

Optique ondulatoire

Chapitre 3 : Interféromètre de Michelson

Sommaire

Page

| 1 | Des 1.1 1.2 1.3 | cription de l'interféromètre de Michelson Présentation Schémas équivalents du Michelson Allure des franges d'interférences | 2 2 3 3 |
|---|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| 2 Lame d'air en source étendue 2.1 Localisation des françes à l'infini | | | 4 4 |
| | 2.1 | Calcul de la différence de marche | 5 5 6 |
| | 2.3 | 2.2.2 Preimer calcul 2.2.3 Deuxième calcul Figure d'interférence : « anneaux d'égale inclinaison » 2.3.1 Calcul de l'éclairement | 6 7 7 |
| | 2.4 | 2.3.2 Effet du « chariotage » | 8 8 |
| 3 | Coin 3.1 3.2 3.3 3.4 | n d'air en source étendue Localisation des franges sur les miroirs (admis) | 9 9 10 10 |
| 4 | App 4.1 4.2 | Aspect historique Michelson 4.1.1 L'expérience de MICHELSON et MORLEY 4.1.2 Les conséquences de l'expérience Applications classiques Assess | 10 10 10 12 12 |

L'interféromètre de MICHELSON a été inventé pour mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à « l'éther », supposé être - à l'époque - le milieu matériel de propagation des ondes électromagnétiques. Comme nous le verrons à la section 4.1, l'expérience ne put mettre ce mouvement relatif en évidence.

Toutefois, nous verrons que ses caractéristiques en font un dispositif interférentiel précis et permettant d'obtenir des franges très lumineuses. Pour cette raison, l'interféromètre de MICHELSON reste un outil encore très utilisé.

1 Description de l'interféromètre de Michelson

1.1 Présentation

L'interféromètre de MICHELSON, présenté sur la figure 1, est un interféromètre à division d'amplitude. Le faisceau lumineux primaire est dédoublé par une lame semi-réfléchissante LSR. Chaque partie du faisceau va ensuite se diriger sur un miroir. Le miroir M1 est orientable et peut être translaté, alors que le miroir M2 est seulement orientable. Les faisceaux retournent ensuite sur la lame semi-réfléchissante, ils se recombinent. Une partie sort de l'interféromètre alors que l'autre revient en direction de la source. L'interféromètre est complété, d'une part, par une lame de verre anticalorique VA qui absorbe une bonne partie des infrarouges contenus dans le faisceau lumineux incident, cela évite aux autres parties de l'interféromètre de trop chauffer. D'autre part, une lame compensatrice LC est présente sur un des deux faisceaux. Nous verrons son utilité ci-dessous.





FIGURE 1 – Interféromètre de MICHELSON

Sur la photographie de la figure 2, on peut voir les parcours suivis par les faisceaux lumineux. En particulier, c'est sur la face d'entrée de la lame semi-réfléchissante LSR que s'effectue la division d'amplitude.



FIGURE 2 – Parcours des faisceaux lumineux

Comme on peut le voir sur le tracé des faisceaux lumineux de la figure 2, le faisceau rouge sur schéma qui se réfléchit sur le miroir M1 que l'on peut translater (on dit encore charioter) effectue trois traversées de l'épaisseur de la lame semi-réfléchissante LSR. Il faut donc que le faisceau allant sur le miroir M2 subisse exactement le même parcours afin que seules les différences de position et d'orientation des deux miroirs soient créatrices de différence de marche. C'est la raison de la présence de la lame compensatrice LC sur le parcours du faisceau bleu sur le schéma.

L'interféromètre est utilisé dans deux configurations :

- Les deux miroirs sont perpendiculaires et la différence de marche est uniquement créée par une différence de distance de chaque miroir à la face réfléchissante de la lame LSR, on parle alors d'interféromètre de MICHELSON *en lame d'air*, ce que nous expliquerons ensuite. Dans le cas particulier où les deux miroirs sont toujours à la même distance de la face réfléchissante de la lame LSR, il n'y a pas de différence de marche, on dit qu'on est au *contact optique*.
- Les deux miroirs sont au contact optique mais ils ne sont plus tout à fait perpendiculaires. Un très petit angle de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} rad a été créé, on dit que l'interféromètre de MICHELSON est monté en *coin d'air*. La différence de marche provient de la différence d'orientation des faisceaux émergents.

1.2 Schémas équivalents du Michelson

Dans cette partie, on considère que la source qui éclaire le Michelson est ponctuelle.



FIGURE 3 – Les deux types de configurations du Michelson

1.3 Allure des franges d'interférences

Les surfaces d'égal éclairement, obtenues avec deux sources ponctuelles cohérentes, sont représentées ci-dessous. En plaçant un écran n'importe où dans le champ d'interférences, on peut observer des franges bien contrastées. Les interférences sont dites « délocalisées ». On verra qu'avec une source primaire étendue, cela n'est plus vrai.



L'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle donne des interférences délocalisées. On peut remarquer qu'il agit alors comme un diviseur de front d'onde... Dans la section suivante, on étudie le Michelson éclairé par une source étendue : les franges ne sont plus délocalisées. Elles ne sont visibles que sur un plan localisé dans l'espace. On montrera alors que ces figures sont obtenues par division d'amplitude.

2 Lame d'air en source étendue

2.1 Localisation des franges à l'infini

Une source étendue peut être vue comme un ensemble de sources ponctuelles, incohérentes entre elles : en tout point de l'espace, l'éclairement résultant est la somme des éclairements obtenus avec chaque source ponctuelle. Ainsi, les d'hyperboloïdes de chacune des sources ponctuelles étant décalées les unes par rapport aux autres, les franges se brouillent et le contraste résultant est nul (observable en TP).

Il existe néanmoins une zone de l'espace où les figures d'interférences des différentes sources ponctuelles se superposent toutes parfaitement, et où les franges ne se brouillent pas. En considérant deux rayons issus de deux points S et S' de la source étendue et de même inclinaison, montrons que les rayons « fils » qui émergent du Michelson se rencontrent à l'infini dans la même direction, c'est-à-dire au même point du plan focal image d'une lentille convergente :



FIGURE 4 – Lame d'air en source étendue

En lame d'air, et éclairé par une source étendue, le Michelson donne des franges localisées à l'infini. L'utilisation d'une source étendue permet d'obtenir des figures d'interférence très lumineuses.

Remarque : On réalise bien ici une division d'amplitude, car les rayons émergents qui interfèrent à l'infini sont bien issus d'un même rayon provenant d'un point de la source étendue.

2.2 Calcul de la différence de marche

2.2.1 Schéma équivalent

Le calcul de la différence de marche δ s'effectue beaucoup plus simplement en raisonnant sur la lame d'air constituée par le miroir M2 et le miroir fictif M'1 image de M1 par la lame semi-réfléchissante.



FIGURE 5 – Calcul de la différence de marche

2.2.2 Premier calcul

En considérant le schéma équivalent avec S, M2 et M'1, déterminons la différence de marche δ en un point M de l'écran situé dans le plan focal image de la lentille de projection :

 \triangleright

Nous constatons que la différence de marche est indépendante de la position du point source S dont est parti le rayon lumineux. Ceci explique la localisation des franges à l'infini lorsque l'on utilise une source étendue.

2.2.3 Deuxième calcul

Refaisons le calcul de la différence de marche, mais en considérant cette fois-ci les sources secondaires S_1 et S_2 , images de S à travers M'1 et M2 :

 \triangleright

2.3 Figure d'interférence : « anneaux d'égale inclinaison »

2.3.1 Calcul de l'éclairement

A partir de l'expression de la différence de marche entre deux rayons se croisant dans le plan focal de la lentille convergente, exprimons l'éclairement $\mathcal{E}(r)$ dans le plan focal en fonction de la coordonnée radiale r, repérée par rapport à l'axe optique de la lentille :

 \triangleright

La forme des franges est donnée par $\mathcal{E}(r) = \text{cte}$, soit par r = cte: les franges sont donc des anneaux de centre O. Par ailleurs, comme ces franges correspondent à une différence de marche et donc à un angle d'incidence i donné, on parle d'« anneaux d'égale inclinaison ».



FIGURE 6 – Anneaux d'égale inclinaison

Remarques :

- L'ordre d'interférence au centre vaut $p(0) = \frac{2e}{\lambda_0}$ et est donc quelconque. Avec $\lambda_0 = 600$ nm, il suffit de faire varier e de 150 nm pour passer d'une frange centrale brillante à une frange centrale sombre. Ce calcul montre comment un interféromètre de Michelon peut permettre de mesurer une distance macroscopique e avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde.
- Contrairement au cas des fentes d'Young, l'ordre d'interférence est plus faible à l'extérieur de la figure qu'au centre. En effet, étant donné que :

$$p(i) = \frac{2e\cos i}{\lambda_0} \tag{1}$$

une augmentation de *i*, entraîne une diminution du cosinus et donc un plus faible ordre d'interférence.

2.3.2 Effet du « chariotage »

Considérons les deux effets d'une diminution de la distance e: le suivi d'un anneau donné que l'on suivrait, tandis que le deuxième effet concerne l'évolution de l'ensemble de la figure d'interférence.

- A un anneau donné, correspond un ordre d'interférence fixé. On voit d'après l'équation (1) que, si l'on diminue la distance e, le cosinus de l'angle i augmente, ce qui correspond à une diminution de l'angle i: les anneaux vont se rétracter et disparaître par leur centre.
- En supposant que l'ordre d'interférence au centre de l'écran est entier (p(0) = k), déterminons le rayon r_n du n^e anneau visible :

 \triangleright

Le rayon du n^e anneau visible sur l'écran augmente lorsque e diminue : on verra de moins en moins d'anneaux sur l'écran.

Ce fait joue un rôle important pour le réglage de l'interféromètre de Michelson. Pour atteindre le contact optique, correspondant à e = 0, on déplace l'un des miroirs dans le sens qui fait diminuer le nombre d'anneaux - en les faisant disparaître par leur centre - et augmenter ainsi les rayons des anneaux restants. Lorsque le contact optique est atteint, l'ordre d'interférences est nul en tout point et l'éclairage est uniforme : on dit que l'on observe la *teinte plate*.



FIGURE 7 – Sur la photographie de droite, on est plus près du contact optique que sur celle de gauche. L'épaisseur de la lame d'air à ce moment est de l'ordre du micron voire en dessous.

2.4 Réglages en TP pour obtenir des interférences en lame d'air

- Réglage du faisceau incident : Il faut le former de manière à avoir une large gamme « d'angles ». Pour cela, il suffit de former l'image du filament sur le miroir M1 : au niveau des miroirs M2 et M'1, le faisceau est le plus convergent possible, et contient donc de nombreuses valeurs de différentes.
- Réglage du dispositif de projection sur l'écran : Une lentille convergente permet de projeter l'image dans son plan focal, où l'on placera donc l'écran. Plus sa focale est grande, plus la taille de la figure d'interférence sera grande, mais elle sera d'autant moins brillante (car la même énergie est alors répartie sur une plus grande surface).

3 Coin d'air en source étendue

3.1 Localisation des franges sur les miroirs (admis)

En considérant un même rayon issu d'un point S, et pris perpendiculaire au miroir (pour simplifier la construction), montrons que les rayons « fils » qui émergent du MICHELSON se rencontrent proche du coin d'air :



FIGURE 8 – Montage en coin d'air

Par construction graphique, on peut montrer qualitativement qu'un déplacement de la source ne modifie pas la figure d'interférence de manière significative, compte-tenu de la faible distance entre M'1 et M2. On l'admet ici.

En coin d'air, et éclairé par une source étendue, le MICHELSON donne des franges localisées autour du coin d'air.

Pour observer les franges sur un écran, il faut projeter l'image de M2 sur l'écran grâce à une lentille convergente.

3.2 Calcul de la différence de marche en un point M de l'écran

Pour simplifier cette étape du calcul, il vaut mieux raisonner avec un rayon lumineux issu de S et perpendiculaire à l'un des miroirs. L'idée clef est que l'on peut assimiler localement le coin d'air à une lame d'air. Le coin d'air apparaît alors comme une lame d'air d'épaisseur variable selon la distance x du point A à l'arête du coin :

\triangleright

3.3 Figure d'interférence : « franges d'égale épaisseur »

Donnons l'expression de l'éclairement en fonction de la position du point M(x, y) sur le plan des franges :

⊳

En coin d'air, une frange correspond à une valeur de l'épaisseur du coin : on parle de « franges d'égale épaisseur ».

3.4 Réglages en TP pour obtenir des interférences en coin d'air

- Réglage faisceau incident : Il faut le former de manière à éclairer les miroirs sur toute leur largeur. Pour cela, il suffit de placer la source dans le plan focal objet d'une lentille convergente.
- Réglage du dispositif de projection sur l'écran : Une lentille convergente pour projeter l'image de M2 sur l'écran. Il est essentiel de vérifier que la distance entre M2 et l'écran est supérieure à 4f', sinon il est impossible de former l'image sur l'écran (cf. TP méthode de Bessel en focométrie).

4 Applications de l'interféromètre de Michelson

4.1 Aspect historique

4.1.1 L'expérience de Michelson et Morley

L'interféromètre de MICHELSON a été mis au point en 1881 par le physicien américain ALBERT MICHEL-SON (1852-1931). Ce dernier l'a perfectionné en 1887 avec son compatriote EDWARD MORLEY (1838-1923). L'objectif de ces deux physiciens était de mettre en évidence l'existence d'un milieu matériel jusqu'alors hypothétique : *l'éther*. Ce milieu était, selon les théories de l'époque, le support des ondes électromagnétiques prévu théoriquement par la toute nouvelle théorie de l'électromagnétisme de MAXWELL. La lumière se déplaçait à la célérité $c \simeq 300\,000\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ par rapport à l'éther et la Terre sur son orbite autour du Soleil à $v \simeq 30\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Le rapport $\beta = v/c$ de ces deux vitesses est donc de l'ordre de 10^{-4} .

L'interféromètre était réglé au contact optique (à la meilleure précision possible de l'époque) avec le trajet LSR-M1 dans la direction de la vitesse v de la Terre sur son orbite. Le trajet LSR-M2 était donc perpendiculaire à la direction de déplacement de la Terre (voir le schéma de la figure 9 où sont indiquées les vitesses de la lumière que l'on obtient en appliquant la loi classique de composition des vitesses de NEWTON et de GALILÉE).



FIGURE 9 – L'expérience de MICHELSON et MORLEY

En notant l la distance commune aux deux miroirs, calculons la différence de marche entre les deux parcours :

 \triangleright

Pour améliorer la sensibilité du dispositif, celui-ci était tourné d'un angle de $\pi/2$, ce qui échangeait les rôles des deux chemins optiques suivis. Entre la première situation et la seconde, il y avait donc au total une variation $\delta_t = 2l\beta^2$ et par conséquent un changement de l'ordre d'interférences Δp tel que :

$$\Delta p = \frac{2l}{\lambda} \beta^2 = \frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \tag{2}$$

La longueur de chaque bras avait été choisie par MICHELSON et MORLEY de l'ordre de 11 m. Elle avait été très précisément réglée pour que $l = 2 \times 10^{7^{\circ}}$ pour une longueur d'onde dans le jaune ($\lambda \simeq 550$ nm). Comme le rapport β est de l'ordre de 10^{-4} , on en déduit que la variation de l'ordre d'interférence était :

$$\Delta p \simeq 0,4\tag{3}$$

On passe quasiment d'une figure d'interférences où une frange brillante est remplacée par une frange sombre $(\Delta p_{b\to s} = 0, 5)$. Cela était largement supérieur à la sensibilité du dispositif expérimental : $\Delta p_{\min} \simeq 0,005$. Or, en renouvelant un grande nombre de fois l'expérience, jamais aucun changement de cette nature n'a été observé.

4.1.2 Les conséquences de l'expérience

La conclusion de cette expérience - qui n'a pas été remise en cause tant elle avait été menée de façon rigoureuse et précise - était que les deux temps de parcours de la lumière étaient identiques, remettant ainsi en cause les bases de la mécanique de NEWTON.

Après les réflexions et les travaux de nombreux physiciens et, en particulier, de LORENTZ et POINCARÉ, ALBERT EINSTEIN proposa la théorie de la *Relativité Restreinte* en 1905 qui affirma l'abandon de la nécessité d'un milieu comme l'éther. Cette théorie postule que les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide à la vitesse c et cela quel que soit le mouvement de la source et le référentiel lié à l'observateur. On retiendra donc, que l'interféromètre de MICHELSON a eu une importance considérable dans l'évolution des théories en Physique avec la naissance de la Relativité Restreinte en 1905, théorie qui fut une premiere étape vers la théorie de la *Relativité Générale* d'EINSTEIN parue en 1916.

4.2 Applications classiques

L'interféromètre de MICHELSON est utilisé en astronomie pour déterminer le diamètre apparent d'une étoile ou bien pour mesurer la distance angulaire séparant les deux composantes d'une étoile double. On l'utilise aussi, toujours dans le domaine de l'astronomie, pour étudier la sismologie d'étoile et, en particulier, celle du Soleil (héliosismologie). En laboratoire, l'interféromètre de MICHELSON permet d'établir le profil d'une raie d'émission d'une source, ou bien encore de mesurer des indices optiques ou des épaisseurs. Mais une de ses applications les plus importantes est l'étude de surfaces réfléchissantes. On utilise, par exemple, une surface plane de très grande qualité pour le miroir M1 et la surface à tester à la place du miroir M2. On se place au contact optique, alors tout défaut de planéité de surface de taille de l'ordre de quelques dixièmes de la longueur d'onde sera perceptible par formation de franges.