

Chapitre 03. Interférences par division d'amplitude : interféromètre de Michelson



Albert Abraham Michelson

(1852 - 1931) est un physicien américain. Il a reçu le prix Nobel de physique de 1907 pour ses instruments optiques de précision et les études spectroscopiques et métrologiques qu'il a menées grâce à ces appareils, cf annexe.

INTRO :

Au Ch02, nous avons étudié les trous d'Young, dispositif interférentiel par **division du front d'onde**. L'utilisation d'une source étendue conduit à une diminution uniforme du contraste de la figure d'interférences, qui sont non localisées.

On étudie ici l'interféromètre de Michelson, dispositif interférentiel par **division d'amplitude** : un même rayon est séparé en deux parties par réflexion partielle sur une lame semi-réfléchissante (idéalement 50% de l'intensité incidente est transmise et 50% est réfléchie). Le trajet des rayons transmis et réfléchi est ensuite contrôlé grâce à des miroirs pour les superposer en sortie de l'interféromètre. Eclairé par une **source étendue**, les dispositifs interférentiels par division d'amplitude produisent des **interférences localisées** : le contraste de la figure est maximal sur une **surface** particulière de l'espace. En observant les interférences au lieu de localisation, la figure est lumineuse et contrastée.

On étudie ici l'interféromètre de Michelson d'un point de vue théorique mais il faut retenir les aspects expérimentaux associés (détaillés au TP10C-D).

Buts de ce chapitre : décrire l'interféromètre de Michelson ; interpréter la forme des franges via l'ordre d'interférences p ; présenter les deux configurations possibles et leurs applications.

Prérequis :

1^e année : Optique géométrique ; Propagation d'un signal - Interférences.

2^e année : O1 Optique ondulatoire – Superposition d'ondes lumineuses ; O2 Interférences par division du front d'onde

Plan du chapitre :

A) Présentation générale	2
1) Constitution	2
2) Nécessité de la lame compensatrice - Modélisation	3
3) Schéma équivalent	3
B) Configurations de l'interféromètre – Interférences localisées.....	4
1) Contact optique	4
2) « Lame d'air » et « coin d'air » - Localisation des interférences	4
C) Etude en lame d'air ($\alpha = 0$) – Anneaux d'égale inclinaison localisés à l'infini	6
1) Différence de marche – Ordre d'interférence – Nature des franges	6
2) Conditions d'éclairage et d'observation : à connaître et à mettre en œuvre en TP !	7
3) Rayon des anneaux	7
4) Mesures spectroscopiques (cf TP10D et TD).....	9
D) Résultats en coin d'air ($\alpha \neq 0$) – Franges rectilignes d'égale épaisseur localisées sur les miroirs	10
1) Conditions d'éclairage et d'observation : à connaître et à mettre en œuvre en TP !	10
2) Différence de marche – Ordre d'interférence – Nature des franges	10

3) Interfrange.....	11
4) Eclairage du coin d'air par la lumière blanche – Teintes de Newton – Spectre cannelé	11
5) Mesures interférométriques (cf TP10D et TD).....	13
Bilans comparatifs.....	14
Annexe : Expérience historique de l'interféromètre de Michelson et applications actuelles	16

A) Présentation générale

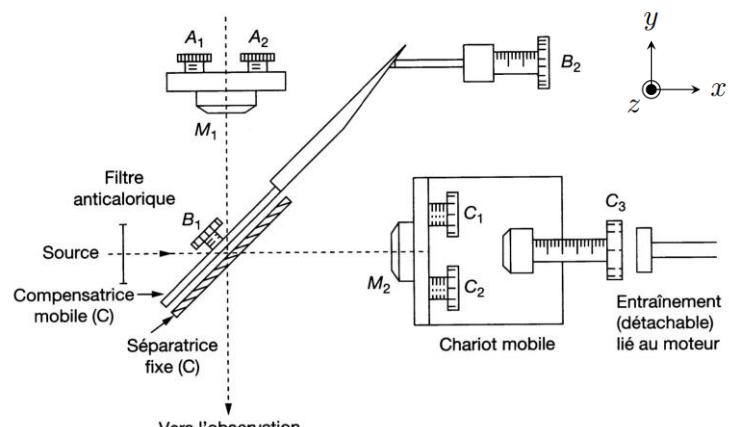
1) Constitution

Un interféromètre de Michelson compte un dispositif de séparation qui assure la **division d'amplitude** et deux **bras** contenant chacun un miroir de précision (M_1 et M_2).

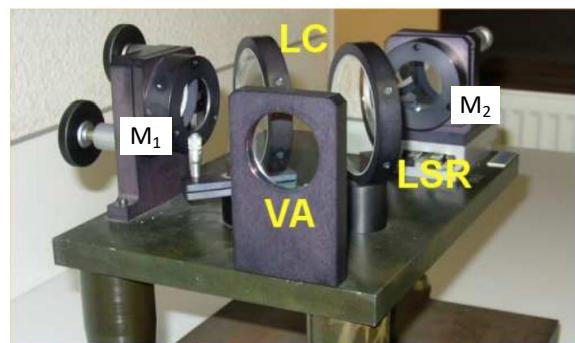
- ♦ Le miroir M_1 est appelé **miroir fixe**. Deux vis de réglage fin (A_1 et A_2) permettent de le faire pivoter autour des axes (Ox) et (Oz) .
 - ♦ Le miroir M_2 peut pivoter autour des axes (Oy) et (Oz) grâce aux deux vis de réglage grossier (C_1 et C_2). M_2 est appelé **miroir mobile** car il peut être translaté parallèlement à l'axe (Ox) grâce à la vis de translation C_3 , on parle de **chariotage** de M_2 . On repère la position de M_2 le long de l'axe (Ox) grâce à un vernier micrométrique.
 - ♦ La séparatrice, notée LSR = **lame semi-réfléchissante**, qui fait un angle d'environ 45° avec chaque miroir, assure la division d'amplitude : sa face d'entrée est traitée de manière à partager un rayon incident issu de la source S en deux rayons d'égale intensité :
 - l'un ressort de la lame sans être dévié (il se réfléchit ensuite sur M_2)
 - l'autre est réfléchi selon les lois de Snell-Descartes (il se réfléchit ensuite sur M_1).
 - ♦ L'interféromètre comprend également une **lame de verre anticalorique** (VA) qui absorbe les infrarouges du faisceau lumineux incident afin d'éviter l'échauffement des miroirs et une **lame compensatrice** (LC) présente sur le bras n°1, cf détails au § suivant.



Vue de dessus



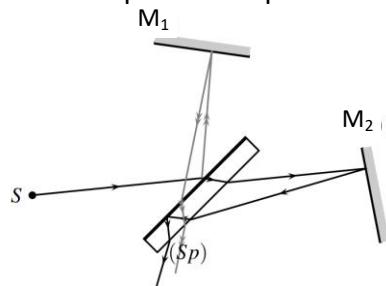
 Vue de côté



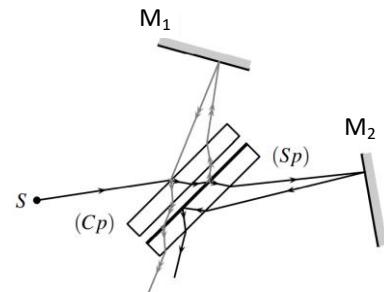
Ch03. Division d'amplitude

2) Nécessité de la lame compensatrice - Modélisation

En l'absence de lame compensatrice, le rayon qui se réfléchit sur M_2 traverse 3 fois la lame séparatrice alors que le rayon qui se réfléchit sur M_1 ne la traverse qu'une fois. On choisit donc des lames séparatrice et compensatrice de même indice et de même épaisseur et avec deux vis (B_1 et B_2), on règle l'orientation de la compensatrice afin qu'elle soit parallèle à la séparatrice.



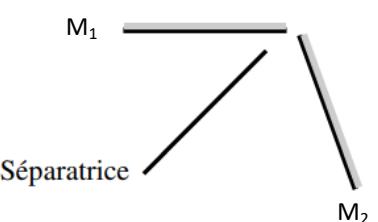
Lame séparatrice seule (notée ici S_p)



Rajout d'une lame compensatrice (notée ici C_p)

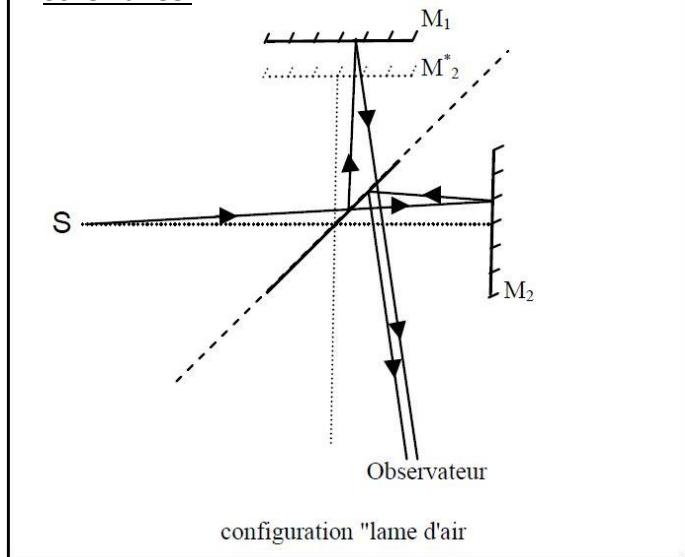
La lame compensatrice permet de compenser la différence de marche existant entre les deux voies du fait de la traversée de la lame séparatrice.

Dans toute la suite, on considérera que l'ensemble des lames séparatrice et compensatrice est équivalent à une **lame séparatrice d'épaisseur nulle**, n'introduisant aucune différence de marche, cf schéma ci-contre.



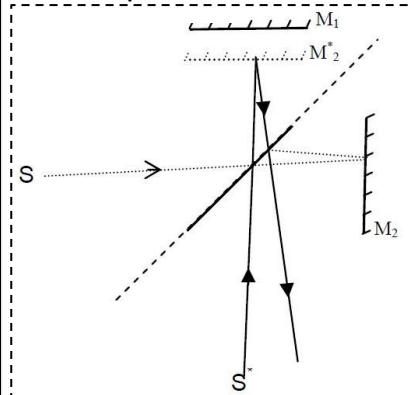
3) Schéma équivalent

Schéma réel



configuration "lame d'air"

Voie 2 équivalente



Voie 1 équivalente

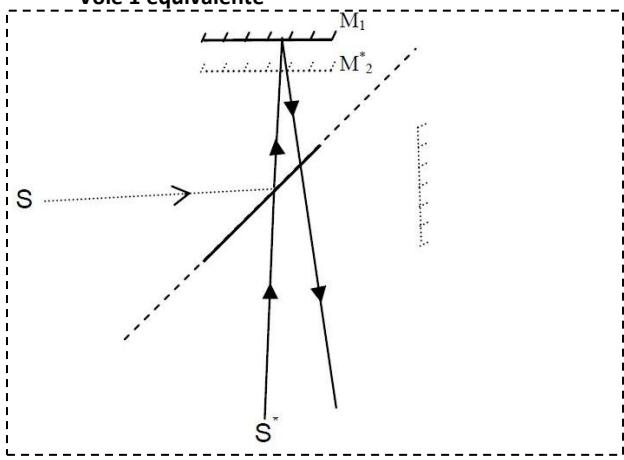
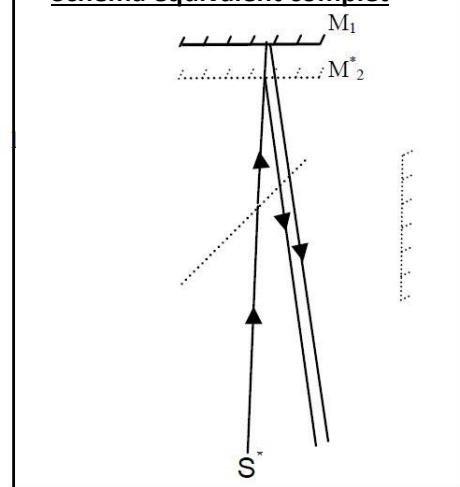


Schéma équivalent complet



On considère une source S ponctuelle.

On introduit :

- **S* image de S par la séparatrice** : S* est le symétrique de S par rapport à la séparatrice ;
- **M₂*** image de M₂ par la séparatrice : M₂* est le symétrique de M₂ par rapport à la séparatrice.

Du fait de la réflexion des rayons sur la séparatrice, tout se passe comme si les rayons étaient issus d'une source S* et se réfléchissaient sur un miroir fictif M₂*.

Le calcul de la différence de marche est inchangé si on considère que S* est la source et que les chemins (1) et (2) correspondent à des réflexions sur (M₁) et (M₂*) respectivement.

Dans la suite, **on raisonnera sur le schéma équivalent de l'interféromètre**, où la source primaire S, la séparatrice et le miroir M₂ ne sont plus représentés.

L'état de l'interféromètre de Michelson est caractérisé par deux paramètres :

- la **distance e** entre le miroir (M₁) et le **miroir équivalent / fictif (M₂*)** ;
- l'**angle α** entre ces deux miroirs.

On peut aussi introduire les **sources secondaires** :

- S₁ image de S* par le miroir M₁ : S₁ est le symétrique de S* par M₁ ;
- S₂ image de S* par le miroir M₂* : S₂ est le symétrique de S* par M₂*.

B) Configurations de l'interféromètre – Interférences localisées

1) Contact optique

Si les miroirs M₁ et M₂ sont :

- situés à égale distance de la séparatrice, i.e. $e = 0$
- et perpendiculaires entre eux, i.e. $\alpha = 0$

Alors, en tout point M, $\delta(M) = 0$: l'interféromètre de Michelson est au **CONTACT OPTIQUE**^{*}.

En tout point M, l'ordre d'interférence est nul, l'écran est donc uniformément éclairé. La figure observée est appelée **TEINTE PLATE** : il s'agit d'une unique frange d'interférence constructive.

^{*} Cette situation correspond à la superposition du miroir (M₁) et du miroir équivalent / fictif (M₂*).

2) « Lame d'air » et « coin d'air » - Localisation des interférences

A partir du **contact optique**, il y a deux façons de faire apparaître une différence de marche non uniforme :

- $\alpha = 0$ et $e \neq 0$ en translatant (M₂) : configuration **LAME D'AIR**, cf § C ;
- $\alpha \neq 0$ en pivotant (M₁) ou (M₂) : configuration **COIN D'AIR**, cf § D.

Les rayons lumineux qui interfèrent sont issus de la division d'amplitude d'un même rayon incident. Eclairé par une source étendue, l'interféromètre de Michelson produit des interférences **localisées** :

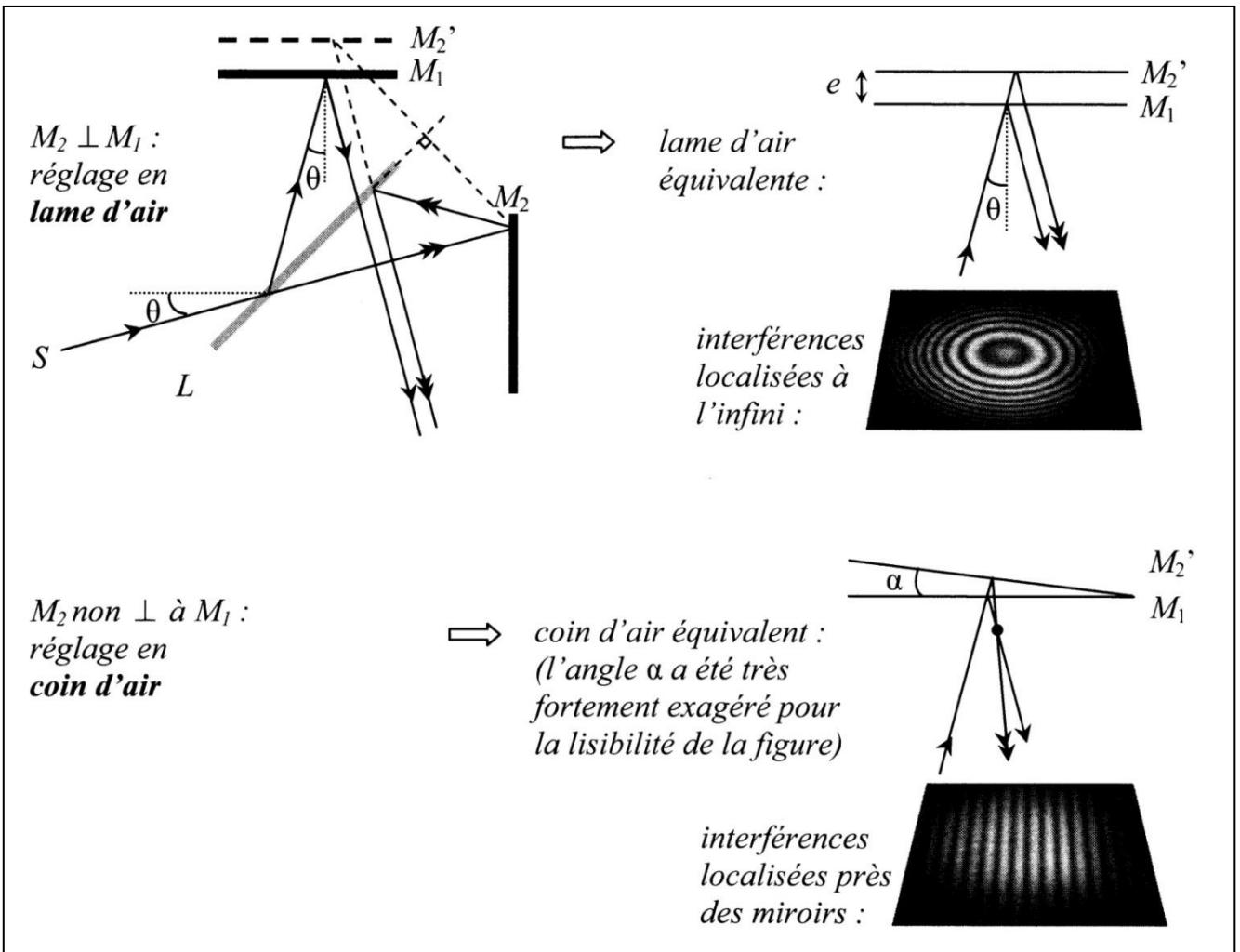
- à l'infini en **configuration lame d'air** ;
- près des miroirs en **configuration coin d'air**.

Les **interférences** produites par un interféromètre à division d'amplitude éclairé par une source étendue sont **LOCALISEES**. On appelle **lieu de localisation** la **surface du champ d'interférences où le contraste est maximal**.

Pour un point M du lieu de localisation, la différence de marche ne dépend pas de la position de la source (cf § C.1), donc les franges d'interférences données par les différents points d'une source étendue se superposent sans se brouiller : **en passant d'une source ponctuelle à une source étendue, la figure d'interférences au lieu de localisation gagne en intensité sans perdre en contraste.**

C'est pourquoi un **interféromètre à division d'amplitude**, éclairé par une source étendue, permet d'obtenir au lieu de localisation des interférences à la fois lumineuses et contrastées contrairement aux interféromètres à division du front d'onde.

Pour observer la figure d'interférences, il faut la projeter sur un écran avec une lentille (cf conditions d'observation § C.2 – D.1).



Cf animation :

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/michelson.html>

NB : Au lieu de localisation, l'interféromètre de Michelson n'est pas sensible à la cohérence spatiale mais il est **sensible à la cohérence temporelle**. Cette propriété est discutée aux § C.4 et D.4.

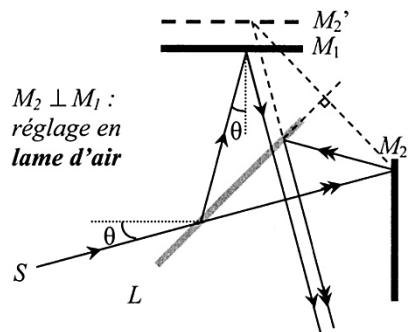
Dans toute la suite, on étudie les interférences au lieu de localisation.

C) Etude en lame d'air ($\alpha = 0$) – Anneaux d'égale inclinaison localisés à l'infini

En configuration **LAME D'AIR**, (M_1) et (M_2) sont perpendiculaires.

Sur le schéma équivalent, (M_1) et (M_2^*) sont parallèles, i.e. $\alpha = 0$, et distants de l'épaisseur e , appelée **épaisseur de la lame d'air**. En pratique, la distance e est très faible.

En configuration lame d'air, les **interférences sont localisées à l'infini**.



1) Différence de marche – Ordre d'interférence – Nature des franges

Pour une onde monochromatique de longueur d'onde λ_0 :

① Différence de marche en M, situé à l'infini	② Ordre d'interférence associé
$\delta = 2e \cos(\theta)$ <p>Avec θ l'angle d'incidence des rayons sur les miroirs qui correspond à la direction d'observation</p>	$p = \frac{2e \cos(\theta)}{\lambda_0}$

➲ Démonstration à connaître :

Faire un schéma et établir l'expression ① de la différence de marche en lame d'air.

Il y a 2 raisonnements possibles selon que l'on utilise ou pas les sources secondaires S_1 et S_2 .



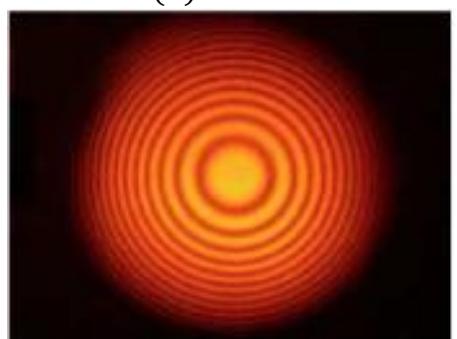
NB : La différence de marche ne dépend pas de la position du point source mais seulement de l'angle d'inclinaison du rayon émis : les figures d'interférences dues aux différents points de la source se superposent sans brouillage.

Rq : Si l'interféromètre se trouve dans un milieu d'indice optique n alors $\delta = 2necos(\theta)$.

Les franges d'interférences sont des zones telles que $\delta = cste$ ou $p = cst$ soit ici $\theta = cste$.

Ce qui permet d'interpréter la forme des franges observées : **anneaux concentriques perpendiculaires à la normale au miroir (M_1)**.

Ces franges sont donc appelées **ANNEAUX D'EGALE INCLINAISON**.



Anneaux d'égale inclinaison obtenus en éclairant l'interféromètre de Michelson réglé en lame d'air avec une lampe à vapeur de Sodium

2) Conditions d'éclairage et d'observation : à connaître et à mettre en œuvre en TP !

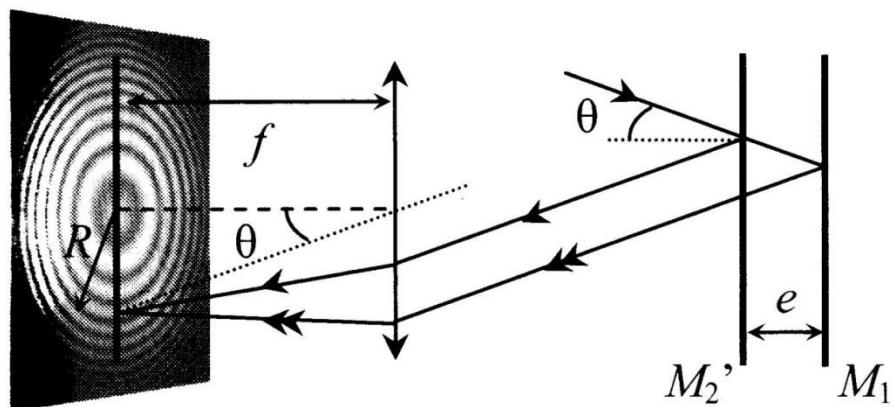
a) Condition d'éclairage

Pour maximiser la luminosité de la figure et le nombre d'anneaux, il faut que le faisceau atteignant le miroir (M_2') contienne un maximum de rayons avec des angles θ les plus variés possibles. Pour cela, la source et (M_2') sont conjugués par une lentille convergente (L_1) de courte focale (condenseur) dans une configuration proche de Silbermann.

b) Condition d'observation

En configuration lame d'air, les interférences sont localisées à l'infini. On utilise donc une lentille convergente (L_2) (lentille de projection) en sortie de l'interféromètre et on place un écran dans le plan focal image de cette lentille. NB : la différence de marche n'est pas modifiée par l'ajout de (L_2).

Les anneaux sont d'autant plus grands que la distance focale f' de (L_2) est élevée, cf § C.3.



3) Rayon des anneaux

On éclaire l'interféromètre avec une source monochromatique de longueur d'onde λ_0 .

D'après la figure ci-dessus, le rayon de l'anneau associé à l'inclinaison θ vérifie : $R = f' \cdot \tan(\theta)$

Pour les angles d'inclinaison $\theta \ll 1 \text{ rad}$: $R \approx f' \theta$

a) Pour une épaisseur e de lame d'air fixée :

L'ordre d'interférence est maximal au centre de l'écran :

$$\theta = 0 \Leftrightarrow \cos(\theta) = 1 \text{ soit } p_0 = \frac{2e}{\lambda_0}.$$

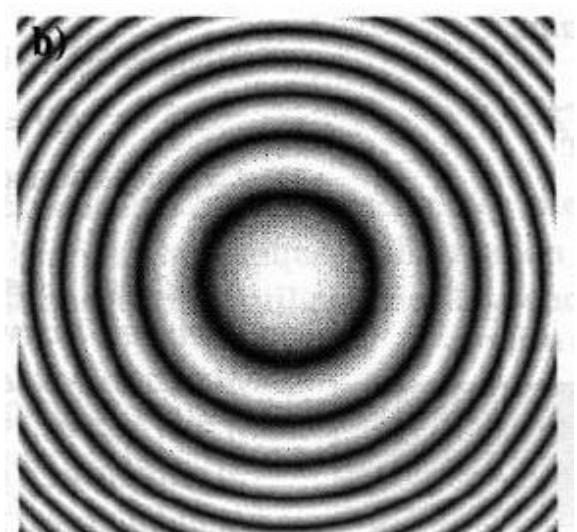
Considérons une situation telle que l'anneau central soit brillant i.e. $p_0 \in \mathbb{N}$.

Le N^{e} anneau brillant (compté depuis le centre) est tel que :

- son ordre d'interférence vérifie $p = p_0 - N + 1$
- on note R_N son rayon.

Pour les anneaux associés à un angle d'inclinaison $\theta \ll 1 \text{ rad}$, on peut montrer (cf TD) que :

$$R_N = f' \cdot \sqrt{2 - \frac{\lambda_0 p}{e}} = f' \cdot \sqrt{(N-1)} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_0}{e}}$$



Bilan : En lame d'air, l'ordre d'interférence est maximal au centre de la figure et minimal sur le pourtour. La distance entre deux anneaux brillants successifs n'est pas constante : les anneaux sont de plus en plus rapprochés à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'écran, cf figure ci-dessus et expression de R_N .

b) Evolution de la figure lorsqu'on fait varier l'épaisseur e de lame d'air :

Lorsque l'on translate le miroir (M_2), on modifie l'épaisseur e de lame d'air.

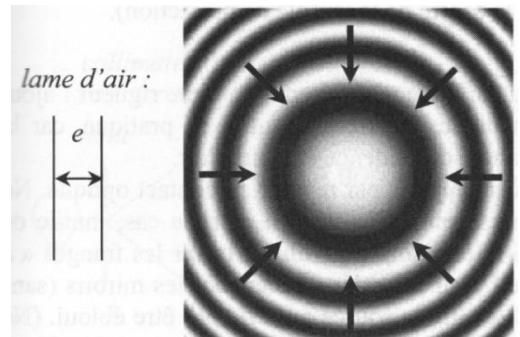
① Considérons l'anneau brillant d'ordre d'interférence p .

Comment évolue son rayon lorsque e diminue ?

$$p = \frac{2e \cos(\theta)}{\lambda_0} \Leftrightarrow \cos(\theta) = \frac{\lambda_0 p}{2e}$$

Ainsi, lorsque e diminue, cf ci-contre :

$$\cos(\theta) \nearrow \Rightarrow \theta \searrow \Rightarrow \tan(\theta) \searrow \Rightarrow R = f' \cdot \tan(\theta) \searrow$$

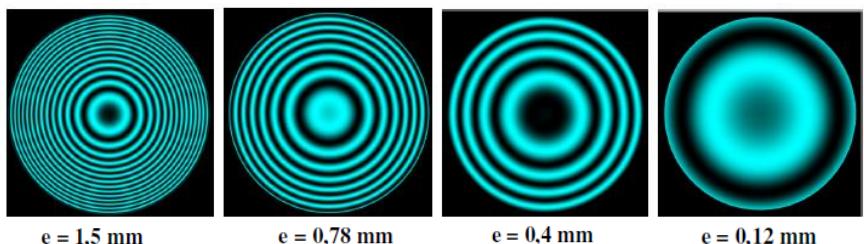


② La partie entière de l'ordre d'interférence au centre de l'écran $p_0 = \frac{2e}{\lambda_0}$ correspond au nombre d'anneaux visibles.

Ainsi, lorsque e diminue, cf ci-contre de gauche à droite :

$$p_0 = \frac{2e}{\lambda_0} \text{ diminue}$$

\Rightarrow moins d'anneaux visibles



Bilan : En lame d'air, lorsqu'on se rapproche du contact optique (e diminue) :

- le rayon de l'anneau d'ordre p diminue. On dit que les anneaux rentrent.

- le nombre d'anneaux visibles diminue.

Au contact optique ($e = 0$), en tout point M, $p = 0$: on a une **unique frange d'interférence constructive nommée teinte plate** (écran éclairé uniformément).

En TP, il faudra s'appuyer sur ces résultats pour identifier le sens de translation de (M_2) permettant de se rapprocher du contact optique.

4) Mesures spectroscopiques (cf TP10D et TD)

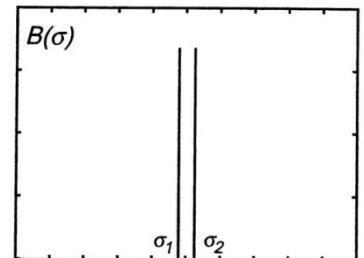
L'interféromètre de Michelson est sensible à la **cohérence temporelle**.

On l'utilise alors pour réaliser des mesures spectroscopiques en étudiant l'évolution du **contraste de la figure d'interférences**.

a) Ecart spectral d'un doublet

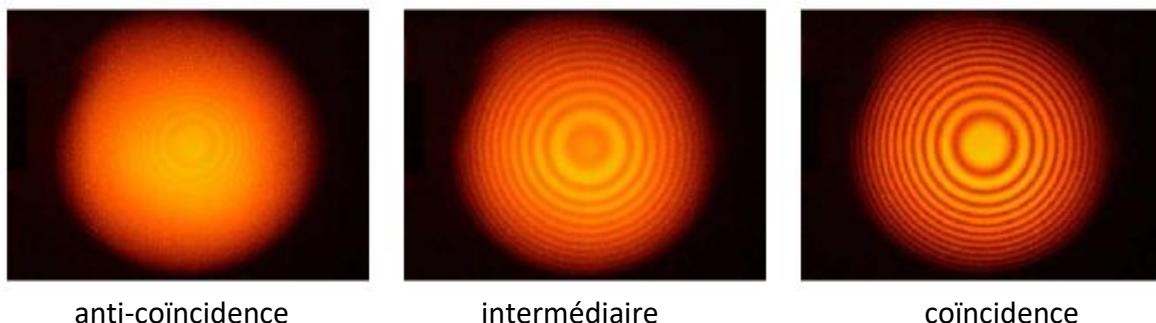
La lampe à vapeur de sodium (Na) émet principalement un doublet jaune (couleur de la lampe allumée) i.e. deux raies de longueurs d'onde très proches, cf spectre ci-contre en nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$.

On note $\lambda_m = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ la valeur moyenne des longueurs d'onde du doublet et $\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|$ l'écart entre les longueurs d'onde de chaque raie.



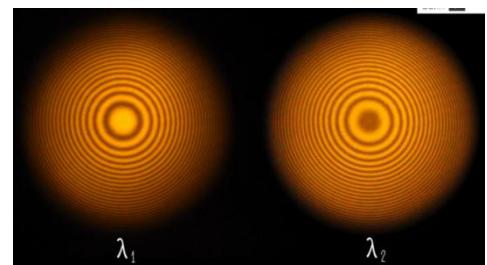
On éclaire l'interféromètre de Michelson réglé en lame d'air par une lampe au Sodium. Lorsque l'on translate le miroir mobile, le contraste s'annule périodiquement (près du centre).

Au **maximum de contraste**, on parle de **coïncidence** et lorsque que le **contraste est nul**, on parle d'**anti-coïncidence** (brouillage de la figure d'interférence).



En images cf culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/physique-animee-Michelson-battements-optiques.xml

Situation d'anti-coïncidence : les anneaux brillants de la figure d'interférences due à l'onde de longueur d'onde λ_1 se superposent aux anneaux sombres de la figure d'interférences due à l'onde de longueur d'onde λ_2 .

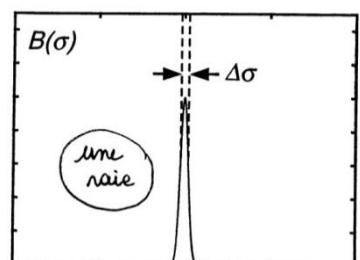


En pratique : En repérant les positions du miroir mobile correspondant aux **anti-coïncidences**, on peut évaluer l'écart $\Delta\lambda$ du doublet de raies, cf TP et TD.

b) Longueur de cohérence temporelle / Largeur spectrale d'une raie

On considère une source non monochromatique dont le spectre d'émission à une largeur spectrale $\Delta\lambda$ autour d'une valeur moyenne λ_m , cf ci-contre le spectre en nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$.

On a vu au ChO2 qu'il y a interférence si $\delta < L_c$ où L_c est la longueur de cohérence temporelle de la source.



On éclaire un interféromètre de Michelson en configuration lame d'air avec une lampe à vapeur de mercure munie d'un filtre vert pour isoler une raie spectrale.

A partir du contact optique, on translate le miroir mobile M_2 jusqu'au brouillage de la figure d'interférences.

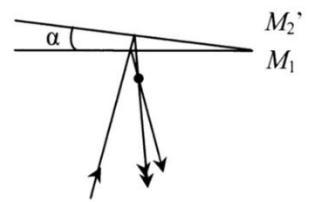
En pratique : En repérant les positions du miroir mobile de part et d'autre du contact optique telles qu'on a **brouillage**, on peut évaluer la largeur spectrale $\Delta\lambda$ de la raie étudiée, cf TP et TD.

D) Résultats en coin d'air ($\alpha \neq 0$) – Franges rectilignes d'épaisseur localisées sur les miroirs

En configuration **COIN D'AIR**, (M_1) et (M_2) ne sont pas perpendiculaires.

Sur le schéma équivalent, (M_1) et (M_2^*) forment un angle $\alpha \neq 0$ appelé angle du coin d'air. En pratique, l'angle α est très faible : $\alpha \approx 10^{-3} \text{ rad}$.

En configuration coin d'air, les interférences sont localisées près des miroirs.



1) Conditions d'éclairage et d'observation : à connaître et à mettre en œuvre en TP !

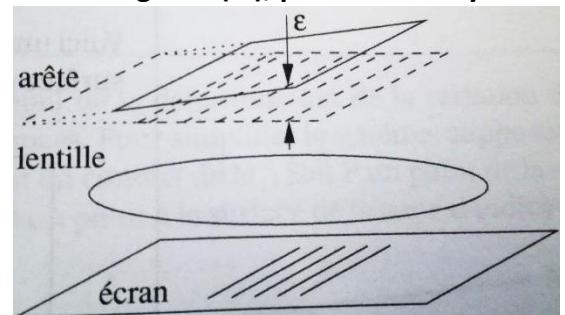
a) Condition d'éclairage

Afin de voir les franges, il faut éclairer les miroirs avec un faisceau de rayons parallèles en incidence quasi normale.

Pour cela, on place la source dans le plan focal objet d'une lentille convergente (L_1), près de son foyer.

b) Condition d'observation

En configuration coin d'air, les interférences sont localisées près des miroirs. On utilise donc une lentille convergente (L_2) en sortie de l'interféromètre pour faire l'image du miroir (M_1) sur un écran i.e. que (M_1) et l'écran sont conjugués par (L_2) .

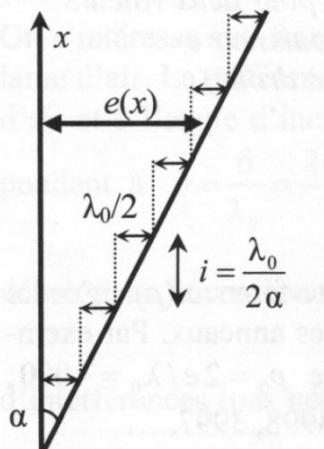


2) Différence de marche – Ordre d'interférence – Nature des franges

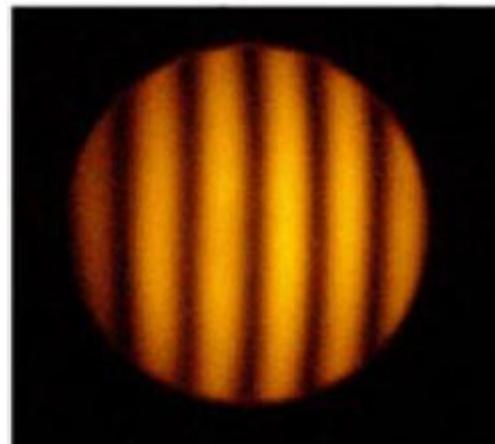
Pour une onde monochromatique de longueur d'onde λ_0 et un rayon en incidence normale sur (M_1) :

① Différence de marche en M, situé <u>près des miroirs</u>	② Ordre d'interférence associé
$\delta = 2e(x) \approx 2\alpha x$, avec x défini ci-dessous Cette expression vous sera fournie.	$p \approx \frac{2\alpha x}{\lambda_0}$

Rq : Si l'interféromètre se trouve dans un milieu d'un indice optique n alors $\delta = 2n\alpha x$.



Vue de dessus



A l'écran

Les franges d'interférences sont des zones telles que $\delta = \text{cste}$ ou $p = \text{cst}$ soit ici $e(x) \approx \alpha x = \text{cste}$.

Ce qui permet d'interpréter la forme des franges observées : franges rectilignes parallèles à l'arête commune des miroirs (M_1) et (M_2^*).

Ces franges sont donc appelées FRANGES D'EGALE EPAISSEUR.

3) Interfrange

On éclaire l'interféromètre de Michelson avec une source monochromatique de longueur d'onde λ_0 .

a) Pour un coin d'air d'angle α fixé :

⇒ Exercice classique : Montrer que l'interfrange s'écrit : $i = \frac{\lambda_0}{2\alpha}$

Bilan : L'interfrange est constant : les franges sont équidistantes.

b) Evolution de la figure lorsqu'on fait varier l'angle α du coin d'air :

Lorsque l'on pivote le miroir (M_1), on modifie l'angle α du coin d'air.

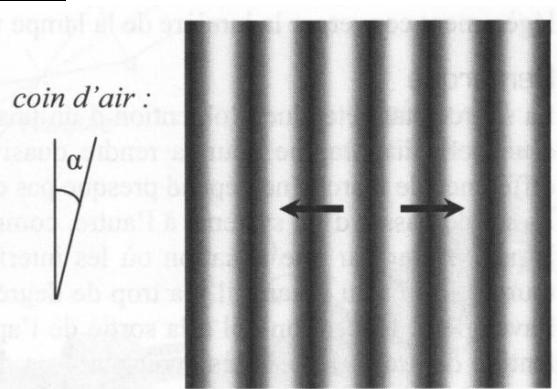
Lorsque α diminue, cf ci-contre :

i augmente

⇒ les franges s'éloignent les unes des autres

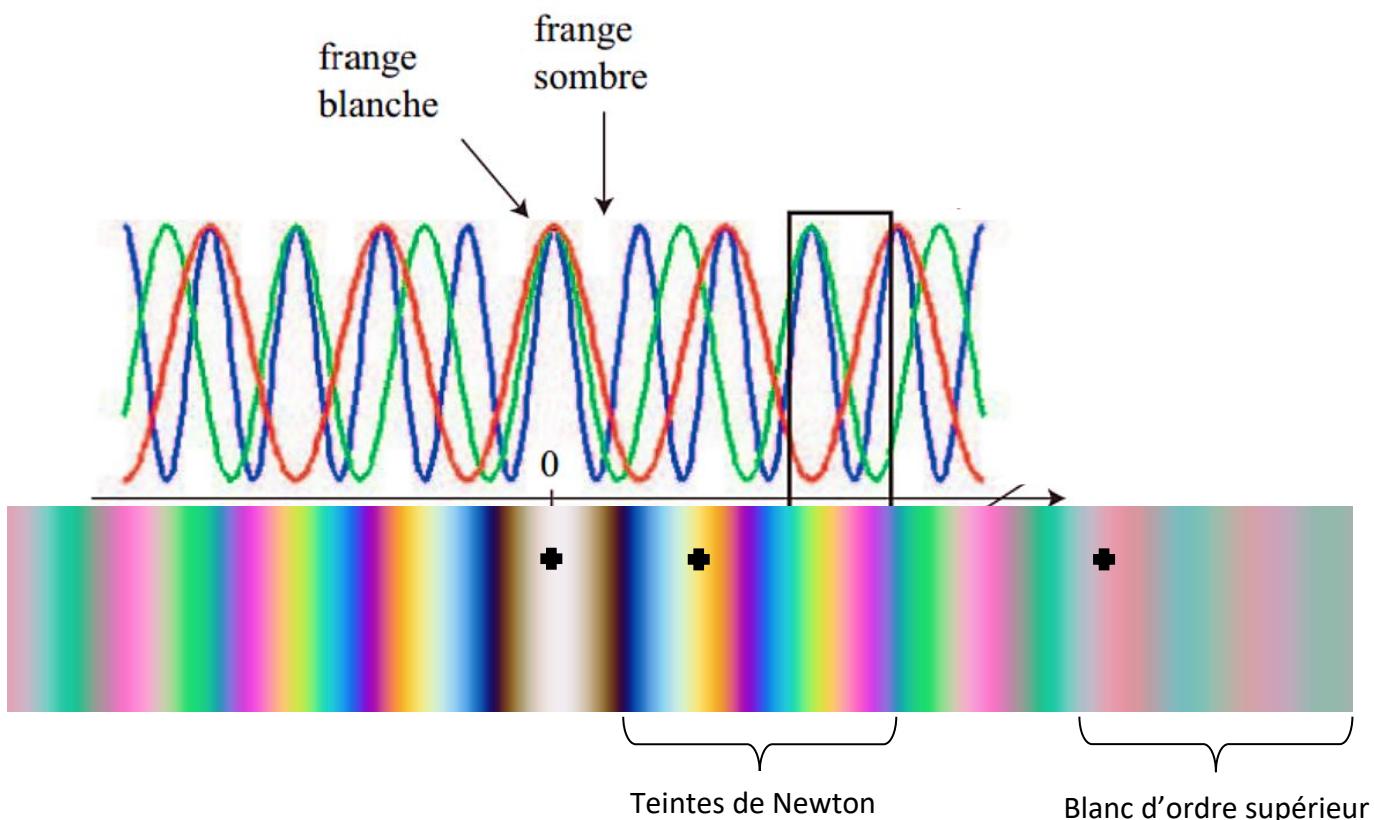
Bilan : Lorsqu'on se rapproche du contact optique (α diminue), les franges s'éloignent les unes des autres.

En TP, il faudra s'appuyer sur ce résultat pour identifier le sens de rotation des vis de pivotement de (M_1) permettant de se rapprocher du contact optique.



4) Eclairage du coin d'air par la lumière blanche – Teintes de Newton – Spectre cannelé

Comme pour les trous d'Young éclairés en lumière blanche, l'interfrange augmente avec la longueur d'onde. La figure d'interférences obtenues en lumière blanche est donc similaire, cf § C.4 du Ch02.

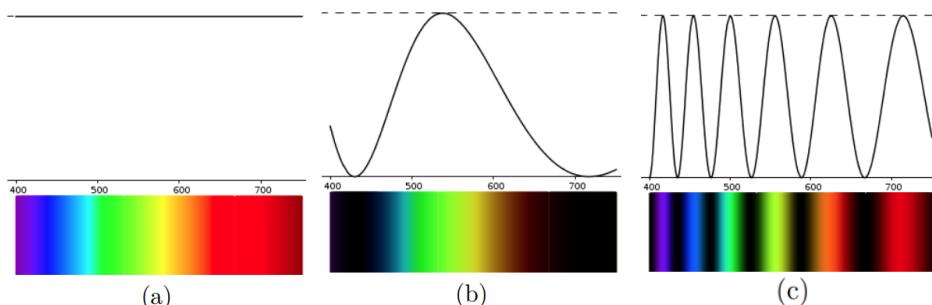


L'ordre d'interférence au point M d'abscisse x dépend de la longueur d'onde : $p \approx \frac{2\alpha x}{\lambda_0}$.

Hormis en $x = 0$, la nature de l'interférence n'est donc pas la même pour toutes les longueurs d'onde.

Avec un spectromètre à fibre optique, on réalise le spectre de la lumière obtenue en un point M de la figure d'interférences.

Les figures ci-dessous donnent les spectres aux 3 points repérés sur la figure précédente.



D'après l'animation : <https://www.geogebra.org/m/usV5s5FR>

Le spectre (c) présentent des zones noires, appelées **CANNELURES**, on parle de **SPECTRE CANNELE**.

Une cannelure correspond à une longueur d'onde absente du spectre de la lumière reçue en un point M.

En M, cette longueur d'onde est associée à un ordre d'interférence demi-entier i.e. qu'en M, il y a interférence destructive pour cette longueur d'onde.

Pour prévoir la couleur observée sur l'écran, il faut identifier la couleur correspondant à :

- la synthèse additive des couleurs pour lesquelles les interférences sont constructives ;
- la couleur complémentaire des couleurs pour lesquelles les interférences sont destructives.

(a) Au centre de la figure : $x = 0$ donc $p = 0$ pour toutes les longueurs d'onde, qui interfèrent toutes constructivement. Le spectre en sortie de l'interféromètre est identique au spectre en entrée, la couleur observée aussi. Cette couleur est identique à celle observée au contact optique en lame d'air.

(b) Immédiatement autour : on observe des **raies irisées** : ce sont les **TEINTES DE NEWTON**. Seules une ou deux longueurs d'onde interfèrent destructivement, et on observe la couleur complémentaire.

(c) À grande distance : lorsque x devient trop grand, beaucoup de longueurs d'onde interfèrent destructivement, beaucoup constructivement, si bien que l'œil n'est plus capable de les distinguer et a une **impression de blanc**, appelé **BLANC D'ORDRE SUPERIEUR**. C'est ce que donne le spectre (c). Le blanc d'ordre supérieur correspond au brouillage des franges car le critère $\delta(M) < L_c$ n'est plus respecté.

En pratique, le blanc d'ordre supérieur apparaît pour des différences de marche très faibles puisque pour une lampe à filament $L_c \approx 0,1 \mu\text{m}$.

5) Mesures interférométriques (cf TP10D et TD)

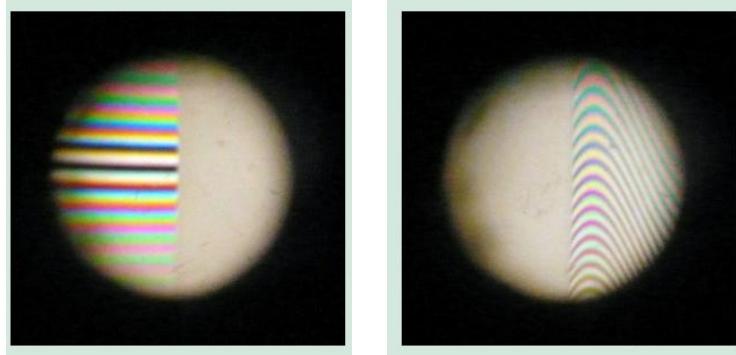
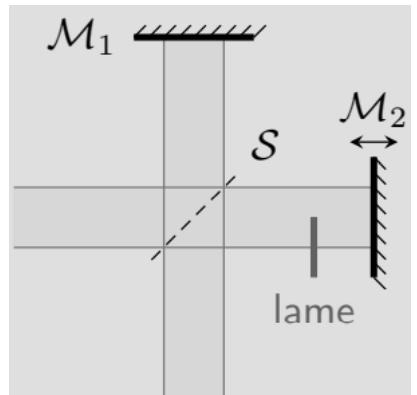
Une **lame de phase** est un **objet transparent d'indice $n \neq 1$** . On l'appelle ainsi car le passage de l'onde lumineuse au travers d'un tel objet la déphase par rapport à la situation où elle serait passée dans l'air. La grande sensibilité des interférences en lumière blanche à des différences de marche infimes peut être exploitée pour mesurer l'indice n de l'objet ou visualiser ses inhomogénéités d'épaisseur.

a) Détermination d'un indice optique

Considérons un **interféromètre de Michelson réglé en coin d'air et éclairé en lumière blanche**.

On interpose une lamelle de microscope dans le bras ② de l'interféromètre de telle sorte qu'elle ne recouvre que la moitié du faisceau. Cette lamelle a une épaisseur $l = 0,16 \text{ mm}$ mesurée au palmer, et on cherche à déterminer son indice n .

En pratique : Partant des franges de lumière blanche côté air (photo de gauche), le miroir mobile M_2 est translaté jusqu'à les retrouver côté lame de verre (photo de droite). On lit sur le vernier qu'il a été déplacé de d pendant l'opération. On peut montrer (cf TD) que $n = 1 + \frac{d}{l}$.



b) Principe de la mesure d'un défaut de planéité

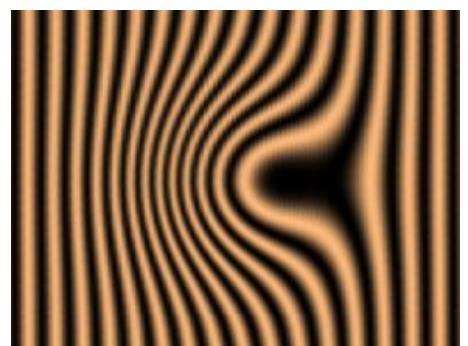
Considérons un **interféromètre de Michelson réglé en coin d'air et éclairé avec une lampe au sodium, considérée comme monochromatique** de longueur d'onde $\lambda_0 = 0,590 \mu\text{m}$.

On introduit devant le miroir (M_2) une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur e' et d'indice n que l'on place parallèlement au miroir. On peut ainsi détecter les **défauts de la lame qui n'a pas forcément une épaisseur e' parfaitement égale en tout point**.

La figure ci-contre est une simulation de la déformation des franges due à une « bosse » de hauteur $\Delta e'$ sur une lame d'indice $n = 1,5$.

Le sommet de la bosse est au centre de la figure, sur la frange la plus déformée qui se décale vers la gauche (perpendiculairement aux franges) d'environ 3 interfranges. C'est le signe que la lumière qui traverse la lame à cet endroit a un supplément de différence de marche égal à environ $3\lambda_0$ dû à la bosse.

On en déduit que : $\Delta e' = \frac{3\lambda_0}{2(n-1)} \approx 1,8 \mu\text{m}$.



Cette méthode est utilisée pour contrôler des éléments d'optique de haute précision.

On peut déceler une bosse (ou un creux) de hauteur de l'ordre de $\frac{\lambda_0}{10} \approx 50 \text{ nm}$.

Bilans comparatifs

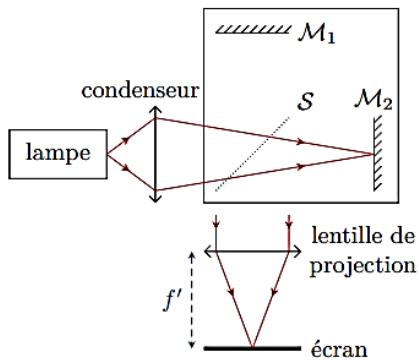
Dispositif interférentiel	Trous / fentes d'Young	Interféromètre de Michelson
à division ...		
Interférences localisées ?		
Sensibilité à la cohérence spatiale ?		
Sensibilité à la cohérence temporelle ?		
Bilan en images	<i>culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/physique-animee-Fentes-Young.xml</i>	<i>Cf ci-dessous</i>

Interféromètre de Michelson	Lame d'air	Coin d'air
Différence de marche	$\delta = 2e \cos(\theta)$	$\delta = 2e(x) \approx 2\alpha x$
Type de franges		
Condition d'éclairage		
Lieu d'interférences		
Condition d'observation		
Bilan en images	<i>culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/physique-animee-Michelson-lame-air.xml</i>	<i>culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/physique-animee-Michelson-coin-air.xml</i>

Synthèse schématique à retenir, en particulier pour les TP :

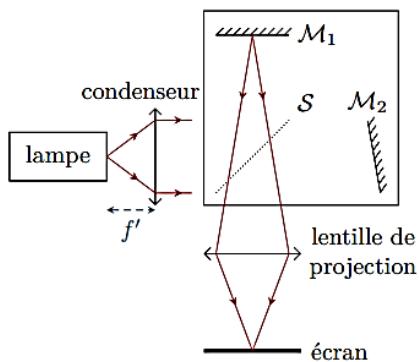
✿ Les rayons représentés symbolisent le montage expérimental, mais ne sont pas les rayons qui interfèrent.

Lame d'air



- ▷ Miroirs fictifs parfaitement parallèles.
- ▷ Franges circulaires : « anneaux d'égale inclinaison », $\delta = 2e \cos i$.
- ▷ Localisation à l'infini, donc observation dans le plan focal image d'une lentille convergente.
- ▷ Éclairage convergent sur les miroirs, donc utilisation d'un condenseur.

Coin d'air



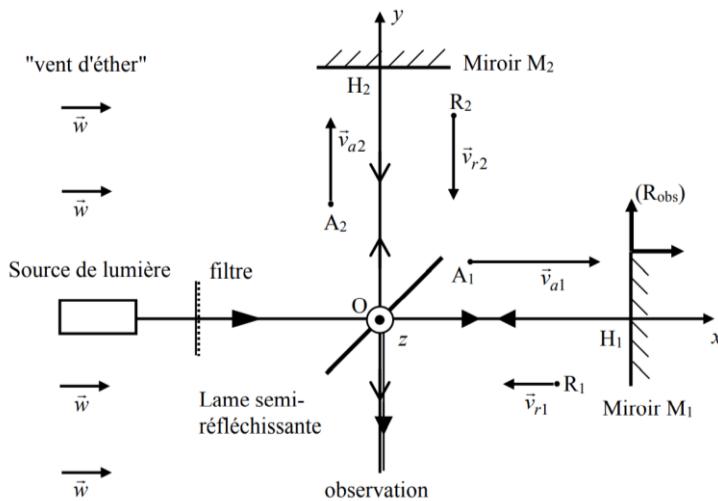
- ▷ Miroirs fictifs inclinés.
- ▷ Franges rectilignes : « franges d'égale épaisseur ».
- ▷ Localisation sur les miroirs, dont on forme l'image sur un écran avec une lentille de projection pour pouvoir les observer.
- ▷ Éclairage parallèle, donc source dans le plan focal objet d'un condenseur.

Annexe : Expérience historique de l'interféromètre de Michelson et applications actuelles

NB : dans cette annexe, le miroir fixe est noté M2 et le miroir mobile est noté M1.

Expérience de Michelson-Morley (cf CCINP 2020)

L'interféromètre de Michelson a été développé à la fin du XIX^e siècle par Albert Michelson. Il semblait à l'époque inenvisageable qu'une onde électromagnétique puisse se propager sans milieu matériel. Albert Michelson et Edward Morley ont donc cherché à mesurer la vitesse de la lumière par rapport à son support supposé, appelé l'éther, en se basant sur la loi classique d'addition des vitesses. La Terre sur son orbite avec une vitesse d'environ 30 km/s par rapport au Soleil pouvait permettre de déceler une variation de la vitesse de la lumière sur des parcours identiques en longueur mais qui devaient être différents en temps selon qu'ils seraient dans le sens du mouvement ou perpendiculairement au vent d'éther.



La conclusion tirée de cette expérience était que les deux temps de parcours de la lumière étaient identiques. Cela remettait en cause les bases de la mécanique de NEWTON. L'expérience de MICHELSON et MORLEY n'a pas été remise en cause tant elle avait été menée de façon rigoureuse et précise. De plus, au cours du 20^{ème} siècle, elle a été à nouveau effectuée en utilisant un laser et des longueurs de bras de l'ordre du kilomètre ! La variation de l'ordre d'interférences, s'il y a, est extrêmement petite $\Delta p < 10^{-12}$, confirmant ainsi les premiers résultats obtenus un siècle plus tôt.

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

Applications actuelles

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

Enfin, l'expérience Virgo en Italie, a pour but de détecter des ondes gravitationnelles à l'aide d'un interféromètre de Michelson dont les bras font plus de 3 km, cf photo. Ces ondes ont été détectées pour la première fois en 2015 avec le détecteur américain LIGO et ont valu le prix Nobel de physique 2017 à Weiss, Barish et Thorne.

