

Manuel d'utilisation
Interféromètre de précision
Jeu complémentaire

Martin Henschke, 2006-05-30

650265

650266



Sommaire

1	Eléments fournis, désignation des composants.....	3
2	Consignes de sécurité.....	3
3	Introduction, caractéristiques techniques.....	4
4	Manipulation et entretien.....	5
5	Interféromètre de Michelson.....	6
5.1	Expérience standard.....	6
5.1.1	Montage de l'expérience	
5.1.2	Réalisation des mesures	
5.1.3	Evaluation de l'expérience	
5.2	Indice de réfraction du verre.....	7
5.2.1	Montage de l'expérience	
5.2.2	Réalisation des mesures	
5.2.3	Evaluation de l'expérience	
5.3	Indice de réfraction de l'air.....	8
5.3.1	Montage de l'expérience	
5.3.2	Réalisation des mesures	
5.3.3	Evaluation de l'expérience	
6	Interféromètre de Twyman-Green.....	9
6.1	Montage de l'expérience	
6.2	Réalisation de l'expérience et interprétation des observations	
7	Interféromètre de Fabry-Perot.....	10
7.1	Montage de l'expérience	
7.2	Réalisation des mesures	
7.3	Evaluation de l'expérience	

1 Eléments fournis, désignation des composants

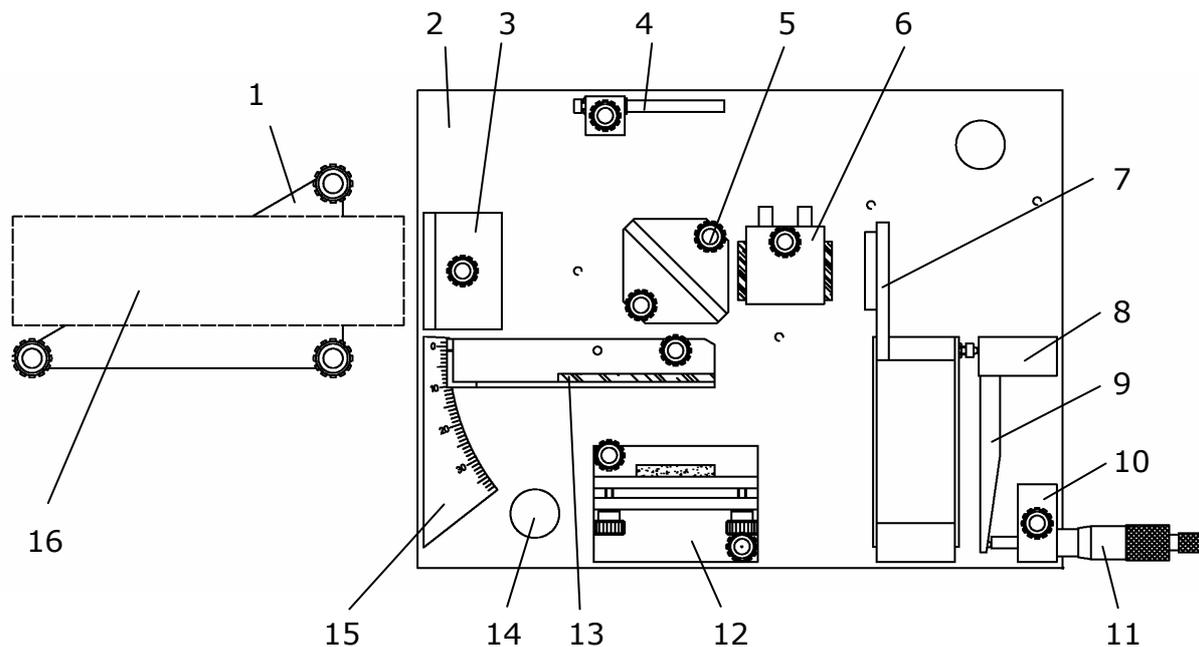


Fig. 1: Eléments fournis, désignation des composants

- 1 Support de laser
- 2 Plaque de base
- 3 Lentille de divergence
- 4 Ecran (d'observation)
- 5 Diviseur de rayon
- 6 Cellule à vide (dans le jeu compl.)
- 7 Miroir à réglage de précision
- 8 Excentrique avec plaque de calibrage
- 9 Bras d'excentrique
- 10 Porte-micromètre
- 11 Micromètre
- 12 Miroir ajustable
- 13 Plaque de verre sur support (dans le jeu complémentaire)
- 14 Bouton porteur
- 15 Graduation angulaire
- 16 Laser (non fourni)
- 17 Boîtier plastique robuste (non illustré)

2 Consignes de sécurité

L'interféromètre doit être exploité avec un laser au He-Ne de classe 2. Un regard direct dans le rayon du laser peut provoquer des brûlures de la rétine et doit impérativement être évité. Respecter rigoureusement les prescriptions de sécurité du laser !

Placer l'interféromètre sur une table stable ou à un autre endroit approprié, de telle sorte qu'il ne pourra tomber ni que personne ne pourra être blessé par son poids.

Avec les boutons porteurs (14), on peut soulever l'interféromètre pour saisir celui-ci par le bas.

La pression maximale admissible dans la cellule à vide (6) s'élève à 200 kPas (2 bars), ce qui correspond à une surpression de 100 kPas (1 bar). En cas d'endommagement du verre de la cellule, comme par ex. des rayures ou des fissures, mettre immédiatement hors service et faire réparer la cellule. En cas d'expériences avec de la surpression, s'assurer que personne ne se trouve dans la zone explosible de la cellule. Le cas échéant, porter des lunettes de protection.

3 Introduction, caractéristiques techniques

En 1881, A. Michelson (1852 - 1931) réalisa une expérience au cours de laquelle un faisceau lumineux fut divisé en deux au moyen d'un diviseur de rayon (cf. Fig. 2). Les deux rayons furent réfléchis par des miroirs, puis de nouveau superposés dans le diviseur, ce qui, en présence de distances différentes, entraîna une interférence entre les deux rayons (suppression ou amplification). Comme différentes vitesses de lumière dans les deux rayons partiels entraîneraient également une interférence, cette expérience a pu montrer qu'il n'existe pas d' « éther », car le rayon partiel ayant le vent dans le dos devrait être plus rapide que celui avec le vent de côté. Outre la justification de l'inexistence d'un éther, un interféromètre peut servir à mesurer la longueur d'ondes lumineuses ou, si la longueur d'onde est connue, à mesurer de très courtes distances, ce qui est important entre autres pour contrôler la qualité superficielle de composants optiques.

Ces expériences classiques et bien d'autres encore peuvent également être réalisées avec l'interféromètre de précision :

1. Interféromètre de Michelson
 2. Interféromètre de Fabry-Perot
 3. Détermination de l'indice de réfraction du verre *
 4. Détermination de l'indice de réfraction de l'air **
 5. Essai Twyman-Green pour composants optiques (qualitatif, pas quantitatif) *
- * avec jeu complémentaire (cellule à vide et plaque en verre sur support pivotant)
** avec jeu complémentaire et pompe à vide

Grâce aux positions prédéfinies des composants, on peut rapidement transformer les montages pour effectuer les différentes expériences.

caractéristiques techniques:

- Grande plaque de base lourde et rigide pour des mesures précises et reproductibles : 245 x 330 x 25 mm, 5,5 kg.
- Grands composants optiques pour des images d'interférence claires et nettes : (Ø 40 mm / 40 x 40 mm).
- Miroir de surface : passage 15%, réflexion 85% en cas d'incidence verticale.
- Diviseur de rayon extrêmement plan : face avant $1/10 \lambda$, face arrière $1/4 \lambda$. Passage 50%, réflexion 50% avec un angle d'incidence de 45° , face arrière antireflet.
- Ajustage aisé du miroir par démultiplication d'excentrique d'env. 1:1000 (un trait sur le micromètre correspond à un parcours de miroir d'env. 10 nm) avec une précision de fabrication de $\pm 30\%$. Le rapport mesuré après fabrication entre l'ajustage du micromètre et celui du miroir est indiqué sur la plaque de calibration, par ex. $1 \text{ mm} \hat{=} 830 \text{ nm}$. Avec cette valeur, la précision de mesure des longueurs d'ondes doit être d'au moins $\pm 5\%$ (écart de linéarité et autres erreurs).
- L'écran d'observation réfléchissant et réglable dans son inclinaison permet de réaliser les expériences également à la lumière du jour (pas de rayonnement solaire direct).

4 Manipulation et entretien

Montage du laser : monter d'abord le laser sur son support. Comme ce support est conçu pour différents lasers, il propose trois alésages pour vis à tête conique (M5 ou M6), bien qu'un seul suffise normalement. L'alésage convenant au laser est déterminé par le centre de gravité du laser et ses possibilités de fixation. Lorsque le laser est monté, son centre de gravité doit se situer à peu près au-dessus de l'alésage du milieu et le rayon lumineux à 60 - 62 mm au-dessus de la plaque de travail. Si la zone de réglage des vis moletées ne suffit pas, monter par exemple une bague d'écartement appropriée sous le laser. Choisir la longueur de la vis de fixation de telle sorte que le boîtier du laser et les parties internes du laser ne soient pas endommagés. Pour cela, déterminer d'abord la profondeur de vissage maximale de la vis dans le logement du laser, puis choisir une vis dont le filet dépasse d'env. 2 mm de moins du support (une vis et un écrou à quatre pans adapté aux rainures usuelles sont fournis).

Diviseur de rayon : le verre du diviseur présente une face antireflet et, identifié par un triangle (également appliqué pour les montages marqués), un revêtement perméable à 50% sur l'autre face.

Transport, rangement : comme lors de son état à la livraison, le bras d'excentrique (9) doit toujours reposer sur le socle du miroir à réglage fin (7) lors du transport et du rangement, pour éviter ainsi des impacts sur l'excentrique de précision.

Nettoyage et entretien de l'excentrique : l'excentrique usiné au laiton s'appuie sur une bille en acier polie du support du miroir à réglage fin. La présence de poussière ou d'autres impuretés risque de gripper le réglage du miroir. Dans ce cas, dévisser le socle d'excentrique (8) (les têtes de vis se trouvent sous la plaque de base (2)) et l'excentrique en laiton ainsi que la bille en acier. A cet effet, utiliser un chiffon doux, éventuellement imbibé de ligroïne, d'acétone, etc. Lors du montage de l'excentrique, veiller à ce qu'une légère pression soit exercée sur la bille en acier. Après le montage, verser une goutte d'huile sans résine (huile pour armes ou machines à coudre) sur le point de contact entre l'excentrique et la bille en acier.

Nettoyage des composants optiques en verre : le miroir de surface, le diviseur de rayon, la lentille de divergence et les plaques de la cellule à vide peuvent être essuyés avec précaution avec un chiffon doux, éventuellement imbibé d'éthanol. Essuyer sans exercer de pression ! Il est préférable de travailler avec beaucoup d'éthanol et peu de force. N'essuyer la plaque en verre sur le support (13) qu'avec un chiffon sec (en embuant éventuellement le verre), la bande adhésive (expérience Twyman-Green) risquant sinon de se détacher.

5 Interféromètre de Michelson

5.1 Expérience standard

5.1.1 Montage de l'expérience

Le montage des composants sur la plaque de base est illustré dans la figure 2. La description suivante sous-entend que tous les réglages de base doivent encore être réalisés.

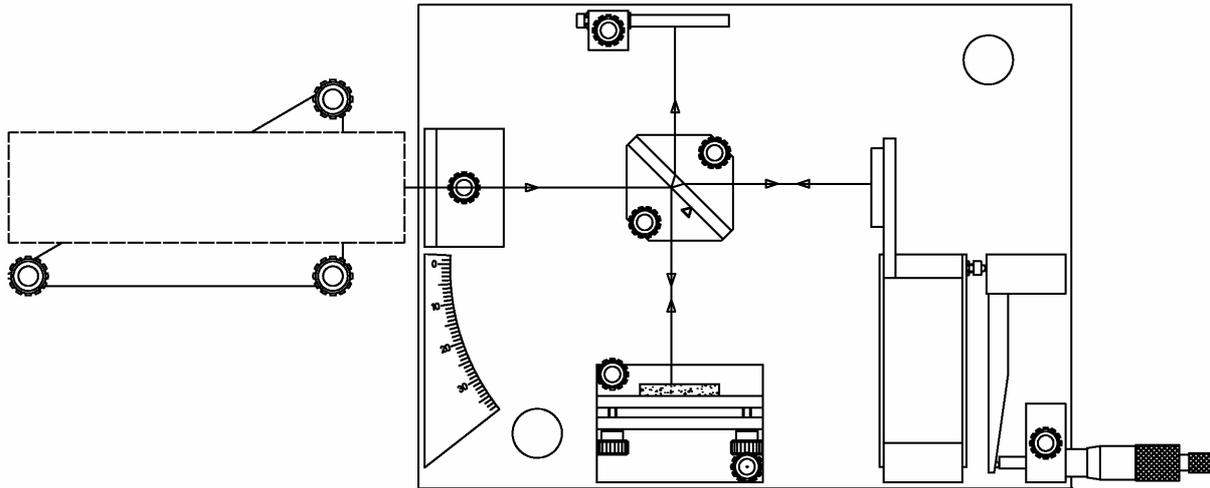


Fig. 2 : Interféromètre de Michelson

1. Visser le laser au He-Ne sur son support (cf. manuel d'utilisation, montage du laser) et le placer à peu près droit devant la lentille de divergence.
2. Retirer le miroir ajustable et le diviseur de rayon, puis fixer la lentille de divergence bien droit sur la plaque de base.
3. Régler le laser de sorte que le rayon réfléchi par le miroir à réglage fin retourne au centre de la lentille de divergence.
4. Desserrer la vis moletée de la lentille de divergence et écarter la lentille d'env. 90° du rayon laser.
5. Monter le miroir orientable et l'ajuster avec les vis de réglage de telle sorte que l'écart entre la plaque de support du miroir et le support à proprement parler soit environ identique sur tout le pourtour (5 - 6 mm).
6. Visser sans le serrer le diviseur avec la face partiellement réfléchissante orientée vers la division angulaire et le tourner dans les limites données de telle sorte que les deux points les plus clairs apparaissant à l'écran d'observation se situent environ sur une même ligne verticale. Puis, serrer le diviseur.
7. Avec les vis de réglage du miroir ajustable, tourner ce dernier, jusqu'à ce que les deux points les plus clairs à l'écran se couvrent exactement. Une interférence, reconnaissable à un vacillement, devrait déjà apparaître.
8. Tourner de nouveau la lentille de divergence dans le rayon et la visser dans la position qui permet d'obtenir à l'écran une image à peu près centrée (quant à la clarté, et non aux anneaux d'interférence). Incliner l'écran dans l'axe vertical pour obtenir une image claire et nette.
9. Ajuster encore une fois le miroir pour que les anneaux d'interférences se situent au centre de l'écran.

Les temps du faisceau de lumière sont pratiquement identiques, ce qui permet d'obtenir de grands écarts des anneaux d'interférence, faciles à observer. Mais il en résulte aussi une

déformation elliptique des anneaux (des modèles d'interférence hyperboliques apparaissent sur l'écran, même si les rayons centraux sont de durées parfaitement identiques). Pour obtenir des anneaux à peu près circulaires, on peut tourner le diviseur à 180°.

5.1.2 Réalisation des mesures

1. Dévisser d'env. 25 mm la vis du micromètre dans le sens horaire contraire, puis revenir lentement en arrière jusqu'à 20 mm pour éviter des imprécisions de mesure apparaissant lors de l'inversion du sens de rotation.
2. Continuer à tourner la vis dans le sens horaire, tout en comptant le nombre m d'anneaux qui apparaissent. Pour apprécier si un anneau complet s'est formé, utiliser la graduation imprimée sur l'écran d'observation. Pendant les mesures, éviter que de l'air de respiration accède dans les rayons lumineux, car les modifications de la densité d'air se répercutent directement par des anneaux « courants ».
3. Après avoir compté au moins 20 anneaux (plus il y en a, plus la mesure sera précise), lire la vis du micromètre et noter le résultat l_M .
4. Pour relever d'éventuelles erreurs lors du comptage des anneaux, répéter au moins trois fois les pas 1 à 3.

5.1.3 Evaluation de l'expérience

Si par exemple on relève au cours de la première mesure $m = 30$ anneaux et

$$20 \text{ mm} - l_M = 11,76 \text{ mm}$$

compte tenu d'une démultiplication de par exemple 1:830, on obtient un parcours de miroir $l_S = 9761$ nm et ainsi la longueur d'onde lumineuse suivante :

$$\lambda = \frac{2l_S}{m} = 651 \text{ nm}$$

Si l'expérience est réalisée soigneusement, les résultats de toutes les mesures ne doivent pas diverger de plus de 2% de la valeur moyenne. Si les écarts sont plus importants, il peut s'avérer nécessaire de nettoyer l'excentrique (cf. paragraphe 3, Nettoyage et entretien de l'excentrique).

La précision des mesures de la longueur d'onde doit être d'au moins $\pm 5\%$. Une vérification est possible avec un laser de longueur d'onde connue (laser au He-Ne : $\lambda = 632,8$ nm).

5.2 Indice de réfraction du verre

5.2.1 Montage de l'expérience

Le montage est d'abord similaire à celui de l'expérience standard (cf. 5.1.1). Puis, la plaque en verre avec le support pivotant est placée dans le rayon partiel avant (fig. 3) et le réglage du miroir ajustable est légèrement affiné pour que les anneaux d'interférence restent bien au centre de l'écran.

Lorsque le miroir est légèrement tourné en avant ou en arrière autour de 0°, la transition des anneaux apparaissant aux anneaux disparaissant doit se situer très exactement à 0°. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que le diviseur ne se trouve pas exactement dans un angle de 45° par rapport au miroir à réglage fin. Comme une orientation parfaitement exacte du diviseur

est pratiquement impossible, on note l'angle Φ_0 où a lieu cette transition. Dans cette position, cet angle est déduit de la valeur de mesure Φ_M pour obtenir l'angle de pivotement réel Φ .

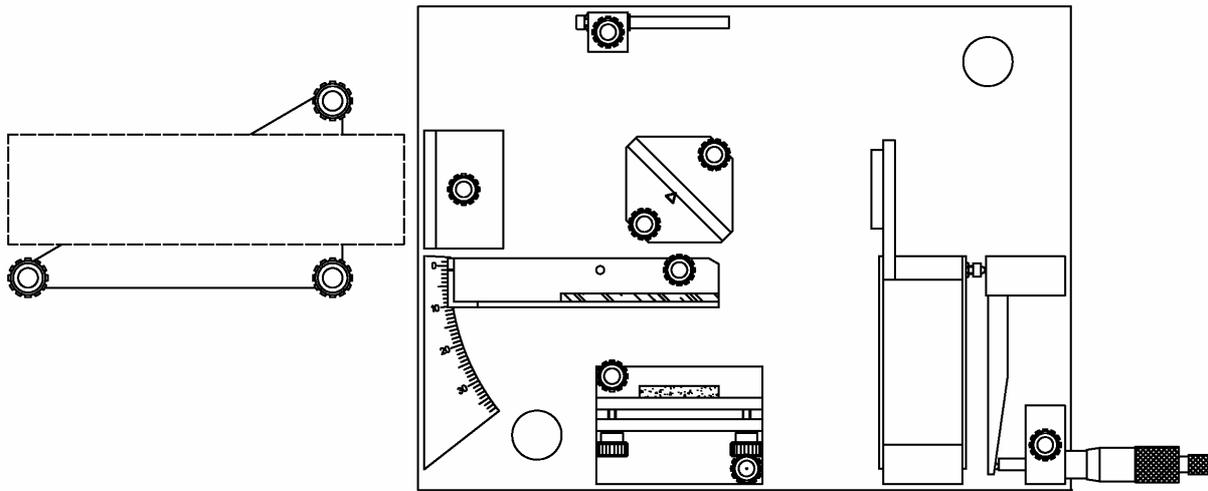


Fig. 3 : Montage pour la mesure de l'indice de réfraction du verre

5.2.2 Réalisation des mesures

On tourne la plaque en verre à partir de l'angle Φ_0 . On compte le nombre m d'anneaux disparaissant. Plus l'angle pivotant est grand, moins la modification de l'angle qui entraîne la disparition d'un anneau est importante. Aussi est-il nécessaire d'avoir du doigté pour compter un peu plus d'une vingtaine d'anneaux.

5.2.3 Evaluation de l'expérience

Avec l'angle Φ (par ex. $5,4^\circ$), le nombre d'anneaux mesuré m (par ex. 20), la longueur d'onde λ (dans l'air) du laser utilisé (par ex. 633 nm) et l'épaisseur de la plaque en verre t (dans ce cas 4 mm), on obtient selon Andrews¹ l'indice de réfraction n_G du verre :

$$n_G = \frac{(2t - m\lambda)(1 - \cos\Phi) + \left(\frac{m^2\lambda^2}{4t}\right)}{2t(1 - \cos\Phi) - m\lambda} = 1,55$$

Lorsqu'on compare ses propres résultats avec ceux mentionnés dans la littérature, il faut toujours tenir compte que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde et qu'on ne peut comparer entre elles les valeurs de mêmes longueurs d'ondes.

5.3 Indice de réfraction de l'air

5.3.1 Montage de l'expérience

Le montage est d'abord similaire à celui de l'expérience standard (cf. 5.1.1), à la différence près que, pour des raisons pratiques, la couche partiellement réfléchissante du diviseur est orientée en arrière vers le côté droit. Puis, la cellule à vide est placée dans le rayon partiel droit (fig. 4) et le réglage du miroir ajustable est légèrement affiné pour que les anneaux d'interférence restent bien au centre de l'écran.

¹ C. L. Andrews, Optics of the Electromagnetic Spectrum, Prentice-Hall, 1960

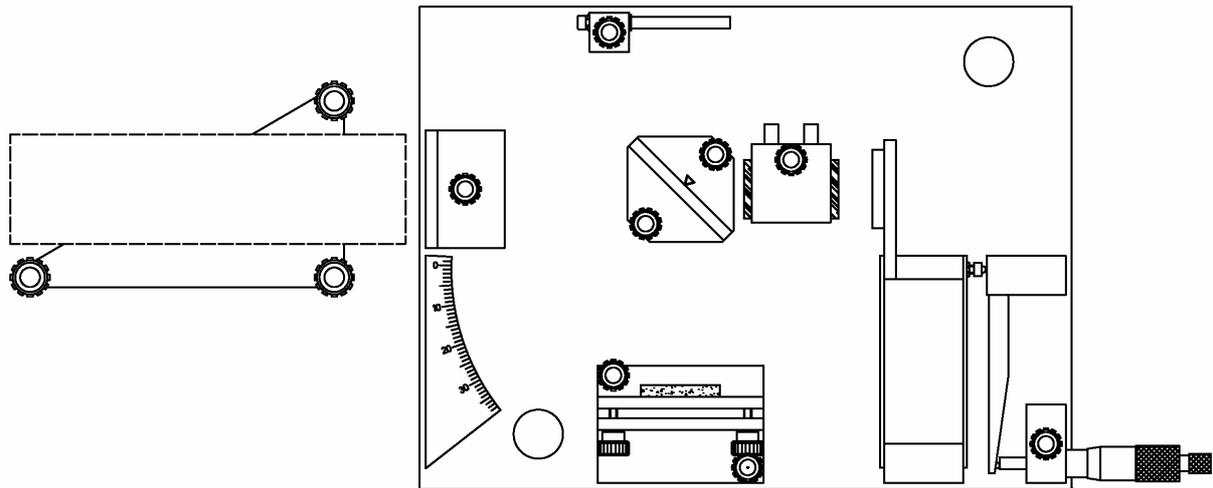


Fig. 4 : Montage pour la mesure de l'indice de réfraction de l'air

5.3.2 Réalisation des mesures

Brancher la pompe à vide à la cellule à vide et noter la pression p affichée. Puis, faire le vide dans la cellule et compter le nombre m d'anneaux disparaissant. Noter à intervalles réguliers la pression et le nombre correspondant. Lorsque la pression minimale est atteinte (pour une pompe à main simple, env. 10 kPas), la cellule à vide est de nouveau remplie d'air. A présent, on peut encore effectuer une série de mesures à surpression (jusqu'à max. 200 kPas, correspondant à 1 bar de surpression).

5.3.3 Evaluation de l'expérience

Avec une pression $p = 0$ l'indice de réfraction est $n(p=0) = 1$. L'indice augmente au fur et à mesure qu'augmente la pression, selon l'équation :

$$n(p) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p$$

Pour déterminer l'indice de réfraction à pression normale, il faut donc déterminer d'abord l'augmentation $\Delta n / \Delta p$. Pour première approximation, on a l'équation suivante :

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{\lambda}{2l_z} \left| \frac{\Delta m}{\Delta p} \right|$$

Ce faisant, m est le nombre d'anneaux apparaissant / disparaissant, λ a longueur d'onde lumineuse et l_z la longueur intérieure de la cellule à vide (dans ce cas 41 mm). Par exemple, si pour une chute de pression de $\Delta p = 90$ kPa, on détermine $\Delta m = 25$, on obtient $\Delta n / \Delta p = 2.14 \cdot 10^{-9}$ 1/Pa. Ainsi l'indice de réfraction de l'air à pression ambiante (100 kPas) est donc $n = 1.00021$. Dans la littérature², on trouve $n = 1,00029$.

6 Interféromètre de Twyman-Green

Cette expérience permet de déterminer la qualité superficielle de composants optiques. Normalement, on entend par interféromètre de Twyman-Green un appareil dont le rayon lumineux (laser) est élargi et parallèle. Pour une compréhension qualitative du principe de

² H. Stöcker, Taschenbuch der Physik, Deutsch, 1998

fonctionnement, on peut, comme avec les expériences réalisées jusqu'à maintenant, aussi utiliser une lumière élargie, mais non parallèle.

6.1 Montage de l'expérience

Pour illustrer une surface optique de mauvaise qualité, on utilise un ruban adhésif transparent collé sur une plaque en verre et qui semble parfaitement homogène lorsqu'on regarde à travers elle. Le montage est d'abord similaire à celui de l'expérience standard (cf. 5.1.1). Puis, la plaque en verre avec le support pivotant est placée dans le rayon partiel avant (fig. 5) et le réglage du miroir ajustable est légèrement affiné pour que les anneaux d'interférence restent bien au centre de l'écran.

6.2 Réalisation de l'expérience et interprétation des observations

A droite de l'écran d'observation, comme pour l'expérience 5.1, on trouve des anneaux d'interférence réguliers. A gauche en revanche, les anneaux sont effilochés et dans des zones pourtant sombres, on trouve des points clairs et inversement. Comme nous savons depuis l'expérience 5.2 que de très faibles modifications de l'épaisseur de couche suffisent déjà pour entraîner un déplacement des anneaux d'interférences (expérience 5.2, par rotation de la plaque en verre), on peut supposer que les défauts des anneaux proviennent de la surface irrégulière et bosselée du ruban adhésif.

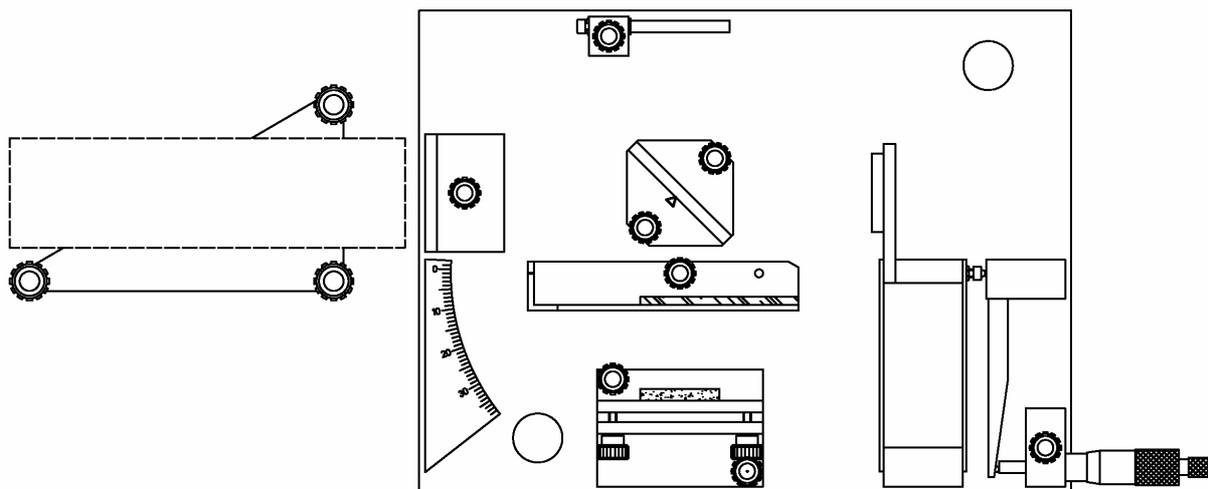


Fig. 5 : Montage pour la mesure de la qualité superficielle de composants optiques

7 Interféromètre de Fabry-Perot

7.1 Montage de l'expérience

Le montage des composants sur la plaque de base est illustré dans la figure 6. La description suivante sous-entend que tous les réglages de base doivent encore être réalisés.

1. Visser le laser au He-Ne sur son support (cf. manuel d'utilisation, montage du laser) et le placer à peu près droit devant la lentille de divergence.
2. Retirer le miroir ajustable et la lentille de divergence, puis placer devant la plaque de base le laser légèrement tourné sur son axe vertical. Ensuite, ajuster l'inclinaison du laser de telle sorte que le rayon partiel réfléchi sur le laser se situe à la même hauteur que le rayon émis. A

présent, si le laser est remis bien droit devant la plaque de base, l'écran d'observation devrait présenter deux points qu'il est possible, par un nouveau réglage, de faire coïncider.

3. Placer la lentille de divergence dans la marche du rayon et, le cas échéant, ajuster la hauteur du faisceau en tournant uniformément les trois vis moletées. Puis, le cas échéant, retourner au point 2. (A présent, on peut déjà voir sur l'écran de faibles anneaux d'interférence, car la face en verre translucide du miroir à réglage fin présente également de très faibles réflexions.)

4. Ecarter de nouveau la lentille de divergence d'env. 90° du rayon laser.

5. Monter avec beaucoup de précaution le miroir ajustable. L'écart entre les deux miroirs doit s'élever à environ 2 mm.

6. Régler le miroir ajustable de telle sorte que tous les points et, le cas échéant, le modèle d'interférence se rencontrent sur l'écran d'observation.

7. Tourner de nouveau la lentille de divergence dans le rayon et la visser dans la position qui permet d'obtenir à l'écran une image à peu près centrée (quant à la clarté, et non aux anneaux d'interférence). Incliner l'écran dans l'axe vertical pour obtenir une image claire et nette.

8. Ajuster encore une fois le miroir pour obtenir les anneaux d'interférences au centre de l'écran.

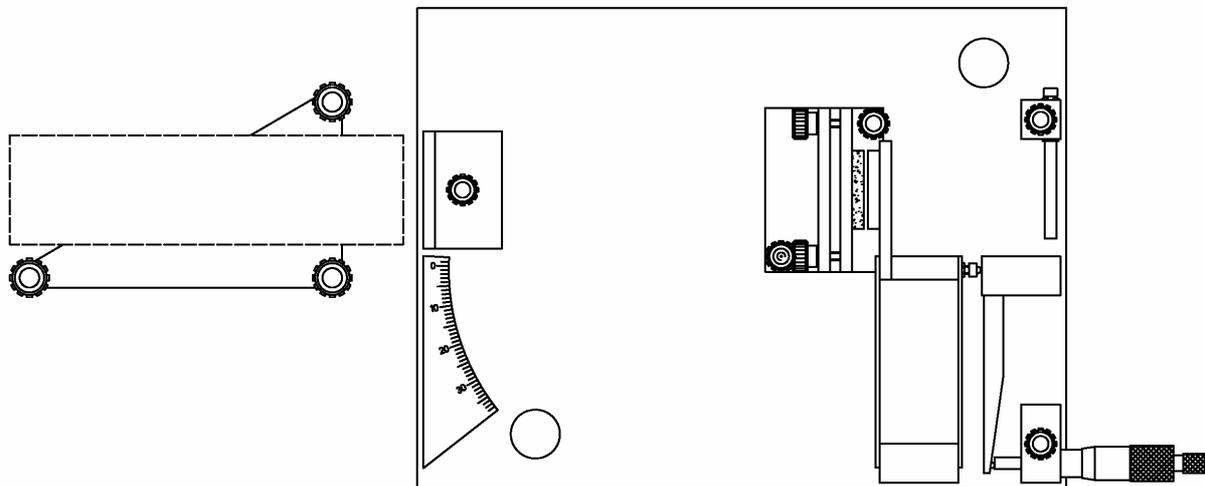


Fig. 6 : Montage de l'interféromètre de Fabry-Perot

7.2 Réalisation des mesures

1. Dévisser d'env. 25 mm la vis du micromètre dans le sens horaire contraire, puis revenir lentement en arrière jusqu'à 20 mm pour éviter des imprécisions de mesure apparaissant lors de l'inversion du sens de rotation.

2. Continuer à tourner la vis dans le sens horaire, tout en comptant le nombre m d'anneaux qui apparaissent.

3. Après avoir compté au moins 20 anneaux, lire la vis du micromètre et noter le résultat l_M .

4. Pour relever d'éventuelles erreurs lors du comptage des anneaux, répéter au moins trois fois les pas 1 à 3.

7.3 Evaluation de l'expérience

Par exemple, si l'on a compté $m = 40$ anneaux et mesuré 20 mm - $l_M = 15,13$ mm, on obtient un parcours du miroir (excentrique 1:830) de $l_S = 12560$ nm et ainsi la longueur d'onde lumineuse (voir aussi les explications au paragraphe 5.1.3) :

$$\lambda = \frac{2l_S}{m} = 628 \text{ nm}$$