

Titre : Interférométrie à division d'amplitude

Présentée par

Rapport écrit par :

Correcteur

Date : 05 Novembre 2019

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Optique expérimentale	Sextant		
Optique physique et Electronique	Mauras	PUF	
Dunod Tout-en-un PC/PC*	Sanz	Dunod	2016
Optique : fondements et applications	Pérez	Dunod	7 ^e édition
Optique : une approche expérimentale et pratique	Houard	De Boeck	
TD Optique http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/			

Plan détaillé

- I) Interférométrie à division d'amplitude**
 - a) Nécessité de la division d'amplitude
 - b) Principe de la division d'amplitude
- II) Exemple : interféromètre de Michelson**
 - a) Principe général
 - b) Configuration en lame d'air, éclairée en source étendue
 - c) Configuration en coin d'air, éclairée en source étendue
- III) Interférences à N ondes : interféromètre de Fabry Perot**

Niveau choisi : CPGE

Prérequis :

- Optique géométrique
- Interférences à deux ondes
- Dispositifs à division du front d'onde

Les temps indiqués en italique sur le côté correspondent à ceux mis pendant la présentation

Introduction :

- Présentation générale : niveau, prérequis
- Définition du phénomène d'interférences (en général) : on n'étudie ici que les interférences lumineuses

- Définition de l'interférométrie : ensemble des techniques dans lesquelles on peut extraire des informations d'un phénomène d'interférences
- Domaines : astronomie, spectroscopie, profilage de surface, métrologie dans l'industrie...
- Annonce du plan

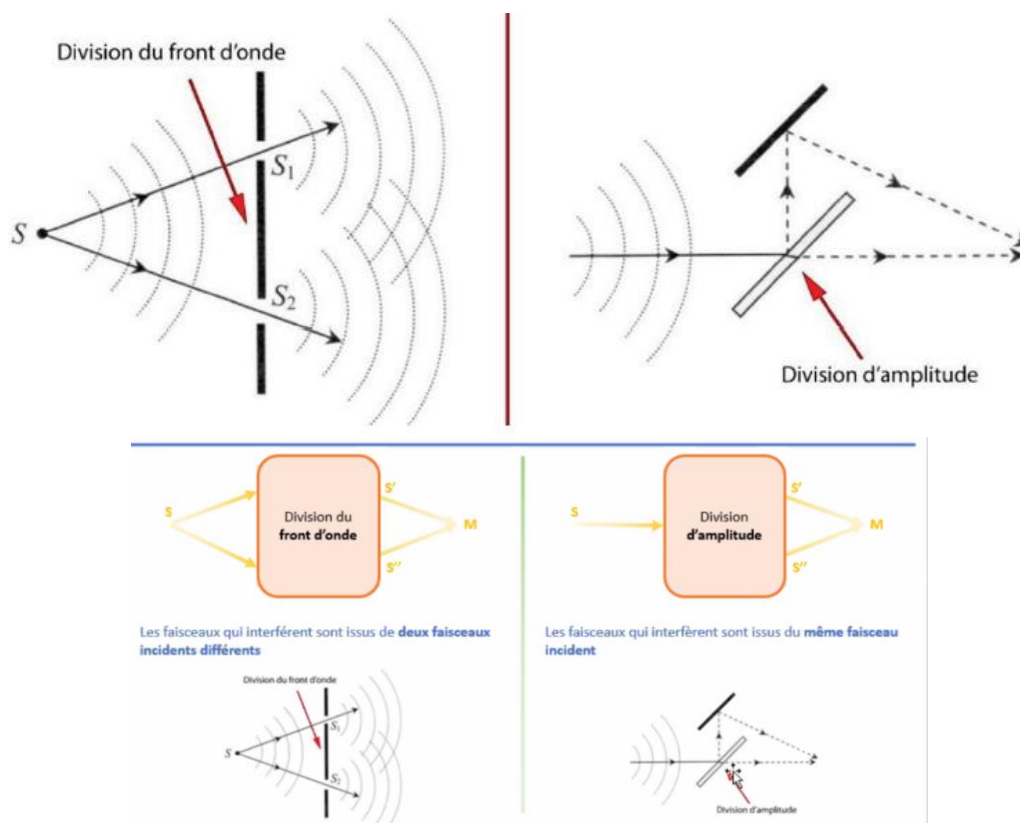
01'30 **Expérience :** Pour illustrer la différence entre dispositifs interférométrique, nous commençons par d'un dispositif interférométrique à division du front d'onde : les Bifentes d'Young éclairées par une fente illuminée par une lampe Quartz Iode (QI) filtrée : Si la fente placée devant la QI est suffisamment fine, on observe des interférences quelques soit la position de l'écran. Il s'agit d'interférences non localisées. Un élargissement de la fente source provoque une perte de contraste, les interférences se brouillent (cohérence spatiale vu en cours). Comme cela a été vu dans l'expérience, la division du front d'onde est sensible à la cohérence spatiale de la source. Avec le dispositif à division du front d'onde, on doit ici utiliser une source quasi-ponctuelle pour voir des interférences, si bien qu'il n'est pas facile d'avoir une forte luminosité de la source.

03'00 I.a) Nécessité de la division d'amplitude

Avec une source étendue il est possible d'augmenter la luminosité de la figure. Le but des interféromètres à division d'amplitude est donc d'obtenir des interférences contrastées même avec des sources étendues. Le prix à payer est la localisation des interférences.

03'45 I.b) Principe de la division d'amplitude

Diapo : Présentation des dispositifs à division du front d'onde et à division d'amplitude



(Slide 2 alternative)

- Dans le cas de la division d'amplitude, un couple de rayons émergents, provenant du même rayon incident scindé par la lame séparatrice, interfère. On comprend que la division d'amplitude n'est pas sensible à l'(in)cohérence spatiale de la source.
- **Interférences localisées avec les dispositifs à division d'amplitude en source étendue, soit sur un écran à distance finie, soit à l'infini, Localisation des interférences : ensemble de points où se coupent les rayons provenant du même rayon incident.**
- **attention, si la source est ponctuelle, elle est donc trivialement cohérente spatialement et il y a toujours non localisation des interférences que le dispositif interférentiel soit à division du front d'onde ou à division d'amplitude**

En résumé :

- : interférences non localisées si la source est spatialement cohérente (ie ponctuelle ou faisceau laser élargi)

- interféromètres à division du front d'onde : on ne peut voir d'interférence que si la source peut être considérée comme spatialement cohérente, mais luminosité limitée (si l'éclairage n'est pas un laser, mais une lampe)

interféromètres à division d'amplitude : interférences même si la source n'est pas cohérente spatialement, mais localisée. La luminosité peut être augmentée en élargissant la fente.

Transition : Je vous ai présenté le principe général de la division d'amplitude, nous allons maintenant regarder un dispositif concret : l'interféromètre de Michelson.

07'00 II.a) Principe général

- Historique : 1907 prix Nobel pour Albert Michelson. Son interféromètre a été construit pour l'expérience de Michelson et Morley, visant à vérifier la loi de composition des vitesses galiléennes, et ainsi mesurer la vitesse d'entraînement de la lumière dans le référentiel terrestre. Les résultats obtenus n'étaient naturellement pas ceux attendus, justifie la relativité restreinte (la célérité de la lumière est indépendante du référentiel).
- Applications : métrologie, industrie, analyse d'état de surface

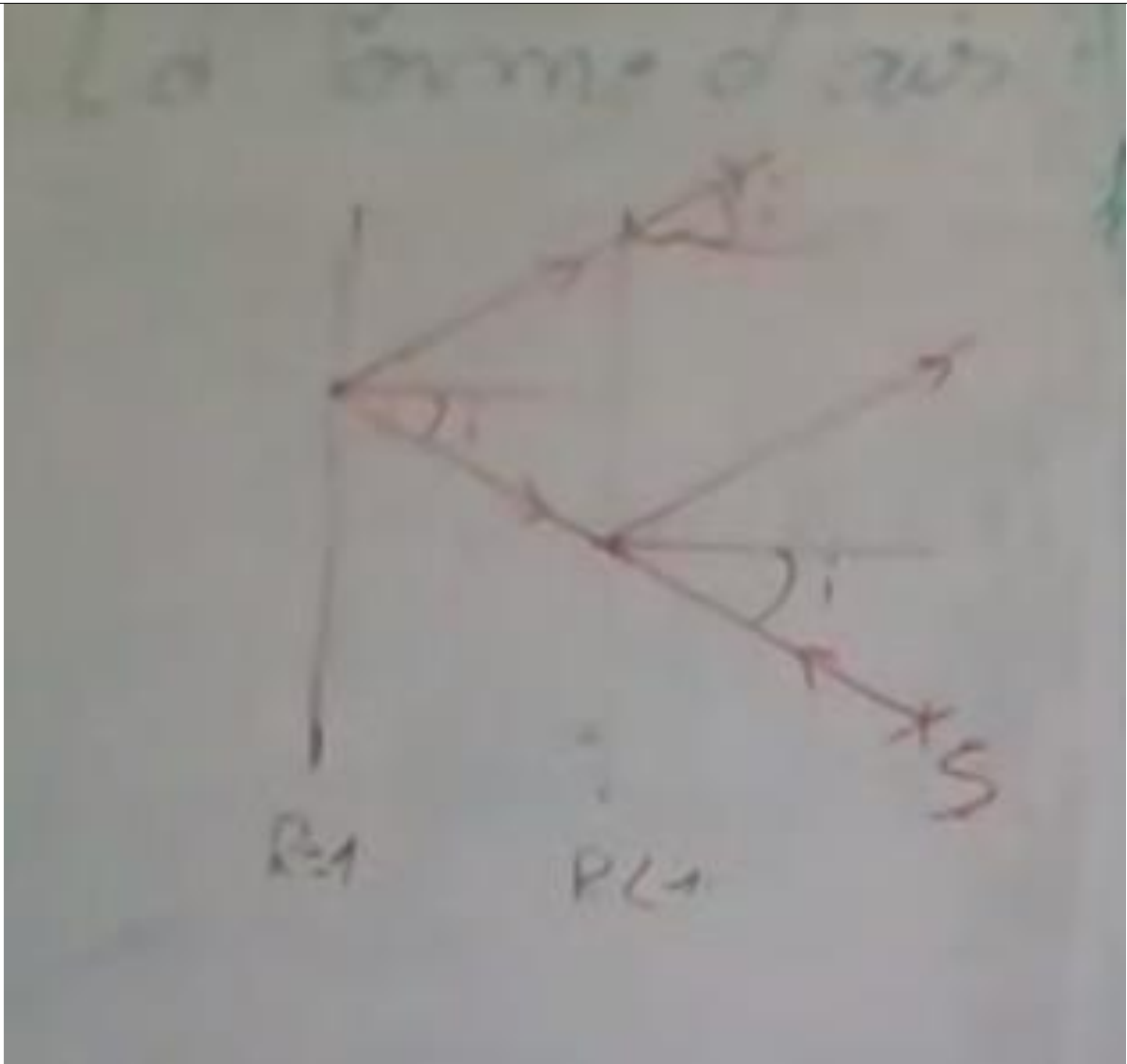
Diapo : Présentation des éléments constitutifs d'un interféromètre : miroirs, séparatrice + compensatrice (explication de son rôle, cf questions)

10'00 II.b) Configuration en lame d'air

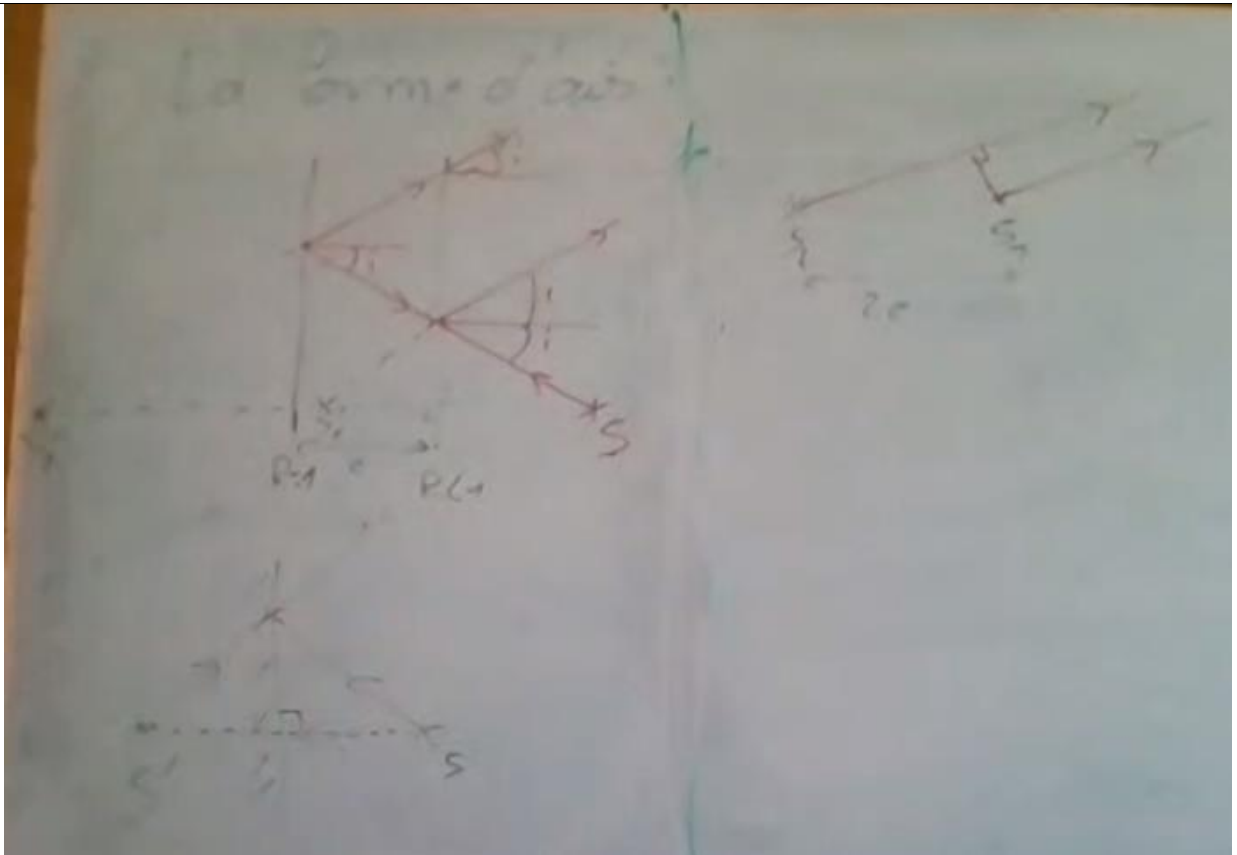
L'interféromètre de Michelson est réglé en lame d'air si les miroirs sont perpendiculaires.

Diapo : schéma pour expliquer cette configuration du Michelson :

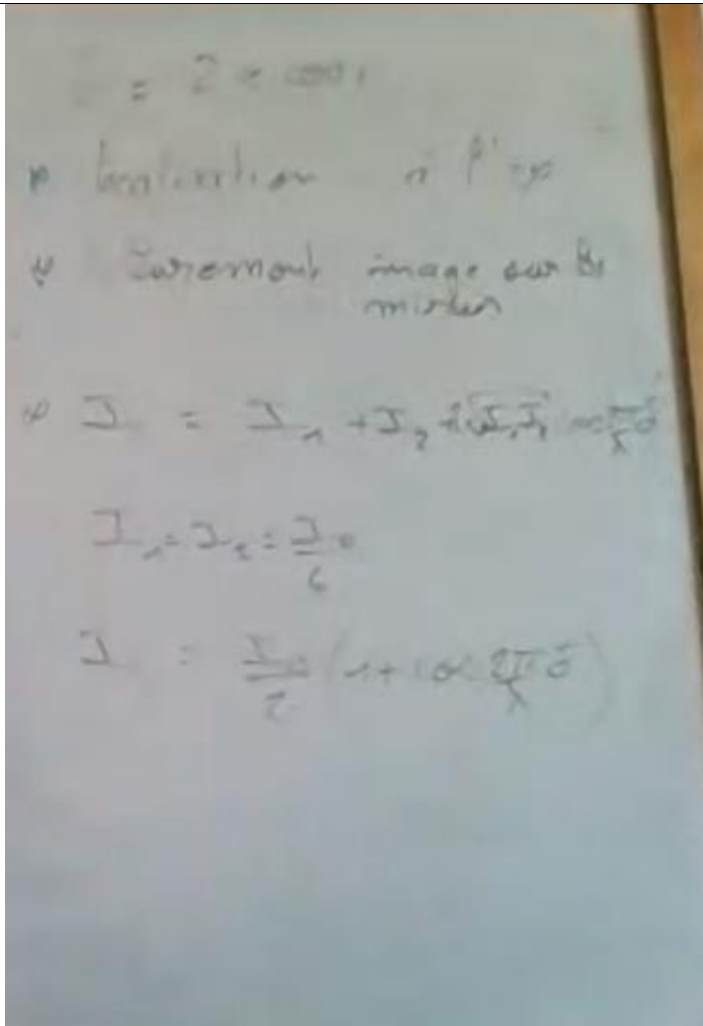
- Schéma pour expliquer le positionnement des sources secondaires (symétries par miroirs et séparatrice), et justifier l'appellation lame d'air
- Schéma replié de l'interféromètre éclairé en incidence normale par une source ponctuelle : $\delta = 2e$ où e est l'épaisseur de la lame d'air
- Schéma replié dans le cas d'une incidence quelconque : $\delta = 2e \cos(i)$ où i désigne l'angle d'incidence des rayons sur l'interféromètre
- Calcul de l'intensité



R est le coefficient de reflexion, utiliser ce schéma dans un premier temps, puis faire ls schéma réduit :



Avec le dernier schéma il est évident que la différence de marche est $2e \cdot \cos i$



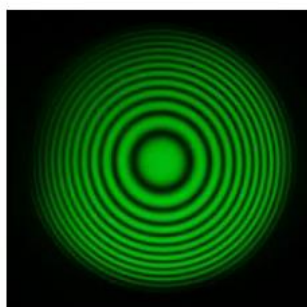
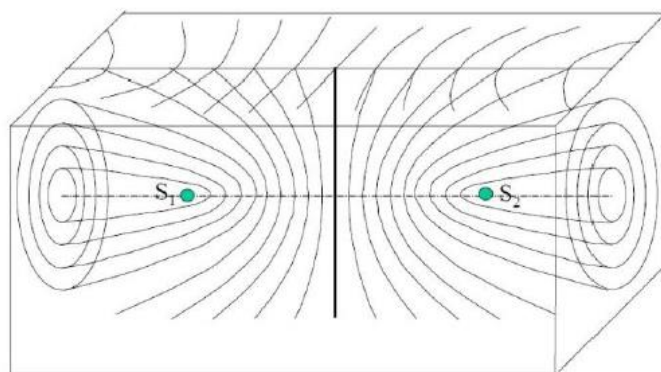
On utilise le prerequis des interferences à 2 ondes. Ce calcul est fait en TD

14'00 **Expérience** : Figure d'interférence obtenue pour un interféromètre de Michelson éclairé en lame d'air par une lampe à vapeur de mercure

On fait rentrer les anneaux, on repère le contact optique.

16'00 **Diapo** : explication de pourquoi on observe des anneaux dans ce cas

Configuration lame d'air



Anneaux d'égale inclinaison
Anneaux d'Haidinger

ATTENTION : la figure avec les hyperboloïdes n'est valable que pour un éclairage par une source ponctuelle (cf commentaires) et n'est donc pas une justification de l'observation expérimentale. Elle est par contre essentielle pour régler un Michelson et comprendre la forme des interférences obtenues.

Dans l'expérience précédente avec une source étendue, les interférences sont localisées à l'infini (car utilisation d'une source étendue, on a N sources ponctuelles et donc N hyperboloïdes les uns sur les autres. Le seul endroit où toutes se superposent est à l'infini. Alors on a N fois la luminosité des sources ponctuelles indépendantes !).

Application à la spectrométrie, mesure de la différence de longueur d'onde du doublet du sodium, sauter la partie du rayon des anneaux.

Calcul du rayon des anneaux :

Pour projeter la figure d'interférences (les rayons sortants du Michelson étant parallèles), on place un écran dans le plan focal image d'une lentille de grande distance focale. Schéma sur tableau : $r_k = f \tan(i_k) \approx i_k$ aux petits angles

Hypothèse : la frange centrale est brillante : $\delta(i_k = 0) = 2e = p\lambda_0, p \in \mathbb{Z}$

$\delta(i_k) = 2e \cos(i_k) = (p - k)\lambda_0$ et aux petits angles, $\cos(i_k) \approx 1 - \frac{i_k^2}{2}$

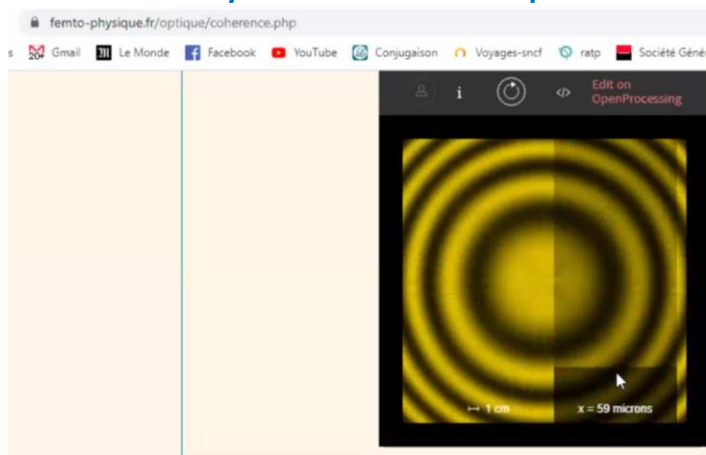
Donc $i_k \approx \sqrt{\frac{\lambda_0 k}{e}} \Rightarrow r(i_k) = f \sqrt{\frac{\lambda_0}{e}}$

21'00 Interprétation de la formule : variation du rayon des anneaux lorsqu'on cherche à s'approcher du contact optique. Les anneaux rentrent mais leurs rayons diminuent : l'anneau d'ordre k change... (cf TD Interférences Clément Sayrin)

24'00 Étude du doublet du sodium

La lampe à vapeur de sodium émet en fait un doublet dont on cherche à mesurer l'écart en utilisant un interféromètre de Michelson. ([Application à la spectrométrie](#))

Diapo : présentation des calculs : Les deux sources sont incohérentes (temporellement), l'intensité de la figure est obtenue en sommant les intensités dues aux deux radiations (formule de Fresnel). obtention de l'intensité, du contraste et de l'écart entre deux annulations de contraste : **Putot faire ce calcul en live, le rayon des anneaux es interessant mais c'est tout. Cela nous permet de parler aussi du contraste C qui varie lentement et montrer l'intêret du Michelson. Le rayon des anneaux n'est pas nécessaire dans cette leçon.**



Simulation possible si o n'a pas accès au matériel.

$$\Delta e = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\Delta\lambda} \approx 0.29 \text{ mm}$$

Expérience : une fois placé au contact optique, on chariote et on repère au vernier les positions pour lesquelles il y a une annulation de contraste (=anticoïncidences), on remonte à Δe

Comparaison entre valeur théorique et mesure expérimentale (avec incertitude, due à la détection de l'annulation du contraste, qui dépend de la vision de l'observateur)
L'interféromètre de Michelson est extrêmement précis.

Annulation de contraste si on bouge trop. Expliquer aussi les trains d'onde.

ODG pour vapeur e sodium de LC : ~3mm,

ODG pour laser LC : ~ m-km

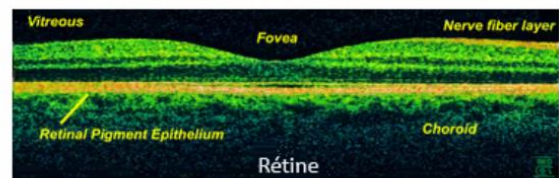
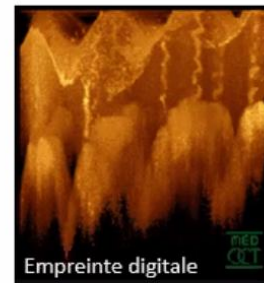
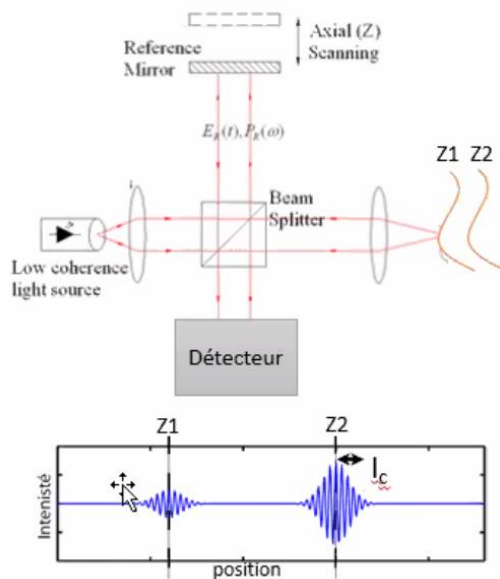
Lumière soleil ODG LC : 10^{-7} m

32'00 Applications de l'interféromètre en lame d'air : très adapté au calcul de la différence de marche, d'où son utilité en spectroscopie. Autre configuration possible : le coin d'air.

Possibilité : Tomographie par cohéence temporelle :

Tomographie par cohérence temporelle

Martin Bouilla



Imagerie médicale, biologie, miroir remplacé par tissus biologique.

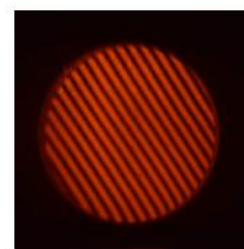
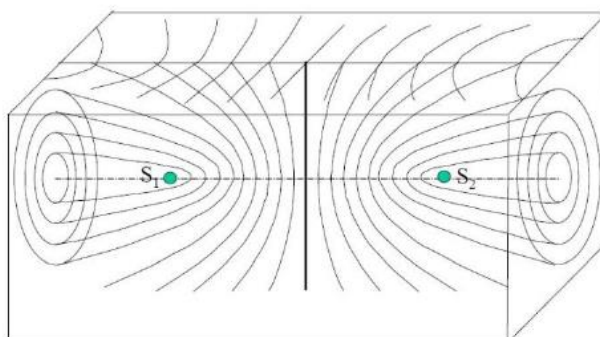
II.c) Configuration coin d'air

Présentation de la configuration

L'interféromètre de Michelson est réglé en coin d'air si les miroirs ne sont pas perpendiculaires.

- Diapo : présentation d'un schéma présentant la configuration coin d'air en éclairage parallèle
- Calcul de la différence de marche : $\delta = 2e(X) = 2\alpha X$ où α représente l'angle entre les deux miroirs et X la position du rayon sur les miroirs
- Diapo : figure d'interférences observées

Configuration coin d'air



Fringes d'égale épaisseur
Fringes de Fizeau

ATTENTION : ce schéma explique uniquement l'obtention de franges rectilignes non localisées lorsque la source est ponctuelle. Dans le cas d'une source étendue, on observe des franges rectilignes localisées sur les miroirs.

- Application : Détermination de l'indice d'une lame, défaut de surface

Transition : Si l'interféromètre de Michelson est certes précis, il ne permet pas de résoudre à l'œil, sans « chariotier », des figures d'interférences causées par des radiations de fréquence voisine (exemple : doublet du sodium). Par contre en « chariotant » il est possible de mesurer l'écart de fréquence du doublet du sodium. L'interféromètre de Fabry-Perot (sans accent !) possède un pouvoir de résolution plus élevé.

40'00 Conclusion : ouverture sur fabry Perot. A savoir :

- Diapo : présentation du dispositif : 2 miroirs face-à-face, très réfléchissants. Les rayons émergents du dispositif interfèrent entre eux (d'où le nom « Interférences à N ondes »)
- Différence de marche : $\delta = 2e \cos(i)$
=> Figure d'interférences identique au Michelson en lame d'air : anneaux d'égale inclinaison, localisés à l'infini.
- Diapo : présentation qualitative de la finesse d'un interféromètre de Fabry Perot et résolution du doublet du sodium : on peut voir avec ce dispositif deux anneaux pour les deux longueurs d'onde (là où elles n'apparaissaient pas pour un interféromètre de Michelson)

Questions posées par l'enseignant

- Précision sur les éléments de l'interféromètre de Michelson, sur les réglages.
Les réglages ont été faits au LASER pour le parallélisme séparatrice/compensatrice, puis avec un LASER convergent (LASER + lentille de focale 5.72mm) pour le réglage en lame d'air.
- Avec un LASER élargi (tube), auriez-vous pu régler l'interféromètre en lame d'air ? Que représente i_k dans l'expression de la différence de marche ?
Non, il faut un faisceau convergent pour observer des anneaux d'égale inclinaison (différents angles d'incidence i_k)
- Les interférences sont-elles localisées avec un LASER ? Avec une source monochromatique ? Elles ne sont pas localisées, à quoi cela est dû ?
*Les interférences ne sont pas localisées si la source est ponctuelle (lié à la cohérence spatiale de la source). Cela n'a rien à voir avec la monochromaticité de la source (lié à la cohérence temporelle de la source). Cela se voit sur les schémas où sont représentées les hyperboloïdes représentant les lieux où les interférences sont constructives (et non les surfaces d'ondes qui sont sphériques). En effet, on peut placer notre œil n'importe où on observera toujours des interférences (donc pas de localisation).
Les interférences sont localisées soit à l'infini soit sur le dispositif dans le cas de l'utilisation d'une source étendue.*
- Pouvez-vous démontrer le théorème de localisation ? cf démo qu'Agnès a fait au tableau (trouvable dans le livre Ondes lumineuses, éditeur de Boeck, auteurs Champeau, Carpentier, Lorgère, chapitre 12, p581)
- Quelle est l'utilité de la compensatrice ? Est-ce important en lumière monochromatique, et en lumière polychromatique ?

La lame séparatrice induit un déphasage physique car les faisceaux transmis et réfléchis ne traversent pas le même nombre de fois cette lame. La lame compensatrice de même épaisseur que la séparatrice « compense » cet effet si bien que les faisceaux transmis et réfléchis traversent les mêmes épaisseurs de verre. En lumière monochromatique, on pourrait chariotter le miroir de sorte à compenser ce déphasage supplémentaire, et on pourrait ainsi se passer de la compensatrice. En lumière polychromatique, la compensatrice est indispensable. En effet, la différence de marche dépend de l'indice de la lame qui varie avec la longueur d'onde d'après la loi de Cauchy (dispersion). On peut donc trouver une position du miroir pour laquelle la différence de marche sur les deux voies sera nulle pour une longueur d'onde donnée, mais pour une autre longueur d'onde la différence de marche sera donc non nulle.

- Retour sur la question de l'augmentation des rayons des anneaux quand l'épaisseur augmente : pouvez-vous réexpliquer le schéma que vous avez fait ? Que se passe-t-il dans un cas intermédiaire ?

Le schéma a été fait pour le $(k + 1)^{\text{e}}$ remplace le k^{e} anneau (chariotage d'une longueur multiple de λ). Dans un cas intermédiaire (on ne chariote pas pour obtenir un ordre k entier), la formule établie n'est plus valide à cause de l'hypothèse d'avoir une frange brillante au centre (sorte de condition aux limites).

- La mesure d'une épaisseur est-elle uniquement réalisable avec un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air ?

Non, en lame d'air cela fonctionne également

- La résolution du doublet est faisable avec un interféromètre de Fabry Perot, mais est-elle réalisable avec un interféromètre de Michelson ?

Oui, l'expérience le montre mais on ne peut pas voir à l'œil (pour une position fixe des miroirs) les deux anneaux

- Quel interféromètre est utilisé en spectroscopie ? Peut-on mesurer autre chose que des doublets avec un interféromètre de Michelson ?

Oui, spectrométrie avec ce type d'interféromètre à division d'amplitude. Spectromètre à transformée de Fourier : utilisé notamment dans le domaine infrarouge

- Utilité du Fabry Perot ?

Cavité LASER, filtrage interférentiel, spectroscopie en lumière quasi-monochromatique (à cause de la limitation de l'intervalle spectral libre, on ne peut pas étudier des sources trop étendues spectralement).

Commentaires donnés par l'enseignant

- **Commentaire de Julie : mon diapo est dans le Drive.**
- Dans cette leçon, des choix sont nécessaires : travail sur l'interféromètre de Michelson ou celui de Fabry Perot. Il est tout à fait possible de ne travailler que sur l'un et de parler en conclusion de l'autre.
Ici, le choix a clairement été fait sur l'interféromètre de Michelson, j'aurais dû passer plus de temps sur le coin d'air, et assumer le Fabry-Perot en conclusion (faute de temps, trois minutes passées sur la partie 3)
- **FAIRE ATTENTION aux problèmes de localisation des interférences (non localisée pour des dispositifs éclairés par une source ponctuelle et localisées (à l'infini ou sur une surface donnée) dans le cas de l'utilisation d'une source étendue pour un dispositif à division d'amplitude**
Il faut **INSISTER SUR LES CONDITIONS D'ECLAIREMENT** de l'interféromètre de Michelson (source ponctuelle/étendue, faisceau parallèle/ non parallèle).
- Bien choisir les schémas pour montrer ce que l'on veut et pas autre chose : par exemple, les schémas avec les sources secondaires et les hyperboloïdes ne peuvent être utilisés QUE pour un éclairage par des sources ponctuelles. Mais ce sont de très beaux schémas et très utile pour expliquer.

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

Dans le temps imparti il n'est pas possible de traiter à la fois le Michelson et le Fabry-Perot. Il faut faire des choix. L'autre interféromètre peut être éventuellement évoqué à la fin

Si le choix est le Michelson, attention de bien présenter de quoi on discute et en particulier de discuter de l'éclairement : éclaire-t-on par une source ponctuelle, une onde plane, une source étendue, L'explication des interférences obtenues dépend crucialement de cet aspect. On doit aussi expliquer sans ambiguïté où on observe les interférences. Il faut ouvrir sur des applications du Michelson (mesure d'épaisseur et/ou mesure de spectre, point qui peut être aussi abordé dans la leçon sur la cohérence)

Si on traite le Fabry Perot, il faut préciser ce que fait et comment on éclaire, ce qu'on détecte. Il faut discuter la spécificité d'un interféromètre à ondes multiples, aborder les notions de résonance, de finesse, d'intervalle spectral libre. Finir sur une application du fabry-Perot (cavité de filtrage, laser,)

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Il est indispensable dans cette leçon d'expliquer ce qu'est un interféromètre à division d'amplitude et donc d'expliquer la différence entre un interféromètre à division d'amplitude et à division du front d'onde. **Il est donc important de discuter les questions de luminosité et de localisation des interférences**

Dans le cadre de cette leçon la localisation des franges doit donc être abordée

Il est important d'avoir bien compris qu'il n'y pas de localisation des interférences pour une source ponctuelle quel que soit l'interféromètre. La question de la localisation est liée à l'étendue spatiale de la source (donc son incohérence spatiale).

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Le Michelson peut être présenté. Attention à bien savoir le régler rapidement en cas de pbs. Prévoir une source ponctuelle lumineuse (laser focalisé) et avoir compris le schéma des hyperboloides (avec les deux sources secondaires S1 et S2)

Pour le Fabry Perot, il y a deux dans la collection : Un « historique » avec de gros miroirs et qui permet d'observer des anneaux, et un plus moderne, confocal, associé à l'expérience « spectroscopie du rubidium »

Attention leur mise en œuvre est probablement plus difficile (car moins courante) que pour le Michelson.

Bibliographie conseillée

Optique , Houard

Optique, Pérez

Optique Hecht

Ondes lumineuses, Champeau, Carpentier, Lorgéré

et tout bon autre livre d'optique

Prendre TD Jules