

Ch O3. DISPOSITIF PAR DIVISION D'AMPLITUDE :

L'INTERFEROMETRE DE MICHELSON

Importance historique :

En 1881, Albert Abraham Michelson (américain, 1852-1931) a inventé cet appareil pour tenter de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther et donc une variation de la vitesse de la lumière en fonction de l'orientation des rayons lumineux. L'échec de cette expérience a permis de montrer l'invariance de la vitesse de la lumière par changement de référentiel galiléen. Ce résultat est à la base de la théorie de la relativité restreinte (Einstein 1905).

En 1893 il a ensuite étudié avec cet interféromètre le spectre de la lampe à vapeur de Cadmium et il a proposé une nouvelle définition du mètre. Il a obtenu le prix Nobel en 1907.

Un instrument toujours d'actualité :

Sondeurs atmosphériques : IASI (Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge) placé sur les satellites météorologiques européens MetOp et AIRS, l'instrument américain sur le satellite Aqua. Ils mesurent la température et surveillent les taux d'ozone, de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane), de polluants...

Détection des ondes gravitationnelles : expérience Virgo (Italie près de Pise), expérience Ligo (Hanford état de Washington)... Première observation en septembre 2015, prix Nobel 2017 (3 américains)

I. Description

Principe :

L'interféromètre est constitué de : 2 miroirs M_1 et M_2

et d'une lame semi-réfléchissante S_p appelée

Tracer la marche de 2 rayons :

L'onde (1) est transmise par S_p , réfléchi sur M_1 , puis est réfléchi sur S_p . L'onde (2) est réfléchi sur S_p , réfléchi sur M_2 , transmise par S_p .

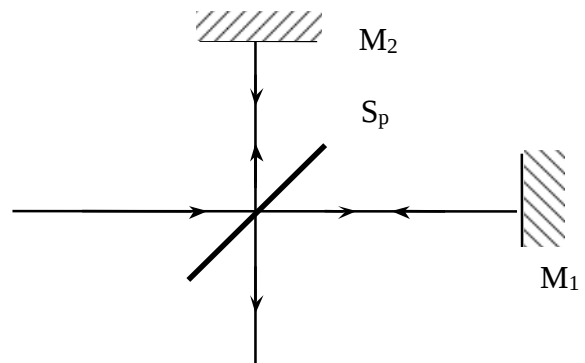


Schéma :

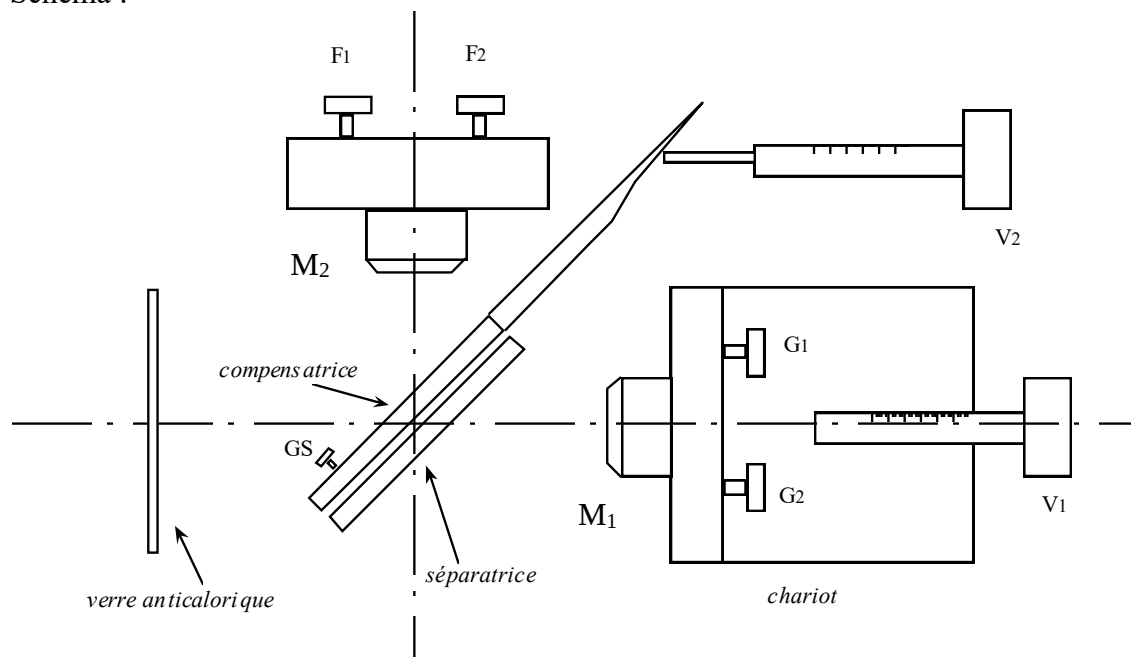


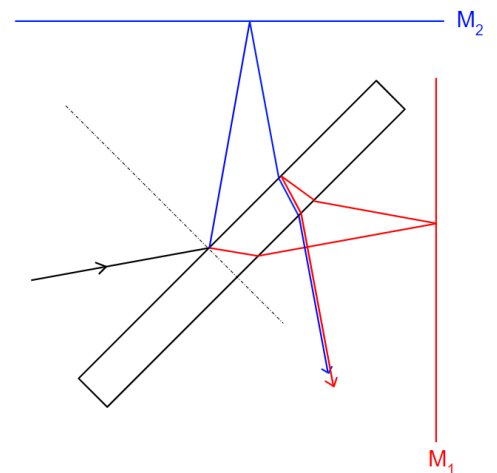
Photo :



Lame compensatrice : avoir compris son intérêt.

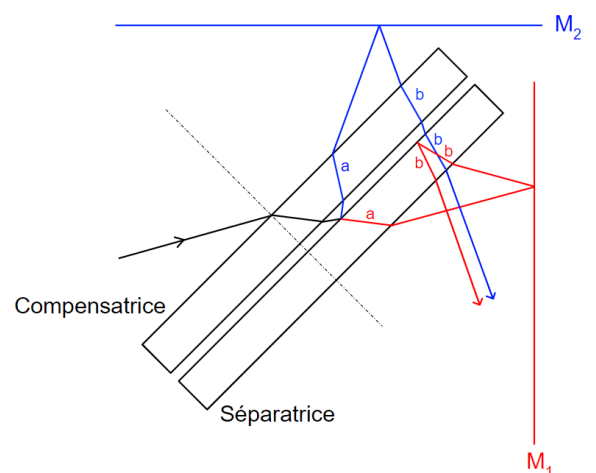
La séparatrice S_p est une lame de verre d'épaisseur e sur laquelle on a déposé d'un seul côté un traitement semi-réfléchissant. Elle est traversée :

et fois par le rayon (2)
 fois par le rayon (1).



Pour compenser les épaisseurs de verre traversées par la séparatrice, on rajoute une **compensatrice**. C'est une lame de verre identique à la séparatrice sans traitement semi-réfléchissant. On la place parallèle à la séparatrice.

Maintenant tous les rayons passent
 fois dans la lame de verre.



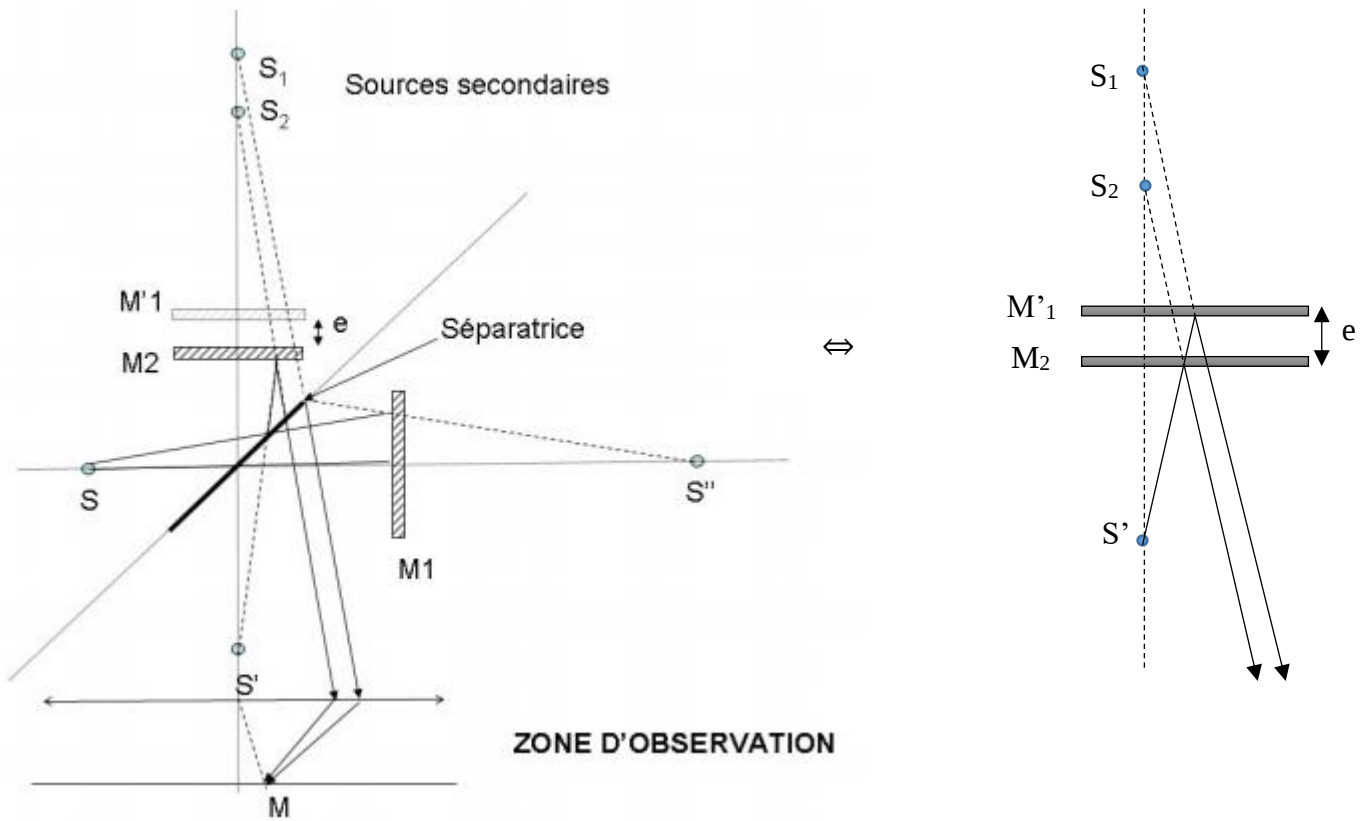
Modèle idéal pour l'ensemble séparatrice-compensatrice :

La séparatrice est supposée infiniment fine. Par transmission elle ne modifie pas les rayons lumineux. Par réflexion elle se comporte comme un miroir plan (les rayons semblent provenir de S^* son image par réflexion qui est son symétrique par rapport au plan S_p).

II. Utilisation en lame d'air (à faces parallèles)

On se place ici dans le cas où les miroirs M_1 et M_2 sont parfaitement orthogonaux.

1) Equivalence à une lame d'air



On note S' l'image de S à travers la séparatrice S_p et M'_1 l'image de M_1 à travers S_p .
 S_1 est l'image de S' par M'_1 et S_2 l'image de S' par M_2 .

Ecrire les égalités des chemins optiques : $(SI_1) =$ et $(SI_2) =$

Du point de vue du chemin optique et du tracé des rayons, le dispositif est équivalent à une lame d'air comprise entre M'_1 et M_2 .

2) Franges d'interférences

Forme des franges :

$$\begin{aligned}\delta_M &= (SM)_1 - (SM)_2 = \\ &= (S_1M) - (S_2M)\end{aligned}$$

car

Les franges d'interférence sont des hyperboloïdes de révolution de foyers S_1 et S_2 .

On place l'écran perpendiculaire à (S_1S_2) , alors les franges d'interférence sont des **cercles d'axe (S_1S_2)** .

Localisation des franges :

Si la source S est ponctuelle, le champ d'interférences est un volume donc les franges sont

Mais en pratique on utilise une source étendue (sauf laser) alors les franges sont

3) Utilisation d'une source étendue

On constate expérimentalement que lorsque la source est étendue, les franges d'interférences sont brouillées sauf si on place l'écran à l'infini (ou dans le plan focal image d'une lentille).
On dit que les franges sont localisées à l'infini.

Les franges d'interférence d'un interféromètre de Michelson utilisé en lame d'air et éclairé par une source étendue sont

CE : Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.

Explication : La figure d'interférence est la superposition de toutes les figures données par tous les points de la source (qui sont incohérents). Le centre des anneaux d'interférence est centré sur la droite (S_1S_2) de chaque point source.

Si l'écran est à distance finie, ces différentes figures

Si l'écran est dans le plan focal image d'une lentille,

4) Franges d'égale inclinaison

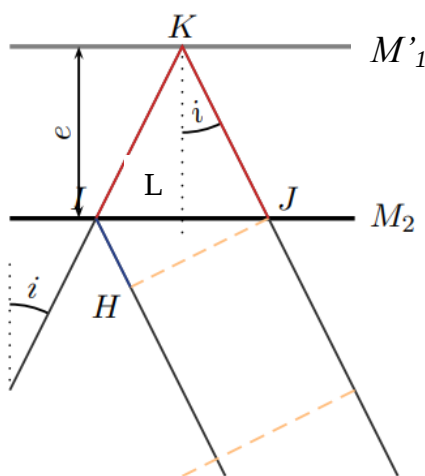
Hyp : Source monochromatique ponctuelle ou étendue placée à distance finie.

Ecran placé à l'infini ou dans le plan focal image d'une lentille

a) Différence de marche :

Calcul de la différence de marche :

Première méthode :



$$\delta_M = (SM)_1 - (SM)_2 \text{ chemins optiques infinis}$$

On introduit la surface d'onde passant la J.

Elle coupe le rayon (2) en H.

Par définition de cette surface d'onde : $(HM) = (JM)$

D'où $\delta_M =$

Dans le triangle (IJH) :

Dans le triangle (KLJ) :

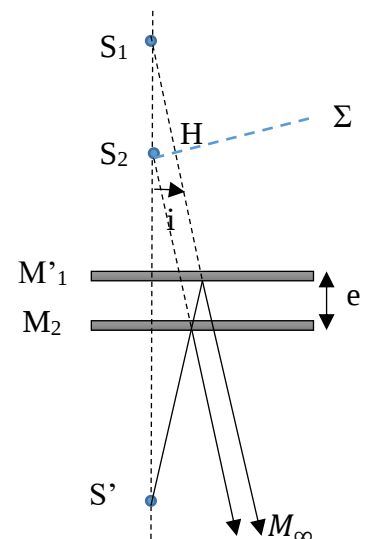
D'où $\delta_M = \dots$

$$\delta_M =$$

Deuxième méthode :

En utilisant le plan d'onde Σ ,

$$\delta_M =$$



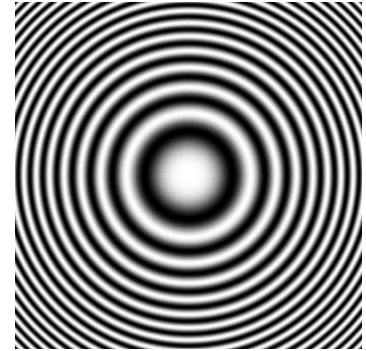
Pour une observation à l'infini (en M),

$$\delta_M = 2.e.\cos(i_M) \text{ avec } e \text{ l'épaisseur de la lame d'air et } i_M \text{ l'angle d'inclinaison (vers M)}$$

CE : Établir et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'incidence des rayons.

Forme des franges :

On en déduit que les franges observées à l'infini sont



b) Observation des franges : savoir placer et choisir les lentilles d'éclairage et d'observation

CE : Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.

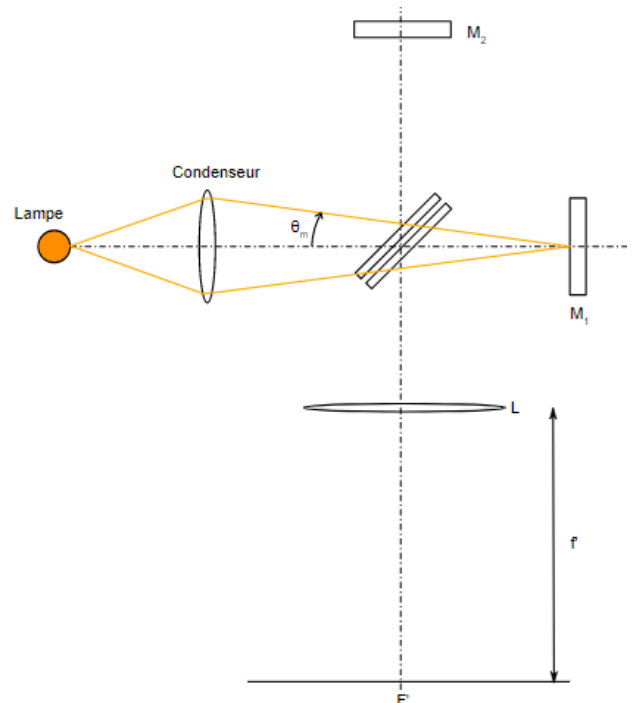
Schéma avec éclairage et observation :

Lentille d'observation : L'observation se fait dans le plan focal image d'une lentille mince convergente L de distance focale f' . Les franges sont des cercles centrés en F' .

Le rayon de l'anneau d'angle d'incidence i_M est (dans les conditions de Gauss) $R_M =$

(Choisir f' pour avoir de grands anneaux).

Lentille d'éclairage : Le nombre d'anneaux visibles est déterminé par la valeur maximale de i_M (θ_m sur la figure). Pour observer le plus d'anneaux possibles, on fait l'image de la source étendue S sur le miroir M_1 avec une lentille d'éclairage L_c (le condenseur). Puisque la distance minimale entre un objet réel et son image réelle est , il faut choisir une lentille L_c de distance focale.



Rem : si la source était au foyer objet de L_c , on n'observerait sur l'écran que

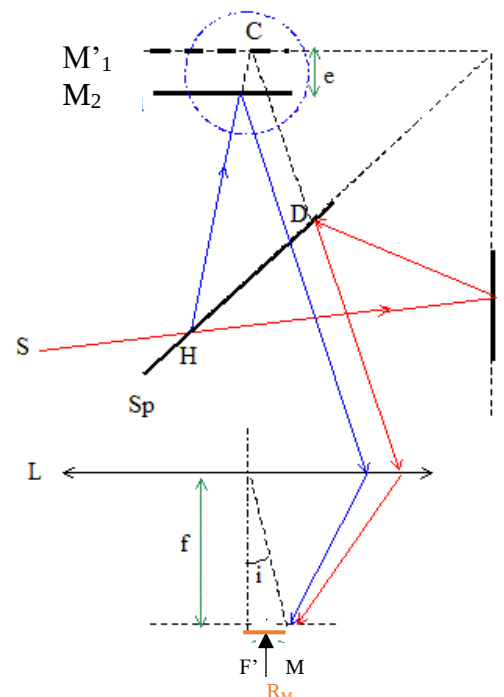
c) Rayons des anneaux à savoir calculer

Le rayon de l'anneau d'angle d'incidence i_M est (dans les conditions de Gauss) :

$R_M =$

$$\text{Ordre d'interférences } p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2e\cos(i)}{\lambda}$$

Quand on s'éloigne du centre (i augmente) , p



- Au centre :
- Premier anneau brillant :
- $n^{\text{ième}}$ anneau brillant :

Rayon du $n^{\text{ième}}$ anneau brillant : $R_n =$

Si le centre est brillant $\varepsilon =$

Conséquence :

d) Teinte plate ou contact optique :

On appelle **teinte plate ou contact optique**

Comment atteindre la teinte plate depuis une observation des anneaux?

- Il faut raisonner sur l'ordre d'interférences : $p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2e \cos(i)}{\lambda}$
Lorsqu'on observe un anneau d'ordre d'interférence p fixé,

Rem : Ne pas raisonner sur le rayon des anneaux : $R_n = f_2' \sqrt{\frac{\lambda}{e} (n - \varepsilon)}$ car

Site d'animations : <https://physique-pcsi.prepa-balzac.fr/applications-pedagogiques-interactives/interferences-lumineuses/>

Savoir régler le Michelson (voir TP).

CE : Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole proposé.

5) Applications : étude du spectre des sources

a) Mesure de l'écart entre les deux longueurs d'onde du doublet du Sodium

On éclaire le Michelson avec le doublet jaune d'une lampe à vapeurs de Sodium :

$\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$

Posons $\lambda_m = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ et $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \ll \lambda_m$

Condition de brouillage des interférences :

Positions des brouillages au centre : $e =$

On observe un brouillage périodique des interférences lorsque e augmente.

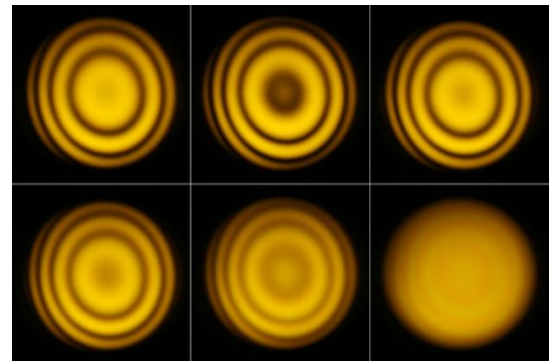
Observation du doublet du sodium:

D'où la distance entre deux brouillages : $\Delta e =$

(à savoir démontrer)

En TP la mesure de Δe permet d'évaluer $\Delta\lambda$: $\Delta\lambda = \lambda_m^2 / 2\Delta e$ avec Δe l'écart entre deux brouillages et λ_m la longueur d'onde moyenne

CE : Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.



b) Mesure de la largeur spectrale d'une raie de la lampe à vapeurs de Mercure

On éclaire le Michelson avec une lampe à vapeurs de mercure suivie d'un filtre qui isole la raie verte.

On modélise la raie verte par une densité spectrale rectangulaire de centre λ_0 et de largeur $\Delta\lambda \ll \lambda_0$.

Critère semi-quantitatif de brouillage des interférences :

Au voisinage du centre $\delta \approx 2e$, il y a brouillage si $e \geq$

Observations : A la teinte plate et autour de la teinte plate, les anneaux sont bien contrastés. Le contraste diminue lorsqu'on s'éloigne de la teinte plate jusqu'au brouillage pour $\delta \geq l_c$

Autre méthode : il y a brouillage pour

Rappel des valeurs de l_c :

CE : Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.

III. Utilisation en coin d'air

On se place ici dans le cas où les miroirs M'_1 et M_2 font entre eux un petit angle α .

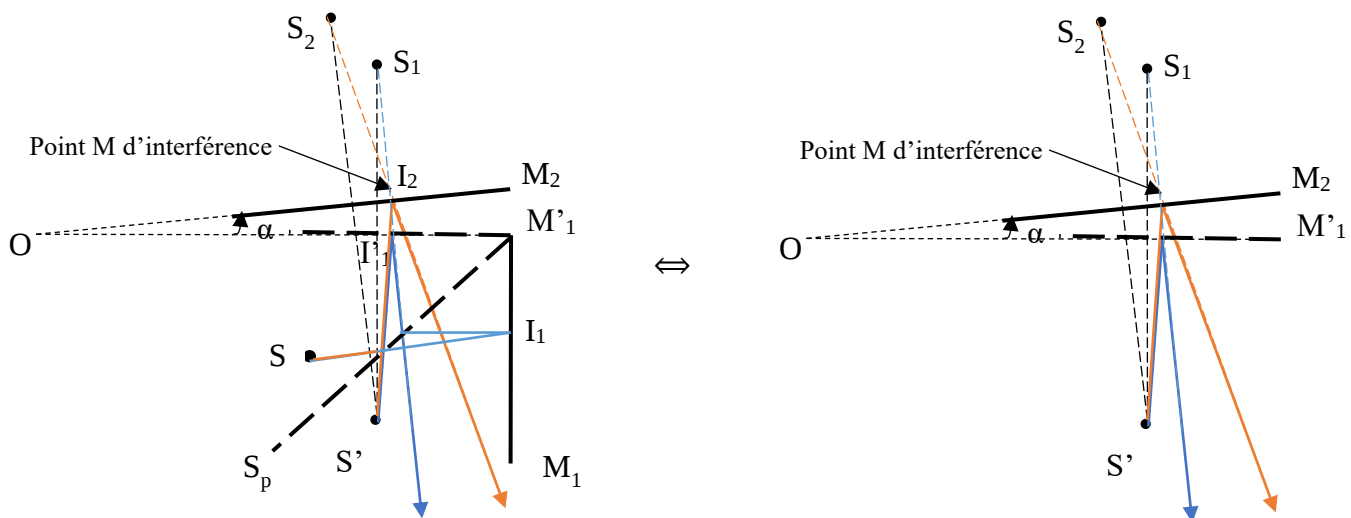
1) Equivalence à un coin d'air

On note S' l'image de S à travers la séparatrice et M'_1 l'image de M_1 à travers S_p .

S_1 est l'image de S' par M'_1 et S_2 l'image de S' par M_2 .

Par symétrie il y a égalité des chemins optiques : $(SI_1) =$

Du point de vue du chemin optique et du tracé des rayons, le dispositif est équivalent à un dièdre rempli d'air entre M'_1 et M_2 appelé coin d'air.



2) Franges d'interférences

$$\delta_M = (SM)_2 - (SM)_1$$

$$= S_2M - S_1M$$

Les franges d'interférence sont des

Localisation des franges :

Si la source S est ponctuelle, le champ d'interférences est un volume donc les franges sont

Mais en pratique on utilise une source étendue (sauf laser) donc les franges sont localisées.

Les franges d'interférence d'un interféromètre de Michelson utilisé en coin d'air et éclairé par une source étendue sous incidence quasi-normale sont

3) Franges d'égale épaisseur

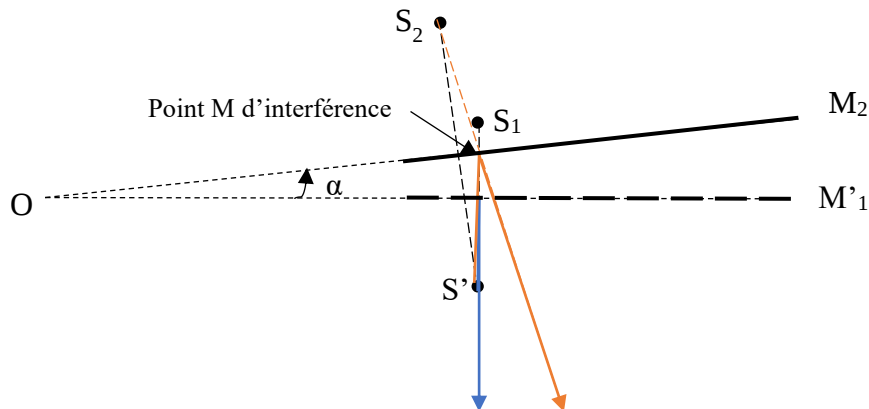
Hyp : Les rayons provenant de la source monochromatique étendue arrivent sur M'_1 sous incidence quasi-normale.

Les franges sont alors localisées au voisinage de M_2 .

a) Différence de marche :

CE : Utiliser l'expression admise de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences.

Schéma sous incidence normale :



En supposant l'angle d'incidence i très faible et l'angle du coin d'air α très faible, le rayon (2) fait approximativement le trajet $2e_M$ en plus du rayon (1).

$\delta_M = 2.e_M$ où e_M est

b) Franges d'interférence :

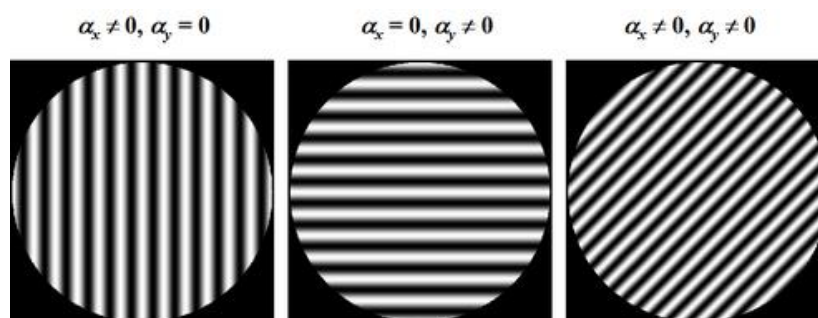
Elles correspondent à δ_M cste donc e_M cste, elles sont appelées

On prend une origine 0 sur l'arête de coin d'air et un axe (Ox) sur le miroir M'_1 perpendiculaire à l'arête.

Alors $OM = x$ et $\delta_M =$

Les franges correspondent à

On en déduit que **les franges sont**



Les franges brillantes sont en $\delta_M =$

Elles sont équidistantes donc on peut définir un interfrange : $i =$

Réglage du Michelson : l'interfrange i augmente quand α diminue donc pour passer d'un Michelson en coin d'air à un Michelson en lame d'air, il faut

c) Observation des franges :

CE : Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.

Lentille d'observation :

Les franges sont localisées _____ ,
pour les observer

Lentille d'éclairage :

Pour éclairer le coin d'air sous incidence
quasi-normale, on place la source étendue

Angle α maximum pour que les franges soient visibles :

Interfrange sur l'écran :

$$i_{\text{écran}} =$$

Typiquement $\gamma \approx 10$

Pour que les franges soient bien visibles à l'œil nu, supposons qu'on désire $i_{\text{écran}} > 1 \text{ mm}$

Alors il faut que $\alpha <$

D'où la difficulté de réglage du Michelson !

4) Observations en lumière blanche (Voir ChO2 III2)

CE : Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.

Voir animations :

<https://physique-pcsi.prepa-balzac.fr/applications-pedagogiques-interactives/interferences-lumineuses/>

5) Applications : mesures d'épaisseur ou d'indices ou de défauts de surface

CE : Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.

Mesure de l'épaisseur d'une lamelle de microscope : (voir ex 4 TD et TP)

Placer la lame dont on veut mesurer l'épaisseur e ou l'indice n sur l'un des bras du Michelson et mesurer de combien de franges s'est translée la figure.

Rem : il faut se placer en lumière blanche pour repérer la frange centrale.

Mesure de défauts de surface :

Remplacer l'un des miroirs du Michelson par la surface à défauts.

Précision des mesures interférométriques :

$$\text{au moins } \Delta\delta =$$

$$\text{Avec un Michelson } \Delta e =$$

dans le visible

