

Chapitre VII

TP-cours : INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON.

Joël SORNETTE vous prie de ne pas utiliser son cours à des fins professionnelles ou commerciales sans autorisation.

En caractères droits : les parties cours.

En italique : les parties TP.

Les objectifs de ce TP-cours sont les suivants :

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

Avant toute chose, on demandera au professeur de vérifier que l'appareil est dérégulé car, à la fin du TP précédent, il a été abandonné réglé!

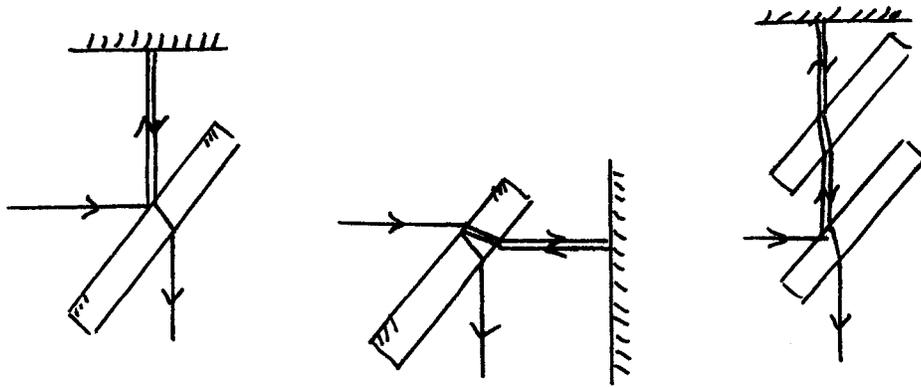
VII-1 Visite guidée de l'appareil

On identifiera :

- la séparatrice,
- les deux miroirs, leurs axes de rotation, la paire de vis "rapides" sur l'un, "lentes" sur l'autre,
- le chariot qui supporte l'un des miroirs, sa vis micrométrique de translation, le dispositif de mesure de la position,
- le verre anticalorique,

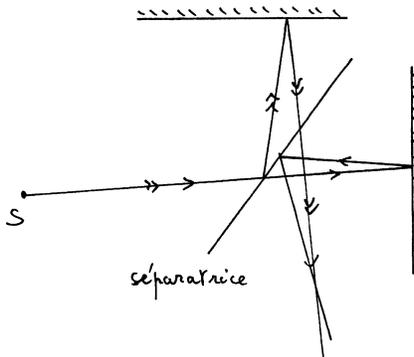
- une lame supplémentaire : la compensatrice dont le rôle est expliqué ci-dessous, ses deux vis de réglage,
- l'entrée et la sortie des rayons lumineux.

Rôle de la compensatrice : La séparatrice est une lame d'épaisseur non nulle ; idéalement une de ses faces est semi-réfléchissante et l'autre anti-reflet. Observons sur les figures ci-dessous, 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. La compensatrice permet de supprimer ce terme et d'avoir une différence de marche indépendante de la longueur d'onde. Elle est fabriquée dans le même verre que la séparatrice, a la même épaisseur et on la règle de sorte qu'elle ait la même orientation ; intercalée au bon endroit, elle rajoute deux traversées là où il le faut (voir figure ci-dessous à droite).



VII-2 Réduction à une lame ou un coin d'air

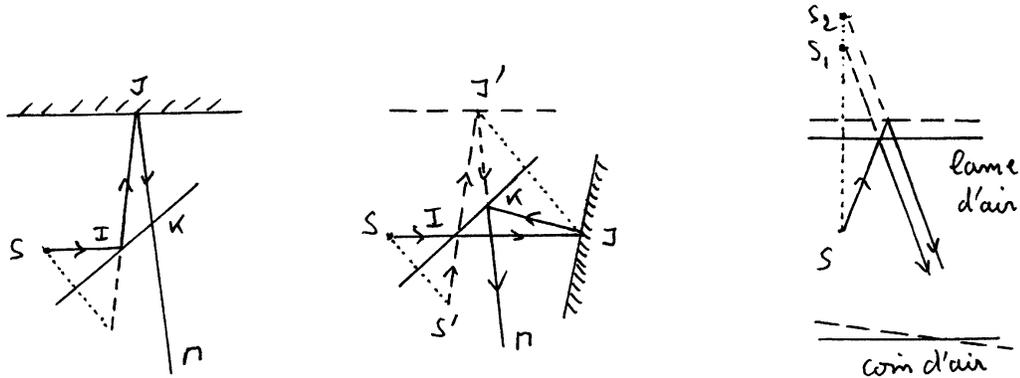
On ne fait que reprendre le cours pour mémoire.



Les rayons issus de la source S arrivent sur une lame semi-réfléchissante, appelée *separatrice* 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. 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. Il est donc d'usage de ne dessiner que cette première réduction de l'interféromètre, à savoir S' , un miroir et le symétrique de l'autre. 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*, 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.

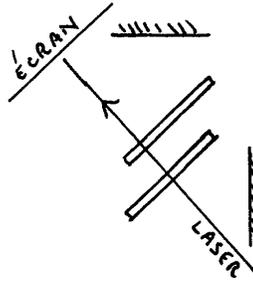
VII-3 Obtention d'interférences avec la lame d'air

On suivra scrupuleusement le protocole expérimental par étapes détaillé ci après :

VII-3.a Réglage de la compensatrice

On envoie en diagonale un faisceau laser qui traversera normalement séparatrice et compensatrice sans rencontrer les miroirs et on observe ce qui se passe sur un écran (voir figure ci-dessous).

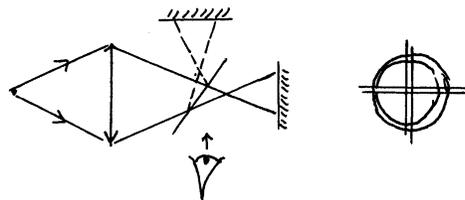
A cause des réflexions multiples ente les différentes faces des lames, on observe plusieurs groupes de taches. Si l'on actionne les vis de réglages de la compensatrice, le groupe le plus lumineux reste fixe et les autres bougent. Quand tous les groupes se chevauchent exactement, le réglage est fait.



VII-3.b Réglage en optique géométrique

On choisit comme source lumineuse une lampe au mercure qui est le meilleur compromis luminosité/monochromaticité : son spectre comporte peu de raies intenses et sauf situation exceptionnelle, le contraste est bon et il est inutile de filtrer.

On focalise à l'aide d'une lentille convergente les rayons vers un point très proche des miroirs : l'idéal est que le faisceau trace sur le miroir un rond lumineux à peine plus petit que le miroir lui-même. La focale choisie sera assez courte car on se souvient (je l'espère) que la distance minimale objet-image est quatre fois la distance focale donc celle-ci sera prise au moins quatre fois plus petite que la distance lampe-miroir. On place contre la lentille un porte-objet muni d'un papier calque sur lequel on a dessiné une croix et un cercle. On observe pour l'instant à l'oeil nu les deux images de cette cible à travers les miroirs (voir figure ci-dessous).



Étape 1 : les miroirs n'étant pas parallèles (on parle toujours d'un miroir et de l'image de l'autre par la séparatrice), on voit deux croix non confondues. A l'aide des vis rapides de réglage d'un des miroirs, on s'arrange pour superposer les deux croix.

Étape 2 : Les miroirs n'étant pas confondus, un cercle, plus éloigné, est vu plus petit ; de plus en déplaçant la tête de droite à gauche ou de haut en bas, il y a un mouvement relatif des deux cercles. A l'aide de la vis de translation du chariot, on s'arrange pour superposer les cercles.

En général, on est obligé d'alterner plusieurs fois l'étape 1 et l'étape 2. Normalement, on voit alors apparaître des franges ; en général, elles sont très serrées et presque rectilignes.

VII-3.c Réglage en optique physique

Le calque et la cible ne servent plus qu'à atténuer l'intensité lumineuse et à éviter l'éblouissement.

Etape 1 : On manœuvre l'une des vis lentes de l'autre miroir, il se passe deux choses : l'orientation des franges change, c'est non significatif et l'interfrange (distance entre franges) varie. On manœuvre la vis dans le sens où les franges s'écartent jusqu'à ce qu'elles cessent de s'écarter pour commencer à se rapprocher : on s'arrête à l'écartement maximum.

Procéder de même avec la seconde vis lente, puis alternativement avec l'une et l'autre. Tôt ou tard, les franges s'incurvent et le centre d'un système de franges circulaires apparaît dans le champ de vision. Il est alors aisé des manœuvrer les vis lentes de façon à amener le centre des franges au centre du miroir. Elles sont en général nombreuses et assez serrées. Si la manœuvre ne donne rien parce que les franges sont beaucoup trop serrées, on chariottera lentement dans le sens où les franges se desserrent puis on procèdera comme ci-dessus.

Etape 2 : Grâce à la vis de chariotage, on cherche à rapprocher les miroirs. Pour savoir si l'on progresse dans le bon sens, on observe la figure après quelques tours : après le défilement des franges (vers le centre en théorie, cf le cours, mais c'est trop rapide pour être vu) on doit voir moins de cercles plus espacés. Si l'on constate l'inverse, c'est qu'on s'est trompé de sens. Là encore, au cours de la manœuvre, le centre des franges se décale et on effectuera une alternance d'étapes 1 et 2. On s'arrête de charioter quand il reste encore beaucoup d'anneaux, mais suffisamment écartés pour qu'ils soient bien faciles à distinguer. Le premier objectif est atteint.

VII-4 Franges localisées et délocalisées

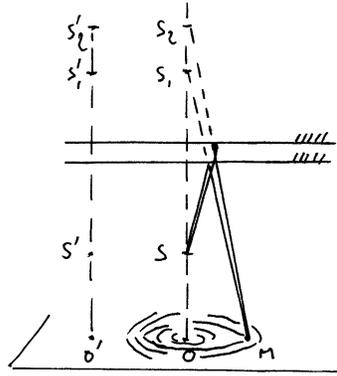
Il est temps de visualiser les franges sur un écran. On place donc un écran à un ou deux mètres de la "sortie" de l'interféromètre et l'on enlève le calque pour augmenter l'éclairement. Si tout va bien, on voit de belles franges.

Placer contre la lampe un diaphragme à iris et le fermer le plus possible, les franges restent visibles, en moins lumineux 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.

Essayons de comprendre :

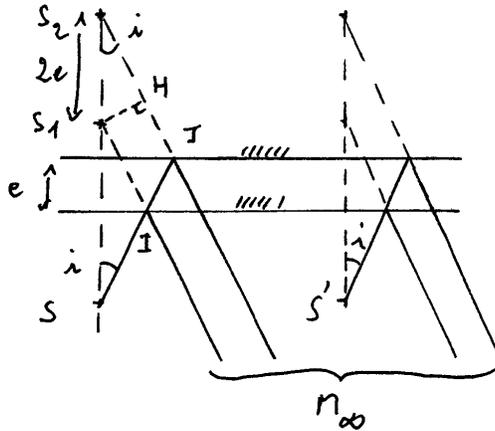
Si l'écran est à distance finie on retrouve, avec une source ponctuelle, comme dans le cours, des anneaux centrés sur la projection O de la source sur l'écran (voir figure).

Remplacer la source ponctuelle S par une source large, c'est lui accoller



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 :

$$\delta = [SJM] - [SIM] = [S_2JM] - [S_1IM] = [S_2H] = 2e \cos i$$

Si l'on élargit la source en lui adjoignant des points S' , au même point M à l'infini, donc dans la même direction i , 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. Le deuxième objectif est atteint.

VII-5 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 signoler 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. Le troisième objectif est atteint.

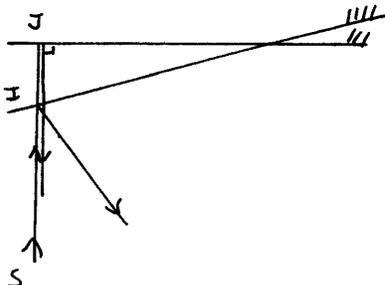
Remarque : Si l'on dépasse le contact optique en chariotant trop loin, le miroir mobile traverse le fixe et la lame d'air se reconstitue dans l'autre sens, les franges vont réapparaître et évoluer en sens inverse.

VII-6 Le coin d'air

On modifie le montage comme suit : on déplace la lampe-source par rapport à sa lentille de façon à placer la source au foyer et en former une image à l'infini (un petit miroir à main permet de vérifier le bon positionnement par autocollimation). Côté sortie, après avoir replacé le calque pour atténuer l'intensité, on observe les miroirs à l'oeil nu et l'on dérègle à peine le parallélisme des miroirs à l'aide d'une vis lente au choix, pour former un coin d'air : on voit alors apparaître des franges rectilignes. Elles sont en fait localisées sur les miroirs, on le vérifie en plaçant à la sortie une lentille convergente pour en former l'image sur un écran (ne pas oublier d'enlever le calque). 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. On vérifiera la localisation des franges : si l'écran n'est pas au bon endroit, on ne voit rien. Le quatrième objectif est atteint.

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'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

VII-7 Contrôle 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 notre matériel est composé 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

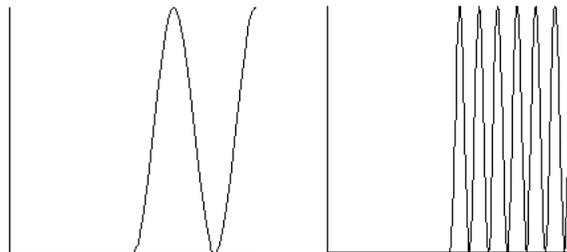
place de la lampe spectrale et de la lentille au foyer de laquelle elle était. Sauf miracle, on ne voit plus rien sur l'écran.

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 $\delta \approx 3 \lambda_m = 3.0,6 \approx 2 \mu\text{m}$. Autre façon de dire les choses : avec une lampe à incandescence, la longueur de cohérence est de $2 \mu\text{m}$. 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 (petit schéma au tableau et en marge). Notre stratégie est claire, roulons.

On note l'indication de la vis de chariotage puis on chariote extrêmement len-te-mmmenntt. 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, le cinquième objectif est atteint. Reste le sixième : 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 !

Une dernière remarque pour la route : Dans le spectre en lumière blanche plaçons nous en un point où δ est non nul. L'intensité de la seule radiation de nombre d'onde σ est proportionnelle à $1 + \cos(2\pi\sigma\delta)$. Observons ci-dessous la courbe donnant l'intensité en fonction de σ , d'une part pour une petite valeur de δ (à gauche), d'autre part pour une grande valeur (à droite) :



A gauche une seule partie du spectre a une intensité non négligeable : on voit quelque chose de coloré, une irisation. A droite de nombreuses radiations dans tous les domaines du spectre sont au maximum : on voit du blanc, comme

l'ordre d'interférence n'est pas petit (typiquement dès qu'il dépasse 3), on appelle ce 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*.