

SOCIÉTÉ DE PRODUCTION ET DE RECHERCHES APPLIQUÉES

SOPRA

0.34

26, rue Pierre-Joigneaux F 92270 BOIS-COLOMBES
SPECTROMÉTRIE - LASERS - ANALYSE

Tél. : 33 (0)1 47 81 09 49
Fax : 33 (0)1 42 42 29 34
Télex : SOPRABC 614472 F

INTERFEROMETRES DE FABRY-PEROT

SOPRA

SOCIÉTÉ DE PRODUCTION ET DE RECHERCHES APPLIQUÉES

ACCESSOIRES ELECTRIQUES
ET MECANQUES

TRAITEMENT SOUS VIDE

APPAREILS DE PHYSIQUE
ET D'OPTIQUE

68, RUE PIERRE JOIGNEAUX
F 92270 BOIS-COLOMBES

(1) 242.04.47

(1) 781.09.49

C.C.P. PARIS 6447-61 H

LES INTERFEROMETRES DE FABRY-PEROT SOPRA

Nous présentons ici les trois interféromètres SOPRA destinés à l'Enseignement, leurs réglages et quelques exercices à faire exécuter par les étudiants. Nous ne désirons présenter que l'aspect technologique des manipulations proposées.

Pour faciliter la lecture, nous avons retenu quelques abréviations dont voici les expressions littérales.

F.P. Interféromètre de Fabry-Pérot

I.S.L. Intervalle Spectral Libre (interféromètre à lames planes)

ISL = $\frac{\lambda^2}{2ne}$ ou λ est la longueur d'onde d'observation
 n l'indice du milieu
 e l'épaisseur mécanique du F.P.

F : Finesse résultante du F.P.

$$\frac{I}{F^2} = \frac{I}{F_T^2} \frac{I}{F_L^2}$$

F_T : Finesse du traitement

F_L : Finesse des lames
(défaut et réglage)

$$F_T = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

ou R est le coefficient de réflexion du traitement.

$$F_L = \frac{X}{2}$$

ou la planéité des lames s'exprime sous la forme $\frac{\lambda}{X}$ s'il est réglé parfaitement.

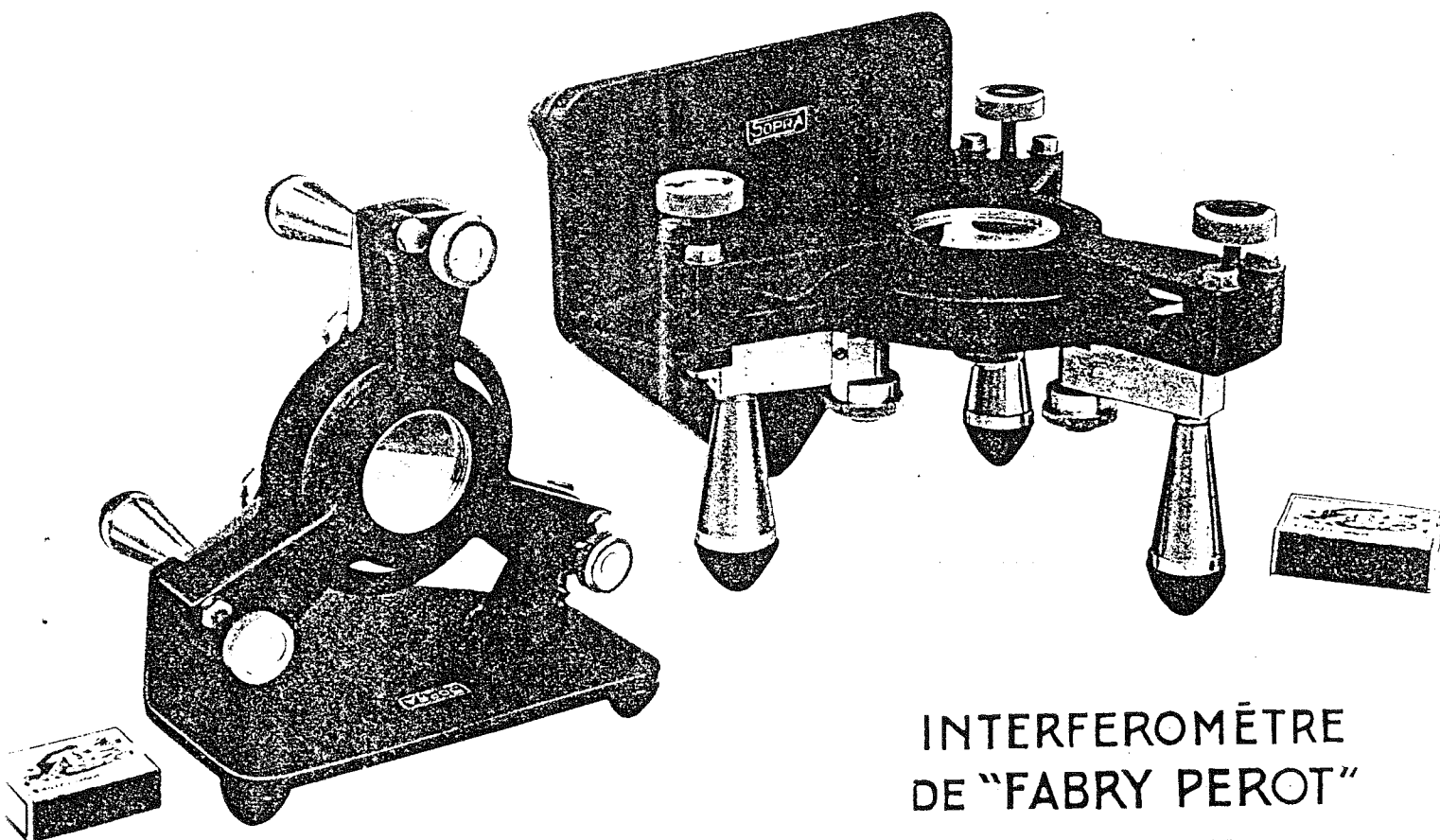
E.S.A. Plus petit élément spectral analysable :

$$\text{ESA} = \frac{\text{ISL}}{\text{F}}$$

les autres abréviations utilisées pour les figures seront mentionnées au cours du texte.

Nous appelons "Lame" l'une des surfaces réfléchissantes de l'interféromètre. Il s'agit d'un disque de verre poli sur 2 faces, dont l'une d'elle avec grande précision.

Cette face est traitée de façon à posséder un fort pouvoir réflecteur, le traitement étant peu absorbant.



INTERFEROMÈTRE
DE "FABRY PEROT"

SOPRA

I- ETALON A EPAISSEUR VARIABLE

Notez que l'appareil est utilisable avec son axe horizontal ou vertical. Les indications ci-après sont indépendantes de la position de l'appareil.

I.1. Présentation

L'étalon de Fabry-Pérot comporte 6 molettes de réglages. Trois placées près des lames servent au réglage de l'épaisseur de l'étalon, et au réglage grossier. Un index placé près de l'une des trois molettes permet la lecture de l'épaisseur à 0,1mm près.

L'épaisseur est réglable de 0,05mm à 5mm.

L'épaisseur minimum est obtenue lorsque les lames écrasent trois points de protection collés sur l'une des lames; ne pas forcer.

L'épaisseur maximale est atteinte lorsque les vis n'ont plus d'action sur le support de lame.

Trois autres molettes, placées sur le diamètre extérieur de l'appareil servent au réglage fin. Elles agissent par déformation de la monture, par l'intermédiaire des trois lames de ressort.

(observer la tranche de l'étalon)

Avant toute manipulation , positionner ces trois molettes à mi-course.

I.2. Réglage Académique

I.2.1. Réglage avec lunette de visée.

Placer une source polychromatique basse pression (lampe à mercure) S, au foyer d'un condenseur C.

Positionner l'interféromètre normalement au faisceau lumineux.

Observer à la lunette les images multiples de la source.

Voir figures au § I.2.4.

au § I.3.3.

Faire superposer ces images à l'aide des 2 vis du réglage grossier V3 puis V2. (voir figure au I.3.3.I)

Observer les anneaux interférentiels.

Régler avec différents filtres F n'utiliser à tour de rôle que l'une des raies de la source.

I.2.2. Réglage avec une lunette autocollimatrice

Observer à la lunette les images multiples du réticule.

Faire superposer ces images avec V3 puis V2.

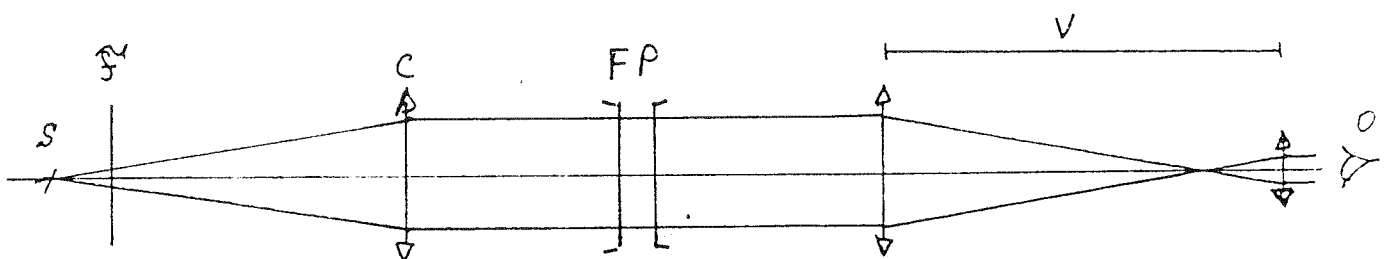
Eclairer l'interféromètre avec la source précédente (S+C)
faire les mêmes observations.

I.2.3. Différents éclairages

L'interféromètre peut-être éclairé en lumière dirigée (voir ci- dessus), en lumière focalisée (conjuguer la source lumineuse avec l'intervalle entre les lames de l'interféromètre à l'aide d'un objectif O) ou en lumière diffuse (placer un dépoli D entre la source et l'interféromètre)

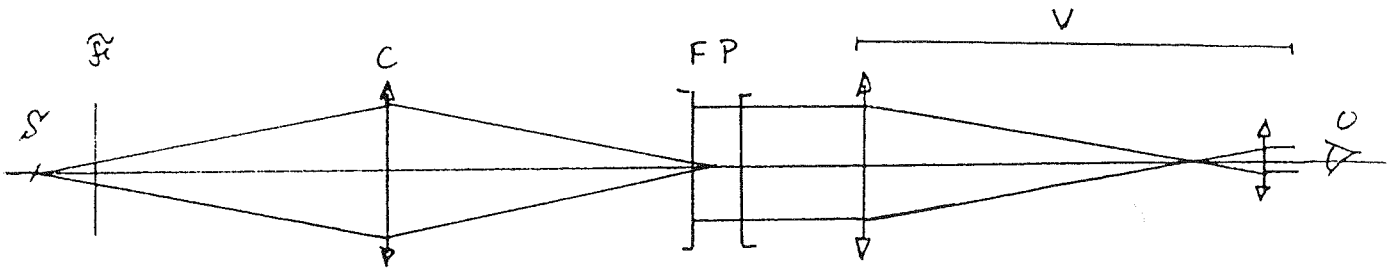
I.2.4. Figures

I.2.4.I. Eclairage en lumière parallèle



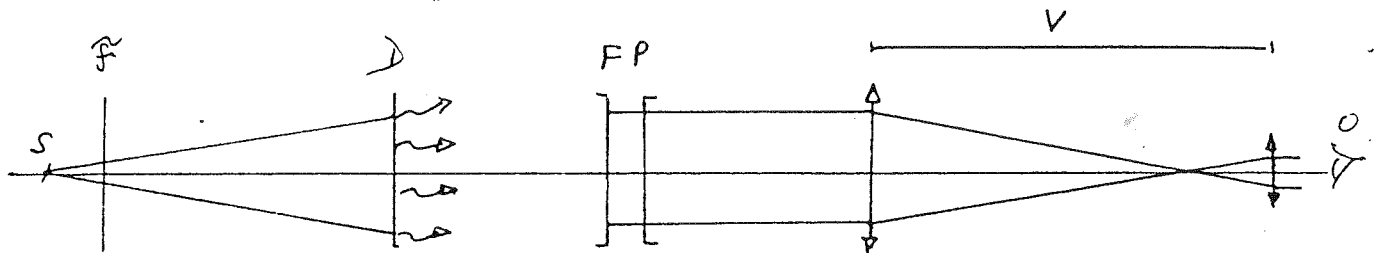
S: Source
F: Filtre
C: Condenseur
F.P.: Fabry - Perot
V: Viseur (Lunette)
O: Oeil.

I.2.4.2. Eclairage en lumière condensé



Mêmes Notations.

I.2.4.3. Eclairage en lumière diffuse



D : Dépoli
Mêmes Notations

I.3. Réglage rapide

I.3.1. Montage

Le montage ne nécessite qu'une source polychromatique S et un dépoli D (verre dépoli ou rodoid ou calque)

I.3.2. Mise en évidence

Observer avec l'oeil les images multiples du bord de la source (l'oeil accommodé sur la source)

Avec les réglages grossiers V3 et V2 (V1 = épaisseur = 2mm environ), faire superposer ces images.

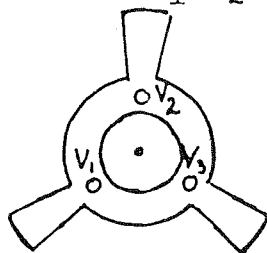
Placer son visage devant l'appareil de façon à pouvoir observer sans bouger les objets suivants :

- sa pupille d'oeil avec une accommodation
- la partie active de la source avec 2ème accommodation
- un jeu d'interférences (autour de son oeil) en accommodant volontairement sur l'infini (mettre son oeil assez loin de l'interféromètre (30 cm).

I.3.3. Réglage grossier

I.3.3.I Notations

Nous allons donner un nom arbitraire aux molettes du réglage grossier = $V_I V_2 V_3$.



I.3.3.2 Mise en évidence des anneaux de Newton

Lorsque les interférences sont observées, déplacer l'oeil suivant la direction $V_I V_3$.

La molette V_I ne sera pas utilisée et servira de référence de l'épaisseur.

Le champ d'interférences évolue lorsque l'oeil va de V_I à V_3

Si les anneaux rentrent (le rayon du I anneau décroît) de V_I vers V_3 dévisser V_3 (et réciproquement.)

Atteindre une configuration quasi-constante.

Déplacer alors l'oeil selon la normale menée de V_2 sur $V_I V_3$.

N'agir que sur V_2 pour tendre vers une configuration qui évolue peu lorsque l'oeil explore le champ.

Revenir à l'observation selon $V_I V_3$.

Le réglage sur V_2 peut avoir détérioré le réglage selon $V_I V_3$.

Progresser de proche en proche. Si l'observateur ne touche pas V_I ; 2 ou 3 séries sont suffisantes.

I.3.3.3 Remarques

Il peut-être plus facile de reculer la source et d'utiliser un dépoli lorsque l'on atteint le point I.3.2., mais l'énergie lumineuse sera moindre.

L'observateur peut aussi filtrer spectralement le jeu.

d'interférences pour simplifier, mais le réglage sera meilleur en lumière polychromatique.

Au cours des réglages, les jeux d'interférences sont toujours filtrés, et l'on observera sans peine 2 séries concentriques d'anneaux :

1° série d'anneaux : interférences principales

2° série d'anneaux : image de la série précédente dans le dioptre de sortie de l'interféromètre (série parasite)

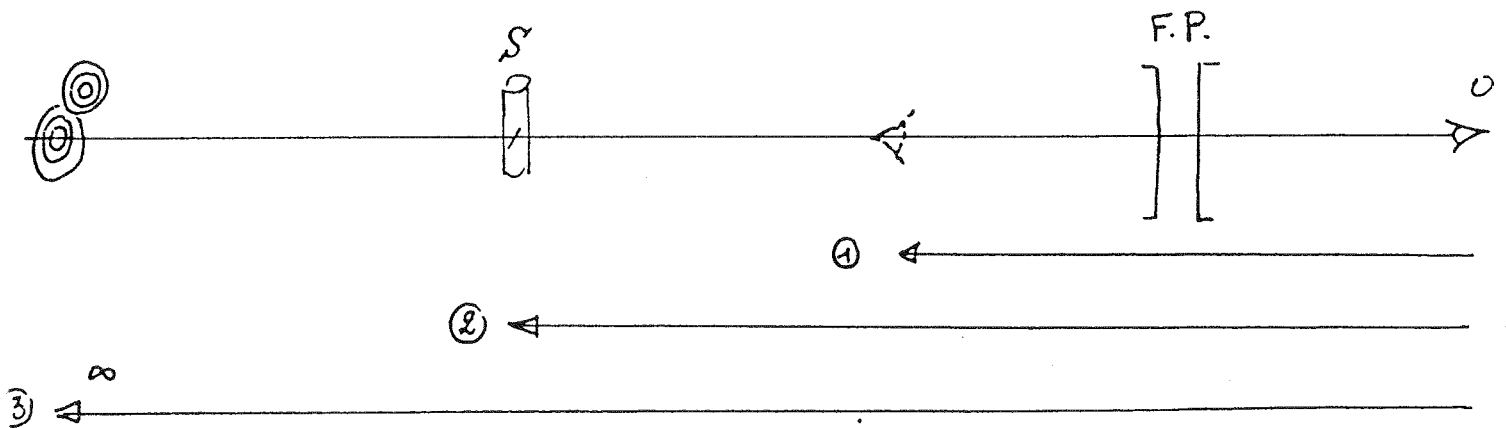
I.3.3.4. Réglage fin

Lorsque l'ordre d'interférence au point d'observation ne varie plus que de 5 anneaux au plus dans tout le champ, abandonner les réglages grossiers V_1 , V_2 et V_3 pour n'utiliser que les réglages fins.

L'observateur doit avoir la patience de n'utiliser que 2 vis sur 3 en gardant toujours la même référence.

Noter le rapport de démultiplication entre les deux réglages.

I.3.3.5 Figure



ACCOMODATION en

① : image de la pupille de l'œil

② : Lampe spectrale Source

③ : Anneaux à l'infini directs sur l'axe
parasites hors d'axe

2-ETALON A CALES INTERCHANGEABLES

2.I. Réglages

2.I.I. Présentation

L'étalon de Fabry-Pérot est livré avec un jeu de cales interchangeable (épaisseurs 2-5-10-20mm) Sur demande, un autre ensemble de cales peut-être fourni.

Les lames en verre optique de précision traitées à l'aluminium, peuvent-être remplacées par une paire de lames en Silice, traitées à la demande (en option) Planéité $\lambda/50$
 $R > 90\%$

Les supports de cales sont montés avec un détrompeur de façon à reprendre à chaque utilisation la position de réglage définie en atelier.

2.I.2. Changement d'épaisseur

Les deux lames sont montées dans des chariots à déplacement symétrique.

Le déplacement est commandé par une molette à action manuelle placée sous l'axe optique de l'appareil (axe horizontal) Lorsque l'écartement des lames est suffisant, le support de cales indésirable peut-être écarté.

La Sécurité évitera tout frottement sur les lames.

De même façon, le nouveau support de lames ne pourra être introduit que si l'écart entre lames est suffisant.

Les lames sont conduites au contact contre les cales par action sur la molette. Il y a lieu de nettoyer les 3 cales de nouveau support pour éviter la présence de toute poussière. Les réglages d'atelier sont tels que les anneaux à l'infini sont visibles dès le serrage de la molette. Les cales sont en Invar supérieur.

2.I.3. Réglage fin

Pour les différents types d'éclairage de l'interféromètre, se reporter au chapitre précédent.

Les réglages fins de l'étalon à cales interchangeables sont effectués par pression des lames sur les cales interchangeables.

Il est conseillé de ne pas effectuer de pression trop considérable.

Le réglage fin définitif s'obtient sans difficulté excessive si l'on opère comme indiqué au paragraphe I.3.2.2. du chapitre précédent.

2.1.4. Remarques

Les commandes du réglage fin sont prévues pour pouvoir fonctionner avec l'appareil sous vide et à diverses épaisseurs très différentes.

Un système à tourne-vis avec rallonges a été retenu à la conception. Il donne l'impression de jeu entre serrage et déserrage d'une même vis. Il n'en est rien au niveau de la pression sur les cales, et le montage est très stable à long terme.

2.2. Balayage de pression

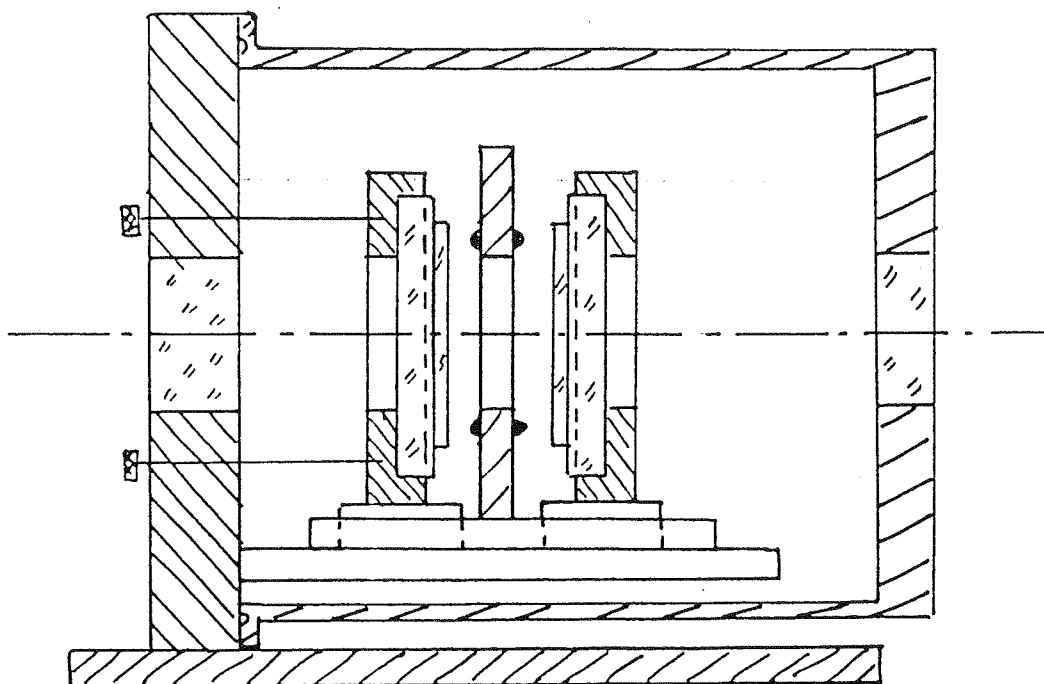
L'étalon de Fabry-Pérot à cales interchangeable est destiné à être utilisé sous vide, par adjonction d'une cuve à vide et d'une pompe à membrane.

Dans la cuve livrée en option avec le système de balayage de pression, la fuite réglable et le manomètre permettent de contrôler la pression sur 2 atmosphères (+ et - 1 Barr)

La fuite est linéaire de 0 à 600 m Barr, si on laisse la pression atmosphérique à l'admission d'air

$$n_{\text{air}} \# n_{\text{azote}} = 1 + 295 \cdot 10^{-6}$$

2.3. Schéma



3-INTERFEROMETRE DE FABRY-PEROT A EPAISSEUR CONTINUEMENT VARIABLE

TYPE 20 KF

L'expression 20 KF signifie 20 kilo-franges. En effet, une variation continue d'épaisseur sur 7mm permet l'observation d'environ 20.000 franges dans le visible.

3.I. Réglages

3.I.I. Présentation

L'appareil se décompose en plusieurs éléments distincts définis par leur fonction.

3.I.I.I. Support de lame mobile

Le support de lame mobile (1) subit les déplacements. Il porte la lame mobile (2) et les réglages fins de l'interféromètre (3)

Ces réglages fins sont réalisables par action sur deux molettes couleur or. La molette noire est immobile et ne sert uniquement qu'en atelier.

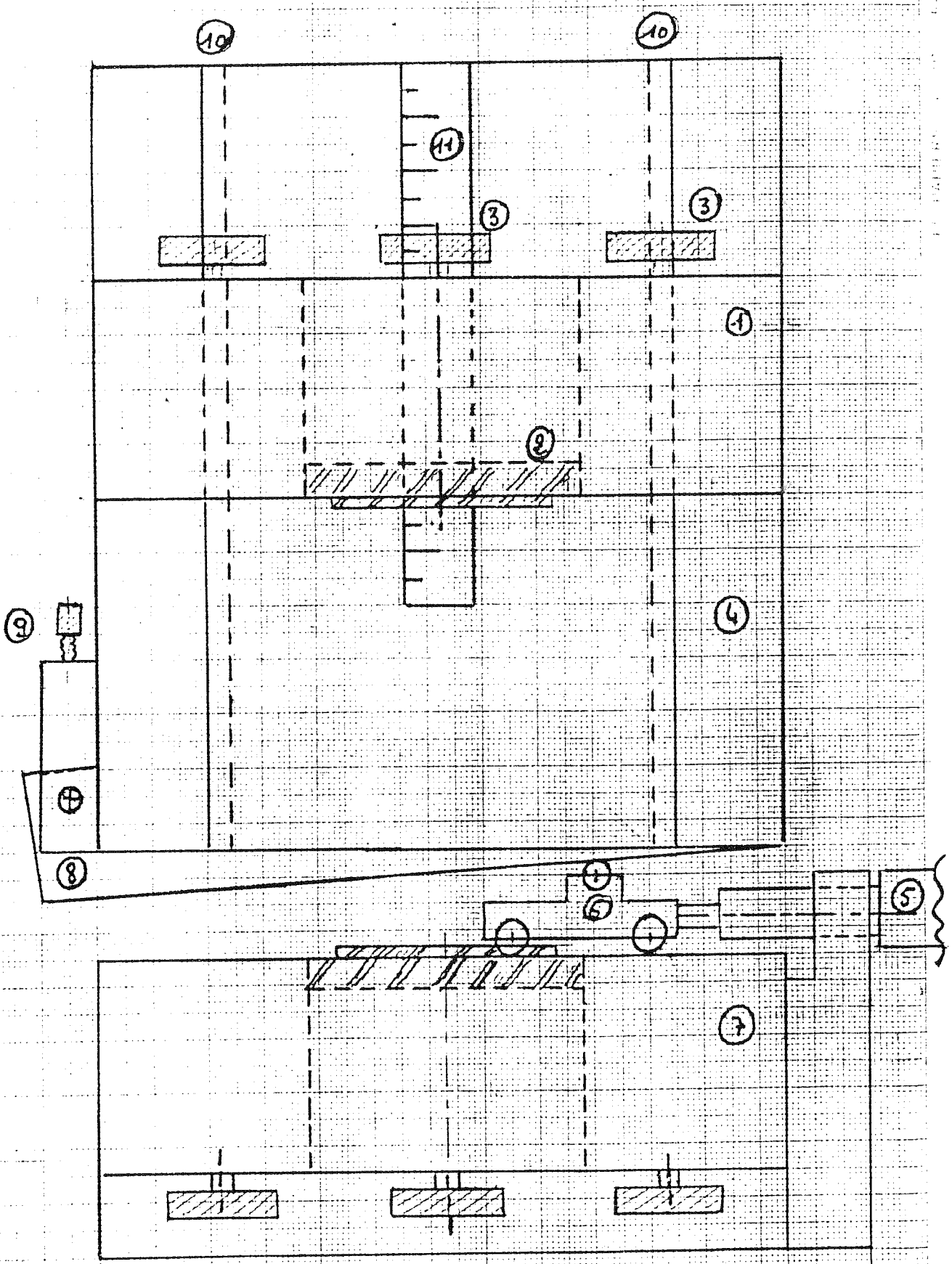
3.I.I.2. Variation continue de l'épaisseur

Le support de lame mobile est monté sur un chariot à déplacement de qualité optique (4)

Ce déplacement est commandé par la butée micrométrique latérale (5)(commandée par moteur en option.)

Cette butée agit sur un chariot(6) inséré entre le support de lame fixe (7) et le chariot à déplacement de qualité optique.

Un coin (8) réglable (9) (voir côté opposé à la butée micrométrique) permet le réglage de démultiplication entre l'avance de la butée micrométrique et le déplacement du chariot à déplacement de qualité optique.



3.1.1.3. Variation manuelle de l'épaisseur

Le support de la lame mobile est monté sur une queue d'aronde (I0) permet un déplacement relatif continu des deux pièces, repéré à l'aide d'un réglet (II)

L'épaisseur initiale d'air entre les deux lames peut donc être réglée manuellement de 0 à 100 mm et arrêtée à l'aide de la vis latérale (I2) à la valeur X.

L'interféromètre est alors réglable par la butée micrométrique (5) entre les valeurs X et X+7mm.

3.2. Cohérence de la source

De par leur largeur spectrale, différentes sources ne peuvent pas être analysées avec n'importe quelle épaisseur de l'interféromètre.

Régler l'interféromètre avec la raie rouge du cadmium par exemple, et observer aux différentes épaisseurs :

- | | | |
|---------------------------|---|---------|
| -Le doublet du Sodium | } | X ~ I |
| -La raie verte du Mercure | | |
| -Laser He Ne | | X ~ 100 |

4- QUELQUES EXEMPLES D'EXERCICES

4.I. Anneaux de Fabry-Pérot

4.I.I. Loi de répartition des anneaux

Pour l'une quelconque des épaisseurs possibles, observer les anneaux à l'infini à l'aide d'une lunette de visée (ou lunette autocollimatrice) munie d'un réticule micrométrique.

Mesurer le diamètre de chacun des anneaux.

En déduire le diamètre angulaire des anneaux et leur loi de répartition.

Cette observation est faite en lumière monochromatique.

La répéter avec différentes longueurs d'onde pour une épaisseur

En déduire l'épaisseur exacte de l'interféromètre.

4.I.2. Rôle de l'épaisseur de l'interféromètre

Régler l'interféromètre à l'épaisseur maximum (Les lampes spectrales permettent jusqu'à 20mm seulement)

Mesurer avec I longueur d'onde λ_0 le diamètre apparent de certains anneaux prédéterminés.

Réduire l'épaisseur de l'interféromètre

Réitérer l'expérience

En déduire la variation du diamètre angulaire des anneaux lorsque l'épaisseur de l'interféromètre varie (se référer toujours au même anneau, le I° par exemple)

4.2. Effet Zeeman

4.2.I. Montage

Placer dans le champ d'un électro-aimant alimenté en courant continu une lampe spectrale dont l'un des niveaux est dégénéré (raie rouge du cadmium par exemple) L'électro-aimant doit donc posséder un entrefer de 34mm au moins pour les lampes standard (Osram ou Philips) et pouvoir débiter jusqu'à 10.000 Gauss (1 Tesla) environ.

Conjuguer la lampe analysée avec l'intervalle entre lames de l'interféromètre.

L'épaisseur de l'interféromètre doit être réglée entre 3 et 4 mm.

4.2.2. Observations

4.2.2.1. Effet transversal sans polarisation

Sous l'action du champ magnétique les niveaux dégénérés se séparent.

Une observation visuelle permet d'observer la raie initiale décomposée en 3 raies.

La distance angulaire entre les nouvelles raies croît avec le champ magnétique. Vérifier la proportionnalité.

Le polariseur à une position indifférente entre la source et l'oeil quelque soit le mode d'observation; seule la direction du vecteur polarisation est importante et peut être repérée.

4.2.2.2. Effet transversal avec polarisation

L'observateur peut maintenant utiliser une lunette de visée à micromètre.

En polarisation Π on observe que la seule raie Π est indépendante du champ magnétique.

En polarisation σ on observe la proportionnalité entre le dédoublement spectral et l'intensité d'alimentation de l'électro-aimant.

On peut donner la distance spectrale en fonction de l'intensité électrique, en utilisant l'intervalle spectral libre de l'interféromètre comme unité spectrale.

4.2.2.3. Effet longitudinal avec polarisation

Au cas où l'une des pièces polaires de l'électro-aimant est percée, faire les mêmes observations dans la direction du champ magnétique (2 raies σ seules)

Un adaptateur d'ouverture en plexiglass poli deux faces, de la longueur de la pièce polaire percée, permet une observation plus aisée.

4.3. Mesures d'épaisseur

4.3.1. Mesure de l'épaisseur des cales de l'interféromètre à cales

L'étalon étant à cales, il sera intéressant de mesurer l'épaisseur des différentes cales.

4.3.2. Méthode des excédents fractionnaires

Nous ne reviendrons pas ici sur cette méthode classique.

4.3.3. Méthode des franges de superposition

Cette méthode est directement applicable avec le modèle 20 KF. L'onde transmise par un étalon de Fabry-Pérot, ou un cristal anisotrope, en faisceau parallèle, peut-être analysée par l'interféromètre à épaisseur continuellement variable.

Il y a mise en phase dans l'interféromètre d'analyse pour des épaisseurs discrètes égales aux différences de marche créées dans l'étalon inconnu ou le cristal.

L'ensemble de ces épaisseurs permet d'en déduire les épaisseurs optiques inconnues.

Cette méthode est à rapprocher de l'analyse par l'interféromètre de Michelson.

4.3.4. Méthode de l'interféromètre de Michelson

Eclairer l'interféromètre de Fabry-Pérot en faisceau parallèle
Analyser le faisceau transmis par l'étalon de Fabry-Pérot à l'aide d'un interféromètre de Michelson.

L'un des miroirs de l'interféromètre de Michelson est mobile et sa position se définit à tout instant :

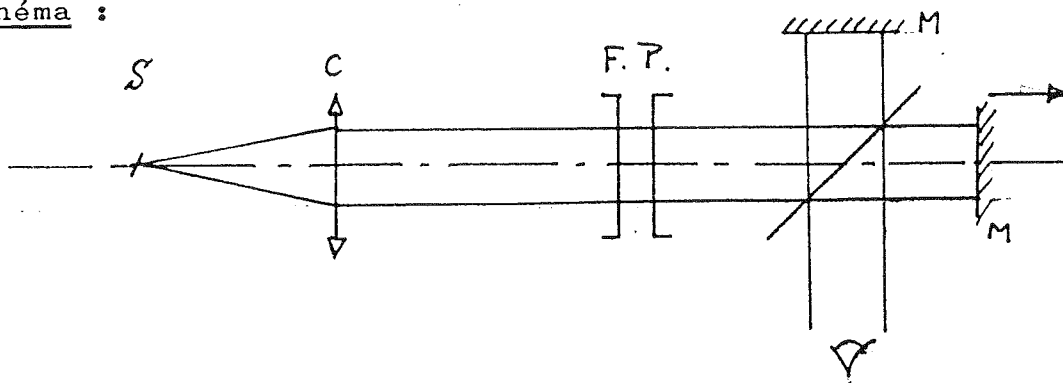
- soit par une lecture sur vernier ou butée micrométrique
- soit par un interférogramme enregistré grâce aux franges d'égales amplitudes données par un laser He Ne.

L'énergie transmise par le système total dépend essentiellement de l'épaisseur de l'étalon de Fabry-Pérot.

On mesure ici un interféromètre à ondes multiples avec un interféromètre à 2 ondes.

Un réglage soigneux du parallélisme des lames du Fabry-Pérot avec les miroirs du Michelson ou d'un autre Fabry-Pérot, permettent l'observation de franges de superposition en lumière blanche seulement près de l'épaisseur égale.

Schéma :



4.4-Etude des performances de l'interféromètre

4.4.1. Finesse résultante de l'interféromètre : F

Régler l'interféromètre à une épaisseur connue, mesurée précédemment.

Observer différentes sources spectrales : Doublets du Sodium
Raie verte du Mercure
Raie rouge du Cadmium

dans un champ magnétique défini.

En déduire l'E.S.A.

Pour le mesurer, on peut lire deux fois l'intensité I du courant qui parcourt l'électro-aimant en présence des raies du Cadmium.

1° Lecture : les raies ont évolué d'un ordre d'interférence

I_1 correspond à l'I.S.L

2° Lecture : les raies sont à peine dédoublées à l'observation
lire I_2

$\Delta I = I_2 - I_1$ correspond à l'E.S.A.

si le champ magnétique a été vérifié proportionnel à I , nous avons immédiatement :

$$\frac{I_{S.L.}}{E.S.A.} = \frac{I}{\Delta I} = F$$

4.4.2. Variation de la finesse résultante

Refaire les mêmes observations avec différents diamètres utiles de l'interféromètre.

La finesse des lames croît lorsque la diamètre décroît.

La finesse résultante progresse avec la finesse des lames.

4.4.3. Mesure des finesesses

Si l'on a pu mesurer la transmission des lames (en admettant $A = 0$) on en déduit F_T : connaissant F , on en tire F_L

4.5. Analyse spectrale

4.5.1. Analyse avec l'étalon à cales interchangeables

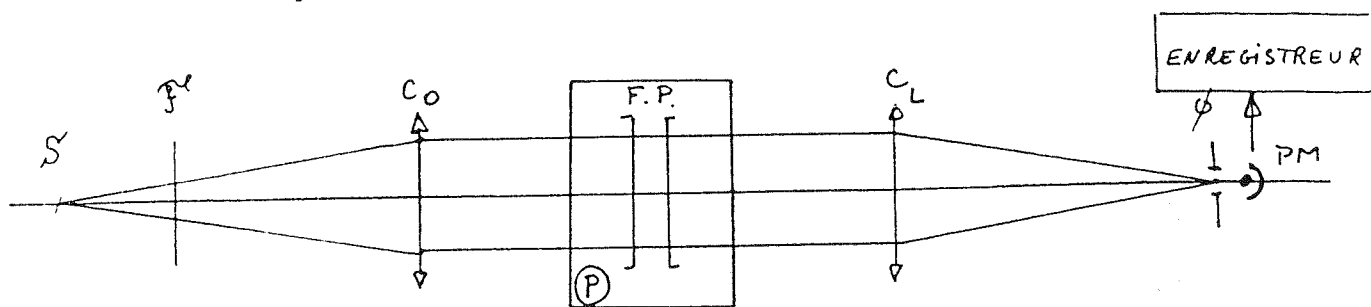
4.5.1.1. Montage

L'épaisseur optique de l'étalon varie avec la pression du gaz.

Par variation de pression dans l'étalon, on pourra analyser une raie.

Définir la cale la plus appropriée pour l'analyse de la raie verte du mercure $\lambda = 5460,7 \text{ \AA}$ $\Delta \lambda \leq \dots = 1 \text{ \AA}$ (Source S)

Réaliser le montage suivant, et faire varier la pression de façon à balayer 2 ordres.



Mêmes Notations

Définir l'élément qui limite la précision du système.

En déduire à l'aide de la focale de l'objectif du Clérait C_L utilisé le diamètre ϕ nécessaire au diaphragme d'analyse placé avant le photomultiplicateur d'enregistrement PM

4.5.1.2 Spectromètre intégral

Remplacer la lampe spectrale au mercure précitée par la fente de sortie d'un spectromètre.

raisonner de la même façon, compte tenu de la dispersion D du spectromètre, de la largeur L de fente ($D \times L$) donne la largeur spectrale analysable autour de la valeur moyenne

Cette largeur spectrale doit être inférieure ou égale à $L \cdot ISL$ de l'interféromètre.

La finesse et la focale du Clérait définissent le diamètre ϕ . La puissance optique de l'objectif C_0 est alors imposée par la conjugaison fente-diaphragme.

Adapter les ouvertures numériques et les diamètres des éléments optiques.

4.5.2.2. Analyse avec l'interféromètre de Fabry-Pérot 20 KF

Refaire les mêmes mesures que précédemment.

L'épaisseur de la cale choisie est remplacée par l'épaisseur donnée à l'interféromètre.

L'épaisseur optique varie non plus par variation de l'indice mais par variation d'épaisseur mécanique: ne

Le déplacement du miroir peut-être commandé par un moteur couplé à la butée micrométrique et un enregistreur à la sortie du P.M.

L'étude peut-être menée de proche en proche.

Mettre en évidence l'évolution de L'I.S.L. et de la résolution du système à la suite des variations d'épaisseur. La meilleure résolution correspond à L'I.S.L. égal à la largeur spectrale de la raie, toutes composantes comprises, avec le plus faible diamètre utile possible vis à vis du montage.

4.6.-Etude des modes d'un laser

Cette étude ne peut-être menée qu'à l'aide de l'interféromètre type 20 KF

En effet, l'épaisseur de l'interféromètre doit-être de l'ordre de 60mm.

Régler l'épaisseur de l'interféromètre de façon que l'I.S.L. corresponde à la largeur Doppler du laser He Ne bon marché (500 M Hz) que l'on étudie. (On peut réaliser la même manipulation avec un Laser de Recherche)

Pour le réglage, utiliser un système afocal pour couvrir le 20 KF, ou bien éclairer un diffuseur placé à grande distance du 20 KF (dans ce cas on risque de devoir travailler dans la pénombre)

Lorsque le 20 KF est réglé, éteindre le laser et le laisser refroidir. L'analyse commence dès la mise en marche du laser He Ne froid.

On observera selon les modèles, s'il y a lieu :

- Le défilement des ordres qui correspond à l'élongation de la cavité Laser sous effet thermique.
- Le nombre d'ordres compris dans la largeur Doppler
- Par analyse spectrale comme précédemment l'énergie comprise dans chacun des ordres (produit de convolution du peigne de Dirac des ordres avec l'enveloppe de l'effet Doppler)
- Le taux de polarisation des différents ordres émis
- En cas d'utilisation du système afocal, voir le rôle d'un filtre spatial- Utiliser différents diamètres de filtres.

Remarque :

Ces observations peuvent-être faites en réglant l'interféromètre en " Coin d'Air " d'épaisseur 50 ou 60mm.