

Chapitre 4 : INTERFEROMETRE DE MICHELSON

Dans le bloc 4, l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience. En revanche, l'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale. Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson on suppose la séparatrice infiniment mince.

Notions et contenus	Capacités exigibles
4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson	
<p>a) Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale inclinaison.</p>	<p>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférence en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde.</p> <p>Mesurer l'écart $\Delta\lambda$ d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation. Interpréter les observations en lumière blanche.</p>
<p>b) Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale épaisseur.</p>	<p>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation. Admettre et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences.</p> <p>Analyser un objet (miroir déformé, lame de phase introduite sur un des trajets, etc...). Interpréter les observations en lumière blanche.</p>

Cet interféromètre, à division d'amplitude, a été inventé par Michelson et Morley en 1887, pour mettre en évidence un éventuel milieu appelé « éther » et par rapport auquel la lumière se propagerait à la célérité C .

L'expérience fut un échec, mais la théorie de la relativité d'Einstein, postulant l'invariance de la célérité de la lumière, en fit une réussite !

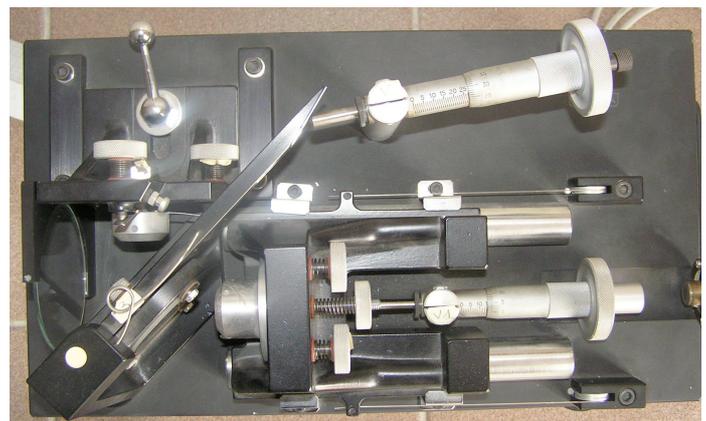
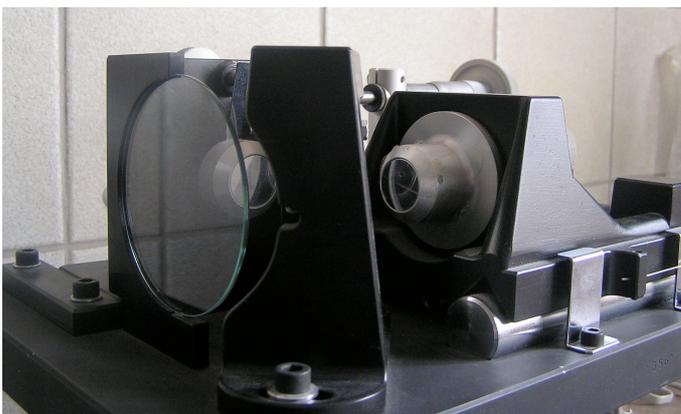
Cet interféromètre est encore très utilisé en métrologie.

On l'utilise actuellement pour tenter de détecter les ondes gravitationnelles (projet Virgo).

1. Description de l'interféromètre.

1.1. Interféromètre réel :

L'interféromètre réel est schématisé sur la figure 1, vu de dessus.



On distingue :

* trois lames : **anticalorique**, **séparatrice (SP)** et **compensatrice (C)**, dont le rôle sera vu plus loin.

* deux **miroirs** (M_1) et (M_2) ;

* différentes vis de réglage :

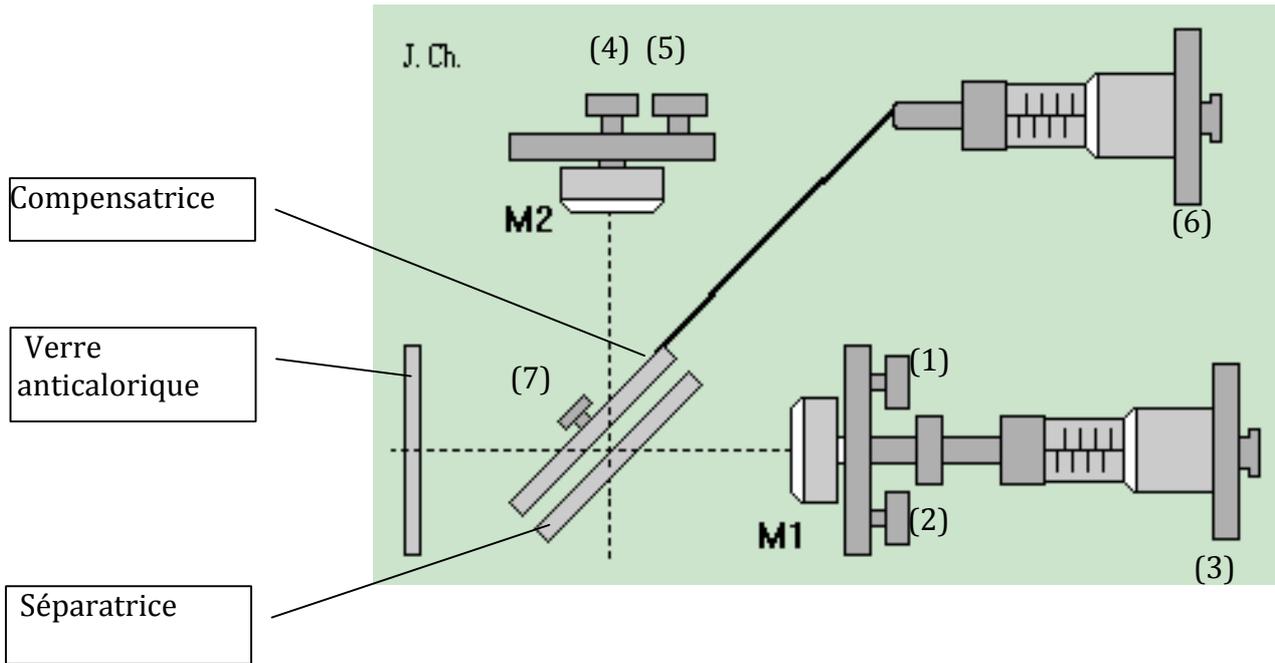
(1) et (2) : vis de rotation rapide ;

(4) et (5) : vis de rotation lente, appuyant sur des languettes ;

(3) : **vis de chariotage** de (M_1) en translation suivant OX ;

(6) et (7) : réglage en rotation de la compensatrice.

C'est un appareil précis, couteux et très délicat ; on le manipulera avec le plus grand soin, en évitant toujours de toucher les parties optiques (verres et miroirs).



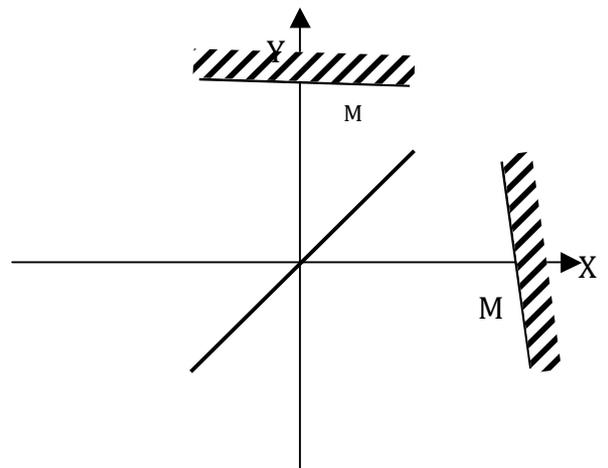
1.2. Interféromètre modélisé :

L'interféromètre théorique est représenté ci-contre.

Il est constitué de deux miroirs parfaitement réfléchissants (M_1) et (M_2) grossièrement perpendiculaires ; l'angle qu'ils forment est $\pi/2 + \alpha$ avec α de l'ordre de quelques minutes d'angles.

La région $X < 0$ est l'**entrée** de l'interféromètre ; on y place la source. La région $Y < 0$ est la **sortie** : on y observe les interférences.

(M_1) est grossièrement perpendiculaire à OX et (M_2) à OY, à quelques minutes d'angle près.



La séparatrice (SP) est une **lame semi-réfléchissante** assimilée à une surface plane sans épaisseur d'équation $X = Y$: un rayon incident y est divisé en deux rayons de **même amplitude** : l'un réfléchi et l'autre transmis : l'interféromètre de Michelson est dit à **division d'amplitude**.

En conséquence, les rayons émergeant en sortie de l'interféromètre ont **même amplitude**.

Le tout baigne dans l'air d'indice pris égal à 1.

2. Equivalence Michelson théorique-lame d'air :

Considérons la marche de deux rayons lumineux issus de l'entrée et émergent en sortie après avoir subi une seule réflexion sur (M_1) ou (M_2) (figure 3).

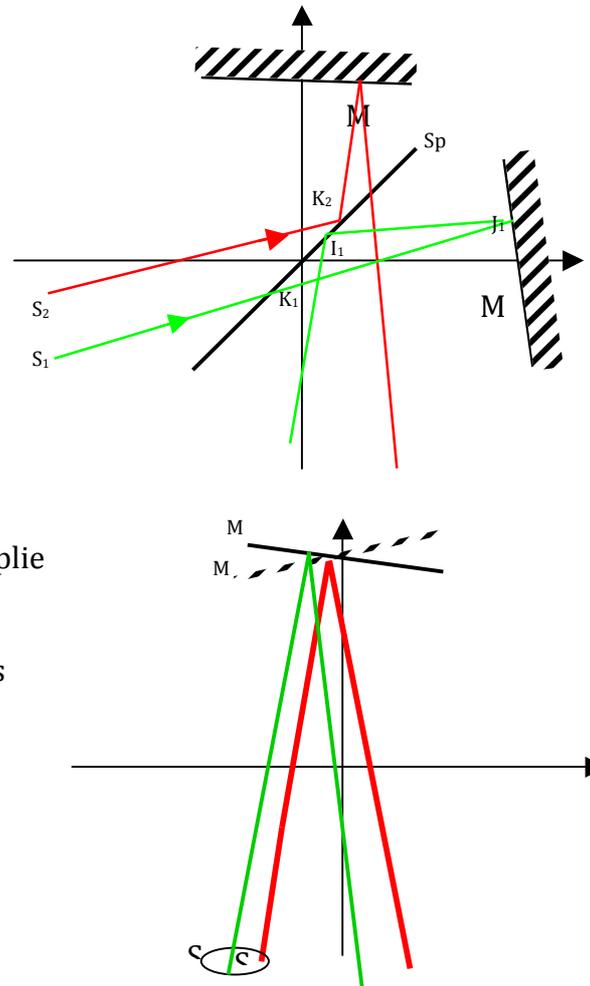
Le chemin optique (S_1M) est inchangé si l'on replie S_1K_1 autour de Sp ; la source devient virtuelle, cependant on continue de la nommer S_1 .

Le chemin optique est également inchangé si l'on replie $K_1J_1I_1 + (M_1)$ vers le haut autour de (SP) ; (M_1) se replie en (M'_1) , image de (M_1) par rapport à (SP) , et J_1 se replie en J'_1 .

De même, le chemin optique (S_2M) est inchangé si l'on replie S_2K_2 autour de (SP) .

La figure est donc équivalente à la figure ci-dessous pour les chemins optiques des rayons.

Le Michelson théorique est équivalent à une lame d'air constituée des deux miroirs (M'_1) virtuel et (M_2) réel se coupant éventuellement à distance finie suivant la droite ou arête (A) en formant un angle α .



3. Utilisation de l'interféromètre en lame d'air à faces parallèles (ou « aux anneaux ») :

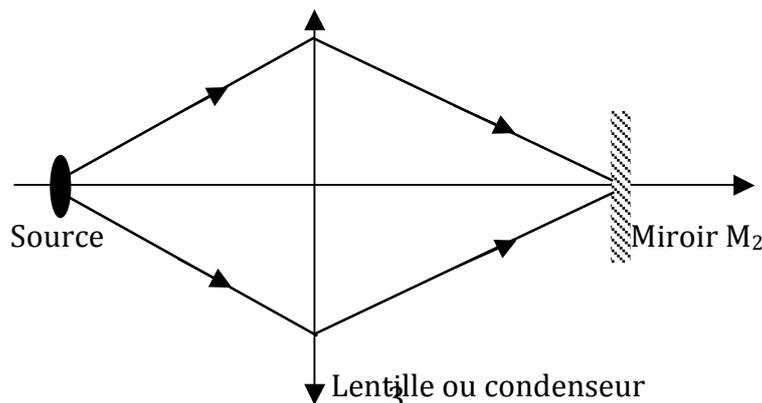
Les miroirs M_1 et M_2 sont strictement perpendiculaires, les miroirs M'_1 et M_2 sont donc strictement parallèles et séparés par une distance e ; l'angle α est strictement nul : le Michelson est monté en **lame d'air à faces parallèles**.

On observe des franges circulaires en sortie d'interféromètre.

3.1. Conditions d'éclairage avec une source étendue :

Une source étendue est une source « large » ; on gagne naturellement en luminosité par rapport à une source ponctuelle.

Afin d'observer le maximum d'anneaux, il faut que le faisceau soit le plus convergent possible ; on utilise en entrée une lentille de courte focale ou un condenseur, afin de faire converger le faisceau sur le miroir M_2 .



Rappel : la source peut ici être placée à une distance quelconque du Michelson, à condition que la distance source-miroir soit supérieure à $4f'$, ou f' est la focale de la lentille d'entrée.

3.2. Conditions d'observation avec une source étendue :

On constate expérimentalement qu'avec une source étendue, les franges sont brouillées si l'on observe à distance finie, car la source n'est plus assez cohérente spatialement.

Si l'on éloigne l'écran, les franges deviennent bien visibles ; on dit que les interférences sont **localisées à l'infini**.

On peut également utiliser une lentille convergente placée à une distance quelconque de la sortie de l'interféromètre, et l'on place un écran (ou un dépoli) pour observer les franges dans le plan focal image de cette lentille.

3.3 Différence de marche :

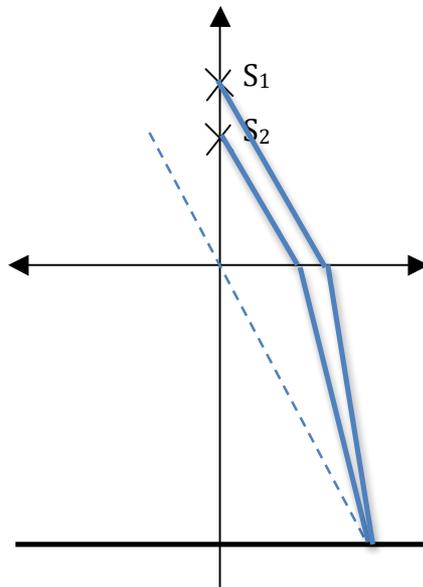
Les interférences étant localisées à l'infini, les rayons émis par les sources secondaires sont parallèles.

La distance de S'_1 à S'_2 étant $2e$, on a :

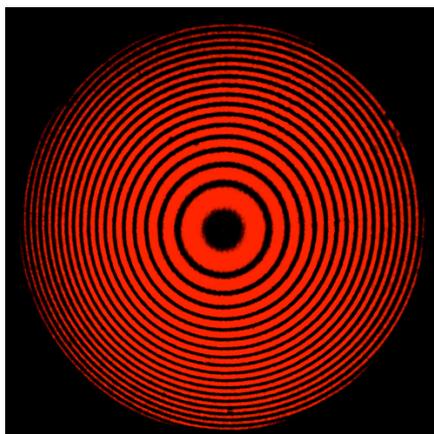
$$\delta(M) = 2e \cos(i)$$

Tous les rayons tombant sur l'interféromètre avec la même incidence i vont donc donner la même différence de marche, et contribuer à la même frange.

Les franges sont circulaires, concentriques, **d'égale inclinaison**.



Remarque : la forme des franges était prévisible, car le système admet une symétrie de révolution autour de l'axe optique de la lentille.



3.4. Rayons des anneaux :

Supposons l'ordre au centre entier, soit p_0 :

$$\delta(0) = 2e = p_0\lambda \quad (1)$$

L'ordre d'interférences du premier anneau brillant est :

$$p_1 = p_0 - 1.$$

L'ordre d'interférences du $k^{\text{ième}}$ anneau brillant est :

$$p_k = p_0 - k.$$

On a donc :

$$2e \cos i_k = p_k \lambda$$

avec i_k petit donc $\cos i_k = 1 - i_k^2 / 2$ au second ordre (2)

(1) - (2) donne :

$$i_k^2 = k\lambda / e.$$

Le rayon dans le plan focal est :

$$r_k = f \tan i_k \approx f i_k$$

soit

$$r_k = f \sqrt{\frac{k\lambda}{e}}$$

Cette formule montre que si l'épaisseur optique diminue, les rayons des anneaux augmentent.

Remarque : si les anneaux sont observés sans lentille à grande distance D , la formule est identique, D remplaçant f .

3.5. Cas particulier : contact optique :

Si (M'_1) et (M_2) coïncident, c.à.d. $\alpha = 0$ et $e = 0$; on dit qu'il y a **contact optique** entre les deux miroirs du Michelson ; l'ordre d'interférence est toujours nul ; on observe sur l'écran une teinte uniforme de la couleur de la source.

4. Utilisation au coin d'air :

L'angle α est faible : les miroirs M'_1 et M_2 forment un coin d'air d'arête (A), le Michelson est dit au **coin d'air**.

4.1. Conditions d'éclairage et d'observation avec une source étendue :

L'interféromètre doit être éclairé avec un **faisceau parallèle** ; on place donc la source au foyer objet d'une lentille convergente (en pratique cette lentille fait partie de la lampe) ; cela peut se faire par autocollimation sur le miroir M_2 .

