

Les Interféromètres et leurs applications

Travail de recherche documentaire - Cours OTI 3^e année

Fabio Verna

4 février 2009

Résumé

Dans ce document, les interférences des ondes lumineuses et leurs utilisations sont passées en revue. En particulier, les interféromètres les plus connus sont introduits. Une attention particulière est posée sur l'interféromètre le plus célèbre : l'interféromètre de Michelson. Ce papier est rédigé dans le cadre du cours d'optique de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion (HEIG) de 3^e année de microtechnique.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Les interféromètres	4
2.1	L'interféromètre de Michelson	4
2.1.1	Historique	4
2.1.2	Principe de fonctionnement	5
2.1.3	Utilisation d'une lame compensatrice	7
2.1.4	Autres considérations	8
2.1.5	Application historique	8
2.2	L'interféromètre de Fabry-Perot	8
2.2.1	Historique	8
2.2.2	Principe de fonctionnement	9
2.3	L'interféromètre de Jamin	9
2.3.1	Principe de fonctionnement	9
2.4	L'interféromètre de Mach-Zehnder	10
2.4.1	Principe de fonctionnement	10
3	Applications	11
4	Conclusion	12

1 Introduction

En optique ondulatoire, l'interférométrie est l'art d'exploiter les interférences résultant de l'interaction entre plusieurs ondes électromagnétiques (OEM). Il faut pour cela des instruments spécifiques : les interféromètres. Toutes les ondes sont des fonctions sinusoïdales dont l'amplitude, l'orientation spatiale et la fréquence sont déterminées à un instant donné. Deux OEM qui se propagent sur le même axe s'additionnent pour former une nouvelle onde. Son amplitude change et peut même être nulle ; on parle alors d'interférence destructive. Considérons deux OEM de mêmes amplitude et fréquence interagissant ensemble. Alors, si elles sont en phase, l'amplitude de la résultante sera doublée. Au contraire, pour un déphasage de 180° , les ondes se détruisent.

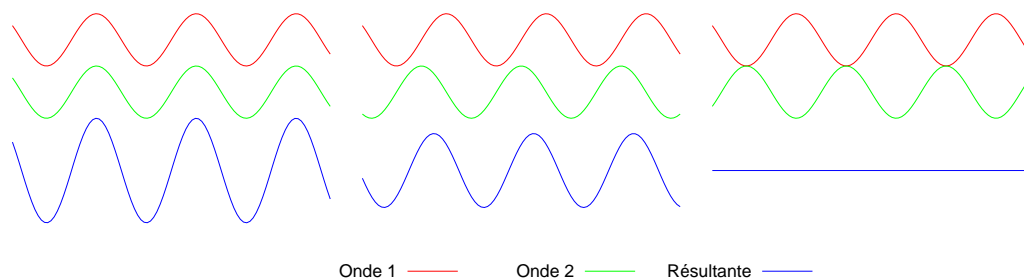


FIGURE 1.1 – Interférence entre deux ondes déphasées de 0° , 90° et 180° respectivement

L'interférométrie se base toujours sur ce principe fondamental. Cependant les techniques utilisées pour obtenir deux ondes déphasées se propageant sur un même axe varient.

2 Les interféromètres

Un interféromètre est une machine exploitant les phénomènes d'interférence qui ont été introduits. Il en existe de différents types.

2.1 L'interféromètre de Michelson

2.1.1 Historique

Albert Abraham Michelson était un physicien chimiste né en 1852 en Pologne (ex-Allemagne)[3]. Il a développé un interféromètre dont le but premier était de démontrer que la vitesse de la lumière n'est pas isotrope, comme on le pensait à l'époque. Au XIX^e siècle la théorie selon laquelle une onde électromagnétique peut se propager dans le vide n'était pas démontrée. Ainsi, certains avancèrent l'hypothèse selon laquelle une OEM se propage dans un support : l'éther [4]. Cependant, puisque la Terre possède une vitesse par rapport à cet hypothétique support, cela impliquerait que la lumière ne se déplace pas de la même façon dans tous les sens. L'expérience de Michelson se devait de montrer

cette différence de vitesse. Il construisit à cet effet son premier interféromètre en 1881. Ce dernier était constitué de deux bras orthogonaux de 30 cm de longueur. L'instabilité du montage et le trop grand impacte des grandeurs d'influence ne permit pas de conclure quoi que ce soit. En 1887, Michelson reprend son expérience à l'aide d'un collègue : Edward Morley. Le nouveau montage, mieux adapté, était très compliqué : des bras de 10m de long fixés sur un table en granite flottant dans un bassin de mercure. Aucune différence sur la vitesse de la lumière ne fut décelée. Ce résultat fut vécu comme un échec par Michelson. En réalité il venait de réaliser ce qui est sans doute la plus connue des expériences de la physique moderne [6].

2.1.2 Principe de fonctionnement

Considérons le schéma suivant :

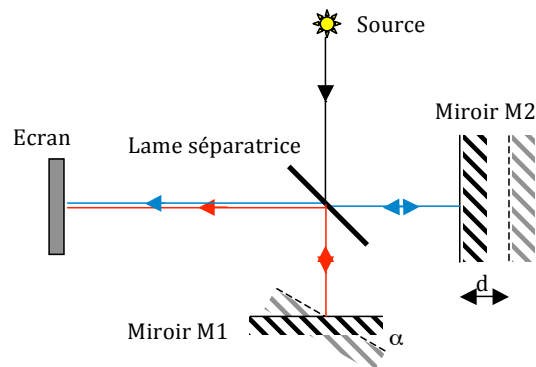


FIGURE 2.1 – Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson

Un rayon (en noir sur la Figure 2.1) est divisé en deux par une lame séparatrice (*Beam Splitter*). Alors, suivant la distance d du miroir M2 et l'angle α , les rayons qui ont été divisés (en bleu et rouge) parcourent un chemin optique différent. Autrement dit, ils ne sont plus en phase. En se rejoignant, ils interfèrent.

Considérons tout d'abord une source émettant un faisceau parallèle (un laser par exemple). Au départ, les miroirs sont placés à la même distance de la lame. Puis M2 est déplacé d'une distance d et M1 pivoté d'un angle α . La différence de chemin optique parcourue par les rayons divisés est (c.f. Figure 2.2) :

$$\delta L = 2d - 2x \tan(\alpha) \quad (1)$$

La différence de phase entre les rayons est :

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{\delta L}{\lambda} \quad (2)$$

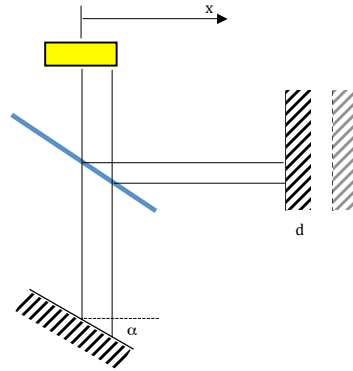


FIGURE 2.2 – L'interféromètre de Michelson avec une source parallèle

Où λ est la longueur d'onde de la source considérée. En interférant, l'amplitude varie selon :

$$\xi(x, \alpha, t) = \xi_0 \cdot (\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \varphi)) = \xi_0 \cdot (\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 2\pi \cdot \frac{2d-2x \tan(\alpha)}{\lambda})) \quad (3)$$

Pour des petits angles α , il vient :

$$\xi(x, \alpha, t) = \xi_0 \cdot (\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 4\pi \cdot \frac{d - x\alpha}{\lambda})) \quad (4)$$

Par identité trigonométrique (somme de sinus) il vient en outre :

$$\xi(x, \alpha, t) = 2 \cdot \xi_0 \cdot \sin(\omega t + 2\pi \frac{d - x\alpha}{\lambda}) \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + 2\pi \frac{d - x\alpha}{\lambda}) \quad (5)$$

Introduisons $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, le nombre d'onde¹. Il vient :

$$\xi(x, \alpha, t) = 2 \cdot \xi_0 \cdot \sin(\omega t + k(d - x\alpha)) \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + k(d - x\alpha)) \quad (6)$$

Lorsque M1 est parfaitement droit ($\alpha = 0$), toutes les ondes interfèrent de la même façon. Sur l'écran, on observe une tache lumineuse dont l'intensité varie de manière cyclique en fonction de la distance d . Dans ce cas, l'intensité lumineuse moyenne sur l'écran est donnée par (Réf. [1] p. 316) :

$$I = I_0 \cdot \cos^2(k \cdot d) \quad (7)$$

$$I_0 = \frac{2 \cdot \xi_0^2}{\sqrt{\mu/\epsilon}} \quad (8)$$

Où $\mu = \mu \cdot \mu_r$ est la perméabilité et $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ la permittivité dans le milieu considéré (Réf. [8], p. 38).

1. Dans la littérature, le nombre d'onde est parfois défini comme $\sigma = 1/\lambda$

Lorsque l'angle α varie, les interférences font apparaître des raies droites sur l'écran. Des raies sombres apparaissent à chaque fois que le déphasage est de 180° , ou encore lorsque la différence de chemin optique est celle d'une demi longueur d'onde. A l'inverse, des raies de maximum d'intensité apparaissent lorsque la différence de chemin optique est multiple de la longueur d'onde. La distance x de la m^e raie est donc :

$$m \cdot \lambda = \delta L \Rightarrow m\lambda = 2d - 2x \cdot \tan(\alpha) \Rightarrow x = \frac{2d - m\lambda}{2 \tan(\alpha)}, \forall m \in \mathbb{N} \quad (9)$$

La distance i entre deux raies, appelée interfrange, est donc :

$$i = \Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{2d - (m+1)\lambda}{2 \cdot \tan(\alpha)} - \frac{2d - m\lambda}{2 \tan(\alpha)} \quad (10)$$

Pour des angles α petits, il vient finalement :

$$i = \Delta x = \frac{\lambda}{2 \cdot \alpha} \quad (11)$$

Pour mesurer l'angle d'inclinaison du miroir M1, il suffit donc de compter le nombre de franges sur une distance donnée. Remarquons encore que le déphasage sur les ondes causé par les réflexions n'a pas d'influence sur les formules : chaque onde divisée subit deux réflexions, soit un déphasage de 360° .

Considérons une source non parallèle. Pour que le phénomène soit observable, il faut disposer une lentille convergente à la sortie de l'interféromètre et placer un écran à la distance focale. Alors, la source est constituée de séries de rayons parallèles distribués dans toutes les directions. Tous les rayons parallèles entre eux focalisent en un seul point. Une autre série de rayons parallèles d'orientation différente focalisent en un autre point. Au final, il se forme des franges circulaires connues sous le nom de franges de Haidinger. En déplaçant M2 d'une distance Δd , les franges sur l'écran défilent. En comptant les franges défilant sur un point de l'écran, il est possible de déduire la distance de déplacement Δd (sans démonstration) :

$$\Delta d = \frac{\Delta m \cdot \lambda}{2} \quad (12)$$

2.1.3 Utilisation d'une lame compensatrice

Considérons la Figure 2.3. Le rayon passant par M2 traverse trois fois la lame séparatrice, alors que le rayon passant par M1 n'y passe qu'une fois. Autrement dit le chemin optique d'un des rayons est allongé. Afin de compenser cette différence, une 2^e lame est insérée. Elle doit être de même matière, épaisseur et inclinaison que la première (toute-fois les petits défauts peuvent être compensés en changeant légèrement l'inclinaison de la lame).

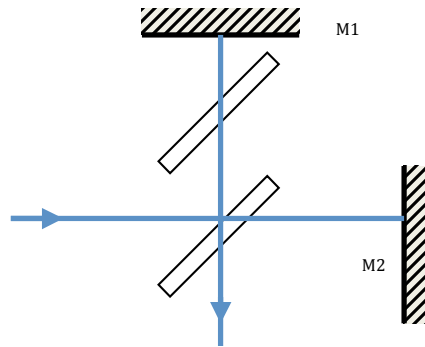


FIGURE 2.3 – La lame compensatrice

2.1.4 Autres considérations

Le fait de déplacer le miroir M2 d'une distance d revient à placer une lame virtuelle sur le trajet des rayons de même indice de réfraction que le milieu considéré. C'est pourquoi un tel montage est appelé "montage en lame d'air". De même, une rotation de M1 est appelé "montage en coin d'air". Enfin, puisque la lame séparatrice divise un rayonnement, l'interféromètre de Michelson est dit "à division d'amplitude".

2.1.5 Application historique

En 1892, Michelson utilisa le mètre étalon du Bureau international des poids et mesures pour valider sa machine. Il détermina ainsi la longueur d'un étalon de 10cm à quelques centièmes de microns près. La technique du comptage des franges s'avéra extrêmement efficace. Il s'agit d'une façon de mesurer un déplacement plus exacte qu'avec une règle gravée [6].

2.2 L'interféromètre de Fabry-Perot

2.2.1 Historique



FIGURE 2.4 – L'interféromètre original de Fabry-Pérot [5]

Alfred Pérot, né en 1863 à Metz (Fr), était astronome physicien qui consacra une partie majeure de ses travaux à l'optique. Charles Fabry, né à Marseille en 1867, était docteur ès sciences et professeur de physique. Il dirigea également un institut d'optique

à la Sorbonne. Fabry et Pérot ont proposé lors de la première moitié du XX^e siècle une façon de construire un interféromètre [5].

2.2.2 Principe de fonctionnement

A l'origine, l'interféromètre de Fabry-Pérot était composé de deux miroirs partiellement réfléchissants se faisant face. L'une des lame peut être réglée en angle de sorte à la rendre parfaitement parallèle à l'autre. Actuellement, les miroirs peuvent être remplacés par deux lames à haut coefficient de réflexion.

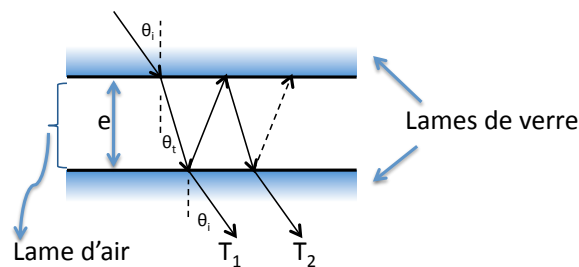


FIGURE 2.5 – Principe de l'interféromètre de Fabry-Pérot

Un rayon incident arrive sur la première surface et la traverse. Une partie traverse la 2^e lame alors qu'une autre partie est réfléchi. Le rayon réfléchi passe à nouveau partiellement au travers de la lame 2 après réflexion sur la lame 1 et ainsi de suite. Ainsi, à chaque passage une partie du faisceau s'échappe en créant des autre faisceaux. Chacun est séparé par un aller-retour entre les lames qui allonge le chemin optique. Pour chaque rayon entrant dans l'interféromètre d'intensité I_0 , les rayons transmis T_i ont une intensité donnée par (Réf. [8], p.8) :

$$I_i = I_0 \cdot T^2 \cdot R^{(i-1) \cdot 2} \quad (13)$$

Où T et R sont les coefficients de transmission et de réflexion respectivement. On comprend dès lors mieux pourquoi un haut coefficient de réflexion est nécessaire. Pour un verre normal ($R = 4\%$), le rayon transmis T_2 a déjà une intensité environ mille fois plus faible que le rayon initial. Enfin, les rayons transmis interfèrent à l'infini et forment des anneaux.

2.3 L'interféromètre de Jamin

2.3.1 Principe de fonctionnement

L'interféromètre de Jamin est une forme primitive d'interféromètre du XIX^e siècle. Deux lames de verre planes aluminées sur un côté se font face (Figure 2.6). Un faisceau incident sur la première lame se partage en un faisceau réfléchi par la face avant et un faisceau réfléchi par la face arrière. Ces deux faisceaux subissent eux aussi le même partage

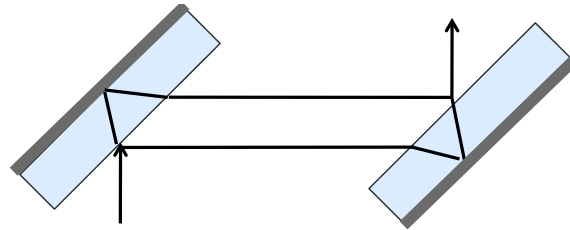


FIGURE 2.6 – Principe de l'interféromètre de Jamin

sur le 2^e miroir. Le rayon réfléchi sur la face avant du 1^e miroir et par la face métallisée du 2^e miroir parcourt le même chemin optique que le rayon réfléchi sur la face arrière du 1^e miroir puis par la face avant du 2^e miroir. Ces deux rayons ont un déphasage nul si les miroirs sont rigoureusement parallèles [6]. Remarquons que les rayons subissent de nombreuses réflexions et réfractions mais seuls les rayons susmentionnés sont considérés. En effet, les autres faisceaux ont une différence de marche trop grande pour interférer et donnent lieu à un fond uni. En inclinant un des miroirs, les faisceaux divisés parcourent des chemins différents. Ils émergent de l'interféromètre et interfèrent à l'infini. La figure d'interférence est composée de raies verticales équidistantes séparées par une distance α :

$$\alpha = \frac{\lambda}{e \cdot 2 \cdot \theta} \sqrt{2n^2 - 1} \quad (14)$$

Où e et n sont l'épaisseur et l'indice des lames, et θ l'angle entre les normales à leur surface. Remarquons enfin que la différence de chemin optique parcouru δl ne dépend pas de l'inclinaison des rayons (Réf. [2], p.89).

2.4 L'interféromètre de Mach-Zehnder

2.4.1 Principe de fonctionnement

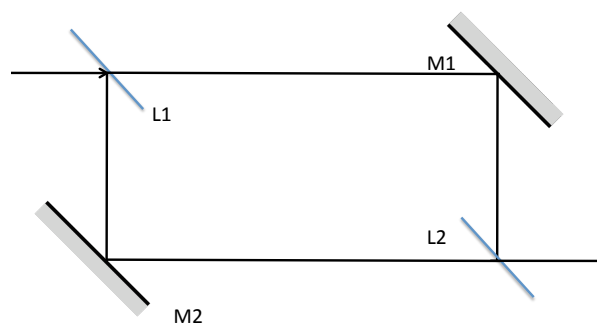


FIGURE 2.7 – Principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder

L'interféromètre de Mach-Zehnder est essentiellement une modification du montage de Jamin. Quatre éléments distincts sont utilisés plutôt que les quatre surfaces des deux

lames de l'interféromètre de Jamin (Figure 2.7). Dès lors, il est possible de fortement séparer les deux faisceaux : une source collimatée est divisée en deux faisceaux par la lame séparatrice L_1 qui parcourent des chemins distincts via les miroirs M_1 et M_2 . Ils sont recombinaés sur la lame L_2 . Avec un ajustement correct, les deux rayons parcourent exactement le même chemin optique et ne sont donc pas déphasés (Réf. [1], p.334).

3 Applications

Les interférences des ondes lumineuses comportent des applications concrètes qui font des interféromètres des instruments indispensables. **L'interféromètre de Mach-Zehnder** est une référence dans l'étude de l'aérodynamique. Puisque les faisceaux divisés peuvent être très distants, alors ils peuvent traverser deux milieux différents. En observant la figure d'interférence, il est possible d'en déduire la densité de l'air ainsi que sa pression et sa vitesse [1]. Un ajustement particulier des miroirs permet de former la figure d'interférence directement sur l'objet étudié en soufflerie [6]. De plus, contrairement à l'interféromètre de Michelson, les rayons ne parcourent pas un aller-retour et peut donc être plus pratique à utiliser. **L'interféromètre de Michelson** reste la référence en la matière. Il est particulièrement utile pour des montages expérimentaux car il est très facile à régler et facile à comprendre.

D'une manière générale, les interférences de la lumière permettent de mettre en évidence des très faibles variations de chemin optique. Autrement dit il est possible de mesurer des déplacements. Une autre des grandes applications est le contrôle des surfaces optiques. Imaginons le cas d'un interféromètre réglé exactement, de sorte que le déphasage entre les rayons divisés soit nul. Dès lors, si l'une des surface réfléchissante n'est pas parfaitement plane, une figure d'interférence apparaît. Il est ensuite possible d'en déduire le profil de la surface à tester. Cette technique nécessite un étalon parfaitement plan comme référence. De même, une application similaire permet de déterminer le rayon de courbure d'une surface.

En interposant une lame de verre ou un gaz sur le chemin d'un des rayon divisé, la lumière parcourt un chemin plus long qui est proportionnel à l'indice de réfraction du milieu considéré. La figure d'interférence permet de calculer cet indice de réfraction. La première application de **l'interféromètre de Jamin** a précisément été celle-ci : les rayons passent dans des cavités remplies de gaz, dont l'une est remplie d'un gaz de référence dont l'indice est bien connu.

Une application plus surprenante est la tentative de détection des ondes gravitationnelles. Albert Einstein avait prédit théoriquement l'existence d'ondes de gravitation se propageant à la vitesse de la lumière. Une onde gravitationnelle est une perturbation du champ de gravité qui se propage dans l'espace. Plusieurs instituts de recherche de part le monde essaient d'utiliser l'interférométrie pour mettre en évidence ces ondes. Un

de ces projets² est constitué d'un interféromètre de Michelson de tous les superlatifs. Chaque bras fait 3km de long et est combiné avec d'autres éléments optiques de sorte à rallonger le chemin optique à une distance équivalente de 100km. La lumière se propage dans des tubes dans lesquels règnent un vide extrêmement poussé³. De plus, toutes les pièces sont mécaniquement isolées des secousses sismiques. La source lumineuse est un laser très puissant stabilisé en fréquence. Dès lors, les variations d'intensité sur la figure d'interférence sont uniquement liées aux ondes gravitationnelles qui interagissent de manière différente sur les deux bras. L'ordre de grandeur de la différence de marche est de $10^{-21}[m]$ et pourrait constituer la mesure physique la plus précise jamais réalisée. En effet, les ondes gravitationnelles proviennent de supernovae en général situées (heureusement) dans d'autres galaxies et les perturbations sur les faisceaux sont infinitésimales[6][9].

4 Conclusion

L'interférométrie a prouvé qu'elle est bien plus qu'une curiosité physique. La panoplie des interféromètre est extrêmement développée et les applications nombreuses. Dans ce document, il a été possible de comprendre le fonctionnement général de ces appareils. Cependant, l'univers des interféromètres a été à peine introduit. De la mesure de distance, au contrôle des surfaces en passant par des applications astronomiques, difficile d'imaginer un domaine aussi varié et plein de promesses. Pour les applications non-triviales, la théorie à appliquer peut vite devenir très compliquée. Il faut dans ce cas se référer à des documents spécifiques plus appropriés.

2. Le projet Européen Virgo [9]

3. Moins de $10^{-9}mbar$ [9]. On parle alors *d'ultra-vide*.

Références

- [1] *Applied Optics and optical engineering*, Ed. Kingslake, Vol. IV, 1967
- [2] Maurice Françon, *Les Interférences lumineuses et leurs applications*, Centre de documentation universitaire, 1969
- [3] <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/charrier/tp/michelson/histori.html>
- [4] *Wikipedia*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley>
- [5] <http://www.sabix.org/bulletin/b18/interferometre.html>
- [6] Patrick Bouchareine, *Techniques de l'Ingénieur (réf R6475)*
- [7] Michel Henry, *Techniques de l'Ingénieur (réf A191)*
- [8] André Perrenoud, *Physique 2, Ondes*, Ed. Nov. 2008, Heig-Vd
- [9] http://www.ego-gw.it/virgodescription/francese/pag_4.html