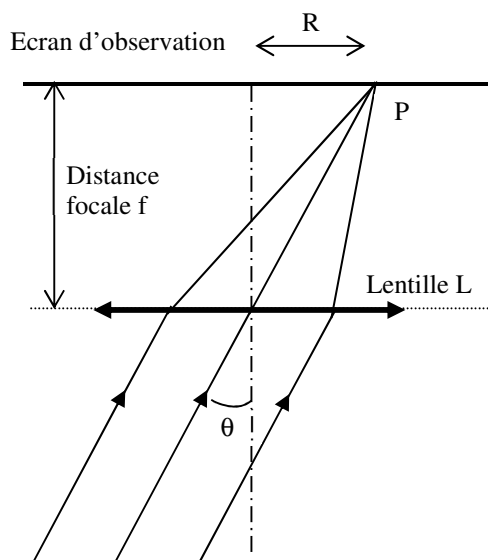
Considérons sur l'écran un point P appartenant par exemple à une frange claire de rayon R . L'ordre d'interférence pour cet anneau s'écrit donc :

$$p \approx \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right) = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{R^2}{2f^2}\right)$$

puisque $\tan \theta \sim \theta \sim R/f$, avec f distance focale de la lentille.

En différentiant cette expression on obtient :

$$\Delta p = - \frac{2 \cdot e \cdot R}{\lambda \cdot f^2} \cdot \Delta R$$



³ Voir également le TP Fabry-Perrot

Cette expression montre que l'ordre d'interférences diminue quand le rayon des anneaux augmente.

De plus, pour deux anneaux consécutifs de rayons R_1 et R_2 ($R_2 > R_1$) on a $\Delta p = -1$ et par conséquent:

$$\Delta R = \frac{\lambda f^2}{2.e.R}$$

Enfin, soit p_i , l'ordre d'interférences du $i^{\text{ème}}$ anneau à partir du centre et p_k , l'ordre d'interférences du $k^{\text{ème}}$ anneau ($k > 1$). On a alors:

$$p_i - p_k = k - i = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{R_i^2}{2f^2}\right) - \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{R_k^2}{2f^2}\right) = \frac{e}{\lambda f} (R_k^2 - R_i^2)$$

$$\text{d'où } (R_k^2 - R_i^2) = (k - i) \cdot \frac{\lambda f^2}{e}$$

Les carrés des rayons des anneaux $R_0^2, R_1^2, R_2^2, \dots$ suivent donc une progression arithmétique de raison $\frac{\lambda f^2}{e}$.

III. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

A. INVENTAIRE DU MATERIEL

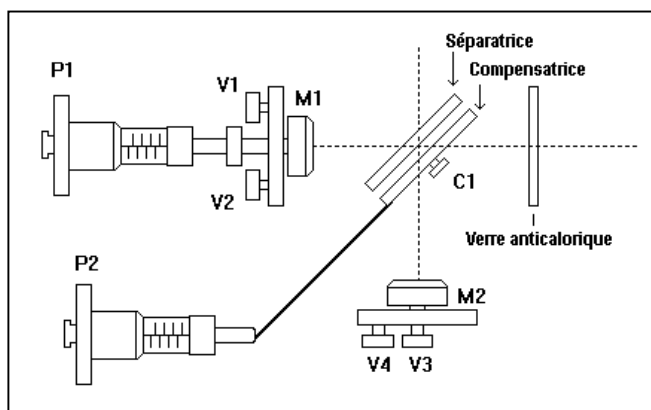
Vous disposez du matériel suivant:

- un interféromètre de marque SOPRA
- un laser He-Ne 2mW de faible divergence $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632,8 \text{ nm}$
- une lampe spectrale à vapeur de mercure (+ filtre interférentiel) $\lambda_{\text{vert-Hg}} = 546,1 \text{ nm}$
- un condenseur (lentille de grand diamètre et courte focale).
- un jeu de lentilles convergentes ($f' \approx +15 \text{ cm}$ et $f' \approx +50 \text{ cm}$)
- un écran opaque monté sur le banc et un écran blanc de grandes dimensions (et le mur ...)
- Facultatif : un écran translucide (calque ou dépoli) – Objectif de microscope

B. DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE

1. Vue de dessus

Les miroirs M_1 et M_2 sont montés sur des supports orientables par des vis micrométriques. Les vis V_1 et V_2 permettent le réglage (« bascule ») du miroir M_1 alors que les vis V_3 et V_4 permettent le réglage du miroir M_2 . Le miroir M_1 est de plus, monté sur un chariot muni d'une vis micrométrique P_1 permettant une translation rectiligne. De ce fait le miroir M_1 conserve son orientation par rapport à l'axe optique.



2. Lames séparatrice et compensatrice

La lame séparatrice Σ est constituée d'une lame de verre dont la face extérieure (dirigée vers la source) est métallisée. L'épaisseur de cette couche métallique est telle que le coefficient de réflexion est $R = 0,5$. Cette lame est fixe par construction. Une seconde lame de verre, non métallisée, de même épaisseur que Σ permet de compenser la variation de chemin optique engendrée par la traversée de la lame séparatrice⁴. Cette lame est appelée lame compensatrice. Elle peut être orientée autour d'un axe horizontal par la vis C_1 et autour d'un axe vertical par la vis micrométrique P_2 .

⁴ Pour plus de détail, voir « Optique expérimentale », Sextant, Hermann (1997), chp III, p 144

IV. MANIPULATIONS ET MESURES

Attention :

- on a vu (§I à III) que dans les relations donnant la d.d.m. ou l'ordre d'interférence, intervenait la longueur d'onde $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$. Toutes les vis de réglages sont faites pour agir sur cette échelle de longueur : elles sont donc très sensibles et parfois fragiles. La plupart du temps, une fraction de rotation suffira pour régler ou dérégler l'interféromètre (à l'exception de la vis du chariot).
- Les pièces réfléchissantes sont métallisées en face avant : toute rayure ou marque de doigt est irrémédiable. Comme pour tous les équipements optiques, nous vous demandons de manipuler avec le plus grand soin.

A. REGLAGE AVEC LE LASER

- Vérifier « à l'œil » que les bancs sont alignés avec le Michelson et orthogonaux entre eux. Placer un écran opaque sur le banc en sortie du Michelson.
- Placer et aligner le laser sur le banc optique, face à M_1 . Centrer le faisceau sur M_1 puis sur M_2 .

Si l'interféromètre est dérégulé, vous devez alors observer sur l'écran un grand nombre de taches dispersées.

- Agir (délicatement !) sur les vis micrométriques pour observer quelle est l'origine de cet ensemble de taches. Noter l'action de ces différentes vis de réglage.
- Régler le parallélisme de la lame compensatrice et de la lame séparatrice: pour cela, agir sur la vis C_1 afin de regrouper les taches suivant deux lignes horizontales, puis agir sur la vis P_2 afin de regrouper au mieux les taches au sein de chaque ligne.
- Agir sur les vis de réglage V_1 et V_2 du miroir M_1 afin d'amener en coïncidence les taches qui subsistent (en particulier, les 2 plus intenses). A ce stade, les miroirs M_1 et M_2 sont perpendiculaires à ε près. Vous avez donc formé un coin d'air. Vous pouvez observer des franges d'interférences dans la tache principale.

B. FRANGES DE COIN D'AIR / SOURCE SPECTRALE

- Laisser le laser en place (en cas d'insuccès du réglage qui suit).
- Placer la lampe spectrale et éclairer l'interféromètre avec un faisceau de lumière parallèle (approximativement) en utilisant le condenseur optique (ou une simple lentille) convenablement placé. Pour cela, il suffit de disposer la source et le condenseur loin de l'interféromètre (en bout de banc, par exemple), puis de déplacer le condenseur pour maximiser la lumière sur l'écran placé en sortie du Michelson.
- En regardant, à l'œil nu, dans la direction du miroir M_2 vous devez alors observer sur celui-ci des franges rectilignes, plus ou moins fines.

Astuce : on peut intercaler, à l'entrée du Michelson, un écran dépoli pour les observations à l'œil nu. On peut alors effectuer tout le réglage de l'interféromètre. Par contre, il faudra retirer le dépoli pour faire une projection.

Si le contraste des franges est médiocre, on peut agir sur la translation de M_1 pour l'optimiser.

Si les franges sont invisibles, revenez au LASER et vérifiez que les franges apparaissent dans les « tâches ».

- Lorsque le contraste vous semble satisfaisant, projetez ces franges, à l'aide d'une lentille placée en sortie du Michelson ($f' \approx +15 \text{ cm}$), sur un écran placé sur l'axe d'observation. Affinez les réglages, si besoin.

- **Déterminez la valeur de l'angle du coin d'air (ϵ)** correspondant à la figure d'interférence observée. On fera plusieurs mesures (au moins 2) pour des angles ϵ différents (i.e. franges « fines » et franges « larges »).

C. CONTACT OPTIQUE

Supprimer le coin d'air afin de rendre M_1 et M_2 parfaitement perpendiculaires. Pour cela, agir délicatement sur les vis de réglage de M_1 afin d'élargir les franges, jusqu'à en observer une seule sur l'écran (claire ou sombre). Les franges peuvent alors être fortement déformées du fait des « défauts » des miroirs.

L'interféromètre est alors proche du contact optique (C.O.) :

- Miroirs orthogonaux (à une fraction de ϵ près).
- Chemins optiques (L_1, L_2) identiques (à quelques $1/100^\circ$ de mm près) pour les deux bras de l'interféromètre.

Important : notez la valeur lue sur la *vis micrométrique du chariot au C.O.* Lorsque vous serez perdus, vous replacerez le chariot à cette valeur.

D. FRANGES D'EGALES INCLINAISONS / SOURCE SPECTRALE

Pour modifier le réglage de l'interféromètre, des franges d'égale épaisseur aux franges d'égale inclinaison, on passera par le contact optique.

Procédure :

- Eclairer tout d'abord l'interféromètre par un faisceau de lumière convergent en rapprochant le condenseur (ou lentille) et la source spectrale de l'interféromètre. Ajouter une lentille convergente si nécessaire.
- Tourner la vis micrométrique P_1 pour translater le miroir M_1 de quelques $1/10^\circ$ de mm, afin de s'éloigner du contact optique et de créer une lame d'air (virtuelle) d'épaisseur (e). A ce stade vous devez alors observer des anneaux concentriques, soit à grande distance (observation sur le mur) soit en regardant directement le miroir M_1 depuis la sortie du Michelson.
- Projetez la figure d'interférence sur l'écran à l'aide d'une lentille ($f' \approx + 50$ cm).
- Modifier la position et le nombre d'anneaux en agissant toujours sur P_1 .
- Notez sur quel domaine de position(s) de la vis P_1 vous conservez une figure d'interférence contrastée (c'est-à-dire avec un contraste « acceptable »).
- Notez l'évolution des anneaux en fonction des variations d'épaisseur de la lame d'air (e) : apparition ou disparition au centre de la figure, sortie ou entrée dans le champ d'observation, évolution de l'ordre d'interférence, rayon, nombre....

Remarque : vous aurez à reprendre ces réglages dans le prochain TP sur l'interféromètre de Michelson. Il est donc conseillé de noter soigneusement les procédures de réglage et les observations que vous avez faites (succès et échecs...).