

TP/Cours d'optique n°3

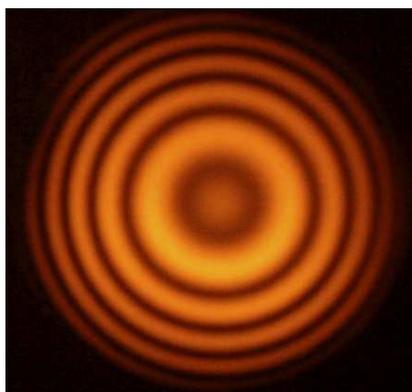
Interféromètre de Michelson

Résumé

L'interféromètre de Michelson est particulièrement bien adapté à l'étude des spectres des sources lumineuses (spectrométrie interférentielle par transformation de Fourier). Il peut être aussi utilisé pour des mesures très précises de différence de marche donc de distances ou d'indice (utilisation dans l'industrie). À la pointe de la recherche, les projets VIRGO (à Pise - Italie) ou LIGO (à Hanford - Washington) de détection des ondes gravitationnelles mettent en jeu un immense interféromètre de Michelson (longueur des bras kilométrique).

Vous allez apprendre à régler l'interféromètre dans plusieurs configurations et vous entraîner à passer de l'une à l'autre facilement. Vous allez lors de ces réglages comprendre la localisation des franges avec une source large. L'étude du spectre d'une source grâce à l'interféromètre sera réalisée au prochain TP, cette fois vous allez à la fin du TP régler très précisément l'interféromètre au contact optique afin de pouvoir détecter des variations insignifiantes d'indice (visualisation d'un écoulement).

Bon amusement !



En caractères droits : les parties cours.

En italique : les parties TP.

Les objectifs de ce TP-cours sont les suivants :

1. régler le parallélisme de la séparatrice et de la compensatrice,
2. obtenir et observer les franges de la lame d'air,
3. obtenir et observer les franges du coin d'air,
4. obtenir la teinte plate au contact optique,
5. comprendre la localisation des franges avec une source large,
6. obtenir et observer des franges en lumière blanche,
7. se servir de lumière blanche pour obtenir un contact optique de meilleure qualité.

I. Généralités

L'interféromètre de Michelson est un dispositif à deux ondes à division d'amplitude.

Lorsqu'il est éclairé par une **source ponctuelle** monochromatique, les interférences sont observables en tout point de l'espace où les ondes sortant des deux voies se croisent : les interférences sont **délocalisées**. Une source rigoureusement ponctuelle et rigoureusement monochromatique n'existe pas mais ce modèle convient relativement bien au cas du point de convergence d'un faisceau Laser sortant d'une lentille de très courte focale (objectif de microscope par exemple).

Lorsqu'il est éclairé par une **source étendue spatialement**, les interférences sont **localisées**.

La **longueur finie des trains d'onde** émis par la source non-monochromatique provoque une **altération du contraste** lorsque la différence de marche augmente (cf. cours).

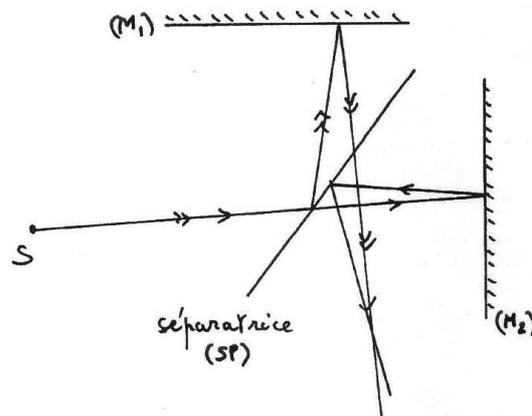
Tout au long du réglage de l'interféromètre, nous vérifierons ces affirmations.

II. Fonctionnement de l'interféromètre

Une lame semi-réfléchissante appelée « séparatrice » (SP) divise le faisceau lumineux émis par la source en deux faisceaux orthogonaux de même intensité ; chaque faisceau est réfléchi par un miroir puis retombe sur la séparatrice ; dans la voie de sortie de l'interféromètre se croisent deux faisceaux :

- (1) : réfléchi par SP puis par M_1 et transmis par SP ;
- (2) : transmis par SP et réfléchi par M_2 puis par SP.

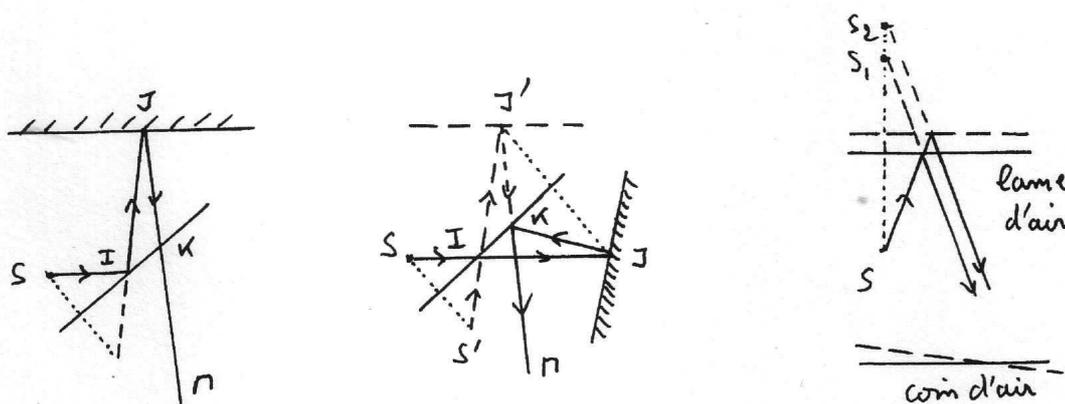
En un point d'observation dans la voie de sortie, les ondes associées à ces deux faisceaux présentent un déphasage qui dépend de la disposition relative des deux miroirs (distance et angle) ; on observe des interférences sous réserve de cohérence spatiale et temporelle de la source.



1. Réduction à une lame ou un coin d'air

Les rayons issus de la source S arrivent sur la lame semi-réfléchissante (SP), sous une incidence voisine de 45° , la lame est conçue pour qu'une moitié de l'énergie se réfléchisse vers un premier miroir et que l'autre traverse la lame vers un second miroir. Les rayons arrivent sur les miroirs sous incidence quasi-nulle et repartent vers la séparatrice où une partie de l'énergie est renvoyée vers la source et n'est pas utilisée et l'autre donnent des rayons susceptibles d'interférer. (voir figure ci-dessous)

Considérons sur la figure ci-dessous à gauche, un rayon $SIJKM$; si S' est le symétrique de S par rapport à la séparatrice, tout se passe comme si un rayon issu de S' se réfléchissait en J sur le miroir M_1 . Au milieu, considérons $SIJKM$ et traçons, en plus de S' , le symétrique du miroir par rapport à la séparatrice, et J' le symétrique de J ; tout se passe cette fois comme si un rayon issu de S' se réfléchissait en J' sur le symétrique du miroir M_2 appelé M'_2 . Il est donc d'usage de ne dessiner que cette première réduction de l'interféromètre, à savoir S' , le miroir M_1 (trait plein) et l'image M'_2 (trait pointillé). Dans la pratique ces deux miroirs sont presque confondus en position et en orientation; s'ils sont parallèles, on dit qu'on a affaire à une lame d'air (appelée lame d'air par abus, en réalité il s'agit d'une lame d'air à faces parallèles), sinon à un coin d'air (figures à droite).



Enfin, dans les deux cas, tout se passe comme si l'on avait deux sources synchrones : les images S_1 et S_2 , presque confondues, de S' dans les deux miroirs de la réduction. Nous ferons constamment référence à ce système équivalent : lorsque nous dirons que les miroirs sont parallèles, il s'agira bien sûr de M_1 et M'_2 (et non de M_1 et M_2 !); lorsque nous parlerons de « contact optique » entre les miroirs, ce sera pour dire que M_1 et M'_2 coïncident.

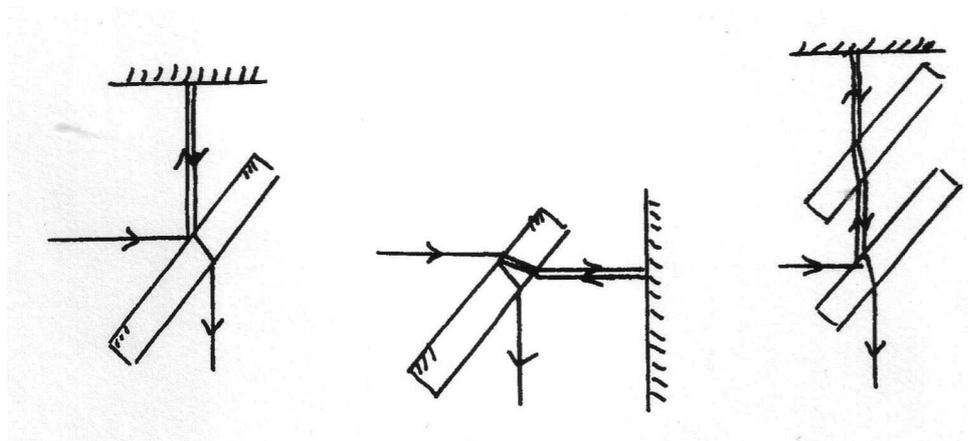
2. Rôle de la compensatrice

La séparatrice est une lame d'épaisseur non nulle; idéalement une de ses faces est semi-réfléchissante (la plus proche de la voie d'entrée) et l'autre anti-reflet.

Observons sur les figures ci-après, à gauche et au centre, les trajets de deux rayons se réfléchissant sur l'un et l'autre miroirs : l'un traverse une fois la lame, l'autre trois, ce qui introduit une différence de marche supplémentaire, par rapport à la différence des longueurs, de $2(n-1)l$ où l est la longueur de la traversée, différence de marche qui dépend de la longueur d'onde avec n car le verre est dispersif. Cette différence de marche « parasite » n'est pas constante pour tous les rayons incidents mais dépend de l'angle d'incidence.

D'autre part, la transmission à une interface verre-air s'accompagne d'une réflexion partielle de l'ordre de quelques % en énergie ; les intensités des deux voies sont donc déséquilibrées, ce qui altère le contraste de la figure d'interférence.

Pour ces raisons, il est nécessaire de rééquilibrer les deux voies et c'est le rôle de la compensatrice, identique à la séparatrice mais non réfléchissante et placée devant elle. Chaque faisceau traverse ainsi quatre fois l'épaisseur de la lame, mais il est clair que la séparatrice et la compensatrice doivent être rigoureusement parallèles.

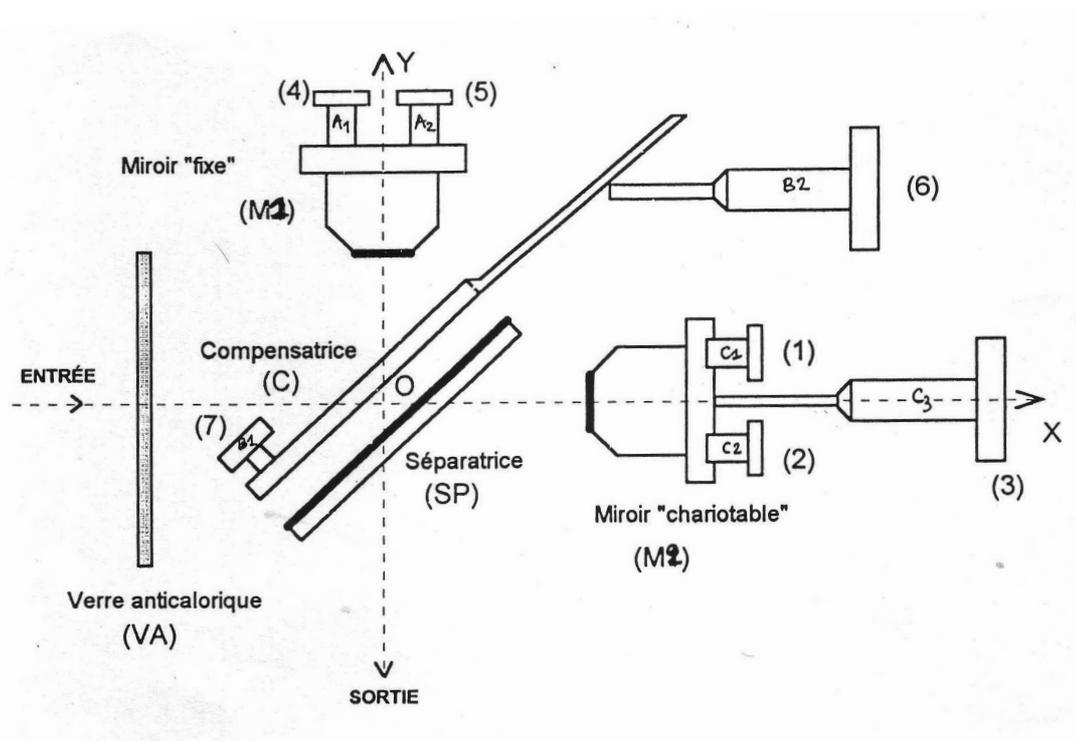


3. Visite guidée de l'appareil

En remplaçant le miroir M_2 par son image M_2' par réflexion sur la lame séparatrice, on a montré que la figure d'interférence est indentique à celle produite par réflexion totale sur les deux faces d'une lame d'air dont on peut faire varier l'épaisseur (en chariotant M_2) et l'angle (en agissant sur les vis C_1 et C_2 de réglage grossier et/ou les vis A_1 et A_2 de réglage fin), éclairée par l'image par réflexion de la source sur la lame séparatrice.

Le miroir M_2 est monté sur un chariot ce qui permet de faire varier l'épaisseur de la lame d'air équivalente en agissant sur la vis micrométrique graduée C_3 (1 tour = 50 divisions = 0,5 mm).

Le parallélisme de la séparatrice fixe et de la compensatrice se règle en agissant sur cette dernière au moyen de deux vis : B_1 fait basculer la compensatrice autour d'un axe horizontal tandis que B_2 la fait basculer autour d'un axe vertical ; cette dernière vis est graduée et peut être utilisée pour faire varier de manière très fine l'épaisseur de la lamme d'air équivalente.



Signalons la présence (éventuelle) d'un filtre anti-calorifique (ou anti-calorique) à l'entrée de l'interféromètre. S'il n'est pas monté, ne surtout pas oublier d'en utiliser un si vous éclairez l'appareil avec une lampe puissante (par exemple une source halogène de lumière blanche) et surtout si vous faites converger le faisceau émis sur les miroirs; son oubli produirait par effet thermique une dégradation irréversible des miroirs. Le bon état de surface de la séparatrice et des miroirs est déterminant pour obtenir une figure d'interférence de bonne qualité. **Ne touchez surtout pas les lames, ni les miroirs.** La mise à disposition d'appareils professionnels de ce type pour tous les étudiants est un véritable luxe; respectez-les! Lorsque l'interféromètre n'est pas utilisé les vis A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 et C_2 sont dévissées de telle façon qu'à la limite, elles ne tendent aucun ressort. Il faudra faire de même en fin de séance.

Commencer par identifier les diverses vis de réglage de l'appareil et profitez-en pour régler les vis à mi-course (afin de pouvoir agir ensuite dans les deux sens) et dérégler le chariot.

III. Réglage du parallélisme entre les lames séparatrice et compensatrice

Il existe différentes techniques de réglage, à l'œil ou par projection sur un écran, en utilisant différents types de sources. Quiconque est habitué à une méthode particulière a malheureusement tendance à penser qu'elle est la meilleure! Certains examinateurs de concours poussent même le terrorisme intellectuel jusqu'à imposer aux candidats une méthode particulière.

Je vais vous présenter deux méthodes. Pour ce premier TP, je préfère utiliser un laser (pas de problème de cohérence) et effectuer le réglage par projection sur un écran (pas de fatigue oculaire). Pour un second réglage en fin de séance ou au prochain TP, je vous présente ensuite la méthode géométrique à l'aide

d'une lampe spectrale (Na ou Hg) qui a le mérite de conduire au réglage du parallélisme des miroirs facilement (méthode préconisée par le programme).

Réglage grossier de la différence de marche

Charioter le miroir M_2 afin de rendre, à « vue d'œil », les chemins optiques sensiblement égaux.

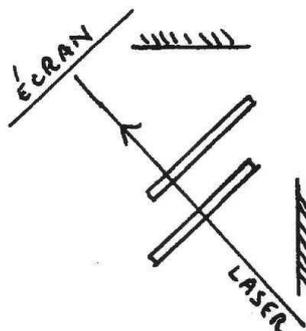
1. Réglage au laser

Lorsque vous utilisez le laser, ne regardez jamais directement la lumière sortant du dispositif car le faisceau est dangereux pour la rétine ; méfiez-vous également des réflexions parasites.

Réglage géométrique

Envoyer directement le faisceau laser sur la lame séparatrice, sous incidence normale. Vérifier que l'incidence est quasi-normale en suivant le faisceau réfléchi qui doit avoir une direction voisine de celle du faisceau incident ; ce faisceau réfléchi doit former une tache de lumière sur la face de sortie du tube laser, près de la fenêtre de sortie mais **ne faites pas rentrer le faisceau réfléchi dans la cavité laser**.

Notez qu'il existe en fait plusieurs faisceaux réfléchis car l'ensemble séparatrice + compensatrice comporte 4 interfaces (réflexions multiples).



Observer sur un écran éloigné (ou dans le plan focal) d'une lentille) les faisceaux transmis par l'ensemble séparatrice + compensatrice. Agir sur les vis de réglage de la compensatrice afin de regrouper au mieux les différentes taches de lumière. Il est clair que les différentes taches dues aux réflexions et transmissions multiples dans le système de 4 interfaces sont confondues lorsque ces interfaces sont parallèles. Cela constitue un réglage grossier qu'il est inutile de trop peaufiner ; arrêtez-vous dès que vous voyez la tache « clignoter » ; c'est la signature d'un phénomène d'interférences.

Réglage interférométrique

On exploite ce phénomène d'interférences pour effectuer un réglage précis du parallélisme entre les lames séparatrice et compensatrice.

Placer un objectif de microscope à la sortie du laser. Le positionnement précis de cette petite lentille est réalisé en théorie grâce à deux vis permettant de translater légèrement la lentille suivant deux directions

orthogonales. Ici il faudra montrer une grande habileté pour aligner le laser et l'objectif dans l'axe de la séparatrice. S'armer de patience si besoin.

Le système constitué par les deux lames est alors éclairé par une source quasi-ponctuelle et monochromatique (point du faisceau de convergence que vous pouvez repérer à l'aide d'une feuille de papier, outil indispensable du futur Jedi du Michelson). Les rayons réfléchis sur les deux faces d'une lame de verre produisent des interférences et on fait ici une observation dans un plan orthogonal à la direction des sources secondaires; on doit observer des anneaux circulaires centrés sur la normale à la lame passant par la source; le phénomène n'est pas très contrasté car l'observation se fait en transmission, mais il est parfaitement visible. Si les deux lames ne sont pas parallèles, les centres des différents systèmes d'anneaux ne coïncident pas.

Agir sur les vis de réglage de la compensatrice pour confondre les centres des différents systèmes d'anneaux.

Le réglage interférométrique du parallélisme des deux lames est alors réalisé. Noter la graduation de la vis B_2 car il arrive parfois qu'on agisse sur B_2 au lieu de C_3 lorsqu'on souhaite translater M_2 ! Vous pourrez ainsi retrouver le parallélisme des deux lames sans devoir recommencer tout le protocole de réglage.

2. Réglage géométrique du parallélisme des lames séparatrice et compensatrice et des miroirs à la lampe spectrale

Cette méthode est une alternative au réglage précédent. **Ne pas dérégler le Michelson.** Vous réglerez à nouveau le Michelson de cette façon si vous disposez de suffisamment de temps en fin de TP.

On utilise pour ce réglage préférentiellement une lampe spectrale au mercure Hg (choisie pour sa forte luminosité) munie d'un filtre coupe-UV (d'apparence à peine jaunâtre pour protéger nos yeux). La lampe éclaire un diaphragme circulaire de faible diamètre placé au foyer d'une lentille L_1 ($f'_1 = 10$ cm) par autocollimation sur les miroirs du Michelson.

Le Michelson est donc éclairé en lumière quasi-parallèle par une source centrée en un point à l'infini dans une direction perpendiculaire aux miroirs.

Dans la voie de sortie placer une lentille L_2 de focale $f'_2 = 20$ ou 30 cm pour former l'image du trou source à travers le Michelson sur l'écran, lequel doit donc se trouver dans le plan focal de L_2 . (cette observation peut se faire également à l'œil à travers le Michelson). On voit alors au moins 4 points image plus lumineux que d'autres provenant des diverses transmissions et réflexions sur la compensatrice, la séparatrice et les miroirs.

1. Régler la compensatrice pour n'avoir plus que deux images.
2. Régler alors les miroirs pour n'obtenir qu'une image bien lumineuse.

Compensatrice et séparatrice sont alors quasi-parallèles ainsi que les miroirs M_1 et M'_2 (c'est le réglage géométrique).

Remarque : avec une lampe au sodium Na, on peut affiner le réglage du parallélisme de M_1 et M'_2 jusqu'à observer des franges dans l'image commune.

IV. Interférences délocalisées

On éclaire le Michelson par une source quasi-ponctuelle et monochromatique (interférences délocalisées).

À partir d'une situation quelconque où l'épaisseur et l'angle de la lame d'air équivalente sont assez importants, on va chercher à réaliser le contact optique et à observer les interférences produites par réflexion sur les deux faces d'une lame d'air à faces parallèles (franges circulaires par observation dans un plan orthogonal) à la direction des sources secondaires), puis sur les deux faces d'un coin d'air (franges rectilignes par observation dans un plan parallèle à la direction des sources secondaires très éloignées).

Réglage géométrique du parallélisme des miroirs

Placer le laser dans la voie d'entrée et envoyer directement le faisceau laser sur le miroir M_2 sous incidence normale. Placer l'écran dans la voie de sortie à grande distance ou dans le plan focal d'une lentille (observation à l'infini, quelle focale choisir pour obtenir une grande image ?).

On observe deux taches principales de lumière sur l'écran, qu'on cherche à regrouper au mieux en agissant sur les vis de réglages grossiers du miroir M_2 . Il est clair que M_1 et M_2 sont alors sensiblement parallèles. Arrêtez-vous dès que la tache clignote, c'est la signature d'un phénomène d'interférences !

Obtention d'anneaux d'égale inclinaison - Réglage « lame d'air »

Placer un objectif de microscope à la sortie du laser ; l'interféromètre est alors éclairé par une source quasi ponctuelle et monochromatique S (point de convergence que vous pouvez repérer à l'aide d'une feuille de papier). Prévoir une distance suffisante entre l'objectif de microscope et le miroir M_2 (au moins une vingtaine de centimètres) afin de pouvoir interposer une autre lentille. Vous devez observer des franges d'interférences sur l'écran, produites par deux sources secondaires S_1 et S_2 images de S' par les miroirs M_1 et M_2 (S' est l'image de S par la séparatrice).

Avant de poursuivre le réglage, on va chercher à améliorer la qualité de la projection. La source S est relativement éloignée des miroirs, si bien qu'une partie des rayons émis par S ne rencontre peut-être pas les miroirs (lumière « perdue ») ; d'autre part, il est clair que si S émet dans toutes les directions, l'ouverture des faisceaux réfléchis par les miroirs est d'autant plus grande que « S est proche des miroirs » (en fait S' proche de M_1 et M_2) et si les faisceaux sont plus ouverts, le champ est plus étendu sur l'écran (pour les anneaux, plus l'angle d'incidence i est élevé, plus le rayon de l'anneau est grand). On s'attend donc à améliorer la luminosité et la largeur du champ en approchant S des miroirs.

Plutôt que de rapprocher l'ensemble tube laser + objectif de microscope ce qui dérèglerait cet ensemble, interposer une lentille convergente entre l'objectif de microscope et l'interféromètre afin de former une image réelle de S proche des miroirs jouant le rôle de source éclairant les miroirs. Attention au choix de la distance focale qui doit être inférieure au quart de la distance objet-image. Réaliser un montage « $4f$ ».

En fait S n'émet pas dans toutes les directions mais dans un angle solide relativement peu ouvert que vous pouvez observer à l'aide d'une feuille de papier ; par conséquent si la source est située trop près des miroirs, ceux-ci ne seront pas entièrement « arrosés » par les rayons incidents et le champ sur l'écran ne sera pas optimisé.

Déplacez donc la lentille afin d'éclairer entièrement le miroir M_2 sans « perte » de rayons ; utilisez une feuille de papier placée contre M_2 pour vérifier ce réglage. Le champ sur l'écran est ainsi optimisé.

Lors de l'étape précédente, en rassemblant les taches de lumière sur l'écran, on a réglé le Michelson en lame d'air à faces quasi-parallèles, quasi car il s'agit d'un réglage relativement grossier. M_1 et M'_2 sont quasi-parallèles et l'observation se fait dans un plan quasi-normal à la direction des sources ; on s'attend donc à observer plutôt des franges circulaires (ou anneaux).

Placez-vous assez loin du contact optique (lame d'air assez épaisse) en chariotant le miroir M_2 dans un sens qui augment le nombre de franges visibles sur l'écran (la distance entre les sources secondaires S_1 et S_2 augmente ce qui diminue l'interfrange, i.e. la distance à parcourir sur l'écran pour voir varier la différence de marche de λ_0).

Loin du contact optique le défaut de parallélisme se fait peu sentir ; le décalage entre S_1 et S_2 est essentiellement longitudinal et on a toutes les chances d'observer des anneaux circulaires dont on peut éventuellement ramener le centre au milieu du champ en agissant sur les vis d'inclinaison du miroir M_2 .

Vérifier que les interférences sont bien délocalisées en déplaçant l'écran.

Réalisation du contact optique - « Teinte plate »

Diminuer alors l'épaisseur de la lame d'air, en chariotant dans un sens faisant défiler les anneaux vers leur centre ; en effet, chaque anneau brillant observé « à l'infini » dans direction angulaire i est caractérisé par un ordre d'interférence p entier tel que $2e \cos i_p = p\lambda_0$, si bien que lorsque l'épaisseur e diminue l'angle i_p sous lequel on voit l'anneau d'ordre p diminue. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air devient plus petite, le défaut de parallélisme des miroirs devient plus critique ; en effet, si il existe un défaut de parallélisme, le décalage transversal entre S_1 et S_2 finit par devenir dominant et les anneaux se transforment en franges plutôt rectilignes (configuration d'Young) ; autrement dit, en se rapprochant du contact optique, on constate généralement une dérive du centre des anneaux qui finit par quitter le champ ; continuer à charioter dans le même sens jusqu'à ce que s'inverse la courbure des franges ; arrêtez-vous lorsque les franges sont rectilignes ; vous êtes alors près du contact optique mais il reste un petit angle qu'on minimise en agissant sur les vis de réglage grossier puis fin d'inclinaison des miroirs de façon à augmenter l'interfrange jusqu'à obtenir un éclaircissement uniforme de l'écran (on parle de « teinte plate ») caractéristique du contact optique. Si une courbure apparaît, chariotez à nouveau, retouchez l'angle des miroirs et ainsi de suite.

En résumé, pour réaliser le contact optique :

- ★ lorsqu'on voit des anneaux, on les fait défiler vers leur centre de courbure en chariotant (opération prioritaire) ;
- ★ lorsqu'on voit la courbure des franges s'inverser (franges rectilignes), on modifie l'angles des miroirs pour augmenter l'interfrange.

Noter la graduation du vernier du chariot afin de pouvoir facilement revenir au contact optique.

Franges d'égale épaisseur - Réglage « coin d'air »

Au contact optique, faire un petit angle entre les miroirs (Michelson réglé au coin d'air) en utilisant la vis de réglage fin faisant tourner le miroir M_1 autour d'un axe horizontal. On doit observer des franges rectilignes horizontales (configuration d'Young : observation dans un plan parallèle à la direction des sources secondaires S_1 et S_2 situées l'une au-dessus de l'autre).

L'interfrange décroît lorsque l'angle α des miroirs croît ; le vérifier en agissant sur la même vis de réglage fin. Régler α de façon à diminuer l'interfrange à la limite de visibilité. Mesurer l'interfrange à l'écran.

L'interfrange est de l'ordre de $\frac{\lambda_0 D}{a}$ où D est la distance entre les sources secondaires et l'écran ; estimez D ainsi que l'interfrange et calculez un ordre de a ($\lambda_0 \simeq 632 \text{ nm}$) ; en déduire un ordre de grandeur de

α . Cet ordre de grandeur montre que les interférences ne sont pas visibles « au départ » pour un réglage quelconque de l'interféromètre lorsque l'épaisseur et l'angle de la lame d'air sont top importants.

Faites ensuite l'image de S_1 et S_2 (objets virtuels) sur l'écran en prenant une lentille convenablement choisie ; déplacez éventuellement l'écran pour rendre l'opération possible. Vous devez vérifier que ces images sont bien au-dessus l'une de l'autre ; estimez leur distance et vérifiez l'ordre de grandeur de a en considérant le grandissement de la lentille.

Diminuer l'angle α afin d'augmenter l'interfrange pour obtenir des franges bien visibles.

V. Interférences localisées

1. En coin d'air

Passage à une source étendue

Éclairez l'interféromètre réglé au coin d'air avec une lampe spectrale à vapeur de mercure (avec le filtre coupe-UV) qui est une source étendue (le tube de verre contenant de la vapeur) ; l'éclairement de l'écran est uniforme !

L'extension spatiale de la source brouille les franges au coin d'air à cause d'un problème de cohérence spatiale.

Localisation des franges sur les miroirs - Source rejetée à l'infini

Lorsque la source est peu étendue, la figure d'interférence est brouillée partout sauf au voisinage immédiat du coin d'air : les franges sont localisées sur le coin d'air i.e. au niveau du miroir M_1 ou M_2 .

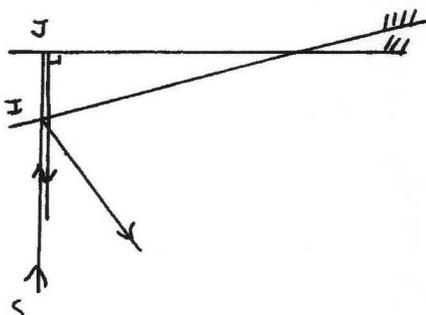
S_1 et S_2 étant dans une configuration d'Young, on sait que l'on augmente la largeur de cohérence spatiale en éloignant la source primaire ; on a donc intérêt à rejeter la source primaire à l'infini en la plaçant dans le plan focal d'une lentille ; l'image du tube de verre doit se former très loin ; suivez cette image à l'aide d'une feuille de papier. Une fois ce réglage d'éclairage effectué, ajouter le verre dépoli contre la lentille et placer votre œil dans la voie de sortie et regarder le miroir M_1 ; vous devez voir les franges d'interférence, comme si elles étaient peintes sur le miroir.

Enlever le dépoli pour gagner en luminosité et faites l'image sur l'écran du miroir M_1 à l'aide d'une lentille convenablement choisie ; par exemple en plaçant la lentille à deux fois sa distance focale derrière les miroirs et l'écran à deux distances focales derrière la lentille on a une image de grandissement -1 . En rapprochant la lentille et en reculant l'écran, on augmente le grandissement. Vous devez voir apparaître les interférences dans la zone où les images de S_1 et S_2 se superposent ; on voit d'ailleurs apparaître nettement l'image des contours des miroirs.

Pour limiter la distorsion de l'image, la lentille de projection doit être utilisée dans les conditions de Gauss : les rayons doivent la traverser près de son centre ; retouchez la position de la lampe spectrale (éloignez-la légèrement de première lentille) afin de former l'image de la source primaire dans la lentille de projection (placez une feuille de papier contre la lentille de projection) ; la projection est ainsi optimisée.

Vérifiez que les interférences sont bien localisées sur les miroirs en déplaçant la lentille de projection, ce qui revient à faire l'image sur l'écran d'un plan objet différent des miroirs ; vous devez observer la disparition des franges.

Essayons de comprendre sur la figure ci-dessous :



Mon astuce : La figure n'est simple à faire et à interpréter que si l'on place la source à l'infini dans une direction perpendiculaire à un des miroirs et que si l'on choisit de dessiner un rayon qui arrive d'abord sur l'autre miroir.

On rappelle que les franges se localisent là où se coupent deux rayons issus des deux réflexions d'un même rayon incident. Le rayon incident se réfléchit en I sur le premier miroir et en J sur le second d'où il revient sur ses pas (incidence normale). Les deux réfléchis se recoupent donc en I, c'est-à-dire sur le premier miroir. Comme la distance entre miroirs est infime, on dit que les franges sont localisées sur les miroirs. La différence de marche est bien évidemment $\delta = 2[IJ]$; elle est liée à l'« épaisseur » (sous-entendu locale) du coin d'air, on les appelle donc franges d'égale épaisseur. La justification -hors programme- de la localisation sera vue en exercice. Retenons donc :

FRANGES D'ÉGALE ÉPAISSEUR :
 Miroirs sécants (coin d'air)
 Source à l'infini
 Interférences sur les miroirs
 Franges rectilignes

Perte de contraste en chariotant - longueur de cohérence

En chariotant (très doucement), vous voyez les franges défiler. En augmentant ainsi l'épaisseur moyenne de la lame d'air équivalente, vous observez un brouillage progressif des franges à cause de la largeur spectrale des raies (trains d'ondes de longueur finie).

Régler la différence de marche pour avoir un contraste maximal.

2. Lame d'air

Modification des conditions d'éclairage

On observe à nouveau les franges directement sur les miroirs à l'aide du verre dépoli.

On sait que pour obtenir un champ lumineux étendu, il faut travailler en éclairage convergent sur les miroirs, i.e. qu'il faut faire l'image de la source primaire sur les miroirs. Eloignez légèrement la lampe spectrale de la lentille jusqu'à ce que son image se forme sur le miroir M_1 .

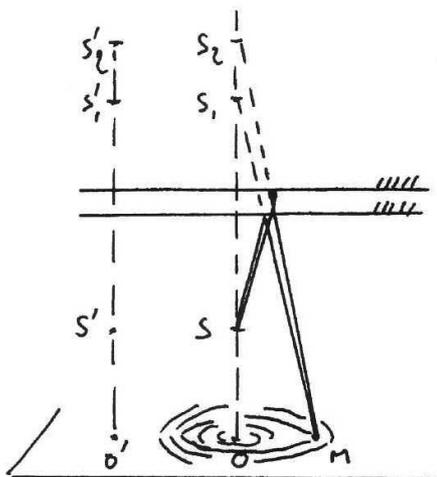
Localisation des anneaux d'égalité d'inclinaison à l'infini

Agissez sur les miroirs (réglage fin) pour revenir au parallélisme (en augmentant au maximum l'interfrange jusqu'à l'obtention d'un éclairage uniforme sur l'écran. Grâce à la vis de chariotage redonner une petite épaisseur à la lame d'air. On doit voir quelques anneaux suffisamment écartés pour qu'ils soient bien faciles à distinguer.

Visualisons les franges sur un écran. On place donc un écran à un ou deux mètres de la sortie de l'interféromètre et l'on enlève le dépoli pour augmenter l'éclairage. Si tout va bien, on voit de belles franges.

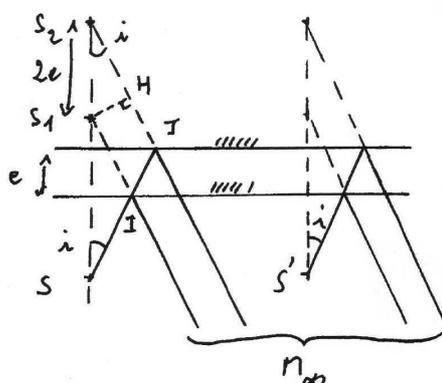
Placer contre la lampe un diaphragme à iris et le fermer le plus possible (modifier la position de la lentille au besoin), les franges restent visibles, en moins lumineuses bien sûr. Rapprocher lentement l'écran de l'interféromètre. Continue-t-on à voir les franges ? Revenir à la position initiale, ouvrir un peu l'iris, rapprocher l'écran. Jusqu'où voit-on les franges ? Recommencer en ouvrant de plus en plus l'iris. Interpréter l'affirmation suivante : avec une source ponctuelle, une lame d'air donne des interférences non localisées ; avec une source large, des interférences localisées à l'infini. On pourra alors observer les anneaux dans le plan focal d'une lentille dite de projection (grande focale). Le faire.

Essayons de comprendre : Si l'écran est à distance finie on retrouve, avec une source ponctuelle, comme dans le cours, des anneaux centrés sur la projection O de la source sur l'écran (voir figure).



Remplacer la source ponctuelle S par une source large, c'est lui accoler des sources incohérentes comme S', qui va donner d'autres anneaux centrés ailleurs, en O'. L'addition de fonctions décalées les unes des autres, chaque fois qu'on a rencontré cette situation, a conduit à la même conclusion : une diminution de la visibilité des franges et c'est aussi ce qui arrive ici.

Montrons par contre qu'à l'infini, le contraste reste bon. La figure précédente devient celle qui suit :



Les symétries et le théorème de Malus donnent :

$$\delta = [SJM]_{(1)} - [SIM]_{(2)} = [S_2JM] - [S_1IM] = [S_2H] = 2e \cos i$$

Si l'on élargit la source en lui adjoignant des points S' , au même point M à l'infini, donc dans la même direction, le calcul conduit à la même différence de marche même si S' est très éloigné de S . S et S' donnent la même fonction intensité en fonction de la position, leur addition est en fait une multiplication par le nombre de sources élémentaires et le contraste est donc conservé. Avec une source large, les franges sont donc bien localisées à l'infini. Comme la différence de marche dépend de l'inclinaison i des rayons par rapport à la normale aux miroirs, on les appelle franges d'égale inclinaison. Retenons donc :

FRANGES D'ÉGALE INCLINAISON :
 Miroirs parallèles (lame d'air)
 Source près des miroirs
 Interférences à l'infini
 Franges circulaires

Terminons par une remarque importante : sur l'avant-dernière figure, on voit qu'au point M à distance finie, convergent deux rayons distincts ; sur la dernière, au point M à l'infini, convergent deux rayons issus des réflexions du même rayon initial. On peut montrer que ceci se généralise : avec une source large, les seuls points où le contraste soit bon se trouvent à l'intersection des paires de rayons provenant des deux réflexions d'un même rayon initial. Nous utiliserons ce résultat plus loin.

Perte de contraste en chariotant - longueur de cohérence

En chariotant (très doucement), vous voyez les franges défiler. En augmentant ainsi l'épaisseur moyenne de la lame d'air équivalente, vous observez un brouillage progressif des franges à cause de la largeur spectrale des raies (trains d'ondes de longueur finie).

Régler la différence de marche pour avoir un contraste maximal.

3. La teinte plate

On reprend le chariotage et l'on s'arrête quand on ne voit plus qu'une dizaine de franges. A ce stade, il se peut qu'elles soient plutôt elliptiques que circulaires : il faut alors figoler le réglage de la compensatrice. Avec l'une des vis, on amène le grand et le petit axes en position verticale et horizontale, puis avec l'autre, on joue sur l'excentricité pour revenir à des cercles.

On continue à charioter de façon à diminuer le nombre d'anneaux visibles qui deviennent de plus en plus grands. De temps en temps, si nécessaire, on recentre le système de franges (vis lentes du miroir) et/ou on rectifie l'excentricité (vis de la compensatrice). On finit par ne plus voir qu'une frange, puis l'intérieur de la première puis enfin une teinte uniforme, la teinte plate : on est arrivé au contact optique, la distance entre miroirs s'est annulée, il n'y a plus qu'un miroir donc plus d'interférences.

Remarque : Si l'on dépasse le contact optique en chariotant trop loin, le miroir mobile traverse le fixe et la lame d'air se reconstitue dans l'autre sens, les franges vont réapparaître et évoluer en sens inverse.

VI. Coïncidences et anti-coïncidences avec la lampe au sodium Na (facultatif)

Remplacer la lampe au mercure par la lampe au sodium en gardant exactement les mêmes réglages.

En chariotant vous voyez les franges défiler, avec une oscillation du contraste produite par les deux composantes du doublet du sodium ; en effet ces deux composantes sont mutuellement incohérentes et on observe la simple superposition de deux figures d'interférences décalées ; tantôt les deux figures coïncident (coïncidences), tantôt elles sont complémentaires (anticoïncidences). En outre on observe un brouillage progressif des franges à cause de la largeur spectrale des raies.

VII. Passage des anneaux aux franges du coin d'air

Retour au contact optique

Revenez au contact optique en chariotant (faites défiler les anneaux vers leur centre, vous observez alors de moins en moins d'anneaux mais de plus en plus grand jusqu'à la teinte plate). Soignez ce réglage et relevez la graduation du vernier du chariot au contact optique. Comparez avec le pointé effectué plus haut avec le laser. Moins grand est le degré de cohérence de la source, plus courts sont les trains d'ondes, plus vite le contraste chute lorsqu'on s'éloigne du contact optique, plus critique et donc précis est le réglage de ce dernier.

Modification des conditions de projection

Utilisez une lentille de projection convenablement choisie pour faire l'image du contour des miroirs sur l'écran (les interférences du coin d'air sont localisées sur les miroirs).

Modification des conditions d'éclairage

Rapprocher légèrement la lampe de la lentille et faites converger le faisceau dans la lentille de projection (placer une feuille de papier sur celle-ci, l'image de la source doit s'y former).

Passage au coin d'air Faites un petit angle entre les miroirs. Des franges rectilignes doivent apparaître sur l'écran.

VIII. Contrôle en lumière blanche

Passage en lumière blanche

Sans rien changer au montage, remplacer la lampe spectrale par une lampe à iode (lampe à incandescence dans une atmosphère permettant une plus haute température).

Attention toutefois que certains matériels sont composés d'une lanterne avec lampe à iode ET lentille (avec réglage de la distance lentille-lampe ; rappelons qu'on veut une source à l'infini), la lanterne est donc mise à la place de la lampe spectrale et de la lentille au foyer de laquelle elle était.

À moins d'un « coup de chance » qui n'est pas improbable puisque la chance sourit souvent aux innocents (!?), vous n'avez probablement pas approché suffisamment le contact optique avec le réglage précédent avec la lampe au sodium (ou mercure) et vous n'observez pas les franges du coin d'air en lumière blanche mais du blanc d'ordre supérieur.

Tentons de comprendre : Le cours (interférences avec un profil spectral rectangulaire) adapté ici au spectre visible entier, donc à un rectangle très large, prévoit un contraste qui s'effondre rapidement dès qu'on s'éloigne de $\delta = 0$. Typiquement, on ne voit plus rien au delà de $\delta \approx 3\lambda_m \approx 3 \times 0,6 \mu\text{m} \approx 2 \mu\text{m}$. Autre façon de dire les choses : avec une lampe à incandescence, la longueur de cohérence est de $2 \mu\text{m}$. Les interférences en lumière blanche ne seront visibles que si l'épaisseur de la lame d'air est inférieure au micron !

Mais z'alors, on devrait voir quelque chose. Ben oui, là où les miroirs se coupent, on a bien $\delta = 0$, non ? Alors pourquoi rien ?

Tout simplement parce que le contact optique n'était pas parfait, qu'il restait une petite distance entre les miroirs et qu'en créant un petit angle entre eux, les plans qui les contiennent se coupent certes, mais en dehors des miroirs. Notre stratégie est claire, roulons.

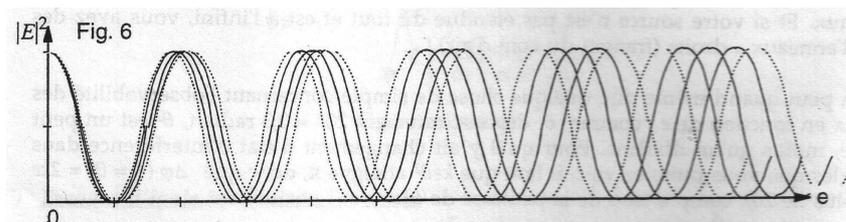
Franges d'égale épaisseur en lumière blanche *Retoucher alors très légèrement et très lennn-teeemmmment l'épaisseur de la lame d'air en chariotant avec des doigts de fée de quelques divisions (les petites divisions bien sûr) d'un côté ou de l'autre pour faire apparaître les franges fortement colorées. Si les franges passent trop vite sur l'écran, vous risquez de les rater (à cause de la persistance des impressions rétinienne) : sensation de blanc comme dans l'expérience du disque de Newton).*

Si l'on va dans le bon sens, en décalant un miroir par rapport à l'autre l'intersection se déplace latéralement et finit par rentrer dans le champ de vision (s'aider d'un petit schéma en marge pour comprendre). On voit alors passer très fugitivement quelques raies irisées qu'il s'agit d'attraper au vol et de centrer (avec un peu d'attention, il y a un axe de symétrie) dans le champ de vision. Remarquons au passage qu'ici, une translation du miroir provoque une translation latérale des franges. On voit ainsi l'allure d'interférences en lumière blanche.

La frange centrale est blanche (ce qui tend à montrer que le déphasage supplémentaire introduit par la lame séparatrice du SOPRA est plus proche de 0 que de π !).

De part et d'autre, les franges sont irisées ; quatre ou cinq franges plus loin, les couleurs disparaissent par superposition de différentes couleurs décalées donnant une sensation de couleur blanche, on appelle ce blanc **blanc d'ordre supérieur**.

En effet dans le spectre en lumière blanche l'intensité de la seule radiation de nombre d'onde $\sigma_0 = 1/\lambda_0$ est proportionnelle à $1 + \cos(2\pi\sigma_0\delta)$. Observons ci-dessous la courbe donnant, pour différents nombre d'onde proches les uns des autres, l'intensité en fonction de e , épaisseur de la lame d'air équivalente, et rappelons-nous qu'au coin d'air la différence de marche $\delta = \alpha e$, i.e. que chaque frange est une frange d'égale inclinaison :



A gauche près de $e = 0$, pour tous les nombres d'onde l'intensité en fonction de e est la même. Toutefois une couleur domine à certains e , à d'autres épaisseurs, d'autres couleurs : les franges sont colorées, surtout les trois premières. A droite pour e grand, de nombreuses radiations dans tous les domaines du spectre sont au maximum : l'œil voit du blanc (blanc d'ordre supérieur). Si l'on faisait le spectre de ce blanc, on s'apercevrait que des radiations sont au minimum car le spectre serait rayé de zones sombres, il s'agit d'un **spectre cannelé**.

Obtention de la teinte plate en lumière blanche *Le retour à une teinte plate et un contact optique parfait. Pour cela on manœuvre la vis lente qui avait servi à créer le coin d'air (si on se trompe de vis, on s'en aperçoit car les franges tournent) dans le sens qui élargit les franges jusqu'à obtenir une teinte uniforme et c'est gagné!*

Au contact optique l'écran est uniformément blanc ; les deux bras de l'interféromètre de Michelson sont alors parfaitement équilibrés. Si vous introduisez une très légère variation de chemin optique sur l'une des voies, la très légère différence de marche induite provoquera l'apparition de franges colorées. À l'aide d'un briquet, envoyez un jet de gaz (surtout pas de flamme, qui détruirait irrémédiablement les miroirs) dans l'une des voies : le jet est visualisé en temps réel sur l'écran.

Matériel

Paillasse professeur

- * Michelson
- * LASER sur pied
- * Lunettes de protection
- * Objectif de microscope monté sur le support universel
- * Petit banc et support adapté
- * Lampe au Sodium haute pression
- * Lampe au Mercure haute pression + filtre vert + filtre UV
- * Lentille +5cm et +10 cm (comme prévu au départ)
- * Diaphragme à iris
- * Dépoli
- * 3 Support + noix
- * Lampe blanche (de la 209)
- * Montage Photodiode
- * Lampe Quartz-iode (blanche) du CAPES
- * Filtre interférentiel
- * Lentille +200mm et +1000mm de JP (tour noir)
- * Ecran du CAPES

Paillasses élèves (5)

- * Michelson
- * LASER sur pied
- * Lunettes de protection
- * Objectif de microscope monté sur le support universel
- * Petit banc et support adapté
- * Lampe au Sodium basse pression
- * Lampe au Mercure haute pression + filtre vert + filtre UV
- * Lentille +5cm et +10 cm (comme prévu au départ)
- * Diaphragme à iris
- * Lentille +25cm et +80cm (celles de JP dans la boîte en carton) - il doit y avoir 9 supports pour 5x80cm et 4x25cm et prendre une 25 avec un tour noir du CAPES
- * Dépoli
- * 3 Support + noix
- * Lampe blanche (de la 209)
- * Ecran en bois