

Interférométrie Moderne

1-But :

Le but de cette expérience est de rendre l'étudiant familier avec le concept de l'interférence de la lumière et de découvrir le vaste champ d'application d'un interféromètre. En faisant cette série d'expériences, l'étudiant devrait être capable d'expliquer des concepts tels que : lumière monochromatique, interférence de lumière, cohérence (temporelle et spatiale) de la lumière, modes des lasers, interféromètre, interféromètre de Michelson ainsi que la détection de signal quadratique. D'un point de vue expérimental, l'étudiant va expérimenter le montage et le démontage sur une table optique, l'alignement du faisceau et aura à s'accoutumer aux divers éléments d'optique basique ainsi qu'avec la capture et le traitement du signal optique.

2-Introduction Générale :

Le terme Interférométrie signifie : « mesurer grâce aux interférences » et il est utilisé pour désigner une vaste gamme de technique pratiquée en optique. Tous les interféromètres fonctionnent sur un principe physique similaire : Il s'agit de la division d'un faisceau de lumière en deux faisceaux distincts qui, après avoir parcouru des chemins séparés dans l'espace, sont recombinaison. Une technique optique de ce genre est appelée interférométrie si le processus de recombinaison peut être soit constructif soit destructif. C'est de là que vient le terme « interférence ».

Ce qui change entre deux faisceaux qui se recombinaison de manière constructive, qui est opposé à la manière destructive, est la phase ; Deux faisceaux qui diffèrent de 180° (ou de π radians) dans leur phase respective interféreront de manière destructive. Pour obtenir un délai de phase, il faut une différence de chemin géométrique d'une demi longueur d'onde, ce qui vaut, pour une lumière rouge, $0.3 \mu\text{m}$ (micromètre) = $0.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ ou, de manière équivalente, à une différence de temps de parcours d'une demi période optique, qui vaut environ 1 femto seconde = $1 \text{ fs} = 1 \times 10^{-15} \text{ s}$. Des valeurs comme celles là illustrent bien la grande sensibilité que l'on peut obtenir avec des mesures interférométrie. Vous allez voir que la précision réelle peut même être supérieure aux nombres ci-dessus.

Le phénomène d'interférence dans l'expérience diffraction & holographie, avec un faisceau laser passant par une « double fente » ne fait pas intervenir deux faisceaux séparés, ou, du moins, il n'y a pas deux chemins séparés identifiables de la lumière. Dans notre interféromètre, en opposition avec cette expérience précitée, la division du faisceau à été faite en deux différentes positions du front d'onde, nous avons affaire à une « division de l'amplitude » où le front d'onde est divisé en deux parties en utilisant un miroir semi-réfléteur que l'on appelle un « beamsplitter » soit diviseur de faisceau. Sa particularité est de réfléchir partiellement ainsi que de transmettre partiellement également un faisceau de lumière incident. [Figure 1]

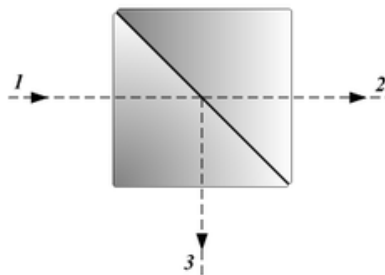


Figure 1 : Schéma d'un diviseur de faisceau

Nous allons travailler principalement avec un interféromètre de Michelson qui n'est qu'une des nombreuses architectures d'interféromètres existantes. Un interféromètre de Michelson consiste en deux miroirs finement poli M1 et M2. Une source S émet une lumière monochromatique incidente sur un miroir semi-argenté d'une surface M en un point C. La surface M est partiellement réfléchissante de telle manière qu'un faisceau est transmis au travers de celle-ci vers le point B alors qu'un faisceau est aussi transmis vers le point A. Les deux faisceaux se recombinaient au point C' pour produire une figure d'interférence (pour autant que l'alignement soit correct) qui sera visible à l'observateur au point E. En changeant la distance de l'un des deux miroirs (ou des deux) nous pouvons créer une différence de phase dans le faisceau recombinaison qui aboutira sur une interférence constructive ou destructive. Ces effets d'interférence peuvent être détectés par un détecteur optique [figure 2]

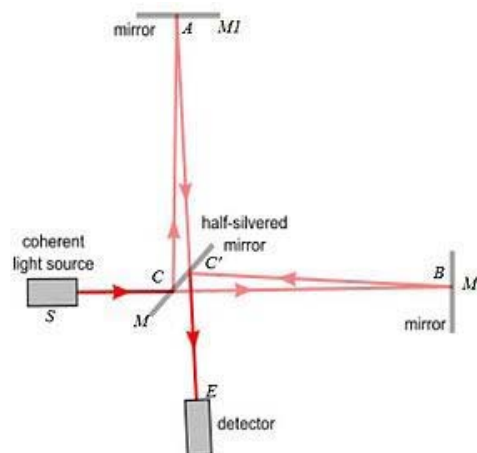


Figure 2 : Schéma d'un interféromètre de Michelson

Les applications de l'interférométrie dans les domaines de la physique moderne et dans l'industrie sont plus vastes encore que celles qui peuvent être illustrées dans cette expérience. De nos jours, l'interférométrie intervient dans une pléthore d'applications, parmi lesquelles la détermination très précise des standards de longueur ou la détection extrêmement sensible de déplacements mécaniques. Diverses méthodes d'interférométrie sont utilisées pour tester la forme des surfaces optiques. L'interférométrie est également à la base d'une méthode de spectroscopie à transformée de Fourier, spécialement utile dans la région infrarouge du spectre. Enfin, l'interférométrie d'une haute sensibilité est à la base du projet LIGO, dans lequel de minuscule distorsion de l'espace-temps, produites par le passage d'onde gravitationnelle, pourraient être détectée grâce à l'interférométrie.

3-Expérience

Nous allons explorer deux types d'interféromètre de Michelson ainsi que leurs applications. Les expériences suivantes seront effectuées :

- Mesure du contraste en fonction de différentes polarisations du laser pour des longueurs identiques de chemin optique (Interféromètre de Michelson standard)
- Mesure du contraste en fonction de différentes longueurs de chemin optique (Interféromètre de Michelson standard)
- Mesure de la longueur d'onde du laser à l'aide d'un micromètre différentiel (Interféromètre de Michelson standard)
- Mesure de la longueur d'onde du laser à l'aide d'un micromètre différentiel (Interféromètre de Michelson en mode quadrature)
- Mesures d'épaisseur pour différents films métalliques
- Mesures des indices de réfraction de différents matériaux (NON OBLIGATOIRE)

3-1 Préparation pour l'expérience

3-1-1 LA SÉCURITÉ AVANT TOUT !!!

- Il est très important de lire les informations sur la sécurité à observer avec les lasers (annexe A). Les étudiants doivent porter des lunettes de protection pour tous les montages optiques. Une fois que le montage est fait et que plus rien ne va être changé, l'usage des lunettes n'est plus obligatoire, bien qu'elles soient toujours recommandées.

3-1-2 Soins du matériel

- NE JAMAIS toucher les surfaces optiques sans gants. Des gants spéciaux sont fournis et doivent être utilisés par les étudiants durant le travail sur le montage optique. L'usage des gants n'est pas nécessaire pour travailler sur l'électronique ou sur l'ordinateur.

3-2 Interféromètre de Michelson standard

3-2-1 Montage de l'interféromètre

- Le laser est déjà positionné et monté au bord de la table optique. Cela permet un maximum d'espace de travail.
- Les deux miroirs pour guider le faisceau parallèlement à la table optique (comme montré sur la figure 3) sont aussi déjà montés. En utilisant les vis d'ajustement du miroir ainsi que le rail de translation, vous aurez tous les degrés de liberté requis pour ajuster le faisceau convenablement.
- Monter le diviseur de faisceau « diélectrique » (avec le label D) selon la figure 3.

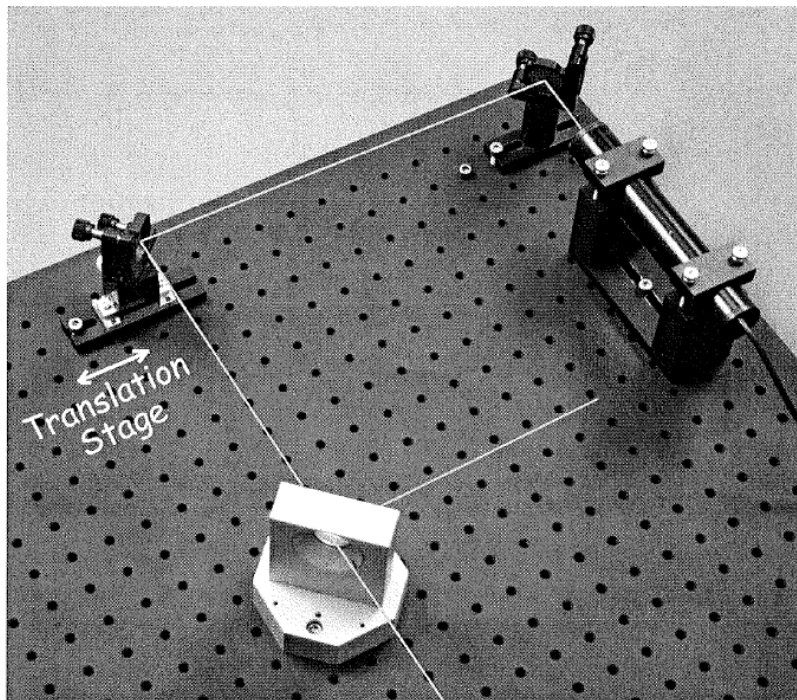


Figure 3 : Guider le laser au travers du diviseur de faisceau

- Monter les deux miroirs terminaux : ces miroirs sont les parties les plus sensibles de l'interféromètre et nécessitent un ajustement. Utilisez deux miroirs, l'un avec la charnière d'ajustement vertical et l'autre horizontal, pour pouvoir les ajuster facilement. [figure 4]

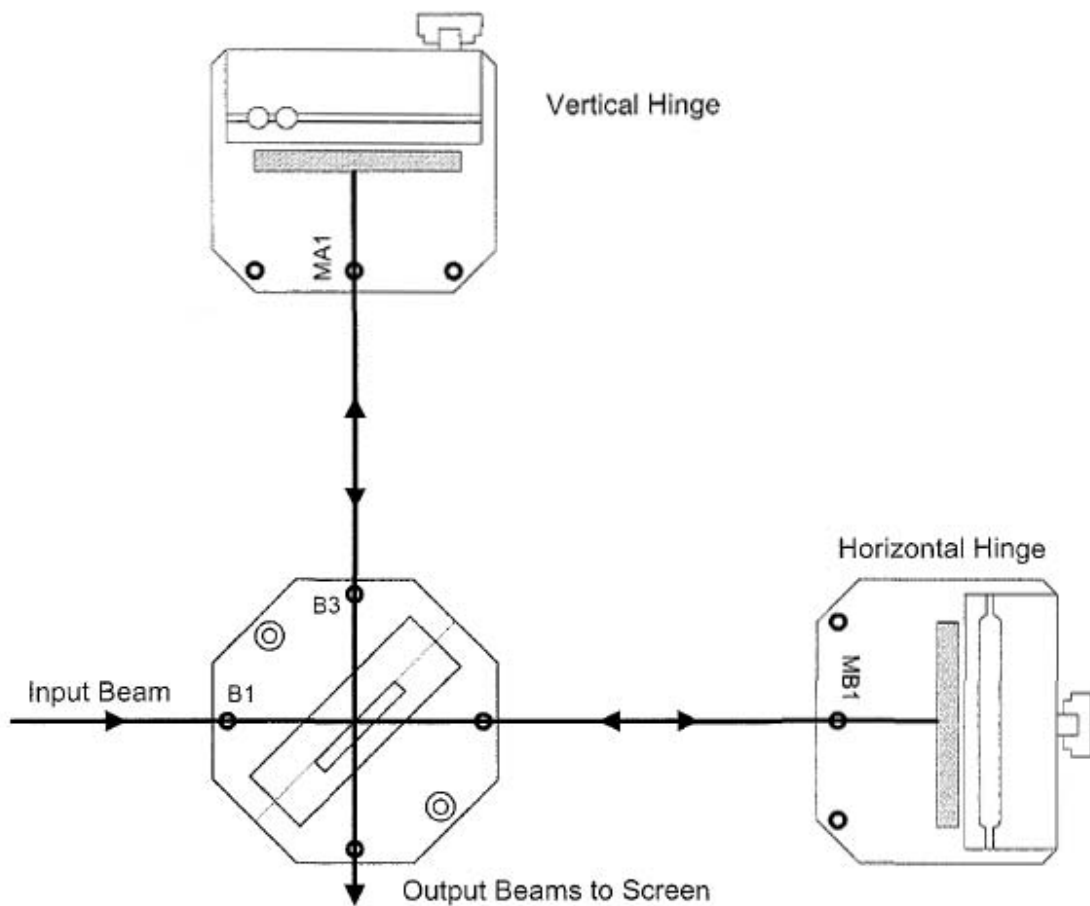


Figure 4 : Montage de l'interféromètre avec un miroir horizontal et un autre vertical.

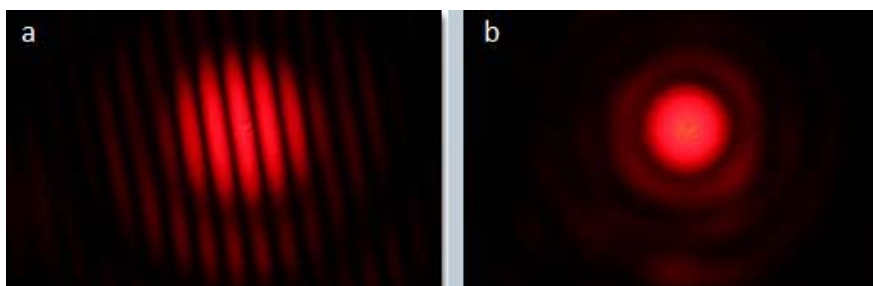
- Aligner les faisceaux. Le but final est de réunir les deux faisceaux (l'un réfléchi, l'autre transmis) qui quittent le « diviseur de faisceau ». Les deux faisceaux devraient tomber l'un sur l'autre si précisément que vous allez voir des « franges » se former. Cela peut être fait en alignant tout d'abord les faisceaux incidents à l'aide de la tour d'alignement [figure 5] en ajustant ensuite les vis de pivotement derrière les miroirs terminaux. Sur ces miroirs, vous pouvez contrôler le faisceau sur seulement une dimension (l'un verticalement et l'autre horizontalement) en utilisant la vis derrière le miroir. Il est aussi possible d'ajuster légèrement (verticalement et horizontalement) chaque miroir avant de les fixer à la table. Pour plus de détails sur la procédure d'alignement, reportez-vous à l'annexe B.



Figure 5 : Les tours d'alignement avec leur support peuvent être utilisées directement sur la table optique

- Aligner le faisceau incident en plaçant deux tours d'alignement, l'une en B1 et l'autre en MA1[figure 4], puis en jouant avec le miroir directionnel (le miroir fixé sur la monture de translation [figure 3]) de manière à ce que le faisceau passe au travers des deux trous d'épingle du milieu de chaque tours d'alignement.
- Placez des tours en B3 et MB1 et essayez de faire passer le faisceau au travers de leur trou central seulement en desserrant la vis du diviseur de faisceau. Vous pouvez ajouter du papier sous le diviseur de faisceau, là où il est fixé, pour ensuite resserrer les vis une fois que le faisceau est aligné. De cette manière vous ne changerez pas l'alignement du faisceau précédent (celui qui est transmis).
- Avant de toucher les vis des miroirs terminaux, essayez la même technique de dévisser les vis pour faire en sorte que le faisceau réfléchi passe à travers les mêmes trous d'épingle, puis resserrez les vis.
- Vous devriez maintenant être en mesure de voir deux points de lumière, éventuellement proche l'un de l'autre, sur un écran (papier – carton) que vous placez devant la sortie du diviseur de faisceau.
- En jouant sur les vis des miroirs terminaux, vous pouvez bouger les points de lumière de manière à ce qu'ils se recouvrent. FAITES ATTENTION de ne pas tourner excessivement les vis. Cela pourrait exercer une pression importante sur les charnières et les endommager. Si vous trouvez qu'il est trop difficile de rapprocher les deux points de lumière, c'est que vous n'avez pas achevé l'alignement basique correctement et devez recommencer. Demandez au responsable si vous rencontrez des difficultés.
- Lorsque les deux points de lumière se recouvrent, vous devriez voir un nouveau phénomène : une sorte de clignotement de la luminosité du point de lumière combiné. Ceci est votre premier phénomène d'interférence et le signe que votre interféromètre fonctionne [figure 6]. Si les points lumineux se recouvrent sans phénomène de clignotement, bougez vos tours d'alignement en aval du faisceau lumineux et observez si les deux faisceaux sortants ne sont peut être ni parallèles ni suffisamment superposés.
- Ce que vous recherchez sont des franges d'interférence, ou une série de raies parallèles alternativement brillant/rouge et sombre/noir. Elles sont formées par l'interférence des deux faisceaux optiques dont la direction de propagation, et donc le

front d'onde, ne coïncide pas exactement. Elles représentent des interférences qui sont constructives ou destructives selon la position dans le faisceau lumineux [figure 6a]. Vous pouvez encore utiliser la vis manuelle au dos des miroirs terminaux afin de faire en sorte que l'espacement entre les franges d'interférence soit aussi grand que possible. Une fois que cela est fait, vous n'avez plus de frange d'interférence, seulement un niveau d'intensité sur tout le point de recouvrement lumineux des deux faisceaux [figure 6b]



Figures 6 a et b : figure d'interférence a) alignement incorrect b) alignement parfait.

- Afin d'être sûr que vous avez bien des interférences, vous pouvez tester l'intensité du point lumineux en pressant gentiment le bout de votre doigt sur la table optique ou sur le revers de l'un des miroirs. Vous devriez être en mesure d'observer le changement d'intensité. Vous pouvez vous rendre compte à quel point votre montage est sensible au mouvement mécanique des éléments optiques. C'est la raison pour laquelle la table doit être isolée des vibrations, de source de chaleur, etc.
- Maintenant, connectez le câble d'alimentation photo détecteur à la boîte électronique et placez le devant le faisceau de manière à ce que les franges d'interférence tombent au centre du détecteur. Vous pouvez ajuster la hauteur et l'angle du détecteur après l'avoir monté sur la table. Vous pouvez aussi changer la position horizontale du détecteur avant de serrer ses vis. En clair, ajustez le détecteur, PAS le faisceau afin d'obtenir le signal. Notez bien que le détecteur est une pièce de silicone de forme carrée relativement petite. Cela signifie que même si le faisceau rentre dans le 'cylindre' d'entrée, il n'arrive peut-être pas sur le détecteur. Utilisez des lunettes de protection et assurez-vous que le faisceau arrive bien au centre sur la surface de détection.
- L'output du détecteur peut être lu à travers le connecteur coaxial soit sur l'oscilloscope soit sur la boîte électronique (comme vous le ferez plus tard). La valeur varie entre 0V (pas de signal) et -10V (saturation). Le gain du détecteur peut être ajusté avec l'interrupteur à l'arrière du détecteur. Il devra être ajusté afin que le maximum ne dépasse jamais -10V. (réglé entre la première et seconde position uniquement)
- L'ajustement final devrait être de jouer avec les miroirs et de maximiser le contraste du signal. Si vous voyez un niveau de signal S_A dû à un faisceau seul ainsi qu'un niveau de signal S_B dû à l'autre faisceau seul, vous devriez idéalement trouver $S_A \sim S_B = S$ et cependant, lorsque les deux faisceaux sont présent, vous devriez voir le signal varier sur l'échelle complète de $[\overline{S_A} - \overline{S_B}]^2$ à $[\overline{S_A} + \overline{S_B}]^2$ ou, approximativement de 0 à 4S. VOUS N'AVEZ PAS L'OBLIGATION D'EFFECTUER CECI.
- La stabilité des franges peut paraître faible à première vue. Vous avez dû remarquer combien l'interféromètre est sensible aux vibrations (qui doivent être évitées par un choix judicieux d'une table optique ainsi que sa position dans le laboratoire. Marcher

dans la pièce perturbera aussi le signal). L'interféromètre est également sensible aux changements de la température de ses éléments (puisque leurs dimensions changent) ainsi qu'aux changements de pression de l'air. Nous allons exploiter cette sensibilité pour mesurer précisément ces « perturbations »

3-2-2 Longueurs de cohérence

- Dans le concept de lumière, il y a deux types de concepts de cohérence. Temporelle et spatiale. Ici, nous allons utiliser l'interféromètre pour observer la cohérence temporelle de notre source de lumière. Ce qui est important de comprendre c'est que la cohérence est une affaire de degré. Vous ne pouvez PAS catégoriser les sources lumineuses en « cohérentes » et « incohérentes »
- Lisez, (et prenez bonne note) du contraste des franges après avoir essayé de les maximiser comme expliqué plus haut. Le contraste est considéré comme la valeur absolue de la différence entre le voltage maximum et le voltage minimum du détecteur.
- Changez la position de l'UN des miroirs en le mettant à 1" (une unité – rangée de trous sur la table) plus loin pour faire un interféromètre avec des longueurs de bras inégales. Ensuite, essayez de les aligner à nouveaux et regardez les franges. Essayez de maximiser le contraste sans changer le gain du détecteur et notez le contraste.
- Faites de même avec une différence dans les longueurs de bras égale à 3" et notez le contraste.
- Faites ensuite de même avec les deux bras à 3" (longueur de bras égale) et notez le contraste.
- Comme vous le voyez, le contraste diminue quand la différence entre les longueurs des bras augmente et non lorsque la longueur des bras varie seule. Cela est dû à la cohérence temporelle limitée de la source lumineuse (différent de la cohérence spatiale).
- Calculez la différence de temps entre la lumière qui voyage le long du bras long et le long du bras court lorsque la longueur des bras est de 1". Nommez cette différence t_d . De combien de périodes de laser s'agit-il ?
- Pensez vous que la lumière émise de la source il y a t_d secondes à la même relation de phase avec la lumière émise juste à l'instant ?
- Qu'est ce qui cause la baisse de contraste entre les franges d'interférence ?
- Pour une meilleure visualisation, laissez le faisceau rencontrer une surface blanche (au lieu du détecteur) et placez une lentille entre le faisceau et l'entrée de l'interféromètre (avant le diviseur de faisceau). Maintenant essayez d'ajuster la lentille afin de voir le signal sur l'écran.

3-2-3 Contrôle de la longueur de chemin à l'échelle micrométrique

- Dans cette section, nous allons tenter de mesurer la longueur du bras avec une précision de l'ordre du sous-micromètre. Il vous faut remplacer l'un des miroirs terminaux par un miroir monté sur un support flexible linéairement avec la possibilité de changer sa position à l'aide d'une tige métallique placée à l'arrière [figure 7].

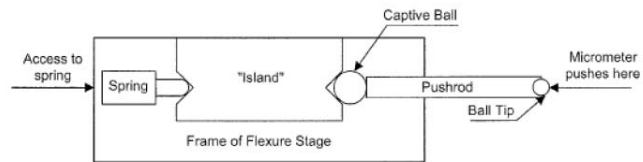
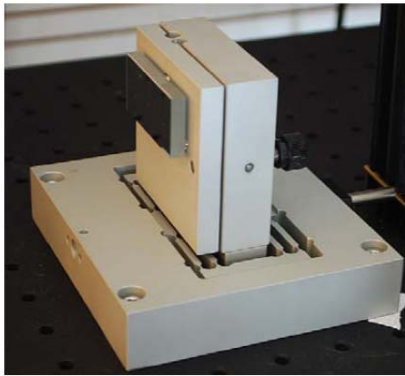


Figure 7 : gauche : miroir terminal monté sur un support flexible. Vue en coupe du support flexible connecté au micromètre.

3-2-3-1 Système opto-mécanique

- Montez le support flexible. FAITES ATTENTION, n'exercez pas une force excessive sur le support car il a une marge de manœuvre limitée (± 1 mm) et vous pourriez l'endommager.
- Le support est fait pour être piloté par un micromètre différentiel spécial avec une échelle de 0 – 2.5 mm mais lisible via une échelle Vernier avec une résolution de 0.1 micromètre [figure 8]. Cela vous donnera un contrôle mécanique direct sur les niveaux des sous-franges que votre interféromètre permet. Montez le micromètre différentiel à une place où il peut toucher les boutons poussoir du support mobile en son milieu (afin de laisser une flexibilité de 1 mm) et de lire le zéro du Vernier sur le micromètre.



Figure 8 : le micromètre différentiel, course de 2,5mm maxi

- Aligner l'interféromètre comme d'habitude afin d'obtenir les meilleures franges d'interférence possible et vérifier le signal sur l'oscilloscope. Afin d'être en mesure de voir les franges, le support mobile doit être connecté à la tige du micromètre qui ne doit pas le laisser osciller librement. Si vous avez bien tout mis en place, vous devriez pouvoir contrôler le signal en tournant manuellement la poignée du micromètre. Cela demande un peu de pratique avant de pouvoir contrôler complètement le signal et de

pouvoir toucher le micromètre sans perturber tout le système.

- Vous devriez aussi apprendre à lire les paramètres du micromètre différentiel, lequel avance sa surface de travail linéaire de 50 micromètre pour une rotation du cylindre. La plus petite division est de 1.0 micromètre, les paramètres peuvent être lus sur une échelle de 0.1 micromètre en utilisant l'échelle du Vernier. Finalement, vous avez une lisibilité qui approxime les translations minuscules que vous faites faire aux franges.
- Positionnez le micromètre à environ 1mm pour vous permettre une plage de mesure confortable.
- Connectez le moteur DC au bout du cylindre du micromètre [figure 8]. Le moteur à une vitesse de rotation de 1 tpm et tourne dans une direction seulement. Cela signifie que vous devez régulièrement desserrer le support du moteur, le détacher du micromètre, remettre le micromètre en position initial et remettre le moteur en place. Il y a un interrupteur de protection qui arrête le moteur si le cylindre du micromètre se rapproche trop du moteur afin d'éviter une collision. Faites également attention d'adapter DELICATEMENT le moteur dans l'adaptateur de plastic blanc sur le micromètre. Ne pas toucher les extrémités afin de lui permettre de s'étendre librement lors de la rotation [figure 9].

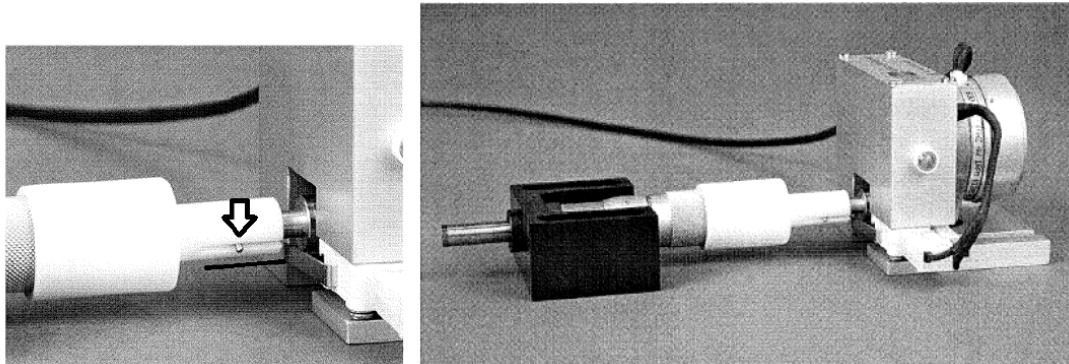


Figure 9 : Connecter le moteur au micromètre tout en laissant suffisamment de place pour l'adaptateur plastique.

- Testez et assurez-vous que le moteur puisse tourner doucement et régulièrement durant plusieurs révolutions. Assurez-vous également que le signal soit sinusoïdal avant de faire des mesures.

3-2-3-2 Montage électronique

- Une fois que vous avez le moteur qui fonctionne mécaniquement, vous devez surveiller le signal de l'interféromètre dont il est la cause. Vous devriez observer les franges apparaître doucement et à une vitesse constante.
- Connectez la sortie de votre détecteur à l'une des deux entrées (entrée + pour l'exemple) sur la boîte électronique [figure 10].
- Suivez le signal du détecteur à l'aide de la boîte de contrôle « modern interferometry » [figure 10] et vérifiez l'influence du filtre des hautes fréquences sur votre signal de frange sinusoïdal dans l'espoir de filtrer le bruit de haute fréquence tout en préservant la sinusoïde de basse fréquence. (BNC-Low Pass Monitor)
- Maintenant vous pouvez capturer le signal et le sauvegarder sur un ordinateur. Pour ce faire, utiliser le logiciel spécial « OpenChoice Desktop »

- Capturez le signal de l'oscilloscope aussi longtemps que l'échelle de temps le permette tout en notant les valeurs du Vernier au commencement et à la fin des mesures.
- Calculez la longueur d'onde du laser sachant que le chemin de la lumière change de $2*L$ ou L est la différence de chemin indiquée par le micromètre.
- Question : Pourquoi le changement est-il de $2*L$?
- Vous devriez également être attentif à l'amplitude du signal que vous obtenez et utiliser une valeur d'hystérèse appropriée en envoyant le signal sur un unique canal du compteur. Lorsque vous avez trouvé une combinaison qui donne un décompte raisonnable, c'est à dire un décompte électronique pour chaque frange d'interférence, vous êtes prêt à mesurer les longueurs d'ondes de manière plus précise.
- Mesurez le décompte pour 2 minutes (~ 2 tours du moteur) et faites les mêmes calculs avec le nombre que le compteur digital vous donne (n'oubliez pas de remettre à zéro avant de commencer !)



Figure 10 : La boîte électronique.

- Finalement, il peut être intéressant de savoir que la mesure standard est définie sur la base de la longueur d'onde de la lumière. Nous faisons confiance aux valeurs du micromètre (qui est lui-même calibré grâce à l'optique !) pour calculer la longueur d'onde du laser.

3-3 L'interféromètre de la « quadrature de Michelson »

Cette section requiert que vous ayez construit et utilisé un interféromètre de Michelson. Il s'agit de vous poser des questions sur des concepts ainsi que sur des aspects pratiques :

Q1 : Lorsque vous êtes dans un « minimum de frange » lors de l'utilisation de l'interféromètre de Michelson, il n'y a idéalement pas d'énergie en direction du détecteur – donc où est-ce que l'énergie de la source lumineuse est-elle allée ?

Q2 : Étant donné qu'un signal sinusoïdal donné par le détecteur lorsqu'un des miroirs de l'interféromètre de Michelson est varié doucement, comment pouvez-vous définir de quelle direction l'interféromètre est effectivement en train de scanner ?

Les réponses à ces questions motivent un approfondissement de l'interféromètre de Michelson. En particulier, vous serez capable de construire un interféromètre si robuste contre les vibrations que vous pourrez faire rebondir une balle de tennis sur la table optique durant l'opération tout en conservant une résolution sur la position du micromètre inférieure à $0.1 \mu\text{m}$.

3-3-1 Sortie standard et non-standard d'un interféromètre de Michelson.

Nous allons nous pencher sur la sortie « non-standard » de l'interféromètre de Michelson. Ceci se rapporte à la question 1 posée plus haut. Nous devons mesurer la seconde moitié du faisceau qui est renvoyé à la source en tant que sortie complémentaire. La méthode consiste à utiliser un miroir semi-réfléchissant additionnel, placé à un angle d'incidence de 45° du rayon entrant, comme représenté sur la [figure 11] ci-dessous. Naturellement, le faisceau entrant rencontre ce miroir sur son chemin vers l'interféromètre et 50% de la lumière nominal entrante est immédiatement déviée, et ne verra pas du tout l'interféromètre. C'est une perte mais le résultat en vaut la peine.

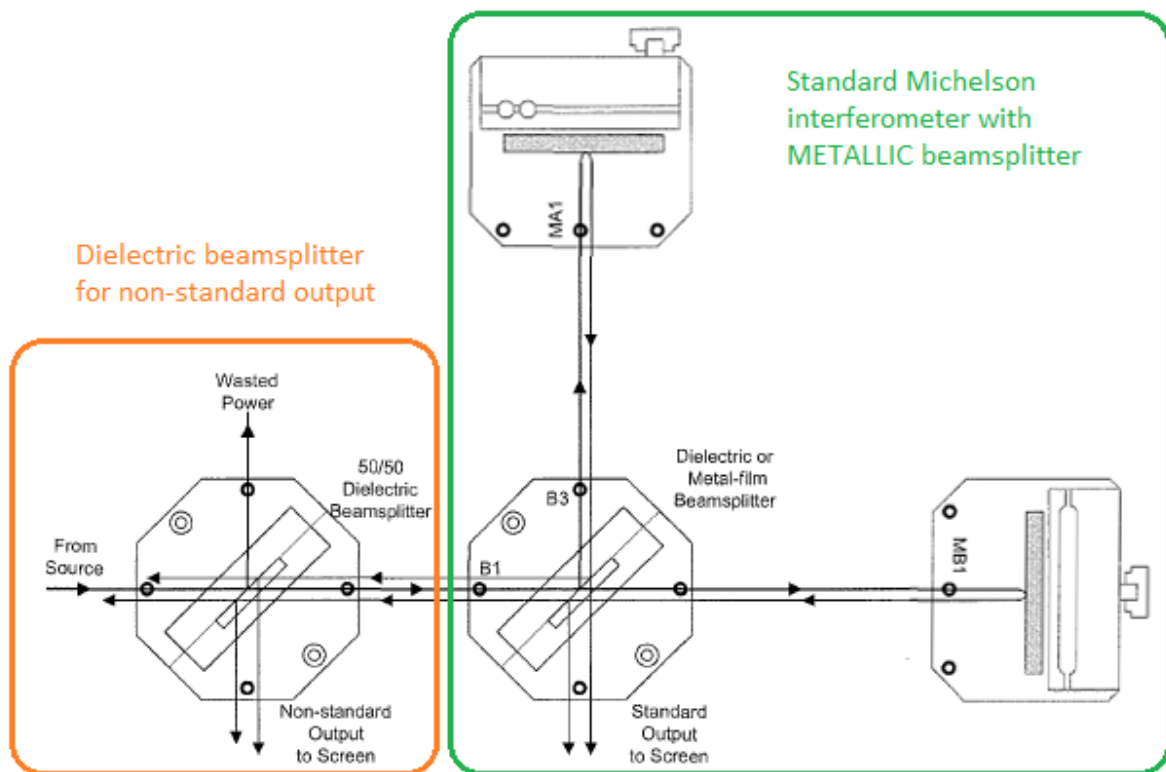


Figure 11 : Schéma de l'interféromètre dans le but d'obtenir la sortie non-standard

- Mettre en place l'interféromètre de Michelson avec les deux longueurs de bras égal, comme dans la section 1, en utilisant le laser HeNe en tant que source et un **diviseur de faisceau métallique** qui, cette fois ci, laissera 6" ou plus de liberté entre le deuxième miroir mobile et le diviseur de faisceau. Une fois le nouveau diviseur de faisceau à film métallique en place, vous devez être conscient que le faisceau réfléchit de la surface métallique (en opposition au faisceau résiduel réfléchit de l'interface verre/air de l'autre coté de la plaque fine)
- Aligner l'interféromètre comme d'habitude (observez la sortie non-standard, où le contraste est plus important, tout en optimisant les franges) et envoyez le signal non-standard vers le second détecteur. Une vue de la double trace des signaux peut vous permettre de réaliser que les deux signaux changent de manière sinusoïdal lorsque vous variez systématiquement la différence de phase dans l'interféromètre.

Cependant, vous aurez remarqué que le contraste de ces signaux est plus faible que précédemment.

- Vous pouvez améliorer le contraste par un choix judicieux de la polarisation de la source lumineuse. Faites simplement tourner la source autour de son propre axe (desserrez le un peu) et voyez lorsque le contraste des deux sorties est bon. Vous pourriez avoir besoin d'améliorer l'alignement à chaque fois que vous faites tourner la source. (NON OBLIGATOIRE)
- Maintenant, changez l'affichage de X-et-Y vs. Temps à X vs. Y en temps réel et vous allez voir quelque chose de nouveau, qui est la motivation première ainsi que la récompense du diviseur de faisceau à film métallique. Vous devriez voir un nouveau emplacement pour X vs Y : L'un qui n'est pas contraint par un argument de conservation de l'énergie qui consiste en une ligne. La raison en est (à l'opposé du diviseur de faisceau entièrement diélectrique, sans perte, que vous utilisiez jusqu'à maintenant) que le diviseur de faisceau à film métallique est dissipatif. Libre de la contrainte de conservation de l'énergie, le signal X vs. Y peut prendre une forme dans laquelle les deux signaux ne sont plus redondants ; De telle sorte que connaître l'un ne fixe plus la valeur de l'autre.
- Essayez de changer très lentement la distance du miroir sur le support mobile et ce, dans les deux directions et observez ce qui se passe sur le graphique XY. Pouvez-vous répondre à la question 2 maintenant ?
- Les deux signaux de l'interféromètre sont appelé « signaux de quadrature » parce qu'ils ont une différence de phase de presque 90° . Un décalage de phase de 90° est obtenu par le choix judicieux du film métallique, son épaisseur et la polarisation de la lumière.
- Envoyez les signaux du détecteur vers la boîte de contrôle électronique « Modern Interferometry » et étudiez comment les ajuster avec un décalage variable jusqu'à ce que votre emplacement soit centré autour du point (0,0). Vous pourriez également ajuster le gain jusqu'à ce que les deux signaux atteignent une amplitude comparable. Maintenant, observez le nouveau point sur l'affichage X vs. Y. Notez que vous avez, durant l'un de ces « cycles » quatre événements distincts lorsque le point (X,Y) croise les axes de l'affichage cartésien.
- Ces croisements d'axes sont des croisements aux zéros du signal électronique et votre boîte contrôleur est équipée pour les détecter. Envoyez les signaux dont le décalage ainsi que l'échelle ont été ajustés vers la section du « compteur de quadrature » de votre contrôleur. Paramétrez ensuite le compteur sur « quadrature mode » (au lieu de Channel-A) et voyez ce qu'affiche les 5 digits du compteur à chaque fois que le point (X, Y) croise l'un des axes cartésiens. Voyez si vous pouvez faire systématiquement le compte à rebours ou non.
- Il y a deux sortes d'ajustements que vous pouvez faire sur le signal analogique de la quadrature pour améliorer le décompte haut/bas. L'un d'eux est de filtrer le bruit électronique à haute fréquence du signal. Cela peut être fait en choisissant une constante de temps de filtrage dans la courbe du signal. Votre but n'étant pas de filtrer la variation du signal optique véritable mais seulement le bruit qui n'est pas en relation avec le signal des franges. La deuxième amélioration électronique que vous pouvez faire est de choisir un niveau d'hystérèse pour le discriminateur électronique qui converti le signal analogique en valeurs digitales. Le but étant de s'assurer que la transition digitale ne se fasse que sur un véritable signal de frange, et non pas à chaque bruit ou fluctuations qui ferai passer le signal à zéro.

- Lorsque vous aurez réussi un comptage fiable, faites le décompte d'un cycle complet autour du focus. Si la phase relative du signal quadratique est vraiment 90° , alors les points du décompte doivent être espacés de manière égale dans la phase optique. A quelle variation de la longueur du chemin un point du décompte correspond-il ? Quelle information sur le déplacement du miroir cela permet-il d'obtenir ?

3-3-2 Mesure de longueur d'onde avec la sortie non-standard de l'interféromètre de Michelson.

Maintenant que vous maîtrisez les 'signaux de quadrature' de l'interféromètre de Michelson (noté QMI pour Quadrature Michelson Interferometry), vous pouvez effectuer de nombreuses mesures intéressantes en utilisant ce montage très précis. En premier lieu, refaites la mesure de longueur d'onde avec le QMI en utilisant seulement le « compteur de quadrature ».

- Combien de points sur le compteur correspondent à une longueur d'onde ?
- Comparez la longueur d'onde du laser HeNe avec les résultats obtenus en utilisant l'interféromètre en mode standard

3-3-3 Mesure d'épaisseur

Dans cette expérience, vous utiliserez une barre de contrôle micrométrique [figure 12] afin de créer manuellement un espace entre le poussoir et le micromètre différentiel. Utilisez ensuite les feuilles métalliques pour combler l'espace créé. L'idée est de mesurer le nombre de points du compteur quand vous créez l'espace et quand vous le comblez. La différence des deux donne l'épaisseur de l'échantillon utilisé pour combler l'espace. Afin d'améliorer la statistique de la mesure, faites ces mesures au moins 5 fois. Prenez bien soin de tourner la vis micrométrique très doucement dans le but d'éviter de filtrer le comptage des franges.

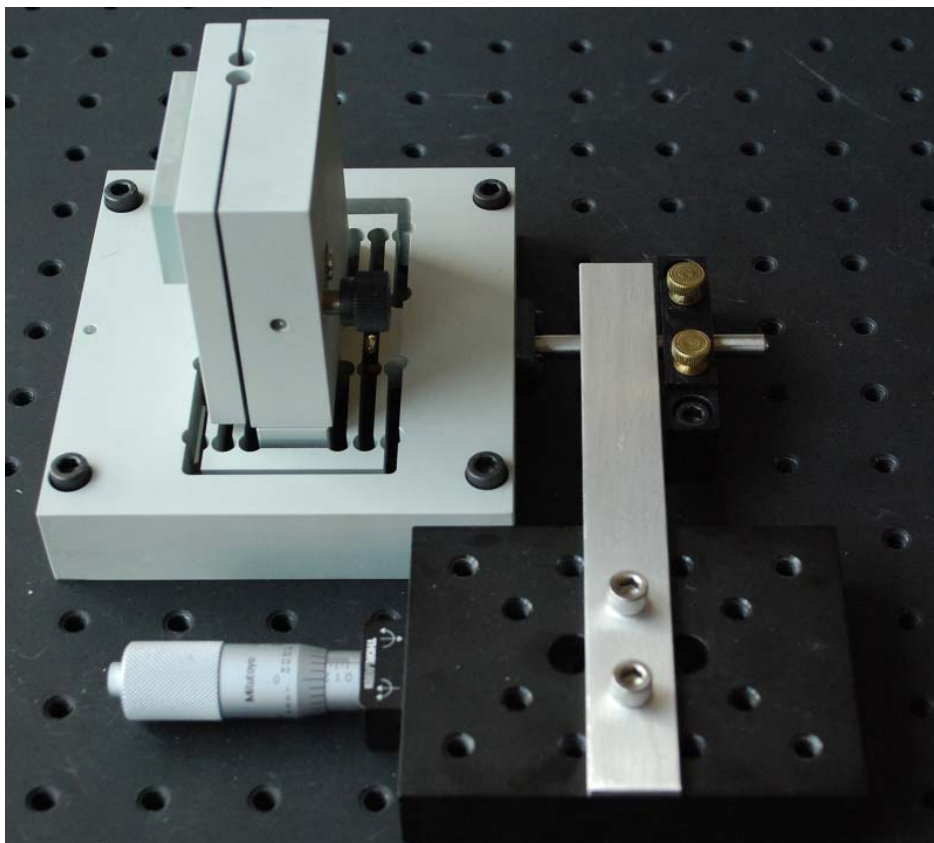


Figure 12 : Le miroir et sa monture à contrôle micrométrique utilisé pour les mesures d'épaisseur

3-3-4 Mesure de l'indice de réfraction

Le but de cette partie est de mesurer l'indice de réfraction de différents matériaux. Pour cela vous introduirez une lame (du matériau à caractériser) dans un des bras de l'interféromètre [figure 13], en changeant l'angle de la lame par rapport à la normale de la direction de propagation de la lumière vous induirez un changement de chemin optique (ainsi qu'un changement de phase). Cette modification du chemin optique dépend de l'indice de réfraction de la lame. Pour les calculs, reportez-vous à l'annexe C. Nous utilisons l'équation suivante pour calculer l'indice de réfraction :

$$n = \frac{\alpha^2 + 2(1 - \cos \theta)(1 - \alpha)}{2(1 - \cos \theta - \alpha)},$$

Avec $\alpha = M(\theta)\lambda_{\text{vac}}/2T$ directement relié au nombre de franges observées.

Vous devrez mesurer le changement du nombre de franges en fonction de l'angle (par pas de 2 degrés pour un intervalle de 0 à 14 degrés) pour chaque lame et tracer les résultats. Pour chacun des points vous calculerez l'indice de réfraction en utilisant l'équation donnée ci-dessus et vous tracerez les résultats obtenus



Figure 13. Une lame de quartz sur la monture tournante dans un des bras de l'interféromètre

Annexe A. la sûreté avec un laser.

L'énergie qu'un rayon laser transfère à l'œil humain peut l'endommager définitivement. Il est donc important de comprendre les précautions requises. Dans le cas d'un rayon laser visible, de faible puissance et à onde continue, comme dans notre appareil interférométrique, les exigences de sécurité sont faciles à respecter avec seulement un minimum de bon sens. Voici cela en un simple petit ensemble de consignes :

- il n'est PAS SANS DANGER de laisser pénétrer un rayon laser intense dans des yeux sans protection, même si cela est très bref.
- Cependant, regarder la lumière du laser diffusée par une surface EST SANS RISQUE, même si vous la regardez de près ou durant un long moment.

Voici la justification de ces deux affirmations, extraite du standard des précautions des lasers

Z136 du l'institut américain des lasers. Nous envisageons le pire scénario, dans lequel une diode laser 5 mW fournit sa lumière à une surface de 1 mm x 2 mm ou de 2 mm x 2 mm = 2 mm². Cela équivaut à une densité de puissance de $5 \text{ mW} / 0.02 \text{ cm}^2 = 250 \text{ mW/cm}^2$, ce qui est plus que le double de l'intensité de la pleine lumière du soleil. Tout comme vous êtes suffisamment lucide pour ne pas regarder le soleil ou faire en sorte que l'intensité de sa lumière ne soit focalisée sur votre rétine, vous saurez éviter de regarder dans le rayon du laser. Le cas de la lumière diffusée est totalement différent. Pour une lumière tombant sur une surface qui diffuse la lumière, comme les surfaces d'aluminium sablées ou anodisées de votre montage, ou comme la surface thermo laquée de la tour d'alignement ou de la baguette d'alignement, il est raisonnable de considérer que la lumière diffuse sur environ 2π : stéradians d'angle solide. Supposez un faisceau laser de 5 mW dirigé sur une telle surface et regardée d'environ 10 cm = 4" ; même si 100% de la lumière est diffusée, l'irradiance au niveau de l'œil est seulement de $5 \text{ mW} / 628 \text{ cm}^2 = 0.008 \text{ mW/cm}^2 = 8 \text{ IW/cm}^2$.

Voyez ici quelques limites de tolérance prise du standard LIA Z136.1 :

- Pour un temps d'exposition plus court que 18 /ls, la limite de précaution est de $5 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$, ce qui doit être comparé avec le cas le pire où une énergie de 250 mW/cm^2 (18 /ls) = 4500 nJ/cm^2 qui est neuf fois plus grand que la limite de sécurité. Vous pouvez donc conclure que même une exposition très brève de vos yeux au rayon laser est dangereuse selon ce standard. C'est la raison pour laquelle les lasers devraient avant tout être orienté adéquatement, pour être allumé ensuite seulement. C'est également la raison pour laquelle les lasers devraient toujours finir sur une destination qui est sans risque (comme une surface absorbante ou diffusive, mais JAMAIS un miroir ou autre surface réfléchissante).
- Pour des temps d'exposition aussi long que 8 heures par jour, la limite de précaution est donnée par $\text{CB} / \text{IW/cm}^2$, où $\text{CB} = 1015$ (« -.550)lm). Cela donne une limite de sécurité de $18 / \text{IW/cm}^2$ pour une lumière laser de 633-nm, en sorte que l'irradiance diffusée de $8 / \text{IW/cm}^2$ calculée ci-dessus reste en dessous de la moitié de la limite de sécurité.

Annexe B. Alignement du faisceau

- 1) Vous devez commencer par aligner le faisceau entrant le long de l'axe naturel ; dans ce cas, il est indiqué par les trous d'épingle de 3 mm de diamètre de deux outils d'alignement de couleur gris appelé « baguette d'alignement ». Ces dernières ont une cheville de métal au fond de leur surface laquelle glisse proprement dans de petits trous situés au sommet de la base du diviseur de faisceau et des miroirs terminaux de manière à permettre un alignement dans l'espace. Mettez deux baguettes en place aux locations BI et MAI comme montré sur la figure 1-4. Ne vous préoccupez pas pour l'instant de savoir si le faisceau laser passe au travers des trous d'épingle. Lisez la section 2 de ce manuel pour comprendre l'algorithme que vous allez utiliser : l'ajustement se fait grâce aux vis manuelles se trouvant à l'arrière des miroirs directionnels, faire en sorte que le faisceau laser passe soigneusement au travers du centre des deux trous d'épingle que vous avez équipé de baguette. Vous avez aligné le faisceau de lumière à une hauteur standard au dessus du plateau, parallèlement à sa surface et le long de la ligne, verticalement au-dessus, de l'une de ses rangées de trous de vis.
- 2) Repositionnez les baguettes du faisceau dans les trous notés B3 et MBI dans la figure 1-4 et observer la propagation du faisceau réfléchi à partir du diviseur de faisceau. Il

est souhaitable que le faisceau passe au travers du trou d'épingle central des deux baguettes, pourtant il semble qu'il n'y ait plus aucun ajustement possible pour l'arranger. Cependant vous pouvez desserrer les vis qui tiennent le support du diviseur de faisceau sur la table, et vous pouvez tourner ce support suffisamment pour permettre un bon alignement vertical. Vous pourriez consulter l'annexe G pour une méthode vous permettant de faire cela encore mieux, mais il n'est pas nécessaire de faire un alignement parfait. Lorsque vous êtes satisfait, clipper à nouveau le montage du diviseur de faisceau sur la table.

- 3) Si le support de vos miroirs terminaux est légèrement vissé sur la table optique, vous aurez la possibilité de les tourner un peu, en exploitant le « jeu » des trous de vis plus grands que la vis elle-même. Tout en bloquant le faisceau vers l'autre miroir, tourner chaque support de miroir en regardant que le faisceau rétro-réfléchi revienne à travers le centre du diviseur de faisceau. Vous ne souhaitez qu'un ajustement relativement grossier des supports de miroir dans le but de rendre la surface des miroirs perpendiculaires au faisceau laser incident.
- 4) Si vous mettez une tour d'alignement dans le faisceau de sortie, vous devriez être en mesure d'identifier les (deux) faisceau(x) de sortie standard de l'interféromètre. A ce stade, il est très peu probable qu'ils se recouvrent ; ce qui est parfait puisque c'est ce qui nous permettra d'identifier quel faisceau est dû à quel bras de l'interféromètre. [méthode : utiliser une autre tour d'alignement pour bloquer le faisceau qui se propage le long d'un bras de l'interféromètre et observer quel est le point qui clignote en faisant cela] Une fois que vous aurez identifié les faisceaux, vous pouvez vérifier que chaque faisceau peut être bougé, avec un seul degré de liberté, en utilisant simplement une vis d'ajustement au dos de la partie supérieur droite du support des miroirs terminaux de votre interféromètre.
- 5) Si vous avez choisi le support de miroir correctement, vous aurez un point lumineux qui peut être translaté verticalement ainsi qu'un second qui peut être translaté horizontalement. Votre but est d'ajuster chacun d'eux jusqu'à ce que les points se recouvrent. [Vous disposez seulement d'une marge de manœuvre limitée sur l'ajustement des charnières flexibles des miroirs terminaux et si votre alignement mécanique initial est trop mauvais, vous n'aurez pas suffisamment de marge sur les vis à main pour réussir ce recouvrement. Au lieu d'endommager les charnières flexibles en les tordant excessivement, vous feriez mieux de tester à nouveau les étapes précédentes de l'alignement mécanique et optique.]
- 6) Lorsque les deux points lumineux se recouvrent, vous devriez commencer à voir de nouveaux phénomènes, une espèce de clignotement dans la brillance du point lumineux combiné. Ceci est votre premier phénomène d'interférence ainsi que le signe que votre interféromètre fonctionne. [Si les deux points lumineux sont superposés sans aucun signe de clignotement, bouger votre tour d'alignement en aval du faisceau et voyez si les deux faisceaux sortant ne sont peut être pas de direction parallèle ou ne se superposent pas dans l'espace]
- 7) Vous avez maintenant le choix entre votre œil ou un diagnostic électronique pour parfaire l'alignement. Si vous êtes un novice, la technique à l'œil est peut être la plus instructive. Vous NE devez PAS regarder dans le faisceau laser, mais vous allez regarder la région illuminée de taille millimétrique sur l'écran blanc de la tour d'alignement dans le but de diagnostiquer la situation. Ce que vous recherchez sont des franges, ou toute une série de bandes parallèles alternativement brillante/rouge et sombre/noire. Elles sont formées par l'interférence des deux faisceaux optiques dont la direction de propagation, et donc le front d'onde, ne coïncide pas exactement. Elles

représentent des interférences qui sont constructive ou destructive selon la position dans le faisceau lumineux [figure 6a]. Vous pouvez encore utiliser la vis manuelle au dos des miroirs terminaux afin de faire en sorte que l'espacement entre les franges d'interférence soit aussi grand que possible. Une fois que cela est fait, vous n'avez plus de frange d'interférence, seulement un niveau d'intensité sur tout le point de recouvrement lumineux des deux faisceaux [figure 6b]

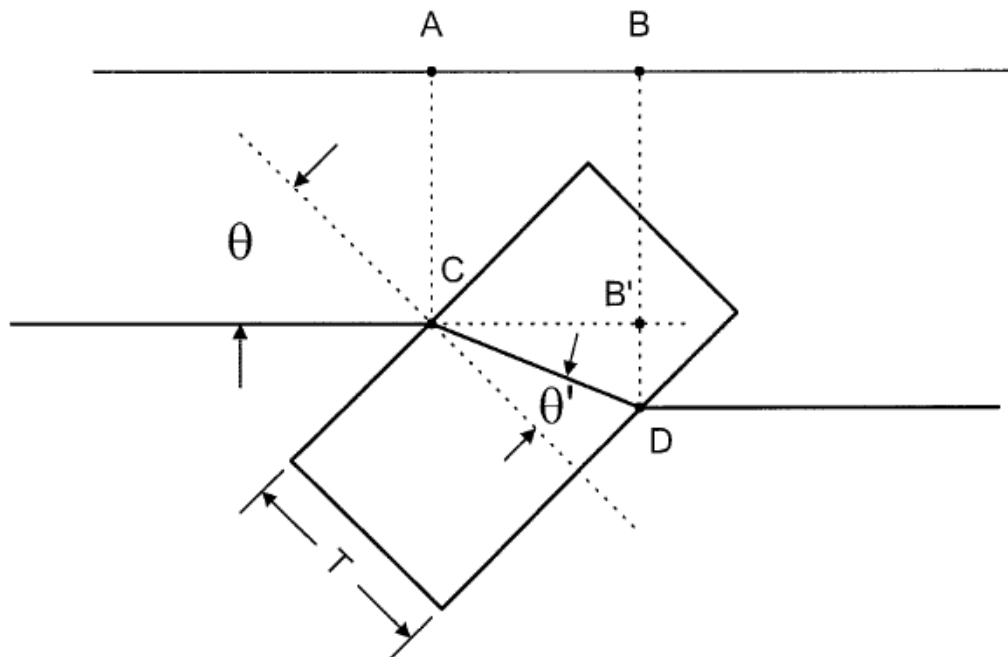
- 8) Vous saurez si vous obtenez toujours un phénomène d'interférence, même si l'espacement des franges dépasse la taille du point lumineux, en utilisant la sensibilité interférométrique de votre montage optique. Rappelez-vous qu'un changement de la différence de chemin de seulement $\lambda/2$ est nécessaire pour changer la sortie d'un état d'interférences constructives à un état d'interférence destructive. Notez qu'une translation de $\lambda/4$ de l'un des miroirs terminaux est suffisant pour générer ce changement. Appliquez délicatement une pression du bout de votre doigt sur le coin du métal au dos de la partie supérieure droite de l'un des miroirs terminaux et vous serez immédiatement en mesure de le déformer (le motif d'interférence) avec un déplacement du miroir aussi minime que $\sim 0.16 \mu\text{m}$ (soit environ 6 micro-pouce). Une autre manière peut être d'exercer une pression du bout du doigt vers le bas du plateau optique dans le but de le déformer suffisamment afin d'obtenir un changement similaire.
- 9) Une fois que vous avez vu les franges et que vous les avez utilisées pour optimiser l'alignement, il est temps d'essayer la détection électronique du faisceau sortant. Trouvez un montage du photo-détecteur TeachSpin, et voyez comment le montant s'ajustera sur le porte-montant de manière à orienter sa surface photosensible sur une hauteur convenable ($\sim 3''$) au dessus de la table afin de capturer le faisceau sortant. Vous devriez monter le photo-détecteur à un endroit tel que vous pouvez voir le point du faisceau laser sur la surface active du détecteur. Si vous utilisez le montant du support correctement, vous serez libre de l'ajuster à la fois horizontalement et verticalement pour centrer le détecteur sur le faisceau. [vous devez ne pas bouger le faisceau pour le centrer sur le détecteur] Maintenant alimentez électriquement l'électronique du détecteur en branchant son connecteur 3-fiches sur l'une des trois prises de courant disponible sur le panneau frontal de l'unité du contrôleur « Modern Interferometry » et dirigez son signal de sortie grâce à un câble coaxial branché sur l'oscilloscope. Le voltage négatif est ici proportionnel à la puissance optique incidente sur le photo-détecteur.
- 10) Vous allez avoir besoin de choisir le gain sur le sélecteur du détecteur, adapté à la puissance optique dans votre faisceau. Le meilleur diagnostic est votre vue sur l'oscilloscope (à un taux de balayage de, peut-être 0.1 s/division) du signal qui devrait montrer une indication de la présence d'un signal. Utilisez un bloqueur de faisceau dans le faisceau laser pour déterminer où est-ce que le niveau zéro se situe. Ensuite, trouvez un moyen de faire varier le signal [comme au point 8 si dessus] pour voir où est le maximum. Si votre signal atteint -10 Volt ou environ cette valeur, il sature le photo-détecteur électronique et vous devriez réduire le paramètre de gain. Vous aurez réussi lorsque vous verrez un signal dynamique et sensible aux vibrations sur l'affichage de l'oscilloscope, allant dans une échelle de voltage entre presque-zéro et une valeur maximal négative.
- 11) Une autre technique d'alignement disponible exploite la sensibilité aux vibrations de l'interféromètre ainsi que la réponse rapide du détecteur. Si vous avez un oscilloscope digital, vous pourriez utiliser des champs multiples à 1 s/division pour montrer un historique temporel du signal sortant et vous pourriez observer cela alors que vous

perturbiez l'interféromètre à l'aide de tapotement répété du bout des doigts sur la table optique. Chaque tapotement individuel devrait faire en sorte que le signal passe par plusieurs cycles complets de variation quasi-sinusoïdale, puisque que l'interféromètre se déforme de plusieurs longueurs d'onde optique lors de ces tapotements. Votre but est de maximiser le contraste du signal, faisant aller ses minimums aussi près que possible de zéro et ses maximums aussi loin que possible de zéro. Vos variables indépendantes sont toujours vos vis d'ajustements au dos des miroirs terminaux, en haut à droite. Vous pouvez utiliser la tour d'alignement pour bloquer le faisceau laser à l'intérieur de l'un des deux bras de l'interféromètre afin d'établir le signal qui est dû à l'un ou l'autre des deux faisceaux. Si vous voyez un niveau de signal S_A dû à un faisceau seul ainsi qu'un niveau de signal S_B dû à l'autre faisceau seul, vous devriez idéalement trouver $S_A \sim S_B = S$ et cependant, lorsque les deux faisceaux sont présent, vous devriez voir le signal varier sur l'échelle complète de $\sqrt{S_A} - \sqrt{S_B}$ à $\sqrt{S_A} + \sqrt{S_B}$ ou, approximativement de 0 à $4S$.

Annexe C. Calcul du changement de phase pour des lames inclinées:

L'effet d'une lame plane sur la phase du faisceau de lumière est compliqué par le fait qu'il y a deux phénomènes ayant lieu simultanément ; le premier est un changement de phase dû à l'indice de réfraction de la lame et le deuxième est un effet géométrique dû à la réfraction de la lumière.

Le calcul du changement de phase pour une lame d'épaisseur T , d'indice n et incliné d'un angle θ relatif à la direction du faisceau incident est calculé plus efficacement en comparant ce chemin à celui d'un faisceau qui traverse une lame non inclinée (voir schéma ci-dessous).



Rappelez-vous que le nombre d'onde k donne la différence de phase par unité de longueur. Pour une distance L , on aura donc

$$\Delta\phi = k L = \frac{2\pi \text{ (rad)}}{\lambda_{\text{vac}}} n L$$

La phase nette accumulée est donc le produit de la différence ci-dessus avec la distance parcourue. Si l'on se réfère au schéma ci-dessus l'accumulation de phase est donnée par :

$$\delta(\Delta\phi) = \frac{2\pi \text{ (rad)}}{\lambda_{\text{vac}}} (n \cdot \overline{CD} - 1 \cdot \overline{AB}) .$$

En utilisant la loi de Snell-Descartes et la géométrie, les distances utilisées sont

$$\overline{CD} = \frac{T}{\cos \theta'} \text{ and } \overline{AB} = \overline{CB'} = \overline{CD} \cos (\theta - \theta'), \text{ where } \sin \theta = n \sin \theta'$$

Finalement le changement de phase, pour une lame inclinée de Θ par rapport à une lame non inclinée, est donnée par

$$\phi(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} T \left\{ \frac{n - \cos (\theta - \theta')}{\cos \theta'} - \frac{n-1}{1} \right\}$$

En utilisant la loi de Snell-Descartes ($1.\sin\Theta = n.\sin \Theta'$) pour des angles petits ($\cos\Theta \approx 1 + \Theta^2/2 + O(\Theta^4)$), on trouve l'expression approchée suivante :

$$\phi(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} T \left\{ \frac{n-1}{2n} \theta^2 + O(\theta^4) \right\}$$

Cela suffit à prouver que le nombre de franges dépend de Θ de façon quadratique.

Pour une expérience en double passe avec une lame de verre $n=1.5$ et $T=1\text{mm}$, le nombre de frange M est donné par

$$M = 2 \frac{\Delta\phi}{2\pi} \approx 2 \frac{T}{\lambda_{\text{vac}}} \frac{n-1}{2n} \theta^2 ,$$

Soit 5 franges avec un angle de $0.1\text{rad}=5.73^\circ$

On peut déduire l'indice de réfraction n en comparant les données $M(\theta)$ avec des fonctions pré-calculées pour une série de valeurs données. La fonction donnant la dépendance du nombre de franges avec l'indice n peut être déduite des formules précédentes et donne

$$n = \frac{\alpha^2 + 2(1 - \cos \theta)(1 - \alpha)}{2(1 - \cos \theta - \alpha)},$$

avec $\alpha = M(\theta)\lambda_{vac}/2T$ directement relié au nombre de franges.

Votre équipement TeachSpin comprend différentes lames de verre et de quartz montés sur des supports qui permettent de tourner d'un angle voulu, la lame autour d'un axe vertical (par rapport au plan de la table). Vous avez à votre disposition un support pour une lame de verre d'épaisseur 1.0mm, un autre support pour une paire de lame de verre similaire ainsi qu'un troisième support avec une lame de quartz d'épaisseur 0.50mm. Vous trouverez aussi deux lames compensatrices de 2.0mm d'épaisseur.

Mise à jour I.S.Mirzei Août 2012
Traduction C.Laplane Oct. 2012
Petites corrections L.Windels mars 2015
Dessins corrigés L.Windels oct 2016