

Titre : L'interféromètre de Michelson

Présentée par : Mestre Eloïse

Rapport écrit par : Mestre Eloïse

Correcteur : Pauline Yzombard

Date : 26/05/2020

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Tout-en-un physique PC-PC*	Sanz	Dunod	2014
Cours de Clément Sayrin			
Poly de TP : Interférence			
TP OCT personnel sur le Drive			

Plan détaillé

Niveau : CPGE

Prérequis : Intérférences

- I- Présentation du dispositif
- II- Différentes configurations
- III- Application à la spectroscopie

Intro : L'interféromètre de Michelson est un dispositif optique permettant d'observer des interférences à deux ondes à partir d'un seul faisceau incident. Michelson reçu le prix Nobel en 1907 pour cette invention.

I- Présentation du dispositif

1) Présentation

Diapo : schéma du dispositif expérimental

Il est composé de 3 sys optiques :

- un miroir M_1 fixe
- un miroir M_2 mobile
- un dispositif séparateur : séparatrice (= lame semi-réfléchissante 50/50) + compensatrice

Les vis sur les miroirs permettent le réglage de l'inclinaison de ces derniers. La vis micrométrique permet de rapprocher ou éloigner le miroir M_2 . L'orientation du dispositif expérimental par rapport à l'axe d'entrée du Michelson est également réglable et doit être = à 45° expérimentalement.

2) Principe et intensité en sortie

Dans la pratique, on va utiliser une source spatialement étendue. Cette source sera monochromatique jusqu'au III-

Un rayon incident est envoyé sur le dispositif séparateur qui le sépare en 2 faisceaux d'intensité égale = la moitié de l'intensité du rayon incident I_0 .

Un faisceau (1) est transmis, réfléchi sur M_2 et réfléchi vers la sortie par la séparatrice.

L'autre faisceau (2) est réfléchi par la séparatrice, réfléchi par le miroir M_1 et transmis par la séparatrice en direction de la sortie de l'interféromètre.

A la sortie du Michelson, l'intensité observée est :

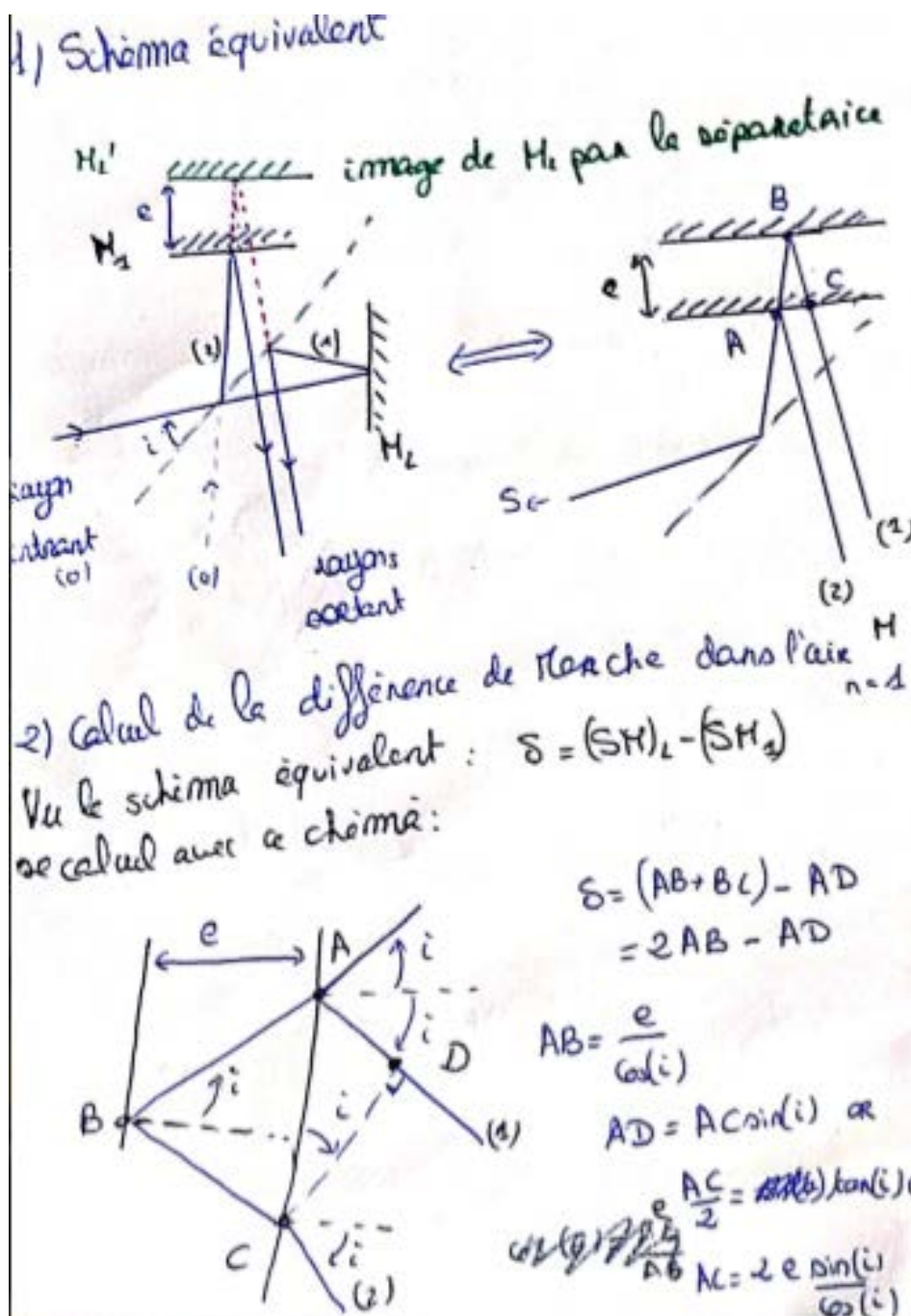
$$I = \frac{I_0}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \right)$$

L'intensité en sortie dépend de la distance parcourue par les deux faisceaux. La détermination de δ permettra de déterminer la figure d'interférence en fonction des conditions expérimentales.

II- Différentes configurations

A. lame d'air

Configuration lame d'air : M_1 et M_2 sont perpendiculaires



$$\delta = \frac{2e}{\cos(i)} - \frac{2e \sin(i)}{\cos(i)} \quad \text{et } \sin'(i) = 1 - \cos'(i)$$

$$= \frac{2e}{\cos(i)} (1 - 1 + \cos'(i)) = \underline{2e \cos(i)} \quad \text{si}$$

donc $I(H) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi e \cos(i)}{\lambda_0} \right) \right)$ pour source monochrom.

3) Figure d'interférence

Expérimentalement

L'intensité au point H à la sortie de l'interféromètre ne dépend que de l'angle incident d'un rayon de la source étendue et non de la pos. de la source.
Les franges observées admettent une symétrie de rotation autour de l'axe M_2H_1' : ce sont des anneaux d'égal inclinaison.

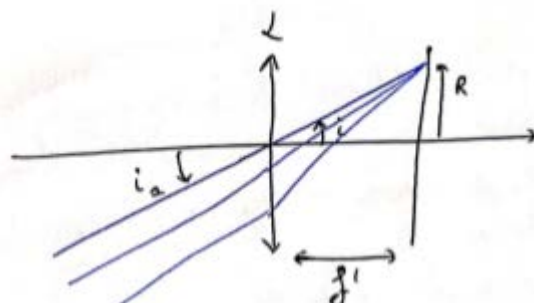
anneaux d'égal inclinaison

L'ordre d'interférence $p(H) = \frac{\delta}{\lambda_0}$ ne dépend que de i .
→ une frange brillante (ou sombre) donnée correspond à la même valeur de i . * Slide

Diapo : Figure d'interférence du lame d'air

Expérimentalement : on constate que plus on éloigne le lieu d'observation des interférences de la sortie du Michelson, plus la figure est contrastée → **Interférences à l'infini**

Expérimentalement, on ajoute une lentille de focale f' à la sortie du Michelson et on observe la figure d'interférence à son foyer



on peut déterminer le rayon d'un anneau d'ordre:

$$p_0 = \frac{2e \cos(i_1)}{\lambda_0} \approx \frac{2e}{\lambda_0} \left(1 - \frac{i_1^2}{2}\right)$$

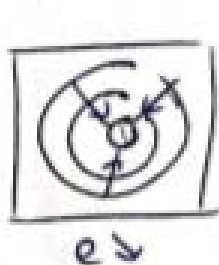
or $i_1 \approx \tan(i_1) = \frac{n}{f'}$ donc $p_0 = \frac{2e}{\lambda_0} \left(1 - \frac{n^2}{2f'^2}\right)$

$$r_1 = f' \sqrt{2 \left(1 - \frac{\lambda_0}{2e} p_0\right)}$$

Le 2^e anneau correspond à l'ordre $p_0 - 1$ et donc le m^{ième} à $p_0 - m + 1$ de rayon $r_m = f' \sqrt{2 \left(1 - \frac{\lambda_0}{2e} (p_0 - m + 1)\right)}$

regardons l'évolution du rayon d'un anneau
"f" de e:

Avec la formule de r on voit que $r \downarrow$ qd $e \downarrow$ et $r \uparrow$ qd $e \uparrow$ un anneau donnée rétrécit et finit par disparaître au centre.



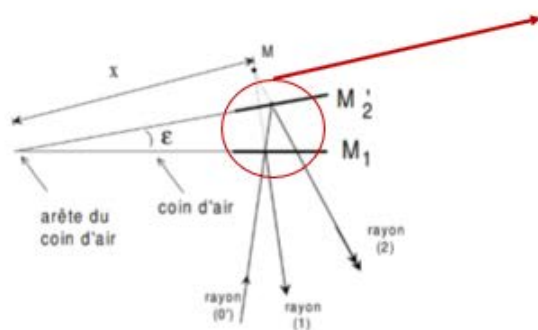
on déf le contact optique \bar{e} etant $\underline{e=0}$,
experimentalement on constate que l'écran est uniformément éclairé = leint plate

B. Coin d'air

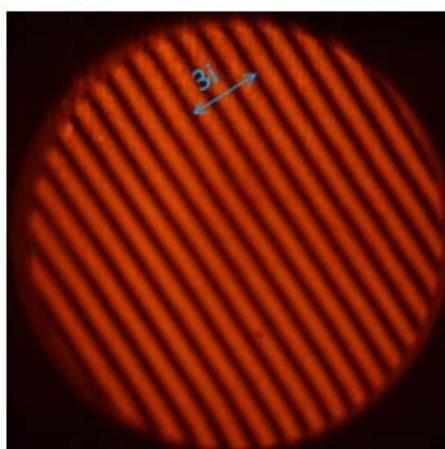
Configuration coin d'air : M_1 et M_2 ne sont pas perpendiculaires

Diapo : interférence localisé près des miroirs et = franges d'égale épaisseur

Coin d'air



$$\delta = 2e(M) = 2\epsilon x$$



$$i = \frac{\lambda_0}{2\epsilon}$$

$$I(M) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi\epsilon x}{\lambda_0}\right) \right)$$

Nous avons étudié le Michelson en lumière monochromatique mais celui-ci peut aussi être utilisé pour étudier des sources polychromatiques

III- Application à la spectroscopie : application au doublets jaune du Mercure

Le sodium possède 2 raies jaunes : $\lambda_1 = 576,9 \text{ nm}$
 $\lambda_2 = 579,1 \text{ nm}$

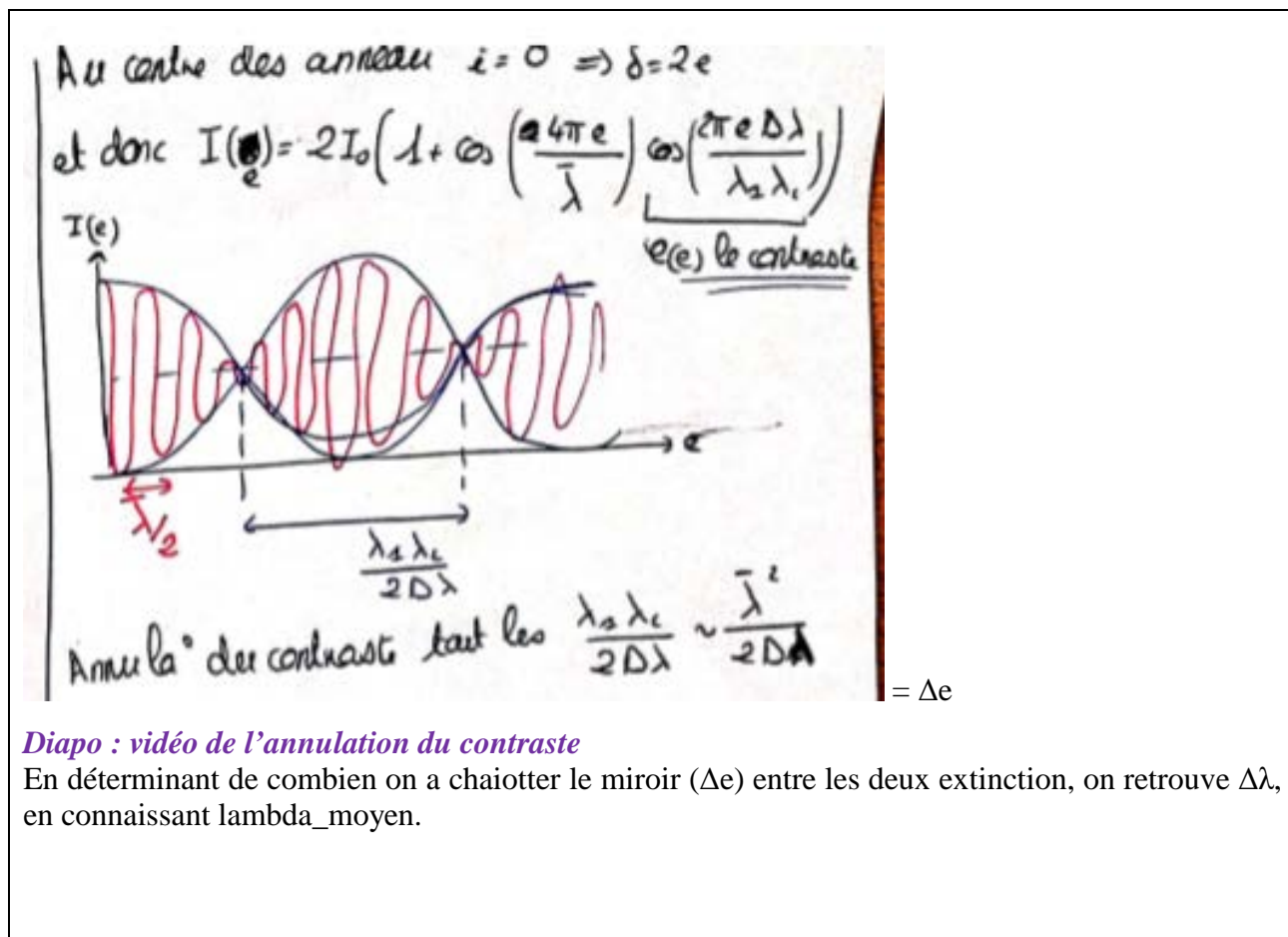
Les deux raies n'ont pas le même λ , elles sont donc incohérentes entre elles. L'intensité en sortie sera :

$$I(M) = I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_1}\right) \right) + I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_2}\right) \right)$$

$$= 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{2\pi\delta\Delta\lambda}{2\lambda_1\lambda_2}\right) \right) \text{ où}$$

$$\text{où } \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$



Questions posées par l'enseignant

- Vous parlez de la séparatrice qui est 50/50. Alors quel est le rôle de la compensatrice sur votre schéma ?
 - Schéma de principe de la séparatrice
 - Le déphasage induit par le verre dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence. Ça pose problème.
- Comment expérimentalement s'assure-t-on que la compensatrice et la lame semi-réfléchissante sont parallèles ?
- Pourriez-vous rediscuter la formule donnant le rayon du k-ième anneau en fonction de l'épaisseur de la lame d'air ?
- Si vous deviez aligner rapidement les 2 miroirs pour régler le contact au optique. Comment feriez-vous ?
- Vous avez dit qu'à l'œil nu, on ne pouvait pas résoudre le doublet du mercure. Qu'est-ce que vous entendez par là ? (attention à ne pas confondre avec le pouvoir séparateur spatial de l'œil)
- Vous avez dit que les élèves pourraient expérimentalement s'intéresser au doublet du sodium ou du doublet du mercure. Selon vous, ils devraient faire lequel préférentiellement (discuter rapidité de la manip vs meilleure résolution limite obtenue) ?
- Vous avez parlé de l'application spectroscopique du Michelson. Pourriez-vous parler d'une autre application, comme par exemple, la spectroscopie par transformée de Fourier ?
- Comment illustrer la cohérence spatiale expérimentalement en cours ? Si vous vouliez le faire avec un interféromètre de Michelson ?

9. Pour vous guider, vous avez parlé de la localisation des franges, elle se fait dans quelles conditions ?
 - a. Source étendue
10. Pouvez-vous citer une application de l'interféromètre de Michelson qui a fait la Une récemment.
 - a. Ligo Virgo ondes gravitationnelles
11. En configuration lame d'air, quelle est la distance typique pour laquelle on peut chariotier avant la perte de contraste, dépendant de la source utilisée ?
12. C'est quoi le temps de cohérence d'une source ?
 - a. Durée du train d'onde
13. Et donc, dans le domaine spectral, c'est lié à quoi ?
 - a. $1/\text{fréquence}$: $1/\text{largeur spectrale}$
14. Du coup la longueur de cohérence est plus grande pour une lampe spectrale ? un laser ?
15. Comment mesurer l'indice d'un gaz avec un Michelson ?
16. Peut-on utiliser un interféromètre de Michelson avec des ondes de matière ? Quel en serait l'intérêt ?

Commentaires donnés par l'enseignant

Bonne leçon, dynamique, trop de temps sur le calcul de la différence de marche alors que les interférences sont en prérequis.

Il faudrait plus parler des applications et des expériences surtout cette année et moins de tps sur les calculs.

Il faudrait surement faire la leçon entièrement du point de vue expérimental : expliquer les réglages précisément, constater « expérimentalement » les interférences et après faire la théorie.

Les membres du jury ont fait bcp d'optique dans leur vie. Il faut donc être hyper calé sur le sujet, et aussi être prêt à répondre à des questions concrètes, expérimentales (la leçon n'a abordé l'interféromètre que sur un point de vue théorique). Très bien l'utilisation de la vidéo.

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Plan clair et structuré, mais légèrement déséquilibré dans ses différentes parties. Par manque de temps, l'étudiante n'a passé qu'une minute sur la configuration du Michelson en coin d'air, et a plutôt opté pour passer la majeure partie de la leçon sur la configuration en lame d'air, avec la démonstration de la différence de marche $\Delta = 2n \cos(i)$, un peu longue (~5min). Ce calcul selon moi pourrait être donné dans les prérequis (interférences à deux ondes dans une lame parallèle), afin de gagner plus de temps pour décrire un peu plus les aspects expérimentaux (réglages du Michelson, ou juste description des paramètres de l'expérience : source élargie spatialement, place-t-on un condenseur ? ou fait-on l'image du filament de la source par le condenseur, on place un filtre interférentiel pour obtenir une source « monochromatique », à quel point cette approximation de « monochromatique » est-elle valide ? etc).

La question suivante a été soulevée : si l'application du Michelson présentée dans le cours, comme dans cette leçon ici, n'utilise que la configuration en lame d'air, est-il vraiment nécessaire de présenter aussi l'interféromètre en coin d'air, au vu des limitations drastiques de temps (30min pour la leçon à présent) ? C'est une question ardue car selon moi, on peut ce choix là ou son contraire. En effet, on peut justifier de ne présenter qu'une configuration (lame d'air ou coin d'air) et ainsi permettre d'avoir deux applications décrites pour la configuration choisie, et en concluant son cours en disant que la deuxième configuration typique sera présentée dans le prochain cours. D'un autre côté, pour pouvoir présenter comment régler le Michelson « expérimentalement » pour atteindre la teinte plate, il est intéressant d'avoir vu les deux configurations et de comprendre les mécanismes d'apparitions des franges en anneaux ou rectilignes, pour réussir à obtenir la teinte plate. Aussi, quel que soit le choix de l'étudiant(e), il me semble important de bien insister sur les prérequis (pour gagner du temps sur des notions « de base » telle que le calcul de la différence de marche) et sur le fait qu'une leçon de 30min de serait couvrir tout le sujet, donc ouvrir en conclusion de la leçon, sur les prochaines notions ou applications qui pourraient être couverts dans un prochain cours, pour justifier de son plan.

Une approche plus « concrète » de l'interféromètre aurait été souhaitable : présenter plus les aspects applications, ou les questions expérimentales (de conditions d'observations, de réglages spécifiques), afin d'illustrer sa maîtrise du sujet.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Une notion importante à aborder quand on parle d'interféromètre de Michelson est la cohérence spatiale (localisation des franges en source « classique » étendue, qui a été abordée) ainsi que la cohérence temporelle (ou spectrale), non abordée ici.

Il serait intéressant d'avoir une idée de l'ordre de grandeurs des longueurs de cohérence des sources usuelles (lampes spectrales + filtre interférentiel, laser HeNe, source blanche), et de mettre en perspective les grandes différences de marches réalisables entre les deux bras du Michelson -- qui permettent des mesures de métrologie d'exception (un prix Nobel en récompense l'inventivité !) -- par rapport à d'autres systèmes interférométriques, tels que les fentes de Young par exemple.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Les applications du Michelson sont nombreuses et il faut avoir une idée de quelques expériences « facilement » réalisables en classe, pour illustrer des notions comme la cohérence spatiale/spectrale, ainsi que pour monter la « puissance » d'un tel outil (interférométrie = abordée ici, spectroscopie par TF, détermination d'indices de réfraction ou de la planéité d'une surface, métrologie, etc), et d'être capable d'énoncer un protocole. Par exemple, savoir énoncer clairement si on se place :

- en configuration coin d'air, lame d'air ?
- avec une source monochromatique, blanche ? quel est l'intérêt ?
- Place-t-on un condenseur devant la source ? ou fait-on l'image du finalement ?
- Est-ce qu'il faut une source avec un « grand » angle d'incidence max pour avoir beaucoup d'ordres pour les franges en anneaux, ou au contraire, a-t-on besoin d'avoir une inclinaison quasi-normale des rayons provenant de la source sur les miroirs (pour la configuration en coin d'air) ?
- Quels types de mesures pour extraire l'information requise : comptage du décalage de franges , recherche de la distance de chariotage entre deux anti-coïncidences, etc ?
- où place-t-on l'écran ?

Bibliographie conseillée

Houard, Optique, une approche expérimentale

Françon, L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser (assez ancien maintenant comme livre, mais avec de bonnes descriptions des applications).