

Interféromètre de Michelson

Table des matières

I Un exemple d'interférences par division d'amplitude : un film de savon	2
II Description de l'interféromètre de Michelson	4
II.1 Généralités	4
II.2 Configurations particulières	5
III Configuration au "contact optique"	7
IV Configuration en "lame d'air"	7
IV.1 Source ponctuelle monochromatique à distance finie	7
IV.2 Source ponctuelle polychromatique (avec diaphragme fermé et sans filtre)	8
IV.3 Source monochromatique étendue (avec filtre et diaphragme ouvert) avec observation à distance finie (sans lentille de projection)	9
IV.4 Source monochromatique étendue (avec filtre et diaphragme ouvert) avec observation à l'infini (avec lentille de projection)	10
a) Construction des rayons avec une observation à l'infini	10
b) Différence de marche	10
c) Caractéristiques des anneaux de la figure d'interférence	11
IV.5 Application à la mesure de longueur d'onde ou inversement à la mesure de distance	13
a) Mesure d'une longueur d'onde λ	13
b) Mesure d'un écart $\Delta\lambda$ entre deux longueurs d'onde	13
V Configuration en "coin d'air"	15
V.1 Source ponctuelle monochromatique à distance finie	15
a) Construction des sources secondaires	15
b) Première approche : analogie avec les trous d'Young	15
c) Méthode de calcul de la différence de marche (α faible)	16
V.2 Source monochromatique étendue avec observation au voisinage des miroirs sous incidence quasi normale	16
V.3 Source polychromatique étendue	17
VI Applications	18

Introduction

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à des interférences produites par des dispositifs à division du front d'onde. Dans ce chapitre, nous allons maintenant étudier un dispositif à **division d'amplitude** : l'interféromètre de Michelson.

En 1907, Albert-Abraham Michelson (1852-1931) a reçu le prix Nobel de physique pour ses travaux d'optique de précision. C'est pour l'importance qu'a eu cette expérience pour le développement de la théorie d'Einstein que ce prix lui a été décerné (l'expérience initiale a été réalisée vers 1890).

Il a notamment mis au point un interféromètre qui porte son nom et qui lui a permis de mettre en évidence l'invariance de la célérité de la lumière vis-à-vis d'un changement de référentiel¹.

1. Il était alors communément admis que l'espace était rempli d'**éther**. L'existence de ce fluide permettait à la fois de justifier la transmission de la force gravitationnelle à distance, et servait de milieu de propagation à la lumière, de même que le son se propage dans l'air ou les ondes se propagent à la surface d'un milieu liquide.

Cet éther constituait alors un référentiel fixe, absolu, dans lequel la vitesse de la lumière était constante.

La Terre étant en mouvement par rapport à ce référentiel absolu lors de son orbite, Michelson construisit un appareil dans le but

Le principe de fonctionnement de cet interféromètre est encore utilisé aujourd'hui. En particulier, l'expérience Virgo en Italie, a pour but de détecter des ondes gravitationnelles à l'aide d'un interféromètre de Michelson dont les bras font plus de 3 km. Ces ondes ont été détectées pour la première fois en 2015 avec le détecteur américain LIGO et ont valu le prix Nobel de physique 2017 à Weiss, Barish et Thorne.



FIGURE 1 – Vue aérienne de l'interféromètre Virgo. Chaque bras de l'interféromètre fait 3 km.

I Un exemple d'interférences par division d'amplitude : un film de savon

Revenons sur l'exemple de la bulle de savon que nous avons évoqué précédemment et cherchons à comprendre pourquoi un tel système peut conduire à un phénomène d'interférences lumineuses.

On rappelle qu'une bulle de savon correspond à une lame d'eau stabilisée par deux couches d'acides gras possédant une partie hydrophile et une partie hydrophobe.

Une bulle de savon peut donc être modélisée par une lame d'indice n_{eau} dans l'air. Une onde incidente sur la première interface va donner naissance à une onde réfléchie et à une onde transmise : c'est donc un dispositif à **division d'amplitude**. L'onde transmise va elle-même également donner naissance à plusieurs ondes, comme l'illustre la figure ci-dessous.

Une onde incidente génère donc plusieurs ondes synchrones et cohérentes qui vont pouvoir interférer.

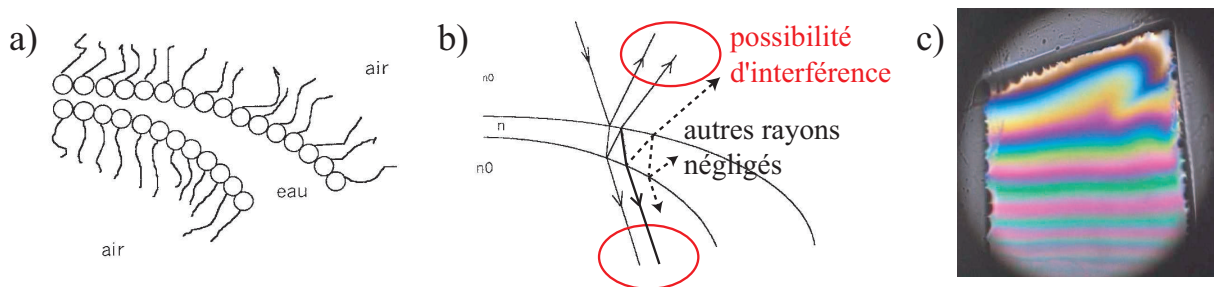


FIGURE 2 – Bulle de savon (a), sa modélisation optique (b), et observation en lumière blanche (c).

Nous avons montré que l'utilisation d'une source étendue conduisait à un brouillage des franges avec le dispositif des trous d'Young. Cependant, une bulle de savon éclairée par la lumière blanche du soleil qui est une source étendue donne lieu à des irisations dues à des interférences.

Afin notamment de comprendre ce phénomène, nous allons étudier un dispositif permettant de reproduire une lame d'indice n dans l'air : l'interféromètre de Michelson.

de déceler une variation de la vitesse de la lumière selon la direction de déplacement de la Terre. En collaboration avec Morley, il n'a cependant jamais réussi à mettre en évidence une quelconque différence de vitesse. C'est le résultat négatif de cette expérience qui a conduit Einstein à postuler que la vitesse de la lumière était identique quel que soit le référentiel considéré. Ceci constitue le fondement de la relativité restreinte.

II Description de l'interféromètre de Michelson

II.1 Généralités

L'interféromètre de Michelson est constitué essentiellement de deux miroirs plans (M_1) et (M_2) et d'une lame semi-réfléchissante (S_p) appelée **séparatrice**². Une onde lumineuse issue d'une source (S), incidente sur la séparatrice donne naissance à deux ondes de même amplitude.

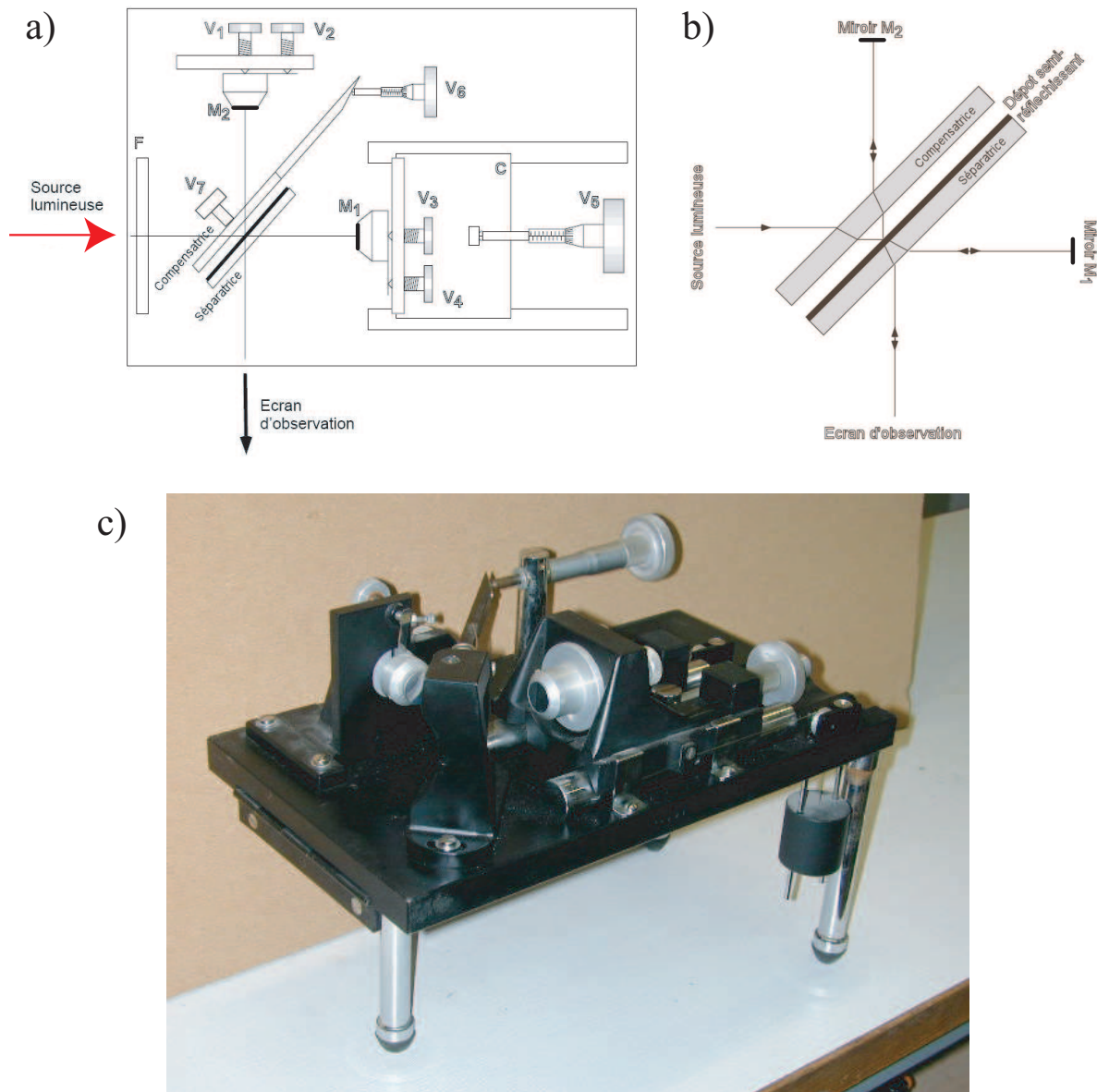


FIGURE 3 – a) Schéma d'un interféromètre de Michelson. b) Illustration de l'intérêt de la séparatrice. c) Photo d'un interféromètre de Michelson utilisé en travaux pratiques.

2. Pour séparer le faisceau lumineux incident en deux ensembles équivalents, on dispose sur une lame de verre à faces parallèles un dépôt métallique mince. Son épaisseur est calculée pour que les intensités des faisceaux réfléchis et transmis soient sensiblement égales et qu'ils subissent la même dispersion. Cet ensemble lame de verre et dépôt semi-réfléchissant forme ce que l'on nomme la *lame séparatrice*. Ce dispositif séparateur induit malheureusement un défaut important pour un interféromètre. Il engendre une dissymétrie entre les faisceaux : les rayons arrivant sur l'écran traversent trois fois la lame séparatrice s'ils se réfléchissent sur (M_1) alors qu'ils ne la traversent qu'une fois s'ils se réfléchissent sur (M_2). Pour rétablir la symétrie, on ajoute une seconde lame de verre nommée *compensatrice*, identique à la première (à ceci près qu'elle ne comporte pas de dépôt métallique) et placée parallèlement à celle-ci. La figure ci-dessus montre que les rayons lumineux traversent alors quatre fois une épaisseur de lame, qu'ils se réfléchissent sur M_1 ou sur M_2 . Il y a alors **compensation de la dispersion**.

On note 1 l'onde qui traverse la séparatrice, puis se réfléchit sur le miroir (M_1) avant de se réfléchir sur la séparatrice en direction de la zone d'observation³. On note 2 l'onde qui se réfléchit sur la séparatrice puis sur le miroir (M_2) avant de traverser la séparatrice en direction de la zone d'observation.

Les deux ondes issues de la même source sont synchrones et cohérentes et vont pouvoir interférer à la sortie de l'interféromètre après avoir parcouru des chemins optiques différents.

Les miroirs (M_1) et (M_2) sont orientables grâce à des vis permettant des réglages très fins. De plus, le miroir (M_2) est monté sur un chariot permettant de le déplacer parallèlement à lui-même.

Dans la suite, nous ne représenterons plus la compensatrice pour ne pas alourdir le schéma. Le champ d'interférence est représenté dans la figure ci-dessous dans un cas quelconque.

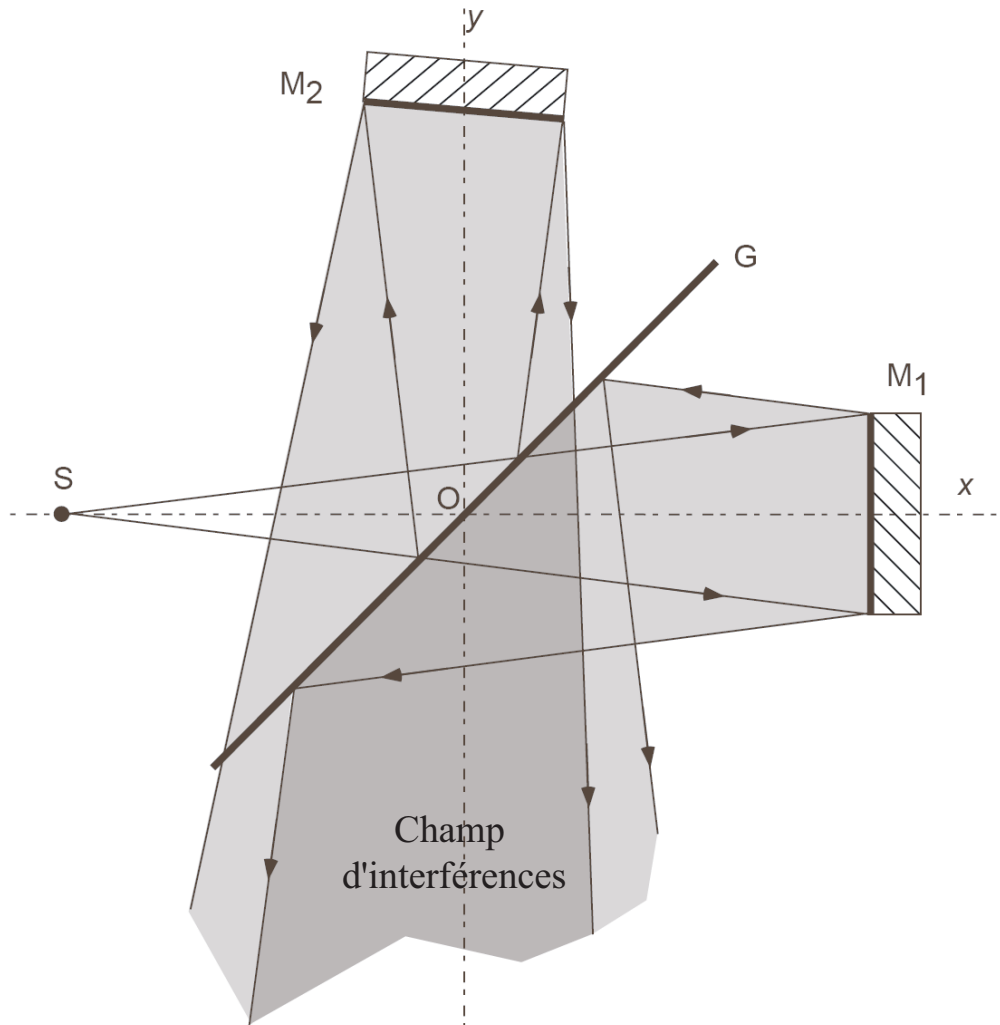


FIGURE 4 – *Champ d'interférences avec un interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle dans une configuration quelconque.*

II.2 Configurations particulières

L'interféromètre est un dispositif complexe et il n'est pas aisé d'en comprendre le fonctionnement dans le cas général. Nous allons donc nous intéresser en particulier aux figures d'interférence engendrées par un

3. On notera que chacun des deux rayons subit un même nombre de réflexions et de transmissions dans l'interféromètre. Il n'y a donc pas de déphasage autre que géométrique entre les deux rayons interférant sur l'écran.

interféromètre de Michelson éclairé par une source monochromatique⁴ et que des S dans les trois configurations suivantes :

- La configuration en **contact optique** : cas où les deux miroirs sont exactement symétriques par réflexion rapport à la séparatrice (les sources secondaires S_1 et S_2 sont confondues).
- La configuration en **lame d'air** : cas où les deux miroirs sont normaux à leurs axes (la direction S_1S_2 est orthogonale à l'écran).
- La configuration en **coin d'air** : cas où les centres des deux miroirs sont à égale distance du centre de la séparatrice O (la direction S_1S_2 est parallèle à l'écran).

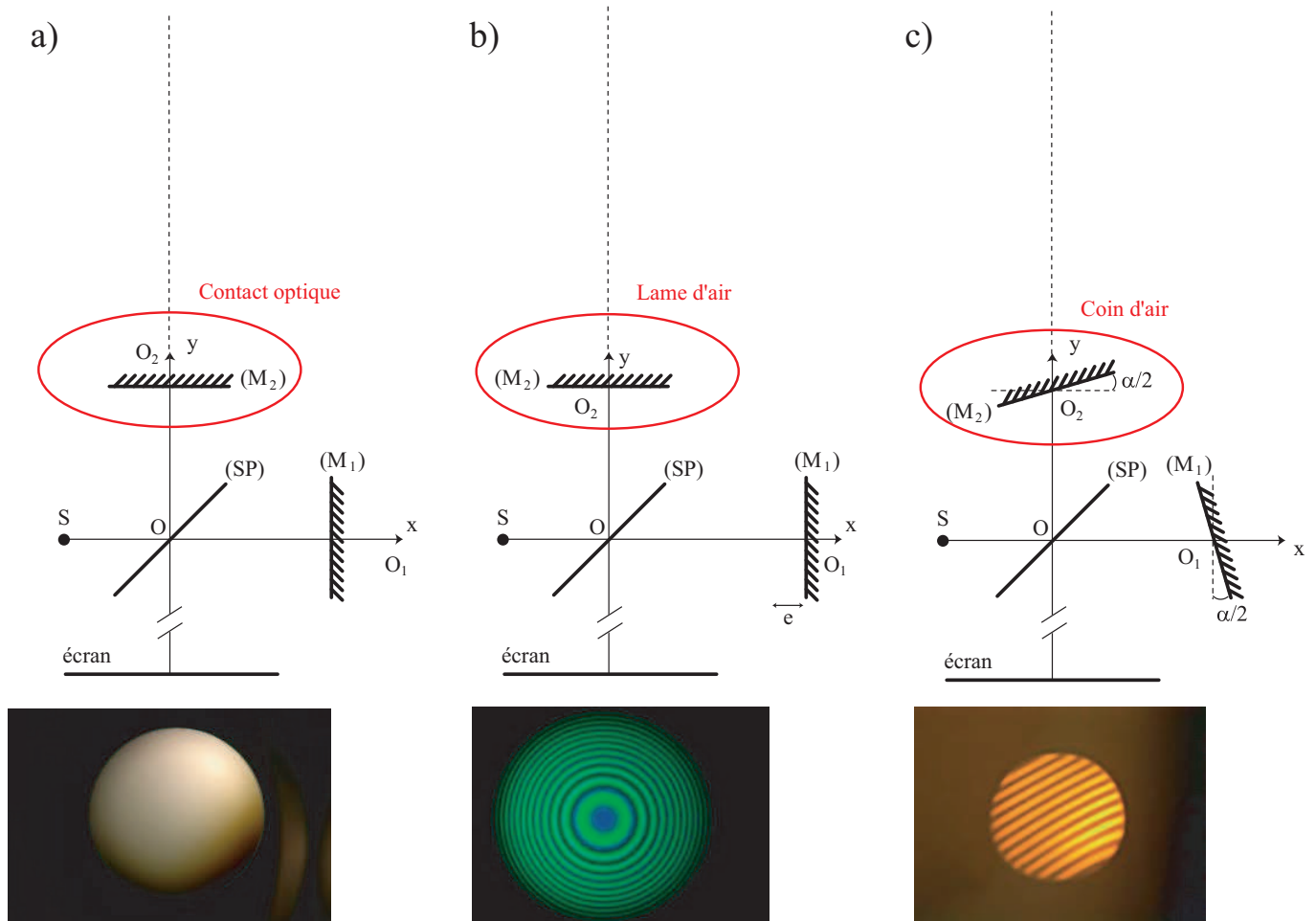


FIGURE 5 – Les différentes configurations particulières de l'interféromètre de Michelson éclairé avec une source ponctuelle monochromatique : le **contact optique**, pour lequel on observe une "teinte plate" (a), la **lame d'air** pour laquelle on voit des anneaux (b), et le **coin d'air** pour lequel on voit des franges (c).

Propriété

On peut caractériser les interférences en construisant un montage équivalent beaucoup plus simple :

- soit en construisant les sources secondaires S_1 et S_2 d'intensités respectives $I_0/2$, où I_0 est l'intensité totale pénétrant dans l'interféromètre.
- soit en construisant les miroirs équivalents à la lame d'air ou au coin d'air et en gardant le point source S (non représenté sur le schéma - cf Fig6.).

Dans la suite nous supposons que le milieu de propagation est de l'air dont nous assimilons l'indice à l'unité : $n_{air} = 1$.

4. On notera qu'il est beaucoup plus simple d'utiliser un laser pour observer les figures d'interférences car la longueur de cohérence d'une telle source vaut environ $L_c = 10\text{cm}$; tant que la différence de chemin optique est plus faible que cette longueur - ce qui est peu restrictif contrairement à d'autres sources pour lesquelles L_c est beaucoup plus faible - on observera bien les franges ou les anneaux.

III Configuration au "contact optique"

La configuration la plus simple est celle du contact optique pour laquelle l'image (M'_1) de (M_1) par la séparatrice correspond exactement avec le miroir (M_2). Dans ce cas, $S_1 = S_2$, et la différence de marche accumulée entre les deux rayons interférant sur l'écran en un point M vaut toujours :

Dans ce cas, la formule des interférences à deux ondes mutuellement cohérentes, de même intensité, nous permet d'écrire que :

On obtient un éclairage uniforme sur l'écran appelé "teinte plate".



IV Configuration en "lame d'air"

IV.1 Source ponctuelle monochromatique à distance finie

Dans cette configuration, (M_1) est normal à Ox et (M_2) à Oy . Nous noterons d_1 et d_2 les distances de M_1 et M_2 au point O . Suivons les deux rayons issus de S qui, après réflexion sur chaque miroir, viendront converger en un point M de l'écran :

- 1^{er} rayon $SBCM$: Après avoir traversé la lame séparatrice S_p , ce rayon se réfléchit en B sur le miroir M_1 . La partie BC semble alors provenir du point S'_1 , image de S par M_1 . Le rayon se réfléchit ensuite en C sur la lame S_p . La partie CM semble alors provenir de S_1 , image de S'_1 par la séparatrice S_p .
- 2^{ème} rayon $SADM$: Ce rayon se réfléchit sur la lame séparatrice S_p en A . La partie AD semble alors provenir du point S' , image de S par S_p . Le rayon se réfléchit ensuite en D sur M_2 . La partie DM semble alors provenir du point S_2 , image de S' par M_2 .

Analogie : Finalement, tout se passe comme si une source primaire unique S' (image de S par la séparatrice S_p) engendrait deux sources secondaires S_1 et S_2 vibrant en phase ($\Delta\varphi = 0$) obtenues par réflexion de S' sur un miroir imaginaire M'_1 (image de M_1 par S_p) et sur le miroir M_2 . Si les deux miroirs M'_1 et M_2 sont distants de $e = |d_1 - d_2|$, les deux sources secondaires sont séparées de $a = 2e$. Si l'on place un écran d'observation normalement à l'axe Oy à la distance D des sources, on se trouve dans le cas d'un écran placé orthogonalement à deux sources S_1 et S_2 cohérentes.

Tout comme dans le cas des trous d'Young, l'éclairage en un point M de l'écran ne dépend donc que de la différence de marche :

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right] \quad \text{avec} \quad \delta = (S_1M) - (S_2M)$$

Le problème étant à **symétrie de révolution** autour de l'axe des sources, la différence de marche δ ne varie pas si l'on fait tourner le point M d'observation autour du point O' choisi comme origine des coordonnées sur l'écran. La figure d'interférence doit donc nécessairement présenter des **anneaux** centrés sur le point O' .

Nous n'avons fait aucune supposition sur la position du plan d'observation et les anneaux sont donc visibles quelle que soit la position de l'écran. Les interférences sont donc **non localisées**.

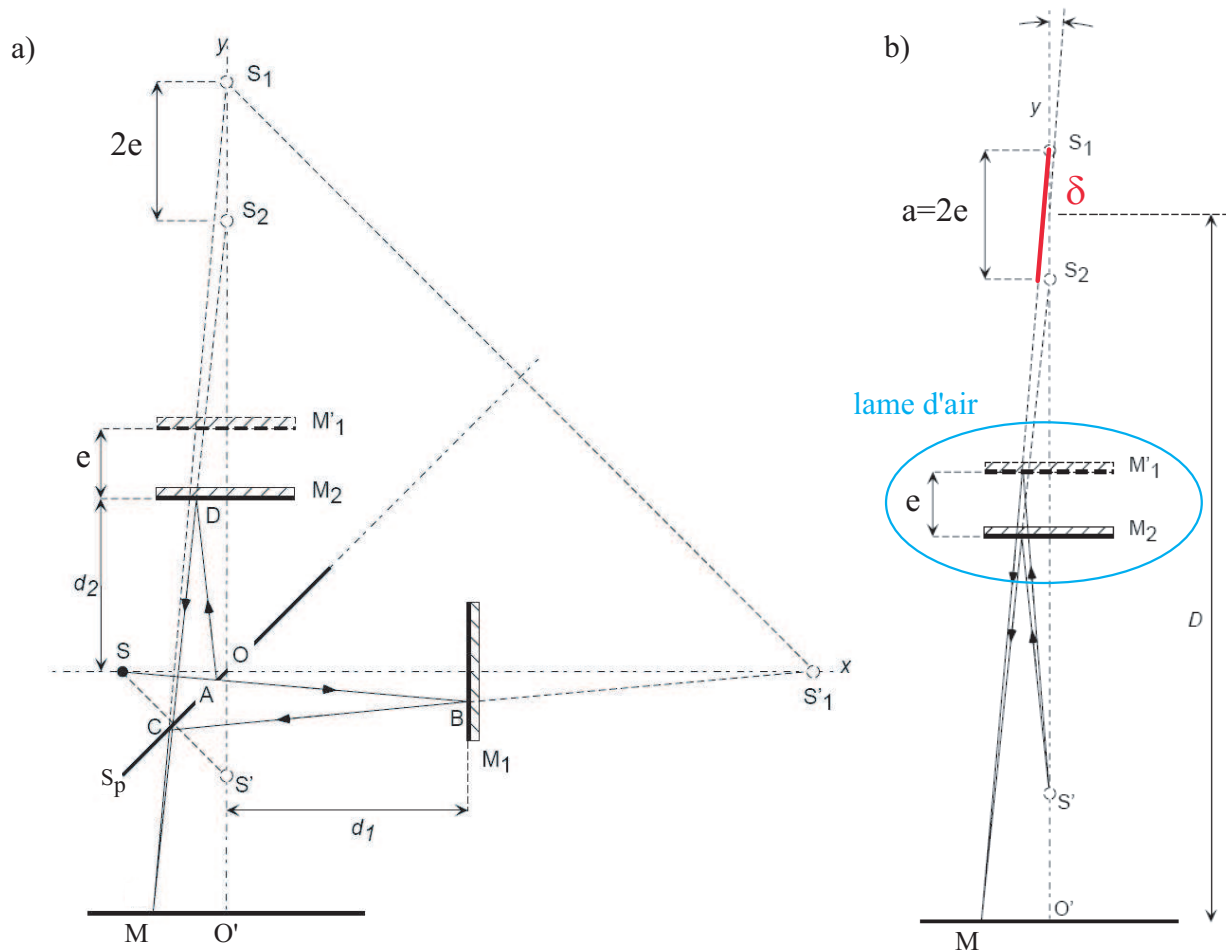


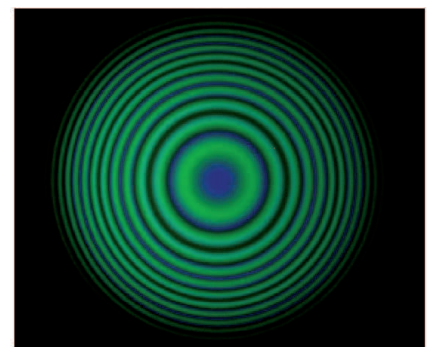
FIGURE 6 – Schématisation de l'interféromètre de Michelson en configuration de lame d'air.

IV.2 Source ponctuelle polychromatique (avec diaphragme fermé et sans filtre)

En présence d'une source ponctuelle polychromatique, chaque longueur d'onde se comporte comme une source incohérente avec les autres. On obtient donc une figure d'interférence correspondant à la simple superposition des intensités pour chaque longueur d'onde.

La position du centre des anneaux ne dépend pas de λ , mais l'angle correspondant à un anneau donné dépend de λ (revu après). On obtient donc des systèmes d'anneaux concentriques colorés.

Par exemple, si la source est une lampe à vapeur de mercure, qui comporte principalement une raie bleue et une raie verte, on observe des anneaux concentriques verts et bleus.



IV.3 Source monochromatique étendue (avec filtre et diaphragme ouvert) avec observation à distance finie (sans lentille de projection)

On rappelle qu'une source étendue est équivalente à un ensemble d'émetteurs ponctuels incohérents entre eux. Les intensités produites par chacun de ces points s'ajoutent donc directement.

Sur l'écran d'observation, chaque point source engendre un système d'anneaux. Ces points étant décalés, les centres des anneaux ne coïncident pas. Si la source est trop étendue, on obtient donc une figure d'interférence brouillée.

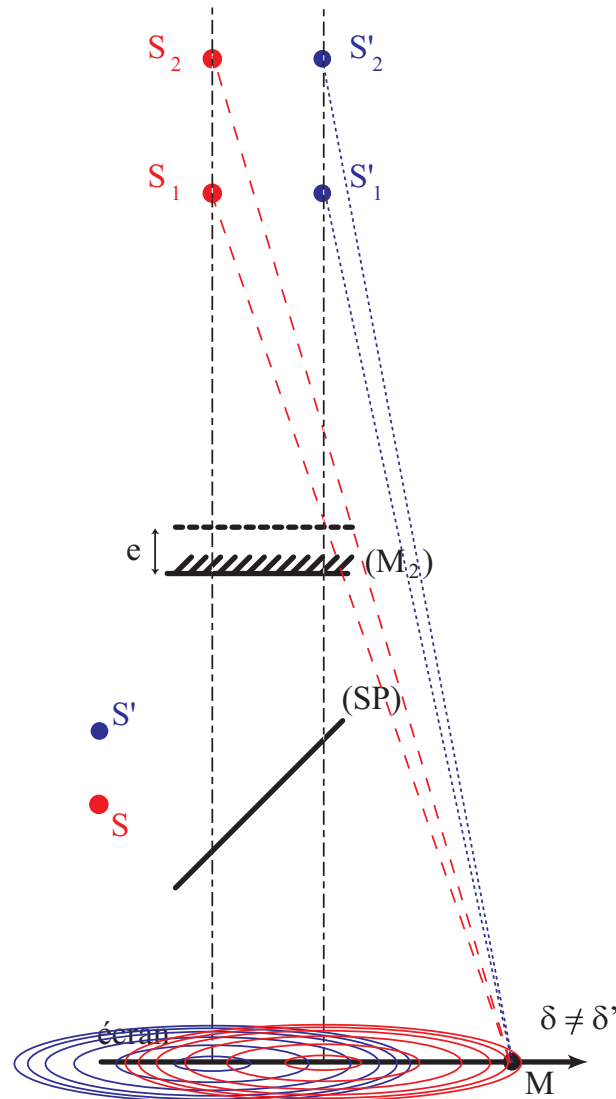
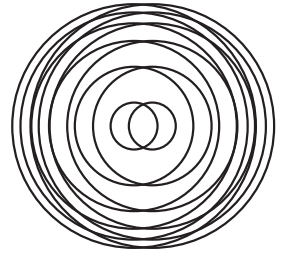


FIGURE 7 – En présence d'une source monochromatique étendue l'infini, l'état d'interférence en un point M de l'écran dépend du point source primaire considéré. Il y a donc brouillage.

L'effet de brouillage décrit ci-dessus est d'autant plus grand que la taille de la source est importante par rapport à la distance D d'observation.

Transition : Que se passe-t-il si on éloigne l'écran ?

IV.4 Source monochromatique étendue (avec filtre et diaphragme ouvert) avec observation à l'infini (avec lentille de projection)

a) Construction des rayons avec une observation à l'infini

Malgré l'existence d'un phénomène de brouillage en présence d'une source étendue, lorsque le plan d'observation est situé à l'infini, on peut tout de même observer des anneaux bien contrastés car la taille de la source reste nécessairement négligeable devant la distance d'observation. Chacun des systèmes d'anneaux se superpose alors exactement au précédent dans ce seul cas. Les interférences sont dites **localisées à l'infini**.

En pratique, on place l'écran dans le plan focal image d'une lentille convergente, comme le montre la figure ci-dessous.

b) Différence de marche

Quel que soit le point source considéré, incohérent avec les autres, la différence de marche peut être déterminée géométriquement sur la figure précédente en utilisant le théorème de Malus et le principe de retour inverse de la lumière. En effet, les ondes qui convergent dans le plan focal de la lentille de projection sont des ondes en phase perpendiculairement aux rayons lumineux avant la lentille. On obtient :

$$\boxed{\delta = 2e \cos i} \quad \text{Différence de marche en lame d'air} \begin{cases} \rightarrow \text{source ponctuelle} \\ \rightarrow \text{source étendue avec observation à l'infini} \end{cases}$$

Remarque

|| On retrouve le **contact optique** pour $e = 0 : \delta = 0$.

Cette expression est identique à celle obtenue dans l'exercice 2 du TD 20 dans le cas d'une *lame d'air* ($n = 1$). Faisons un parallèle entre les deux configurations.

c) **Caractéristiques des anneaux de la figure d'interférence**

- Ordre d'interférence p_k correspondant au $k^{\text{ième}}$ anneau :

Propriété

Lorsque la distance e séparant les miroirs augmente (avec $e > 0$), le rayon des anneaux augmente : ceux-ci semblent donc grossir en "sortant" du centre O' de l'écran. Bien entendu, l'effet inverse est observé si e diminue.

Pour obtenir le réglage de la teinte plate à partir du réglage en lame d'air, il suffit donc de diminuer l'ordre d'interférence au centre, c'est à dire de faire rentrer les anneaux.

- Détermination du rayon r_k du $k^{\text{ième}}$ anneau :

Bilan

Dans le cas d'un Michelson en lame d'air éclairé par une source étendue avec une observation à l'infini, la différence de marche est identique pour tous les points sources et vaut :

$$\delta = 2e \cos i$$

On obtient alors des anneaux d'égale inclinaison^a, bien contrastés et bien lumineux sur un écran placé dans le plan focal image d'une lentille (localisation à l'infini).

^a. On parle d'égale inclinaison car la différence de marche entre les rayons interférant en un point M du plan d'observation et issus de chacun des points de la source ne dépend que de l'angle i .

IV.5 Application à la mesure de longueur d'onde ou inversement à la mesure de distance**a) Mesure d'une longueur d'onde λ** **b) Mesure d'un écart $\Delta\lambda$ entre deux longueurs d'onde**

V Configuration en "coin d'air"

V.1 Source ponctuelle monochromatique à distance finie

a) Construction des sources secondaires

Dans cette configuration, les distances d_1 et d_2 du centre des deux miroirs au point O sont identiques. En revanche, les miroirs ne sont plus orthogonaux à leurs axes. Pour simplifier, nous supposons que chaque miroir fait le même angle $\alpha/2$ avec sa normale.

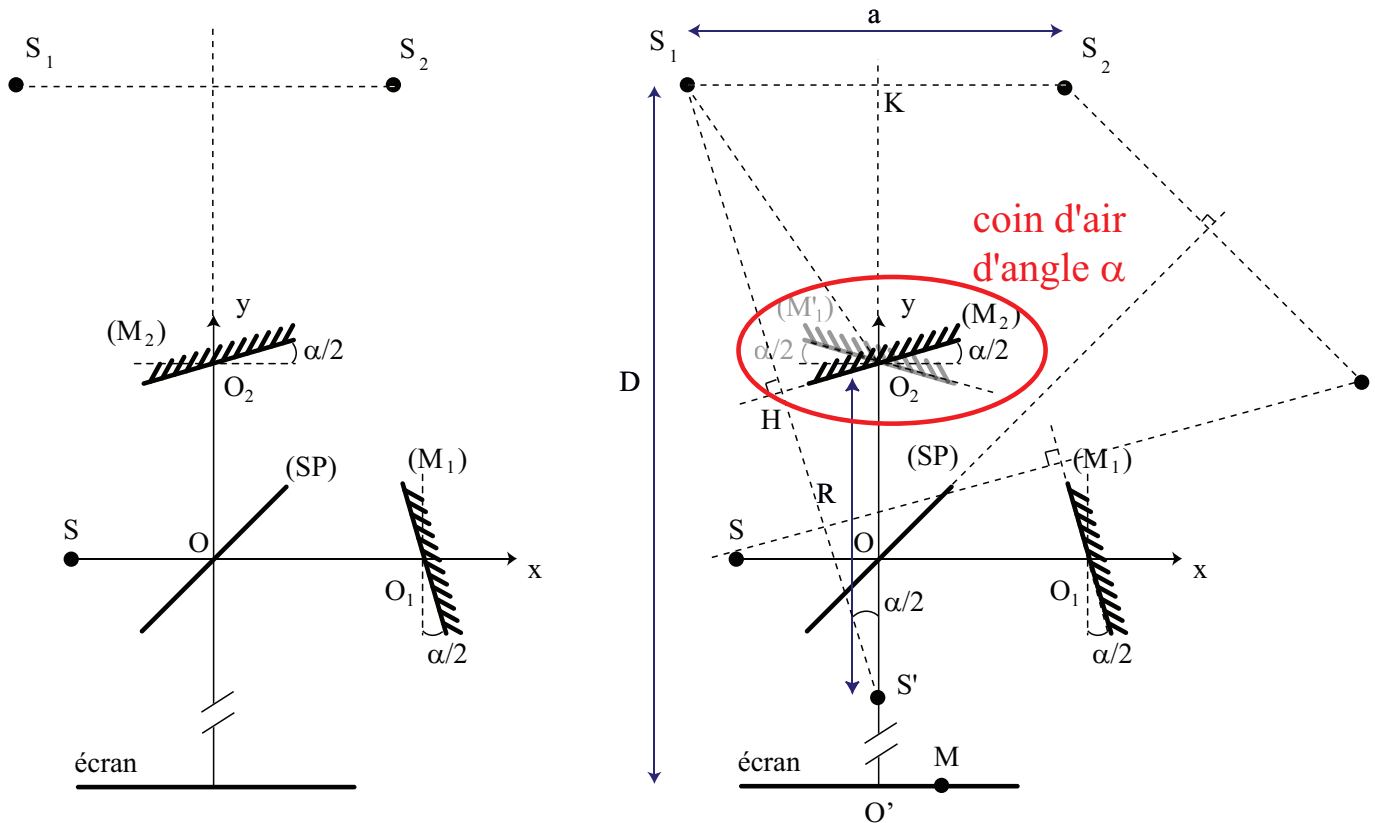


FIGURE 8 – Configuration de l'interféromètre de Michelson en "coin d'air".

Dans ces conditions, un raisonnement identique à celui mené pour la configuration en lame d'air permet d'affirmer que ce système est équivalent à un **coin d'air d'angle α** représenté à droite sur la figure ci-dessus.

La source unique S' engendre deux sources secondaires cohérentes et en phase ($\Delta\varphi = 0$) aux points S_1 et S_2 disposées symétriquement de part et d'autre de l'axe Oy .

b) Première approche : analogie avec les trous d'Young

La position de l'écran par rapport à l'alignement des points sources est identique au cas des trous d'Young et on peut en déduire directement qu'à une grande distance d'observation, on observe des **franges rectilignes parallèles à l'axe Δ commun à M_1' et M_2'** d'après la figure précédente. La frange centrale brillante est centrée sur O' .

Les interférences sont **non localisées** : la position de l'écran est donc quelconque à condition qu'il intercepte la zone de recouvrement des faisceaux.

Cependant, l'analogie avec les trous d'Young est difficile à exploiter quantitativement car la distance entre les miroirs et la source est souvent inconnue. On utilise donc la méthode ci-dessous, plus simple.

c) Méthode de calcul de la différence de marche (α faible)**V.2 Source monochromatique étendue avec observation au voisinage des miroirs sous incidence quasi normale**

Dans le cas d'une source étendue, on peut se reporter au cas des trous d'Young :

- Lorsque la source est étendue dans la direction perpendiculaire à l'axe des sources secondaires, c'est à dire suivant l'axe Δ commun aux deux miroirs, les franges restent non localisées.
- En revanche, lorsque la source est étendue dans la direction perpendiculaire à l'axe Δ commun aux deux miroirs, le théorème de localisation permet de montrer dans le schéma précédent (incidence des rayons quasi normale au coin d'air d'angle très faible) que les franges d'interférences sont localisées au voisinage des miroirs⁵.

Pour visualiser les franges, il faudra donc utiliser une lentille convergente permettant de conjuguer les miroirs avec un écran.

5. On le met bien en évidence expérimentalement.

Bilan

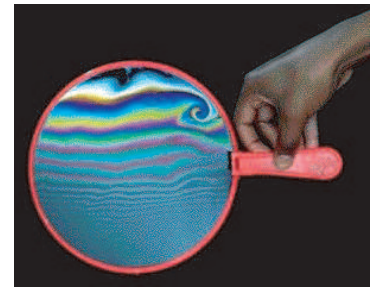
Dans le cas d'un Michelson en coin d'air éclairé par une source étendue, la différence de marche est identique pour tous les points sources et vaut :

$$\delta = 2\alpha X_{\text{miroir}}$$

On obtient alors des franges d'égale épaisseur, bien contrastées et bien lumineuses sur un écran placé dans le plan conjugué avec les miroirs à l'aide d'une lentille de projection (localisation au voisinage des miroirs).

V.3 Source polychromatique étendue

C'est notamment l'étude de la configuration en coin d'air qui permet d'expliquer l'observation de **franges irisées** sur les bulles de savon ou les taches d'huile éclairées en lumière blanche par une source non ponctuelle. Dans la figure ci-contre, un film mince est éclairé par une source de lumière blanche. On observe des franges irisées qui rendent compte de la variation d'épaisseur du film. Dans la partie supérieure, le film est si mince qu'on observe une frange noire.



Afin de pouvoir visualiser des irisations, d'après ce qui a été vu pour les trous d'Young, l'ordre d'interférence p doit être proche de l'unité⁶. Or, pour une lame d'épaisseur e :

$$p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2n_{\text{eau}}e}{\lambda}$$

On visualisera donc ce phénomène lorsque l'épaisseur du mince film d'eau est de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde de la lumière, soit $e \simeq qq \text{ } 100 \text{ nm}$. Les irisations sont visibles à la surface du film de savon puisque les interférences sont localisées au voisinage de l'interface, par analogie avec l'interféromètre de Michelson.

Remarque

En plaçant un biprisme à vision directe ou un spectromètre à fibre devant le blanc d'ordre supérieur, on obtient un spectre cannelé sur l'écran, comme nous l'avions expliqué dans le cours sur les trous d'Young.

6. On rappelle que deux sources cohérentes de lumière blanche donnent lieu à une frange centrale blanche correspondant à $p = 0$, encadrée par deux franges sombres, puis des irisations pour $p \simeq 1$ ou 2 , et enfin du *blanc d'ordre supérieur*.

VI Applications

Les interféromètres de Michelson sont toujours utilisés comme instruments de mesure de précision pour le contrôle de planéité de surface (détection de défauts d'épaisseur inférieurs à $\lambda/10$ pour des miroirs de télescopes grâce à un interféromètre de Michelson réglé proche de la teinte plate), pour la détection des ondes gravitationnelles (interféromètres de Michelson de plusieurs kilomètres de long).

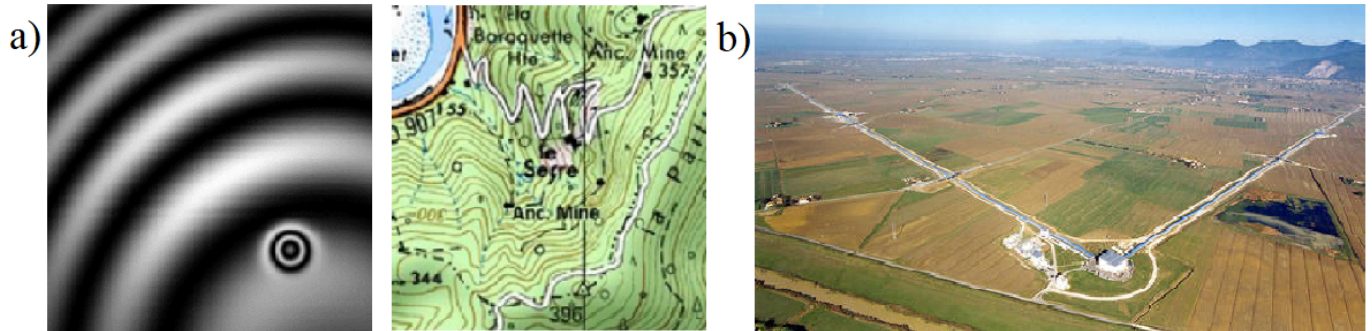


FIGURE 9 – Applications : a) Mise en évidence d'un défaut de planéité sur un miroir (les franges observées sont d'égale épaisseur, et celles-ci s'apparentent donc à des "lignes de niveau" sur une carte), b) Détecteur d'ondes gravitationnelles (LIGO aux Etats-Unis).

Conclusion

On retiendra les résultats fondamentaux suivants :

- La dégradation de la **cohérence temporelle** de la source lumineuse - c'est à dire un élargissement de son spectre $\Delta\nu$ - diminue la visibilité de la figure d'interférence.
- La dégradation de la **cohérence spatiale** de la source lumineuse - c'est à dire un élargissement spatial - diminue la visibilité de la figure d'interférence. Dans certains cas, mais pas toujours, la visibilité est maximale sur une surface particulière de l'espace : on dit alors que les franges sont *localisées* sur cette surface.
- L'étude des interféromètres en général et de l'interféromètre de Michelson en particulier est considérablement simplifiée en se ramenant à un **schéma équivalent** où sont positionnées les sources secondaires.
- L'interféromètre de **Michelson réglé en lame d'air** génère une figure d'interférence en forme d'anneaux d'égale inclinaison. Si la source lumineuse utilisée est étendue, ces anneaux sont localisés à l'infini.
- L'interféromètre de **Michelson réglé en coin d'air** génère une figure d'interférence en forme de franges rectilignes d'égale épaisseur. Si la source lumineuse utilisée est étendue, ces franges sont localisées sur les miroirs.

Configuration	Lame d'air	Coin d'air
schéma et figure d'interférences		
δ		
localisation avec source ponctuelle ?		
localisation avec source étendue ?		