

Titre : LPO3 : Interférométrie à division d'amplitude

Présentée par : Brendan Le Pennec

CR rédigée par : Lydia Chabane

Correcteur : Agnès Maître

Date : 17/10/2022

Compte-rendu leçon de physique élève

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Optique physique et électronique	Daniel Mauras	Presse Universitaire de France (2004)	
Optique Physique	Richard Taillet	de boeck (2015)	953-087864-7
Optique	Sylvain Houard	de boeck (2014)	
Optique et physique ondulatoire	Bertin Faroux Renault	Dunod (1986)	

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis : Optique Géométrique, Interférences à deux ondes, Interférences à division du front d'onde, cohérence temporelle/cohérence spatiale

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction : interférences à division du front d'onde

Interférences sont beaucoup utilisées en physique et même dans la vie de tous les jours : exemple du casque anti-bruit qui fait interférer les ondes sonores de l'extérieur avec celles du son dans le casque audio.

Dans la suite, on s'intéresse aux interférences à deux ondes lumineuses.

Retour sur les fentes d'Young (slide 1). Avec un éclairage des fentes par une source ponctuelle, on observe des franges d'interférences non localisées sur un écran.

Problème : (slide 2) quand on augmente la taille de la source, on observe un brouillage de la figure d'interférences et donc une perte de contraste : problème de cohérence spatiale de la source.

On va voir que l'interférométrie à division d'amplitude permet de s'affranchir de ce problème. Annonce du plan :

- Division d'amplitude
- Un exemple d'interféromètre à division d'amplitude
- Une application pratique de la division d'amplitude

1 Division d'amplitude

1.1 Théorème de localisation

Considérons un système interférométrique éclairé par une source monochromatique étendue tel que représenté sur la Figure 1. On souhaite qu'au point M, les intensités lumineuses provenant de S et S' qui s'ajoutent ne produisent pas de brouillage. Autrement dit, nous avons la condition de non-brouillage au point M suivante :

Condition de non-brouillage : $\Delta(M) = \delta(S', M) - \delta(S, M) = 0$

On montre (dans D. Mauras p. 159) que :

$$-n(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) \cdot \mathbf{SS}' = 0 \quad (1)$$

Cette équation nous permet de distinguer deux cas :

- $\mathbf{u}_2 \neq \mathbf{u}_1$: c'est une contrainte sur la source, les rayons qui interfèrent en M ne sont pas issus du même rayon incident. C'est le cas des interféromètres à **division du front d'onde**.
- $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1$: c'est une contrainte sur l'interféromètre. Les rayons qui interfèrent sont issus du même rayon incident. Le système optique doit contenir une lame séparatrice qui divise en deux un rayon incident puis fait interférer les deux rayons ainsi créés : c'est **la division d'amplitude**.

Théorème de localisation : (Slide 3) Seuls les dispositifs à division d'amplitude peuvent donner des interférences contrastées produites par des sources arbitrairement larges. Ces interférences sont alors **localisées** au voisinage des points d'intersection des couples de rayons lumineux issus du même rayon incident.

1.2 lame d'air

Un exemple simple d'interféromètre à division d'amplitude est celui de la lame d'air. On peut montrer que la différence de marche entre deux rayons lumineux sortant de la lame d'air est donné par :

$$\delta(M) = 2ne \cos i \quad (2)$$

avec e l'épaisseur de la lame d'air et i l'angle d'incidence du rayon lumineux provenant de la source S. On peut faire quelques remarques :

- Les interférences sont localisées à l'infini, il faut donc une lentille convergente et un écran placé dans le plan focal image de cette dernière pour observer la figure d'interférences,
- Pour une même épaisseur e , l'intensité lumineuse ne dépend que de i : on observe des franges circulaires dites **d'égaies inclinaison** qu'on comprend bien en analysant les hyperboloïdes d'interférences (slide 4),
- Pour une source étendue, les franges sont plus brillantes.

On va voir à présent un système interférométrique réalisant effectivement la lame d'air : il s'agit de l'interféromètre de Michelson.

2 Interféromètre de Michelson

Rappel historique : Expérience de Michelson et Morley au XIX^e qui démontre que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions. Prix Nobel de Physique décerné à Albert Michelson en 1907.

2.1 Présentation du montage en configuration lame d'air

Le schéma de principe est présenté (slide 5). Schéma équivalent au tableau tel que représenté sur la Figure 2. Le Michelson n'est certes pas sensible à la cohérence spatiale de la source mais est sensible à sa cohérence temporelle : $\delta(M) \sim 2e < L_c = c\tau_c = c/\Delta\nu = \Delta\lambda/\lambda^2$. En odg :

- laser He-Ne à $\Delta\nu = 10\text{MHz}$, $L_c \sim 30\text{m}$
- lumière blanche, $L_c \sim 1\mu\text{m}$

Ainsi pour régler le Michelson, on commence par utiliser un laser qui est une source spatialement et temporellement cohérente. Si on souhaite changer de

source temporellement moins cohérente que le laser, on se met au contact optique ($e = 0$) en utilisant la propriété suivante : on peut montrer que le rayon des anneaux est proportionnel à $1/\sqrt{e}$, ainsi si e diminue, les anneaux s'aggrandissent et rentrent vers leur centre.

→ observation de la figure d'interférence d'un Michelson éclairé par lampe à vapeur de sodium. On voit les anneaux avec une lentille de $f' = 20\text{cm}$ (faible luminosité de la source et salle assez éclairée, utiliser un condenseur à la sortie de la source pour maximiser l'éclairement sur les miroirs) et on peut repérer le contact optique. On observe également un brouillage des franges pour certaines positions du miroir (M1) car doublet du sodium.

On va mesurer l'écart en longueur d'onde de ce doublet.

2.2 Mesure interférométrique du doublet du sodium

On rappelle la formule de l'éclairement pour deux sources lumineuses de longueur d'onde différente (slide 6). L'écart Δe entre deux antioïncidences est donné par :

$$\Delta e = \frac{\bar{\lambda}}{2\Delta\lambda^2} \quad (3)$$

avec $\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ et $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$.

→ S'éloigner du contact optique de manière à pouvoir visualiser 5 ou 6 antioïncidences. Mesurer Δe , déterminer $\Delta\lambda$ avec son incertitude et comparer à la valeur tabulée $\Delta\lambda = 0,597\text{nm}$ (Encyclopedia Britannica).

Grâce au Michelson, on est capable de faire des mesures interférométriques très précises (inférieures au nm!).

Conclusion

Présentation de la tomographie en cohérence optique (Slide 7). Voir R. Taillet.
Ouverture sur le Fabry-Pérot avec la visualisation des anneaux du doublet du sodium obtenues par Fabry-Pérot (contraste des systèmes d'anneaux de λ_1 et λ_2) (Slide 8)

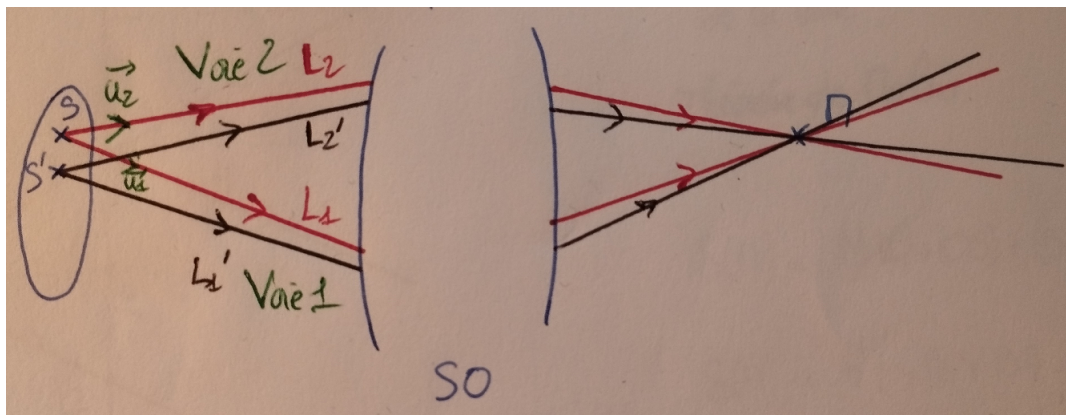


FIGURE 1 – Système interférométrique (SO) éclairé par une source étendue. Les voies 1 et 2 constituent les voies de l'interféromètre. S et S' sont deux points sources.

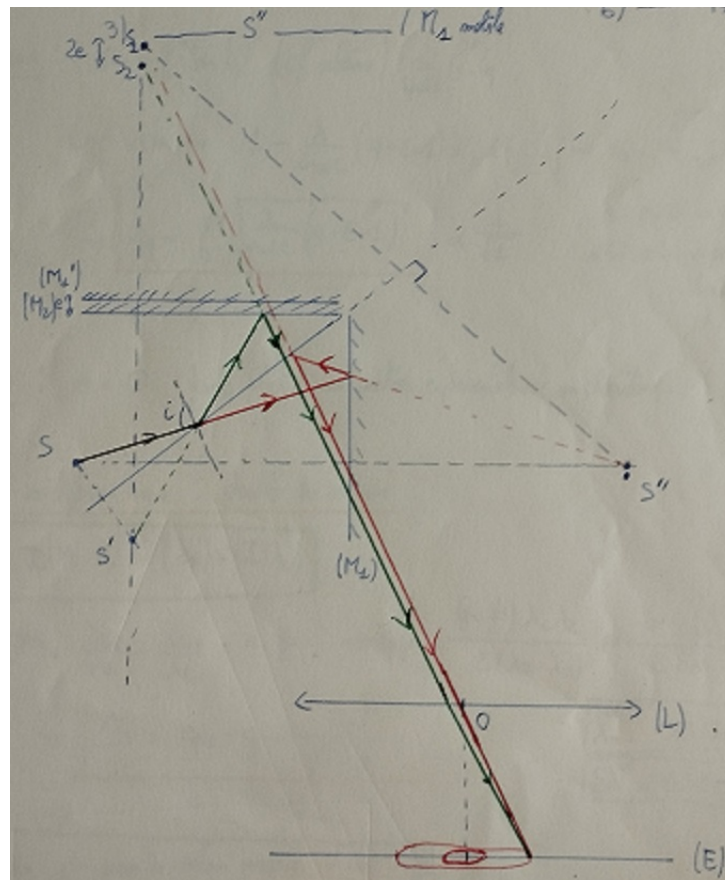


FIGURE 2 – Schéma équivalent du Michelson. S_1 et S_2 sont les images de S à travers respectivement la voie 1 (Miroir M1) et la voie 2 (miroir M2) de l'interféromètre. Le miroir (M1') est l'image de (M1) à travers la séparatrice.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

1. Types d'interférence pour le casque anti-bruit ?

Il y a un micro qui permet d'enregistrer le bruit ambiant. Le signal est ensuite analysé puis un haut-parleur génère un signal de bruit avec une phase exactement opposée à celui qui vient d'être enregistré pour que les deux signaux interfèrent destructivement. Il s'agit donc d'une division du front d'onde.

2. Utilisation des interférences à division d'amplitude ?

Regarder la structure spatiale d'un l'échantillon, voir des défauts de planéité des miroirs, mesurer la différence d'indice de réfraction d'un gaz, mesurer une variation de température.

3. Comment mesure-t-on l'indice de réfraction d'un gaz ?

En configuration lame d'air, on peut regarder comment changent les franges rectilignes lorsque l'indice de réfraction n du milieu varie. Connaissant la taille du miroir, on peut remonter à n .

4. Quelle configuration pour la planéité des miroirs ?

Configuration coin d'air.

5. En configuration coin d'air, où sont localisées les interférences ?

On verra des franges au niveau des miroirs.

6. Pourquoi au niveau des miroirs ?

Il faut considérer deux points sources S_1 et S_2 proches et tracer les rayons issus de ces points et passant par un point P . Si P est proches du coin d'air, la différence de marche δ_1 entre les rayons issus de S_1 et celle entre les rayons issus de S_2 sont quasiment les mêmes (et égales à $2e(P)$) : il n'y a donc pas brouillage. En revanche, si P s'éloigne du coin d'air, δ_1 devient très différent de δ_2 et on a brouillage (cf. corrigé du TD d'optique sur les interférences).

Par ailleurs, une construction géométrique permet de montrer que le lieu d'intersection des rayons réfléchis correspondant **à un même rayon incident** (condition de localisation vu en 1.1, à savoir $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1$) est approximativement le plan faisant l'angle i (où i est l'angle d'incidence) avec (M1'). En pratique, cet angle est si petit (quelques minutes d'arc) que ce plan d'intersection est presque confondu avec (M1') (Dunod Physique tout-en-un 2ème année, PC-PC* 2004).

7. Lorsque la source est ponctuelle, les interférences sont-elles localisées ?

Non. Elles le sont lorsque la source est étendue.

8. Si on a des trous d'Young et une source déplacée de b sur l'axe parallèle à l'axe des trous, comment seront les franges ?

Il y aura une différence de chemin optique additionnelle avant les trous. Les nouvelles franges obtenues se décalent de $\frac{-bD}{d}$, avec d la distance entre la source et les trous d'Young et D la distance entre les trous et l'écran.

9. Peut-il y avoir brouillage si on considère deux sources ponctuelles incohérentes ?

Oui si les deux systèmes de franges créés par les sources sont en antioïncidence (les franges brillantes d'un système de franges se superposent aux franges sombres de l'autre système de franges).

10. Pour la lame d'air, pourquoi appelle-t-on les anneaux "anneaux d'égale inclinaison" ?

Un ordre d'interférence donné correspond à une inclinaison, c'est-à-dire à un même angle d'incidence des rayons lumineux.

11. Pour la lame d'air, est-ce qu'on a le même signe de réflexion des deux côtés ?

Non, $r_1 < 0$, $r_2 > 0$. Il y a un déphasage de π en plus. Dans le Michelson, on oublie car c'est plus compliqué que ça, il y a des traitements en plus. Ce qui compte c'est que le contact optique est défini non pas par la longueur géométrique mais par la longueur optique.

12. A quoi sert la compensatrice ? On pourrait s'en passer pour le laser en réglant la longueur entre les deux bras de sorte à compenser la différence de marche correspondant à l'épaisseur de la séparatrice.

Si la source est polychromatique, on ne peut pas trouver un pas du miroir qui compense la différence de marche pour toutes les longueurs d'onde car l'indice optique de la séparatrice dépend de la longueur d'onde, d'où la nécessité d'utiliser une compensatrice. Si une seule longueur d'onde, ce n'est pas nécessaire (mais ça n'existe pas dans la vraie vie).

13. Pourquoi tu utilises un verre anticalorique ?

Pour ne pas diffuser de la chaleur provenant de la source sur l'interféromètre, cela modifierait n qui dépend de la température (le Michelson est sensible à des variations d'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-4} .)

14. Le laser He-Ne : 10 MHz. Lorsqu'on a fait le calcul on a trouvé 400 MHz. Pourquoi cette différence ?

En réalité, le spectre comporte plusieurs raies. L'enveloppe est à 400 MHz mais la largeur de chaque raie est beaucoup moins : 10 MHz semble raisonnable.

15. Que mesures-tu dans la tomographie ?

Les interférences associées à une certaine épaisseur.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) : Leçon très bien conduite, avec un plan clair et des expériences bien conduites. Les schémas au tableau sont très bien faits. Bon rythme de la leçon. le timing est respecté

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates : Il faut parler de la différence entre les interférences par division du front d'onde et division d'amplitude. on est donc amené à parler de luminosité et de localisation des franges. Le théorème de localisation doit être fait dans la leçon, ou au moins il faut prévoir d'être capable de l'expliquer/démontrer durant les question.

Il faut parler soit du Michelson, soit du Fabry pérot, (soit éventuellement d'un autre interféromètre à division d'amplitude, mais les applications sont alors pas évidentes). Montrer une expérience. Parler des applications de l'interféromètre choisi. Attention pour le Fabry Perot de la collection, il est facile à régler car confocal mais l'ISL est de $C/4D$ (à expliquer géométriquement)

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) : Le Michelson et pour les docteurs une application (par exemple mesure d'une différence de longueur d'onde entre deux raies) ou bien le Fabry-Perot confocal et la mesure de la différence de fréquence entre deux modes d'un laser.

Bibliographie conseillée : Perez, Houard, et tous les livres d'optique classiques. pour le Fabry perot on peut aussi regarder les livres classiques de laser (lasers, Zehnle-Dangoisse et al ; Lasers et optique quantique : Fabre, Grynberg, Aspect ; laser et optique non linéaire : C. Delsart)

Titre : Interféromètre à division d'amplitude

Présentée par : Benoit Beliard

Rapport écrit par : Gilles Collette

Correcteur : Agnès Maitre

Date : 23/10/2023

Bibliographie

Titre	Auteurs	Éditeur
Ondes lumineuses (Conseil d'Agnès)	Champeau Carpentier	De boeck
Optique, fondements et applications	Pérez	
Optique Physique	Richard Taillet	De boeck
Optique	Sylvain Houard	De boeck

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis : Optique géométrique, Interférence à deux ondes, interféromètre de Young, cohérences spatiales et temporelles.

Introduction: Présentation du plan, expérience: lame de savon éclairée avec lumière blanche. Observation d'irisations: frange d'interférence en lumière blanche. Temps: 3'

I Intérêt de la division d'amplitude

Définition d'une source cohérente, intérêt de la division du front d'onde, rappel de la différence de marche pour des trous de Young, obtention des conditions de brouillage d'une source étendue dans le cas d'une division du front d'onde.

Conclusion/transition: une condition pour limiter le brouillage: utiliser un interféromètre à division d'amplitude. (Pérez optique) ceci permet des interférences, avec une source étendue, mais localisées à l'infini.

II Interféromètre de Michelson en lame d'air (13')

1) Présentation du principe du Michelson cas lame d'air. (16')

2) Figure d'interférence dans ce cas, schéma de principe, franges d'égale inclinaison, calcul de la différence de marche. (19')

On retrouve la condition de non-brouillage, localisation de anneaux à l'infini. Diaporama. (24')

III Interféromètre de Michelson en coin d'air (25')

1) Figure d'interférence dans ce cas. Schéma de principe, franges d'égale épaisseur, localisation proche des miroirs.

2) Application mesure de faibles variations d'indices du milieu. Etude des surfaces des matériaux

VI Interféromètre de Fabry Perot (31')

1)Schéma de principe.

2)Applications

Conclusion (37')

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Questions

Expliquez l'expérience de la lame de savon.

On éclaire une lame de savon et on fait l'image de cette lame de savon à l'écran.

Pourquoi des franges rectilignes

Schéma explicatif, principe du coin d'air

Expliquer l'image des bulles de savon obtenue à l'écran ? Blanc supérieur au-dessus, interférence en lumière blanche, franges horizontales irisées de couleurs assez éclatantes en bas sur l'écran, et de couleur plus diluées en haut sur l'écran

Les longueurs d'onde sont résonantes quand l'épaisseur du film est $\lambda/4 + p\lambda/2$ (on doit ajouter en plus de la propagation un déphasage de π lors de la réflexion à l'interface.

Expliquez les couleurs au-dessus? Front blanchâtre : interférences d'ordre supérieurs : un grand nombre de longueur d'onde interfèrent constructivement

Expliquez l'évolution ? ce front descend, les couleurs sont moins nettes en bas pourquoi ?

Le film de savon est soumis à la gravité, si bien que l'épaisseur du film est plus grande en bas qu'en haut. L'ordre d'interférence est plus important quand l'épaisseur du film est grande, si bien qu'un plus grand nombre de longueur d'onde interfèrent constructivement. On voit toujours des franges horizontales mais les couleurs sont pâles. En revanche là où le film est fin et l'ordre d'interférence petit les franges ont des couleurs beaucoup plus éclatantes.

Après la lentille de visualisation sur l'écran, les images sont inversées, le plus épais se retrouve en haut le plus fin en bas à l'écran.

Précisez l'éclairement du Michelson ? Source étendue

Dans le cas d'une source ponctuelle ? On a une source de lumière cohérente spatialement et avec une certaine longueur de cohérence. Il y a délocalisation des interférences.

Dans le cas où le Michelson est éclairé avec un laser où sont localisées les interférences ?

Les interférences sont délocalisées.

Définir le contraste. Formule.

Lien entre longueur de cohérence et différence de marche ? La différence de marche doit être plus petite que la longueur de cohérence temporelle sinon les interférences se brouillent.

Question partie 1

Comment est la lampe par rapport à la fente de Young? Parallèle aux fentes

Peut-on voir des interférences avec des sources étendues ?

La longueur de cohérence spatiale sera d'autant plus courte

A quoi sert la compensatrice ? A compenser l'effet de la séparatrice sur les deux marches différentes du rayons lumineux. En particulier, l'effet de dispersion lié à la séparatrice. La compensatrice permet de rééquilibrer à l'identique la différence de marche des deux rayons liés au passage dans la séparatrice qui est différent pour les deux rayons. Cela se fait facilement pour une onde monochromatique en déplaçant un miroir, même sans compensatrice. Compte tenu de la dispersion de l'indice dans le verre, c'est en revanche impossible de compenser les chemins, en même temps, pour plusieurs longueurs d'onde sans compensatrice. La compensatrice permet d'égaliser l'épaisseur de verre traversée pour les deux bras de l'interféromètre et ainsi de s'affranchir de la dispersion dans le verre. Il est donc possible d'atteindre le contact optique pour toutes les longueurs d'onde en même temps.

Partie coin d'air (Point revu en correction par Agnès au tableau ref : tout en un Dunod PC/PC*)

Précisez les conditions d'éclairement du Michelson dans le cas du coin d'air ?

Si Michelson est éclairé avec un faisceau parallèle, les interférences sont délocalisées. De même si le Michelson est éclairé par une source ponctuelle, les interférences sont délocalisées. Si le coin d'air du Michelson est éclairé en source étendue, les choses sont plus complexes. On considère qu'on éclaire en source étendue en plaçant une lentille de focale f , à la distance f de la source. On éclaire donc la source par plusieurs d'incidence variée. On obtient des interférences pour chacune des incidences. On montre (calcul approché fait dans le Dunod) que le lieu où les interférences varient le moins en fonction de l'incidence est à proximité des miroirs. C'est donc à proximité des miroirs qu'on voit des franges localisées.

Où sont localisées les interférences ? Les interférences sont localisées proche du miroir.

Applications

Doublet du sodium, expliquez la méthode pour le mesurer ? sur un Michelson en lame d'air. On observe les battements qui se caractérisent par des brouillages de l'image d'interférence à certaines positions du miroir qui se déplace

Commentaires lors de la correction de la leçon

(L'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Commentaires de la salle:

Exposé très riche avec beaucoup d'applications, cependant approfondir davantage le Michelson et ne pas parler du Fabry-Pérot. Tu expliques à chaque fois la suite de la démarche c'est un bon point.

Commentaires du correcteur :

Il est important toujours d'expliquer le contexte de la démarche, l'objectif.
L'expérience en introduction est très bien mais il faut l'expliquer.

Il manque des calculs numériques pour démontrer par exemple la valeur du doublet avec une application numérique.

Partie I trop longue limite hors sujet car on ne parle que de la division du front d'onde dans cette partie.

Il faudrait mettre l'expérience du Michelson et son réglage avec par exemple la mesure du doublet du sodium.

Important d'insister sur le fait que la division d'amplitude permet d'obtenir des interférences pour une source étendue, mais à un endroit spécifique (interférences localisées). La division d'amplitude permet en général d'avoir des interférences plus lumineuses que pour la division du front d'onde ou la source ne peut pas être vraiment étendue. Pour les trous d'Young par exemple, on peut étendre la source mais que tant qu'elle est « considérée » comme quasi ponctuelle par l'interféromètre.

Lorsque la source est ponctuelle les interférences ne sont pas localisées.

Rappeler la démonstration faite dans le "Optique lumineuse" en restant généraliste dans le choix de l'interféromètre. On y démontre que des interférences peuvent être observées à partir d'une source étendue, uniquement dans le cadre d'un interféromètre à division d'amplitude.
(point revu en correction au tableau)

Attention : le titre de la leçon était initialement « Interférométrie à division d'amplitude » (titre docteur), alors que c'est « interféromètre à division d'amplitude » qui a été traité. **Pour une leçon sur l'interférométrie, il est indispensable de centrer la leçon sur la mesure, par exemple la mesure du doublet du sodium**

Exemple de plan possible

- interféromètre à division d'amplitude (/division du front d'onde). Sources étendues et localisation des interférences
- interféromètre de Michelson (au moins en lame d'air). Calcul des interférences. Anneaux
- mesure du doublet du sodium

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

La localisation des franges pour une source étendue

Interférométrie : Mesure du doublet du sodium

L'interféromètre de Michelson en lame d'air

L'interféromètre de Michelson en coin d'air

Titre : O3. Interférométrie à division d'amplitude. Élément imposé : Présenter une application métrologique de l'interféromètre de Michelson.

Présentée par : Hubert COSTE

Rapport écrit par : Gwilherm JASPARD

Correcteur : Agnès MAITRE

Date : 21/10/2024

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
J'intègre MP/MP* 5ème édition		DUNOD
Poly de TP Interférence (Série 2)		

Compte-rendu détaillé de la leçon

Niveau choisi pour la leçon : MP

Pré-requis :

- Modèle scalaire de la lumière
- Interférométrie à division du front d'onde
- Notion de cohérence

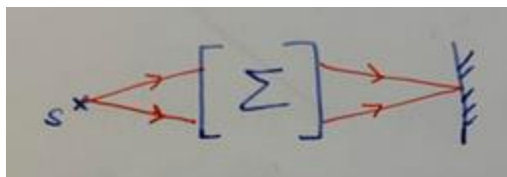
Introduction :

Métrologie = mesure avec une grande précision, utile pour mesurer des choses très petites par exemple. Possible de le faire avec un interféromètre de Michelson.

Exemples : écart de longueur d'onde du doublet du sodium, interférences d'ondes gravitationnelles (LIGO ou VIRGO)

Notion de d'interférence à division du front d'onde ou division d'amplitude :

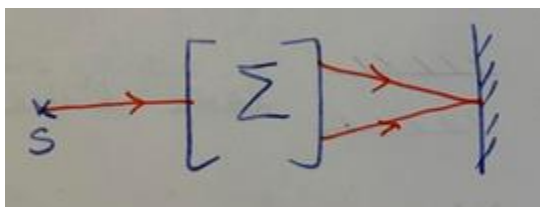
- division du front d'onde :



→ exemple : trous d'Young

→ problème : la cohérence spatiale limite la taille de la source étendue

- division d'amplitude :



→ exemple : Michelson

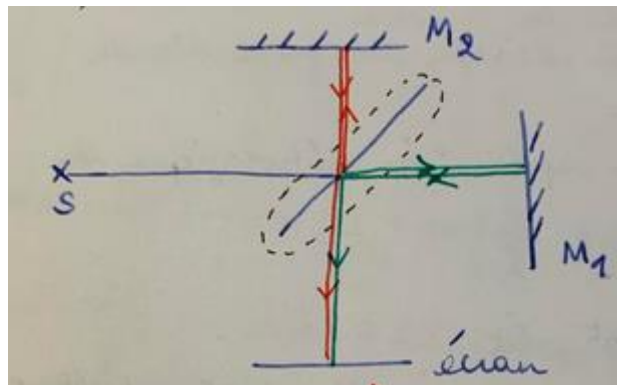
→ Pas de problème de cohérence spatiale avec une source étendue

On va maintenant étudier plus en détail l'interféromètre de Michelson

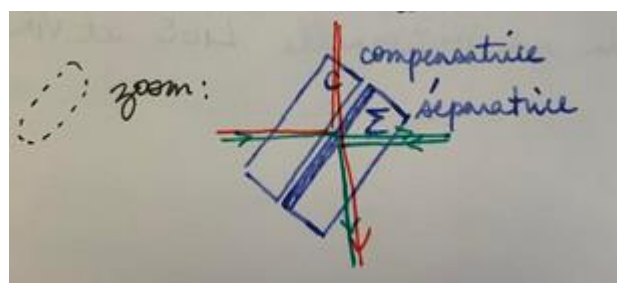
I / Interféromètre de Michelson

A] Principe de fonctionnement

Michelson composé de 2 miroirs M_1 et M_2 , une séparatrice (miroir partiellement réfléchissant) et une compensatrice, organisé selon le schéma suivant.



Zoom sur la paire de lames séparatrice / compensatrice :



La compensatrice permet d'avoir le même chemin optique pour les deux rayons :

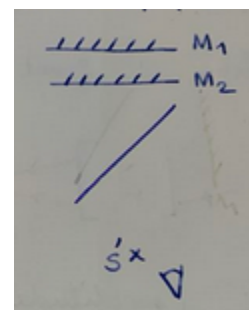
→ voie 1 (rayon vert) : chemin $S \rightarrow C + \Sigma \rightarrow M_1 \rightarrow \Sigma + \Sigma \rightarrow \text{œil/écran}$

→ voie 2 (rayon rouge) : chemin $S \rightarrow C + C \rightarrow M_2 \rightarrow C + \Sigma \rightarrow \text{œil/écran}$

Donc si $C = \Sigma$ on a le même chemin optique

Si la différence de marche entre le rayon 1 et le rayon 2 est nulle, on parle de contact optique.

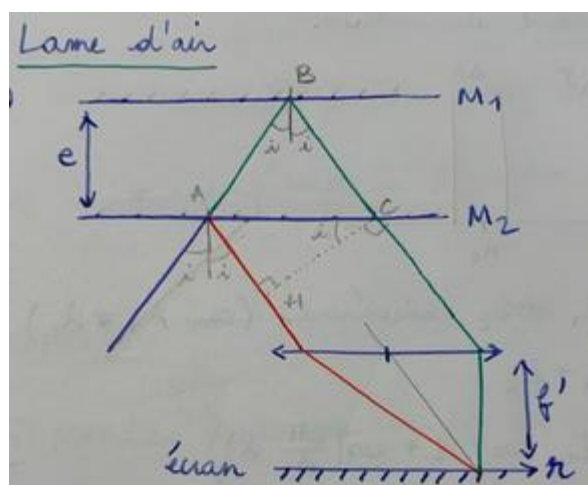
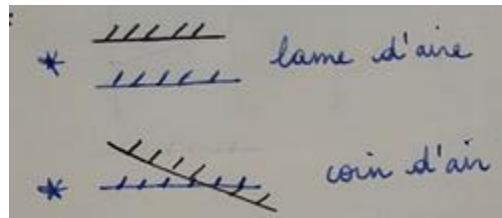
On peut proposer un schéma équivalent du Michelson :



On a donc deux configurations :

→ Si les miroirs sont parallèles, on parle de **lame d'air**

→ Si les miroirs font un petit angle, on parle de **coin d'air**



B] Lame d'air

Différence de marche :

$$\begin{aligned}\delta &= AB + BC - AH \\ &= 2 AB - AH\end{aligned}$$

Relations trigo :

$$\cos i = e/AB \Leftrightarrow AB = e / \cos i$$

$$\sin i = AH/AC$$

$$\tan i = AC/2e \Leftrightarrow AH = AC \sin i = 2e \sin^2 i / \cos i$$

$$\delta = 2e(1 - \sin^2 i) / \cos i$$

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

$$\text{Formule de Fresnel : } I = 2 I_0 (1 + \cos (2\pi \delta / \lambda))$$

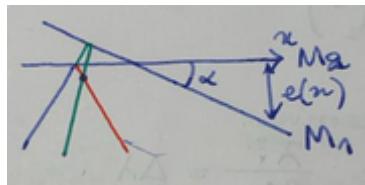
$$\text{or } \tan i = r/f' \text{ donc } I(r) = 2 I_0 (1 + \cos (2\pi \cdot 2e \cos(r/f') / \lambda))$$

→ on a des anneaux car δ donc I ne dépendent que de r

→ code Python pour représenter I en fonction de r

→ démonstration sur le Michelson : observation des anneaux d'égalé inclinaison en lumière spectrale (sodium)

C] Coin d'air



→ on a des interférences localisées à proximité des miroirs

→ on peut montrer $\delta = 2 \cdot e(x)$ (le calcul n'est pas au programme de CPGE)

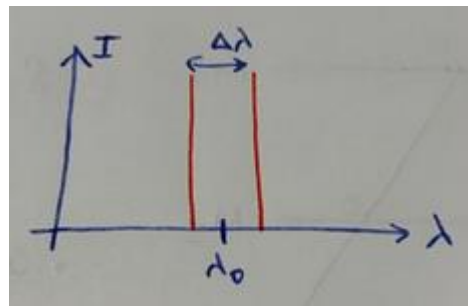
→ pour un angle α entre les deux miroirs, on a $\delta = 2 \cdot \alpha \cdot x$: on a des franges d'égale épaisseur



II / Application

On veut utiliser le Michelson pour effectuer la résolution du doublet du sodium

Spectre de Na :



→ les deux raies se comportent comme deux sources incohérentes monochromatiques, de longueurs d'onde λ_1 et λ_2 , donc

$$I = I_1 + I_2$$

$$= 2 I_0 (1 + \cos(2\pi \delta / \lambda_1)) + 2 I_0 (1 + \cos(2\pi \delta / \lambda_2))$$

→ Battements obtenus montrés avec un code Python

→ Le contraste varie quand on fait varier e

→ Le contraste est une fonction périodique de e (on peut trouver différentes valeurs de e pour lequel le contraste est minimal)

→ on a extinction du contraste lorsque I_1 et I_2 sont en quadrature de phase :

$$\delta / \lambda_1 = p_1 \text{ et } \delta / \lambda_2 = p_2 + 1/2 \text{ avec } p_1 \text{ et } p_2 \text{ entiers naturels}$$

$$\text{donc } p_2 + 1/2 - p_1 = \delta (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$$

$$\text{ie } n + 1/2 = 2e ((\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_1 \lambda_2)) \text{ en supposant que } i=0$$

pour deux extinctions successives :

$$1 = 2\Delta e (\Delta \lambda / \lambda_{\text{moy}}^2) \text{ donc } \Delta \lambda = \lambda_{\text{moy}}^2 / 2\Delta e$$

Valeur theorique $\Delta\lambda = 0.6\text{nm}$

Conclusion :

- interférométrie = faire interférer des ondes pour mesure des choses toutes petites
 - autres mesures possibles avec un Michelson : différence d'indice, mesure de g
- On peut aussi faire des interférences à N ondes : réseaux, Fabry-Pérot

Expérience réalisée :

- Manip = Réglage du Michelson en lame d'air pour une lampe spectrale, puis mesure du doublet du sodium
- Référence : Poly de TP Interférence (Série 2)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Question : Faire la mesure de $\Delta\lambda$ en vrai avec le Michelson (pas eu le temps en 40 min)

Réponse :

→ On arrive à voir deux brouillages

→ Difficulté : s'assurer qu'on a bien deux brouillages successifs

→ Mesures :

$$e1 = 32,45\text{mm}$$

$$e2 = 32,18\text{mm}$$

→ Calcul Python :

$$\Delta\lambda = 0,64\text{nm}$$

$$z\text{-score} = 0,6 \text{ (pas terrible pour de la métrologie)}$$

→ Retour d'Agnès :

→ Très important de bien régler le Michelson pour garder des anneaux nets malgré le gros chariotage

→ Faire la manip en avance pour repérer la position du contact optique et de deux extinctions successives, et faire la manip rapidement en live

→ Python : OK pour faire les calculs mais on ne voit rien, poser les calculs au tableau c'est beaucoup mieux

Question : Quelle est la taille des anneaux ?

Réponse :

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

$$= 2e(1 - i^2 / 2)$$

or $i = \tan i = r/f'$ pour i petit

$$\delta = 2e(1 - (r/f')^2 / 2)$$

... pas la suite du calcul

On pose $\delta = p\lambda$ et on en déduit le rayon

Question : Définition du contraste ?

Réponse :

$$\text{Contraste} = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$$

→ expression en lame d'air pour une seule raie

$$I = 2I_0 (1 + \cos(2\pi \delta / \lambda))$$

donc $I_{\text{max}} = 2I_0$ et $I_{\text{min}} = 0$ donc $\text{Contraste} = 1$

→ *expression pour un doublet ?*

→ On considère les raies de longueur d'onde λ_1 et λ_2 qu'on suppose avoir même intensité

→ On pose $(\lambda_1 + \lambda_2)/2 = \lambda_{\text{moy}}$ et $\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda$

.. calcul classique

On trouve $\text{Contraste} = \text{abs}(2 \cos(\pi \Delta\lambda \delta / \lambda_{\text{moy}}^2))$

On peut se servir de cette relation pour extraire $\Delta\lambda$

En effet, à partir du contact optique, on a un contraste de 1. On chariote jusqu'au brouillage et on a alors le premier contraste de 0 pour lequel $\cos = 0$ soit $(\pi \Delta\lambda \delta / \lambda_{\text{moy}}^2 = \pi/2)$. $\delta = 2\Delta e$ est la position du 1^{er} brouillage à partir du contact optique. On en déduit donc la valeur de $\Delta\lambda$. On peut aussi considérer le chariotage nécessaire entre deux premiers brouillage ce qui leve l'incertitude sur le contact optique s'il n'est pas bien déterminé, (en adaptant la relation précédente)

Question : Pourquoi met-on une compensatrice ?

Réponse : Pour compenser la différence de chemin optique entre les deux rayons

→ *Vraiment utile ?*

En fait, on peut charioter pour compenser cette différence de marche, en lumière monochromatique. Mais si on a une source à spectre étendu, on ne peut plus compenser pour toutes les longueurs d'ondes juste en chariotant à cause de la dispersion d'indice dans le verre. La différence de marche sans la compensatrice ne sera pas la même pour toutes les longueurs d'onde .

Question : Travaille-t-on toujours en lumière monochromatique avec le Michelson ?

Réponse : Non, on peut aussi utiliser une source spectrale ou de la lumière blanche

→ *En Hg, on a brouillage des franges si on est trop loin du contact optique (car superposition des différentes longueurs d'ondes). Quand on a brouillage, la différence de marche entre les deux bras est au-delà de la longueur de cohérence l_c de la source. On a $l_c = c t_c$ où t_c est le temps de cohérence inversement proportionnel à la largeur spectrale $\delta\nu$*

Question : Comment sont les anneaux en lumière blanche ?

Réponse : Proche du contact optique, on a pas d'anneau car le rayon des anneaux est trop grand pour les voir (on voit la teinte plate, avec la couleur qui varie quand on chariote). Plus loin, on ne voit rien non plus car le contraste est nul. chaque longueur d'onde crée des anneaux d'interférences de taille différentes. On ne voit donc jamais d'anneau et seulement des couleurs au et très près du contact optique

Question : En coin d'air, les franges sont-elles vraiment localisées sur les miroirs ?

Réponse : C'est subtil.

→ *source ponctuelle : interférences non localisées (quelque soit le dispositif d'interférences)*

→ *sources étendues : localisées à proximité des miroirs*

Remarque d'Agnès : Il est faux, même si c'est courant dans les livres, de justifier la localisation des franges en disant que les rayons s'y croisent.

Il faut considérer une source étendue (avec une multitude de i (mais pas trop différents pour faire un développement limité en $i + \delta i$) pour un point M donné du miroir)

Il faut chercher le plan tel que $d\delta / di = 0$ (c'est là que les interférences sont situées car c'est dans ce plan que toutes les figures d'interférence des différents points sources coïncident) cf DUNOD PC Edition 2016 par exemple

Commentaires lors de la correction de la leçon

Le binôme prend en note les commentaires de l'enseignant liés au contenu de la leçon : choix des thématiques abordées, plan choisi, notions hors-programme, expériences, respect du format de la leçon. **L'enseignant ajoute ou modifie abondamment des commentaires à posteriori.**

Les commentaires relatifs à la prestation de l'étudiant (rapidité, élocution, enthousiasme, niveau disciplinaire, etc.) sont à remplir sur la fiche « Évaluation » par l'enseignant, qui sera mis à disposition de l'étudiant passé à l'oral uniquement.

RETOURS SUR LE CONTENU :

- Il faudrait aussi aborder, dès la leçon, les notions suivantes :*
 - Contraste (expression pour la lame d'air, et pour un doublet)*
 - Expression de $I(i)$ pour la lame d'air*
 - Calcul du rayon des anneaux*

Si on présente l'expérience de la mesure du doublet, il faut faire la mesure sur le doublet pendant la leçon (avoir les positions déjà repérées)

On peut éviter de parler du coin d'air : c'est subtil.

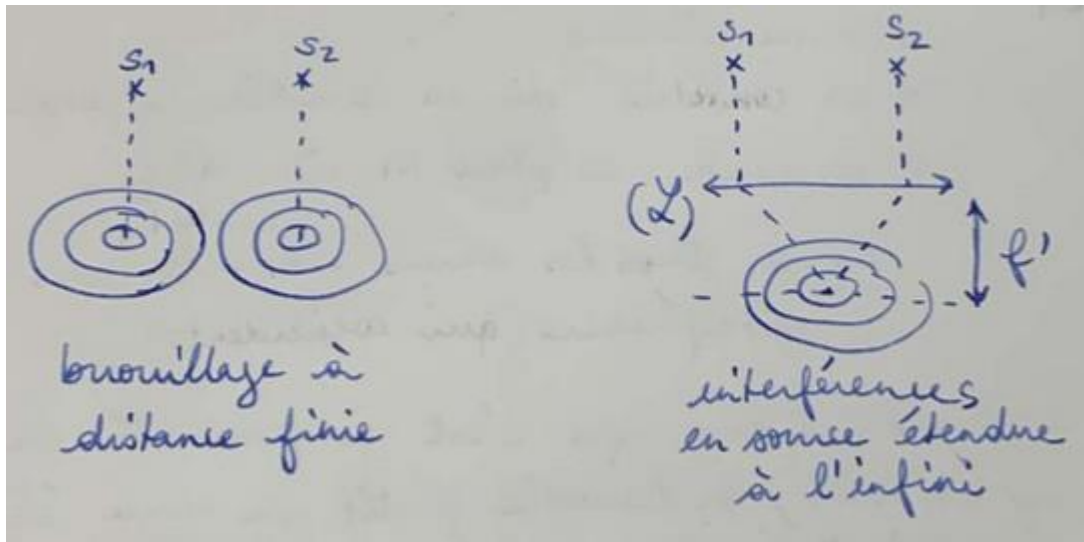
Autres remarques d'Agnès

Avantage division d'amplitude :

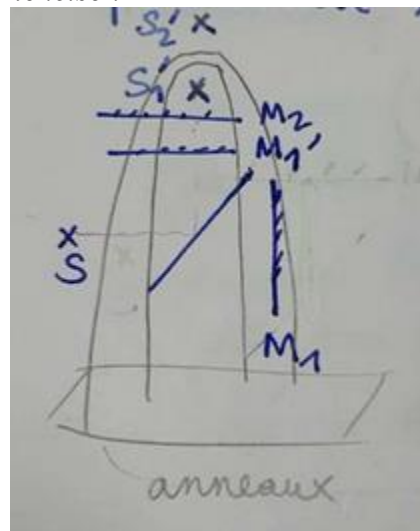
- Pas de brouillage pour une source étendue donc on peut avoir une meilleure intensité*
- Prix à payer : les interférences sont localisées (à l'infini pour la lame d'air, au voisinage du miroir pour le coin d'air)*

NB : si on a une source ponctuelle, on a des interférences localisées, elles peuvent être observées partout mais on a peu de luminosité.

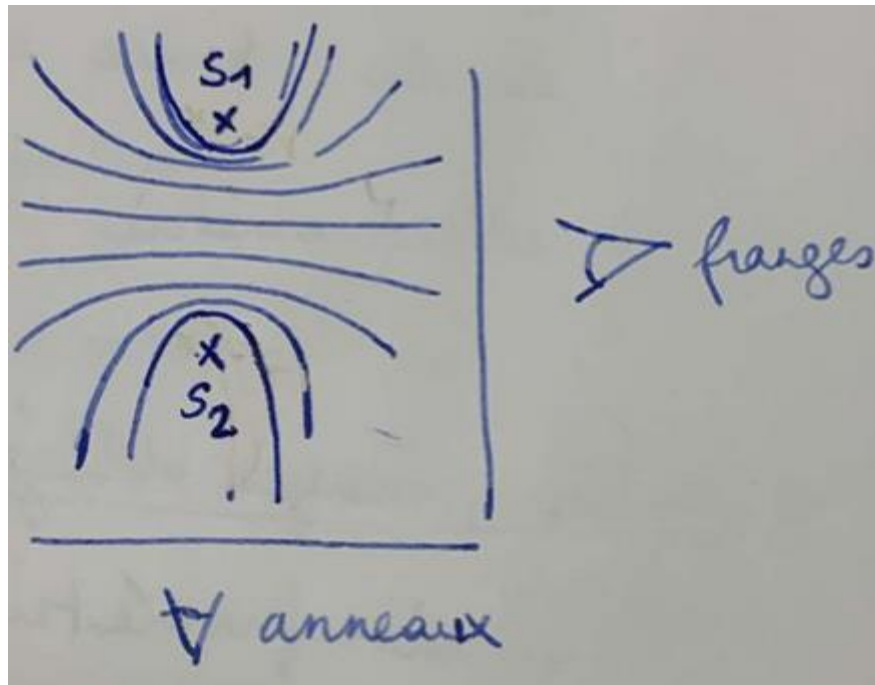
Localisation en lame d'air



Représentation schématique du Michelson



Observation franges ou anneaux



Autres applications du Michelson :

- spectroscopie de Fourier (Le Michelson fait la TF de la source. Pour le doublet du sodium, on a donc des battements)
- interférométrie

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

- interférométrie à spectroscopie de Fourier
- notion de cohérence (spatiale, spectrale)
- Présenter le principe d'un traitement anti-reflet (2024)
- Présenter une expérience permettant de mesurer un écart de longueur d'onde entre les deux raies jaune d'une lampe à sodium
- Présenter une application métrologique de l'interféromètre de Michelson. (2024)
- Mettre en œuvre expérimentalement une mesure d'indice de réfraction à l'aide d'un interféromètre de Michelson. (2024)
- Présenter, en justifiant les choix pédagogiques effectués, l'énoncé et la résolution d'un exercice traitant de la mesure de l'indice de réfraction d'un gaz. (2024)
- Présenter le principe d'un interféromètre Fabry-Perot