

MEMOIRE

présenté

A LA FACULTE DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITE DE PARIS

pour obtenir le DIPLOME D'ETUDES SUPERIEURES DE
SCIENCES PHYSIQUES

par

Maximilien CUISENIER

1er SUJET - Contribution à l'étude et à la réalisation de reproductions de lames
à qualités interférométriques.

2 eme SUJET -

Soutenu le

devant la Commission d'Examen

Président. Mr. P. Jaquinot
Examineurs. MM. R. Lennuyer
R. Chabbal

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à Monsieur le Professeur JACQUINOT qui m'a accueilli dans son laboratoire, et à Monsieur le Professeur CHARRAL qui a bien voulu diriger mon travail.

Je remercie également Monsieur GOLMAN de sa collaboration et tout le personnel du laboratoire Aimé Cotton pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

INTRODUCTION

==

L'étude des propriétés et des conditions optima d'utilisation du spectromètre Fabry-Perot montre que sa Résolution, comme sa Luminosité sont fonctions de nombreux paramètres (1). Parmi ceux-ci, l'amplitude et la forme des défauts de surface des lames jouent un rôle fondamental dans la détermination du coefficient de finesse du Fabry-Perot. Les principaux résultats à ce sujet ont été énoncés par R.Chabbal (2), nous en rapellerons seulement les grandes lignes.

Nous exposerons ensuite deux méthodes permettant d'étudier les défauts de surface des lames : l'une par l'observation des franges du coin d'air ; l'autre, utilisant une méthode et un appareil existant (3) et qui permet le tracé d'une carte des lames.

Nous décrirons enfin, dans le détail de sa technique, une méthode de reproduction de lames à qualités interférométriques, dont la mise au point a été poursuivie au laboratoire de Bellevue avec la collaboration de M. G.Golman.

I° Partie

SPECTROMETRE FABRY-PEROT . COEFFICIENT de FINESSE LIMITE

I. FONCTIONNEMENT du SPECTROMETRE FABRY-PEROT.

On est conduit à exprimer les qualités du spectromètre Fabry-Perot par une fonction d'appareil $W(\sigma)$ où σ est le nombre d'onde de la lumière utilisée. Cette fonction $W(\sigma)$ est le produit de composition de la fonction $A(\sigma)$ qui est la fonction d'Airy, par les fonctions dites fonctions perturbatrices, $F(\sigma)$ et $D(\sigma)$ respectivement fonction diaphragme isolateur et fonction défauts de surface.

- $A(\sigma)$ est de la forme :

$$A(\sigma) = a^2 \left(\frac{T}{1-R} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

La distance entre deux pics est l'intervalle spectral libre $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{S} = \frac{2\pi\sigma}{\varphi}$$

La largeur des pics à mi-hauteur est a :

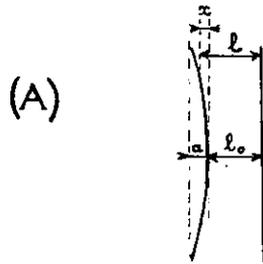
$$a = \frac{1-R}{\sqrt{R}} \cdot \frac{1}{\pi S}$$

On définit la finesse réflectrice N_R par :

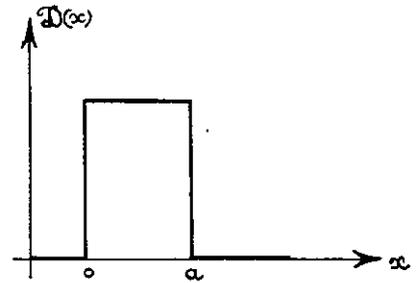
$$N_R = \frac{\Delta\sigma}{a} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

N_R ne dépend que de R (pouvoir réflecteur des lames) et pas de la distance entre les lames.

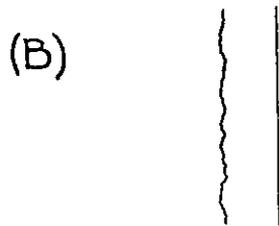
Fig. 1 - Fonction défauts de surface
(D'après R. Chabbal)



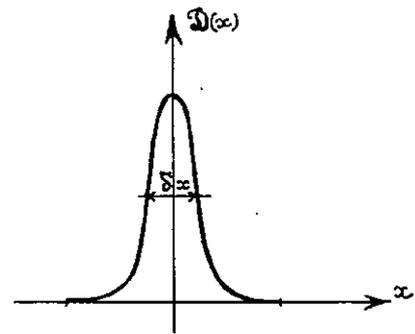
Courbure de flèche a



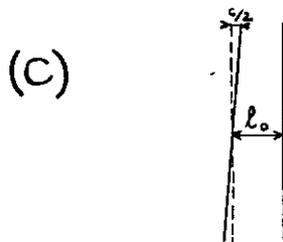
$$D(x) = S/a \quad 0 < x < a$$



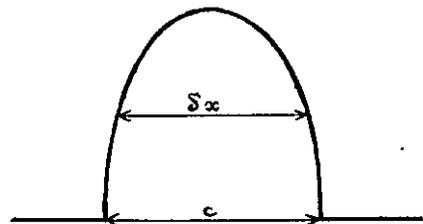
Micropoli gaussien



$$D(x) = \frac{2S}{b} \sqrt{\frac{ln^2}{\pi}} e^{-4ln^2 \frac{x^2}{b^2}}$$



Défaut de parallélisme



$$D(x) = \frac{S}{\pi c} \sqrt{1 - \frac{4x^2}{c^2}}$$

$$-\frac{c}{2} < x < \frac{c}{2}$$

- $F(\sigma)$ est une fonction qui traduit l'influence du diaphragme isolateur sur la fonction d'appareil. Elle dépend de la forme du diaphragme utilisé. Dans le cas d'un diaphragme circulaire vu sous l'angle Ω et dans un intervalle faible en σ , on a sensiblement :

$$F(\sigma) = \frac{d\Omega}{d\sigma} = \frac{2\pi}{\sigma}$$

C'est une fonction rectangulaire de largeur $f = \frac{\sigma\Omega}{2\pi}$

- $D(\sigma)$ traduit l'influence des défauts de surface des lames sur la fonction d'appareil. Elle dépend de la forme et de l'amplitude de ces défauts et s'exprime par :

$$D(\sigma) = \frac{dS}{d\sigma} = \mathcal{D}(x) \frac{dx}{d\sigma}$$

où dS est la portion de surface qui laisse passer la lumière appartenant à l'intervalle spectral $d\sigma$.

x est un paramètre géométrique qui permet d'exprimer la fonction $\mathcal{D}(x) = \frac{dS}{dx}$ où x intervient pas le nombre d'onde.

La figure (1) montre la forme de la fonction $\mathcal{D}(x)$ dans trois cas classiques.

La largeur de $D(\sigma)$ est donnée par :

$$\Delta\sigma = \frac{2\sigma de}{1/\Delta\sigma}$$

On définit la finesse limite N_D par

$$N_D = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\lambda}{2de} = \frac{n}{2} \quad \text{en posant } de = \frac{\lambda}{n}$$

c'est-à-dire quand les lames sont polies à $\frac{\lambda}{n}$.

N_D ne dépend que de la qualité des lames et pas de leur distance.

II. LIMITATION des QUALITES du SPECTROMETRE FABRY-PEROT par les DEFAUTS des LAMES.

A - Limitation de la finesse enregistrée.

La fonction enregistrée est $Y(\sigma) = W(\sigma) \star B(\sigma)$

où $W(\sigma)$ est la fonction d'appareil et $B(\sigma)$ le spectre étudié.

Donc $Y(\sigma) = A(\sigma) \star F(\sigma) \star D(\sigma) \star B(\sigma)$

Et la largeur de $Y(\sigma)$ est supérieure à chacune des largeurs α , f , d et δ de A , F , D et B .

La finesse enregistrée est, par conséquent, inférieure à $\frac{\Delta\sigma}{f}$, $\frac{\Delta\sigma}{\delta}$, et $\frac{\Delta\sigma}{\alpha}$.
Si $\frac{\Delta\sigma}{f}$ et $\frac{\Delta\sigma}{\delta}$ peuvent être augmentées autant qu'on le veut en rapprochant les lames,

Si $\frac{\Delta\sigma}{\alpha}$ peut être augmentée en utilisant des revêtements appropriés et atteindre ainsi des valeurs de l'ordre de 300,

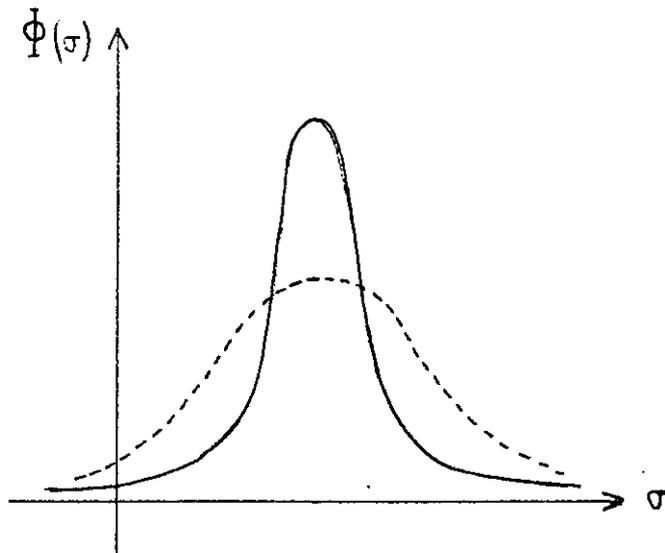
$\frac{\Delta\sigma}{d} = N_D$ est inférieure à 40 et n'atteint que dans les cas très favorables cette valeur; encore faut-il pour cela n'utiliser qu'une faible surface des lames.

C'est donc en fait, la finesse N_D qui limite la finesse globale de l'appareil, d'où son nom de finesse limite.

B - Perte de Luminosité due aux défauts de surface.

Un spectromètre Fabry-Perot à faces non planes est équivalent à un grand nombre de F.P. d'épaisseurs différentes juxtaposés. Tous ces F.P. ont des maxima de transmission pour des valeurs différentes de σ donc les défauts de surface des lames créent un étalement des fréquences.

Par suite la bande passante s'élargit en même temps que son sommet s'abaisse. C'est-à-dire que le flux maximum transmis diminue.



III. CONCLUSION .

Ces considérations ont été développées dans le but de mettre en évidence l'importance fondamentale des défauts de surface des lames dans l'utilisation du spectromètre Fabry-Perot.

Les performances du F.P. sont fonctions directement de la qualité des lames qui le constitue. Actuellement cette qualité est telle que l'on est conduit à utiliser, pour les hautes résolutions, l'association d'un monochromateur à réseau et deux F.P. Cette association introduit des difficultés de réglage et de stabilité qui limitent l'emploi de l'appareil.

On ne pourra généraliser l'emploi du spectromètre Fabry-Perot que lorsqu'un seul appareil permettra d'atteindre de grandes résolutions et ceci sera possible quand on réalisera des lames dont la finesse limite sera de l'ordre des autres coefficients de finesse.

C'est une des raisons pour lesquelles l'étude suivante a été entreprise.

II° Partie

CONTROLE de la PLANEITE des LAMES.

I. OBSERVATION des FRANGES du COIN d'AIR.

1). Principe.

Deux lames planes faisant entre elles un petit angle, éclairées par une source à l'infini, c'est-à-dire un faisceau parallèle, produisent un phénomène d'interférence qui se traduit par l'apparition de franges rectilignes. Ces franges sont localisées sur les lames. Les franges brillantes sont les courbes de niveau du coin d'air, d'une frange à la suivante, l'épaisseur augmente de $\lambda/2$. L'observation avec des verres nus montre que la répartition de la lumière est sinusoïdale. On augmente la finesse en semi-argentant les lames. On observe alors, par transmission, des franges brillantes fines séparées par de larges intervalles obscurs. Les franges au coin d'air ainsi formées sont rectilignes si les lames du coin d'air sont rigoureusement planes. Supposons que l'une des lames soit déformée ; au voisinage des défauts, les franges ne seront plus rectilignes.

Ainsi le coin d'air constitue une méthode simple de contrôle de la planéité des lames. Tout défaut se traduit par une déformation des franges au voisinage de celui-ci et une déformation atteignant un interfrange décèle un défaut d'amplitude $\lambda/2$. Si la déformation est de $1/n$ interfrange, le défaut de planéité est d'amplitude $\lambda/2n$.

2). Réalisation d'un montage.

Nous avons réalisé un système aussi simple que possible qui permet d'obtenir immédiatement les franges du coin d'air sur papier translucide ou sur plaque photographique.

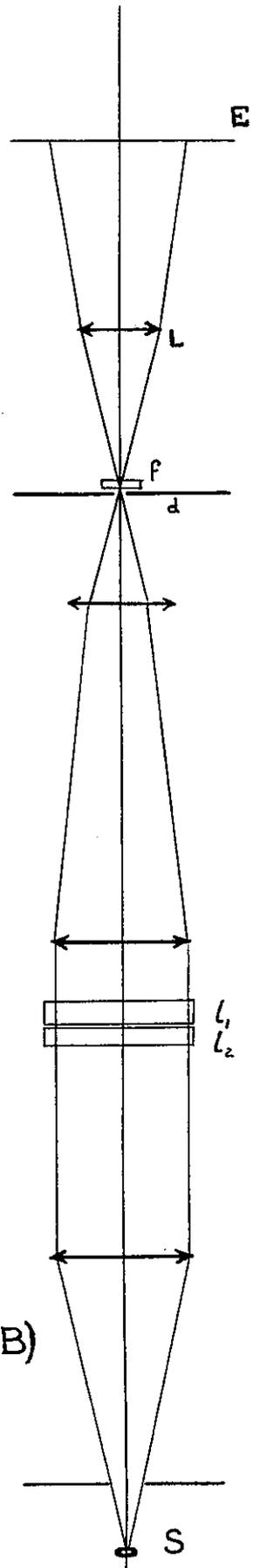
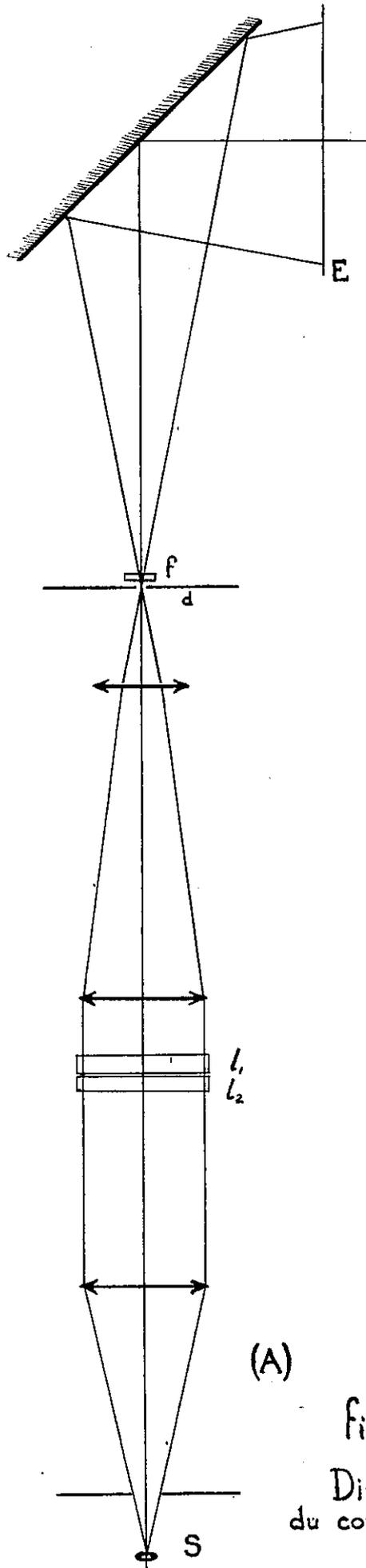


Figure 2
Dispositif
du coin d'air.

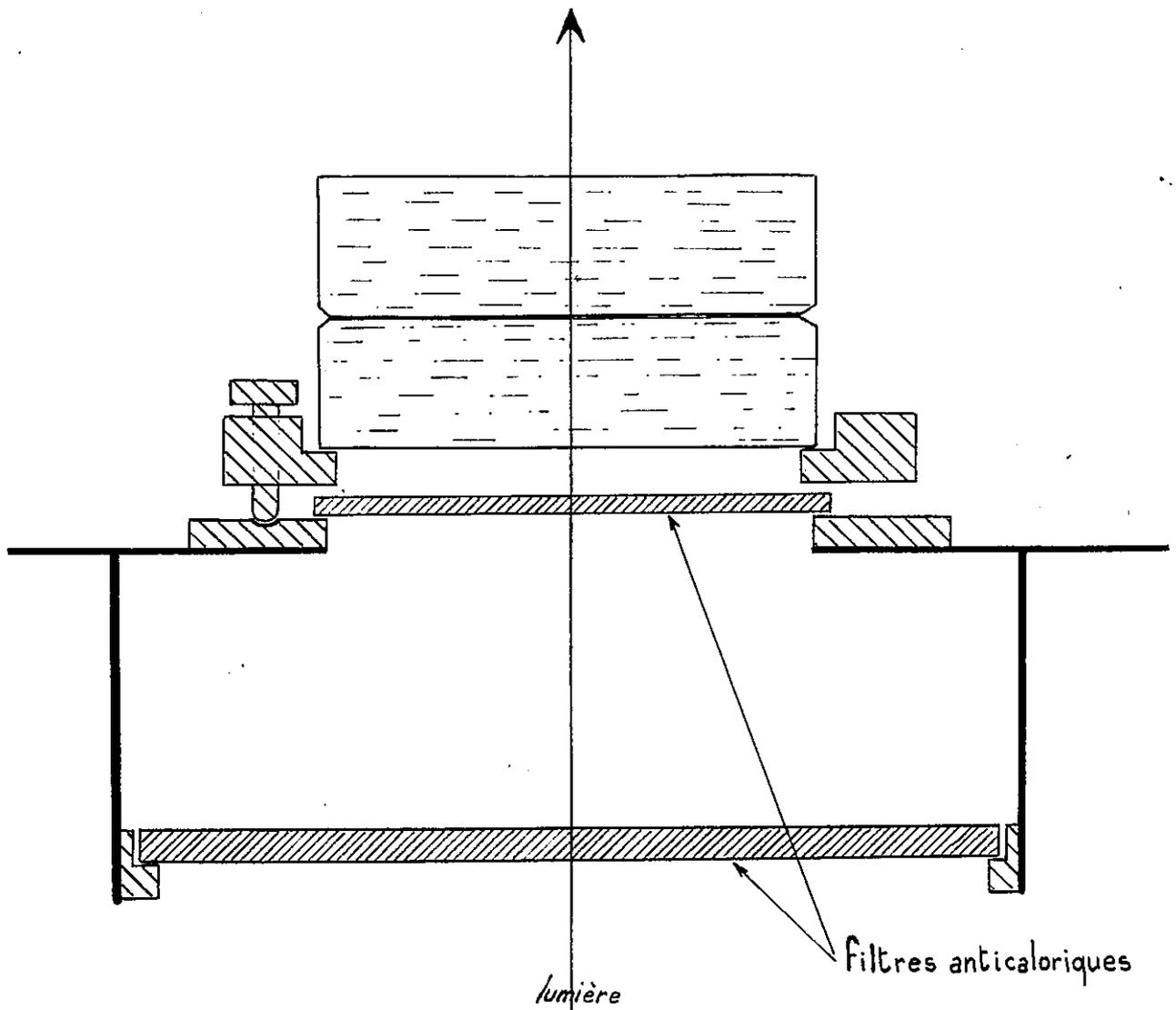


fig. 5

Support des lames dans le
dispositif du coin d'air —

fortement déformée.

Sur les figures 4-2 et 4-3 les vis sont desserrées et la courbure prend une forme régulière, la qualité évolue de $\lambda/1,5$ à $\lambda/6$.

c - Une autre cause d'incertitude sur la qualité des lames est la température à laquelle elles se trouvent. On peut facilement mesurer la température ambiante au voisinage des lames et, à ce point de vue, essayer de se placer toujours dans les mêmes conditions. Mais rien n'indique si les lames éclairées par le faisceau lumineux ne sont pas chauffées d'une façon différente en chaque point pendant l'observation. En fait, il est visible que sans précaution particulière les lames se déforment quand elles sont éclairées dans l'appareil. Ces déformations se produisent alors qu'on a attendu assez longtemps auparavant pour éliminer les causes mécaniques vues ci-dessus, donc elles sont d'origine thermique. Pour se protéger de cette cause d'erreur qui pourrait entraîner une non reproductibilité des tracés, entre la source et les lames sont interposés deux filtres anticaloriques de 5 et 3 mm d'épaisseur. D'autre part la source est ventilée, les lames elles-mêmes étant protégées de cette ventilation. La figure 5 montre le dispositif utilisé.

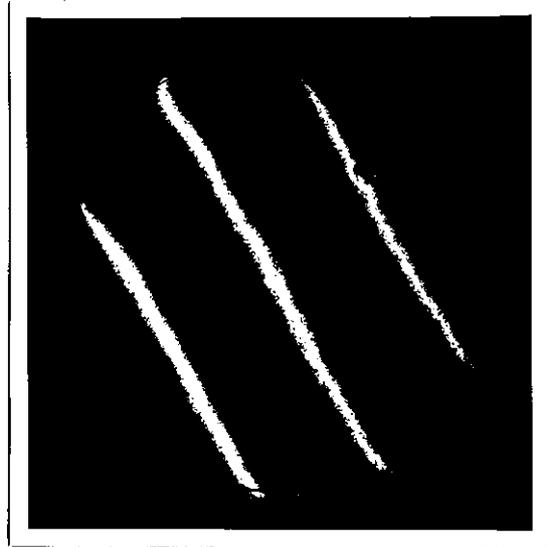
d - Nous avons vu jusqu'ici des causes d'imprécision qui agissent en déformant les lames d'une manière aléatoire. En admettant qu'elles soient toutes éliminées il subsiste une imprécision due au tracé lui-même ou à l'observation des photographies des franges. Nous distinguerons, dans cette discussion, les deux cas : tracé sur papier translucide et photographie.

* Tracé des franges d'égale épaisseur.

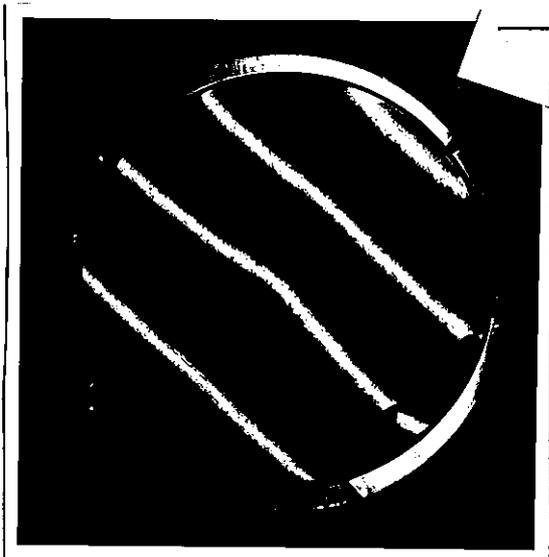
La précision du tracé est limitée par la finesse. Le problème consiste en effet à suivre aussi rigoureusement que possible le centre des franges brillantes. Ce centre étant d'autant mieux défini que la finesse est plus grande.

La finesse dépend du pouvoir réflecteur des lames d'une part ; de la grandeur du diaphragme et de la distance des lames d'autre part.

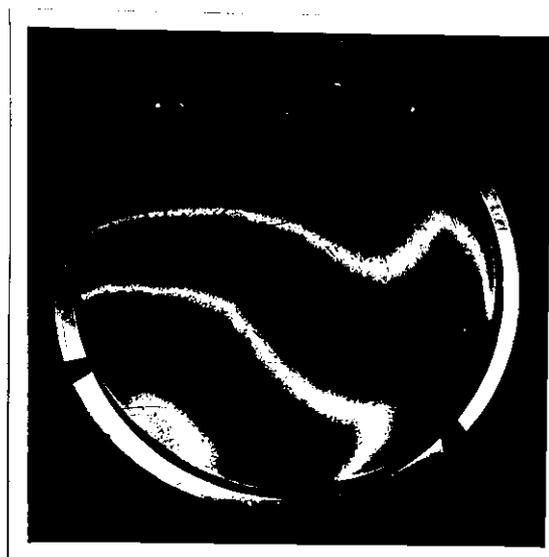
Pour avoir une luminosité suffisante, avec des revêtements d'argent, on ne peut pas



6.1 Lamina à $\lambda/50$



6.2 Lamina à $\lambda/15$



6.3 Lamina à λ

fig. 6. Franges du coin d'air

avoir R plus grand que 95 %. On peut donc s'attendre à une finesse réflectrice de 60.

$$N_R = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \approx \frac{3}{1-R} \quad R = 0,95 \Rightarrow N_R = 60$$

C'est-à-dire que si l'interfrange est de 6 cm, la largeur à mi-hauteur doit être de 1 mm.

Comme on ne connaît pas avec précision la distance des lames, le diaphragme est choisi de telle sorte que la finesse globale soit sensiblement la finesse réflectrice. On arrive à ce résultat avec un diaphragme de quelques millimètres de diamètre placé sur l'image de la source (fig. 2).

Si on admet que l'erreur de pointé est dans tous les cas de l'ordre de la largeur d'une frange on peut apprécier, avec une finesse de 60, un défaut de planéité d'amplitude

$\frac{\lambda}{100}$ environ.

* Photographie des franges d'égale épaisseur.

En photographie, le noircissement de la plaque, puis le tirage, fournissent des franges qui semblent avoir un contour sensiblement rectangulaire. La largeur de cette fonction rectangulaire par rapport à la largeur à mi-hauteur de la fonction d'Airy dépend de la plaque ou du film utilisé, des conditions de développement et ensuite du papier utilisé pour le tirage.

Dans notre cas, la stabilité de l'appareil conduisait à prendre des films rapides donc moins contrastés. On utilise les films "Super XX" et le tirage est fait sur papier extra dur. Dans ces conditions la largeur de la fonction rectangulaire est comprise entre 2 et 3 fois la largeur à mi-hauteur de la fonction d'Airy.

Ceci conduit à une finesse apparente 2 à 3 fois plus petite. La précision des pointés en souffre moins qu'on ne pourrait le penser car cette fois les observations et mesures sont faites dans de meilleures conditions que lors des tracés sur papier translucide.

Ainsi, sur la figure 6-1, la finesse apparente est de 12 mais on pourrait apprécier un défaut atteignant 1/4 de la largeur d'une frange donc d'amplitude $\frac{\lambda}{100}$; du même ordre de grandeur que lors du tracé direct des franges.

Les lames utilisées ici sont de bonne qualité environ $\lambda/50$. Sur la figure 6-2, on a une finesse analogue. Cette fois une des lames utilisées est la même que précédemment, l'autre est à $\lambda/15$ environ.

Sur la figure 6-3 une des lames est la même qu'en 6-1, l'autre est très mauvaise.

e - Quand on a ainsi éliminé les causes d'incertitudes qui agissent en déformant les lames, quand on a réalisé la précision maximum dans l'observation des défauts mis en évidence par la déformation des franges, il reste que l'on n'a pas de renseignements sur la topographie de l'ensemble de la lame. Il faudrait pour cela, obtenir un balayage régulier par déplacement des franges. Or dans l'appareil utilisé les lames sont séparées par des cales de papier très fin et, il est impossible de déplacer l'une par rapport à l'autre pendant une observation. La recherche de la précision dans la mesure des défauts conduit à prendre un grand interfrange, l'intervalle obscur non observé en est d'autant plus grand. On pourrait donc penser utiliser une source à plusieurs raies de telle sorte que l'interfrange d'une longueur contienne des franges d'autres longueurs d'onde ; ainsi une plus grande surface de la lame serait observée en même temps. En fait, cette solution est difficile à réaliser car si certaines raies sont fines dans la lumière d'une source, d'autres sont très larges et les utiliser nuirait au contraste.

L'appareil utilisant les franges du coin d'air a donc le mérite de donner simplement et très rapidement la qualité d'une paire de lames en λ/n . Par contre, il ne prétend pas servir à la description rigoureuse de la topographie d'une lame.

Nous étudierons dans la suite, un appareil basé sur le même principe, c'est-à-dire, l'observation de franges d'égale épaisseur, mais qui doit permettre un balayage régulier et le tracé de carte de lames.

II. UTILISATION d'une MONTURE de SPECTROMETRE FABRY-PEROT à DEPLACEMENT MECANIQUE.

1) Principe de la méthode. Description de la monture utilisée.

Le principe de la méthode ainsi que la description de la monture ont été exposés par R. CHABBAL (3).

Il s'agit d'observer les franges d'égale épaisseur entre une lame plane prise comme

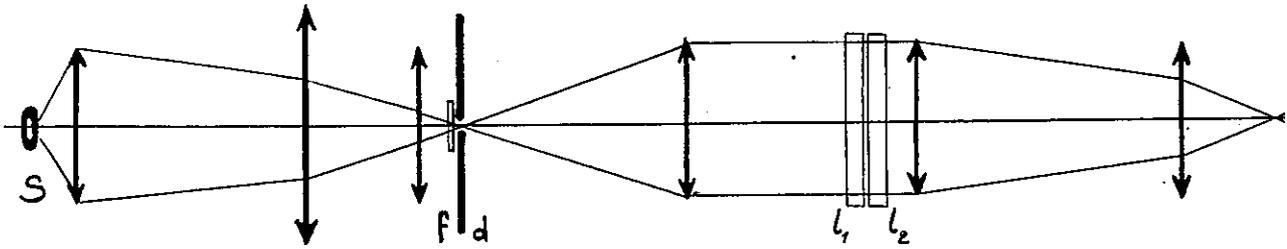


fig.7 - Montage optique pour l'observation des franges d'égal épaisseur

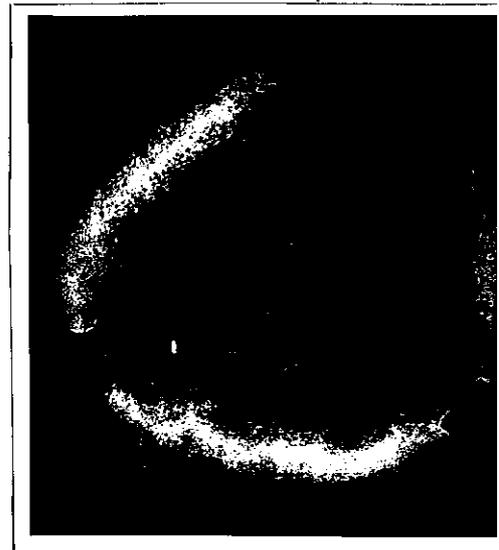


fig.8 - Franges d'égal épaisseur

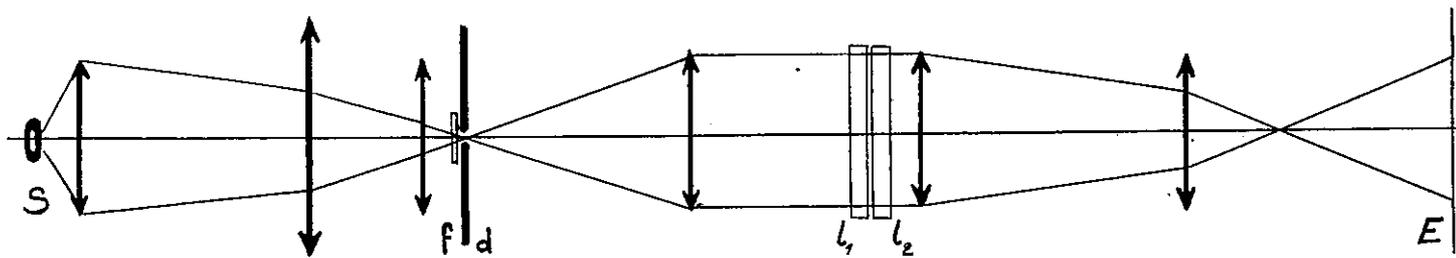


fig.7 - Montage optique pour l'observation des
franges d'égal épaisseur



fig.8 - Franges d'égal épaisseur

étalon et une lame inconnue disposée parallèlement à la précédente. Ces franges se succèdent chaque fois que l'épaisseur augmente de $\lambda/2$ donc, avec de bonnes lames, on observe une seule frange à la fois. Si on déplace alors une des lames, parallèlement à elle-même la frange se déplace. En traçant les formes successives que prend cette frange à intervalles réguliers on obtient une carte, en courbes de niveau, de la lame inconnue par rapport à l'étalon. Les deux lames ainsi utilisées constituent un Fabry-Perot de faible épaisseur. La lame mobile est fixée à une membrane métallique portée par une couronne rigide, sur laquelle est exercée une force variable. Cette force est commandée par le fléchissement d'une lamelle métallique ; elle-même commandée par un poussoir agissant par l'intermédiaire d'un système démultipliateur. La lame fixe est portée par une couronne rigide. Ces deux couronnes sont séparées par trois cales de silice placées à 120° l'une de l'autre. Des ressorts portés par une troisième couronne permettent en modifiant légèrement et successivement la longueur de chacune des trois cales, d'amener les deux lames à être parallèles.

Dans cette monture la lumière chemine horizontalement. Les lames sont maintenues dans leurs couronnes par trois vis serrées sur la tranche

2) Montage utilisé pour l'observation.

Ce montage est tout-à-fait analogue à celui que nous utilisons pour l'observation des franges du coin d'air. La figure 7 en donne un schéma : la source est une lampe à vapeur de cadmium. Le système condenseur en donne une image sur le diaphragme d où l'on place un filtre f isolant la raie verte. Un collimateur envoie sur les lames un faisceau parallèle. Un système projecteur forme l'image des lames sur l'écran E où il est possible de placer une plaque photographique ou un verre dépoli.

3) Fonctionnement du système.

a - Déplacement de la lame mobile .

Il est essentiel que pendant le déplacement, la lame mobile du Fabry-Perot reste parallèle à la lame fixe , ou tout au moins que les défauts de parallélisme ainsi introduits restent bien inférieurs aux autres défauts. On peut dire

que les déplacements de deux points diamétralement opposés de la lame ne doivent pas différer de plus de $\lambda/100$, c'est-à-dire doivent être égaux à 2 % près puisque la lame doit se déplacer de $\lambda/2$.

L'évaluation de ces erreurs de parallélisme peut se déduire de l'observation des franges d'égale épaisseur avant et après un déplacement de $\lambda/2$. Si la translation a été parfaite les franges qui réapparaissent coïncident exactement avec les premières, sinon on peut déduire du décalage entre deux franges correspondantes une valeur de l'angle de rotation de la lame mobile. (3).

Pour corriger un défaut de parallélisme il est possible de déplacer le point d'application de la force exercée sur la membrane métallique. Celui-ci étant matérialisé par une bille mobile. D'autre part on doit connaître avec précision la valeur du déplacement de la lame mobile.

Le poussoir agissant sur la lamelle métallique et par là sur la membrane souple qui porte la lame mobile, est entraîné par une came d'Archimède. On détermine au préalable l'angle dont doit tourner cette came pour que la lame se déplace de $\lambda/2$. Supposons qu'il soit égal à 300° , une rotation de 1° correspond donc à un déplacement de $\lambda/600$. En fait la précision du système conduit à tourner la came d'au moins 5° pour passer d'une courbe de niveau à la suivante c'est-à-dire à imposer un déplacement de la lame d'au moins $\lambda/120$.

b - Finesse.

La précision du tracé est aussi limitée par la largeur des franges observées. En effet, l'œil ou la plaque photographique voient pour une position donnée de la lame mobile, tous les points pour lesquels la transmission est supérieure à une certaine fraction $1/k$ de la transmission maximum.

Si $k = 2$ ce sont les points où l'épaisseur du Fabry-Perot est comprise dans l'intervalle $d_l = \frac{1}{N} \cdot \frac{\lambda}{2}$. Or d_l doit être inférieur à la distance λ/n des courbes de niveau, c'est-à-dire que la finesse doit être au moins égale à $n/2$ (N supérieur à 60 pour le tracé des courbes de $\lambda/120$ en $-\lambda/120$). D'autre part l'épaisseur du Fabry-Perot est ici beaucoup plus grande (de l'ordre du $1/10$ mm) que dans le dispositif du coin

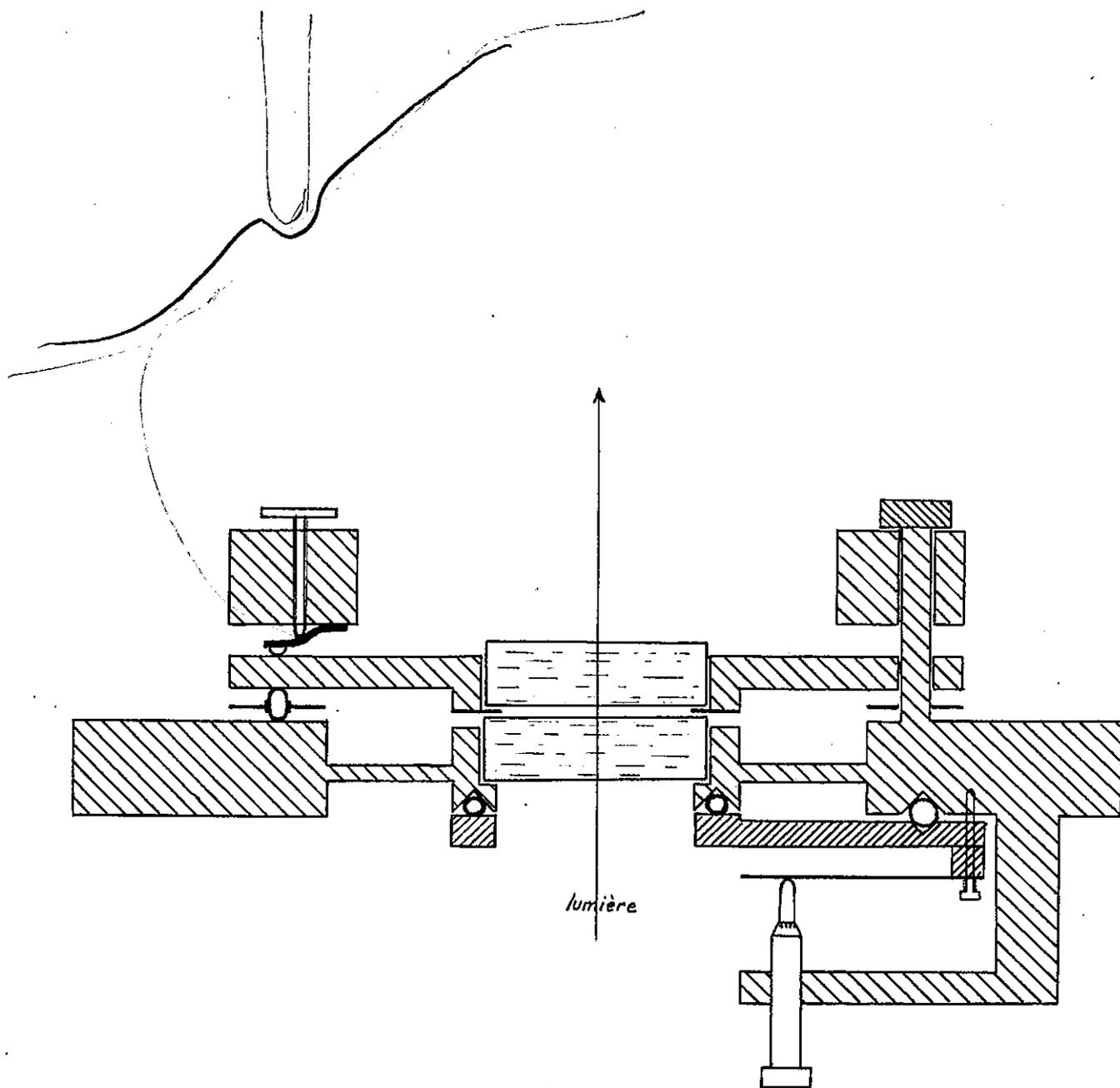


fig. 9

Monture à déplacement mécanique
et Lames horizontales

d'air, ce qui oblige à prendre une source à raies d'émission plus fines ; c'est ce qui nous a fait choisir une source au cadmium au lieu de la source à mercure haute pression. Enfin nous avons vu dans la discussion de la précision du relevé des franges du coin d'air que la photographie conduisait à une finesse apparente 2 à 3 fois plus petite que la finesse réfléchissante. Avec des argentures à 95%, donc une finesse réfléchissante de 60, et une finesse apparente qui ne dépasse pas 25, On est conduit à choisir des courbes de niveau au moins distantes de $\lambda/50$ environ. À titre d'exemple on peut voir (fig. 8) deux franges d'égale épaisseur traçant deux courbes de niveau distantes de $\lambda/50$ environ. La lame observée présentait par rapport à l'étalon une courbure de l'ordre de $\lambda/25$.

c - Déformation des lames.

Nous avons dit au début que les lames étaient maintenues dans leurs couronnes par 3 vis à 120° serrées sur la tranche. Nous avons montré aussi, à propos des franges du coin d'air, combien ce mode de soutien déformait les lames. Par conséquent les courbes de niveau observées sont celles de lames beaucoup plus éloignées de l'état idéal que dans le dispositif du coin d'air. Par contre, cet état est plus proche de l'état où se trouvent les lames lors de leur utilisation dans le spectromètre Fabry-Perot horizontal. Toutefois les utilisateurs tendent à préférer maintenant le spectromètre Fabry-Perot où la lumière se déplace verticalement et où les lames, soutenues simplement par des supports annulaires sont très proches de leur état idéal. Cette raison et le fait que les observations pour être reproductibles doivent se faire sur des lames dépourvues de contraintes, nous ont conduit à imaginer une monture en tout point analogue à celle de R. Chabbal mais où les lames sont horizontales. La figure 9 en donne un schéma. La principale difficulté résidait dans le mode de suspension de la lame fixe qui devait permettre de rapprocher les lames suffisamment jusqu'à une distance de l'ordre de $1/10$ mm. Il semble à ce point de vue qu'un anneau de clinquant puisse être satisfaisant. D'autre part, il semble préférable d'utiliser, pour actionner le poussoir agissant sur la lamelle métallique, une vis micrométrique. Cette dernière présente un jeu beaucoup plus faible que le dispositif démultiplicateur et la came d'Archimède.

et son encombrement est aussi beaucoup plus réduit.

Conclusion.

La modification précédente n'ayant pas été réalisée, l'appareil existant n'a pas été étudié et utilisé autant qu'il aurait fallu. Son maniement est en effet plus délicat que celui du système du coin d'air et s'il donne des résultats plus complets, ceux-ci sont longs et difficiles à obtenir.

Il semble certain cependant que son emploi se généralisera, en particulier quand on utilisera, au lieu d'argentures, des coatings qui permettront d'atteindre des finesses plus élevées. En fait, la finesse reflectrice doit être adaptée à la qualité des lames observées et être d'autant plus grande que cette qualité est meilleure.

III° Partie

REALISATION de REPRODUCTIONS de LAMES à QUALITES .. INTERFEROMETRIQUES

Le travail effectué cette année aux laboratoires de BELLEVUE, en collaboration avec M. Golman technicien du C.N.R.S. , a surtout porté sur la mise au point d'une technique de reproduction ; c'est la raison pour laquelle nous nous étendrons sur les détails pratiques. Nous exposerons ensuite les premiers résultats obtenus, mais en soulignant bien que ceux-ci ne constituent pas ce que l'on peut espérer de meilleur, mais au contraire, des premiers essais qui seront sans aucun doute améliorés.

I. PRINCIPE de la METHODE .

Dans son principe, la méthode proposée n'est pas une nouveauté. Elle a été décrite par MM. SEYA et GOTO (4) pour la fabrication de répliques de réseaux. Il s'agit de réaliser une réplique d'une surface de verre, de la même manière qu'on réalise un moulage dans d'autres domaines. On dépose sur le verre une couche peu adhérente et mince qui respecte la surface. On étend dessus une substance fluide adhésive et on recouvre d'une lame de verre. Le fluide durcit et reste fixé à la lame de verre, support de la réplique, alors qu'il se sépare de la matrice par décollement de la couche peu adhérente. La couche peu adhérente introduit ainsi un plan de moindre résistance où se produit la séparation entre les deux lames de verres. Elle est formée d'une ou deux couches métalliques ; une , si elle adhère mal au verre, deux dans le cas où la première adhère bien au verre et la deuxième mal sur la première.

Dans la méthode de Seya et Goto le décollement se produisait entre deux couches d'aluminium, ici on a utilisé le décollement entre verre et cuivre, argent ou or et entre Aluminium et aluminium, cuivre , argent ou or.

Hass (5) a aussi utilisé le décollement entre verre et argent ou cuivre pour la fabrication de répliques de miroirs entièrement constitués de résines.

2. ETAPES SUCCESSIVES de la REALISATION.

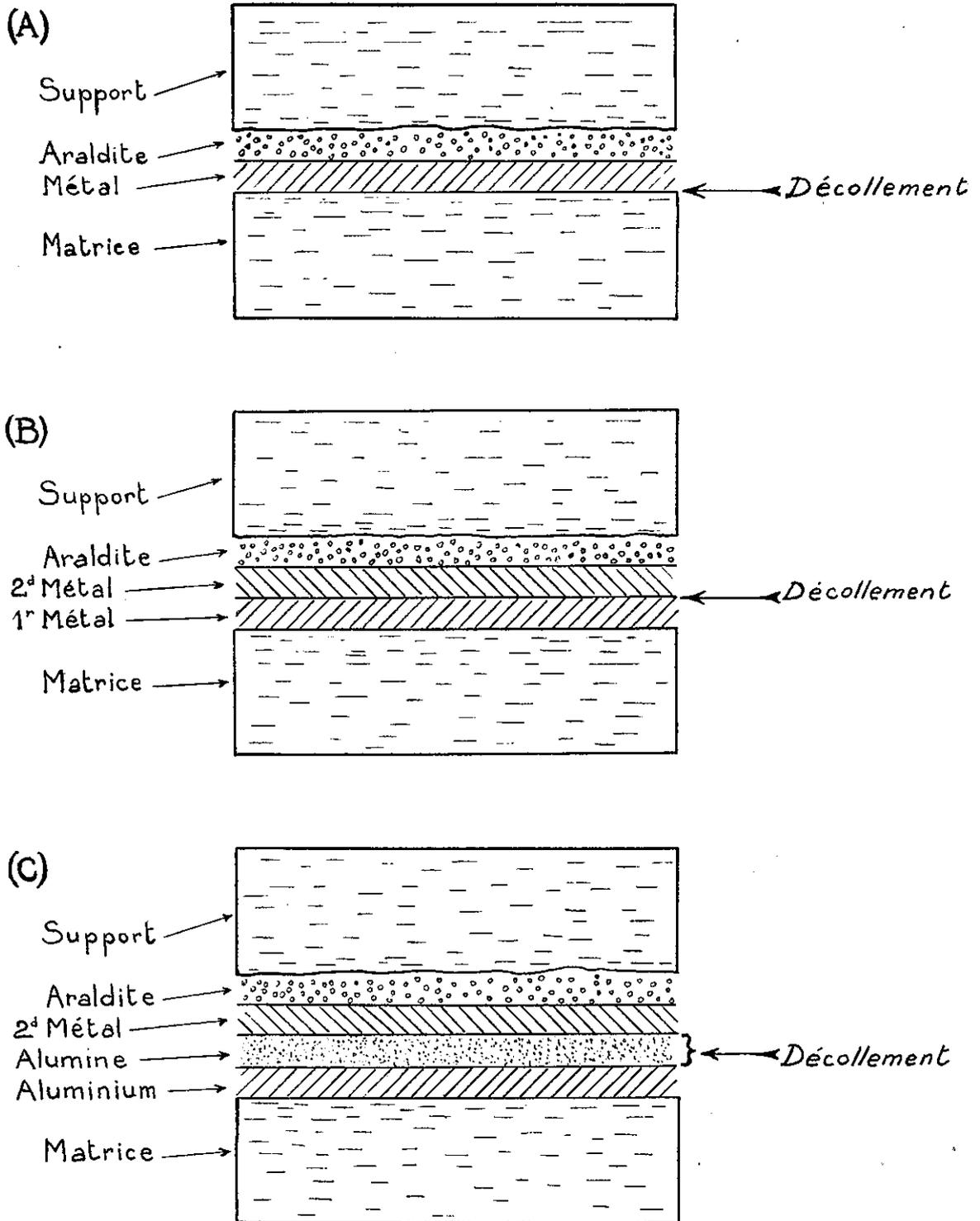
1). En premier lieu on doit nettoyer rigoureusement la surface de verre que l'on se propose de répliquer. Ceci est fondamental pour que le dépôt métallique soit uniforme donc n'introduise pas de défauts de planéité.

2). Le dépôt métallique s'effectue ensuite par évaporation sous vide de l'ordre de 10^{-5} mm de mercure. Pour l'aluminium on utilise des cavaliers sur fils de Tungstène. Pour cuivre, argent et or on place le métal dans des creusets en molybdène.

3). L'adhésif utilisé fut d'abord une résine épikote, mais on la remplaça par un autre produit à pouvoir adhésif plus grand : l'araldite 103 avec le durcisseur H Y 951 dans la proportion d'environ 8 % . L'araldite se présente comme un liquide très visqueux, jaunâtre. Le durcisseur est aussi jaunâtre mais plus fluide. Les deux produits sont transparents. Lors du mélange il s'introduit de nombreuses bulles d'air qu'il importe de faire disparaître. On y arrive en chauffant doucement le mélange vers 40-50° , sous pression réduite. Le mélange ainsi préparé doit être utilisé très vite car il risque de se polymériser du fait qu'il a été chauffé.

4). Le produit est versé simplement sur la matrice recouverte de sa couche métallique. Pour favoriser l'étalement de la colle, il est bon de porter le tout (matrice, colle et support de verre) à une température voisine de 40°. Il est nécessaire de mettre assez de produit pour que la goutte déborde largement. Au début, nous n'avions pas pris cette précaution et nous mettions simplement une goutte au centre, laissant le soin, à la lame de verre placée dessus, de l'étendre jusqu'au bord. Mais chaque fois une auréole blanchâtre se formait qui restait accrochée au verre à la périphérie de la goutte primitive. Cette auréole est due à l'action de la vapeur d'eau sur l'araldite ainsi qu'à la dissolution d'une multitude de bulles d'air au moment où la lame de verre touche la goutte.

Fig. 10 - Schémas de la reproduction des lames



En opérant comme il a été dit plus haut, le chauffage des verres élimine une grande partie de la vapeur d'eau et des bulles d'air accrochées à la surface et d'autre part, l'araldite en débordant, rejette l'auréole qui pourrait se former à l'extérieur.

5). Le collage ainsi réalisé, on laisse la polymérisation se produire à température constante. A 40° il faut de 14 à 24 H., à 25° , il faut attendre au moins 48 H.

Quand la polymérisation est terminée, ce que l'on vérifie dans un tube contenant la même araldite et placé aussi dans l'étuve, on passe au décollement.

6). Le décollement de la réplique s'opère plus ou moins facilement suivant la technique employée (fig. 10).

A. Une couche métallique (fig. 10 A)

Dans le cas où il n'y a qu'une couche métallique, le décollement se produit entre le verre et le métal. Cette technique a été utilisée avec succès, le métal étant l'argent ou mieux le cuivre ou encore mieux l'or. On a essayé aussi, une couche d'aluminium, mais ce dernier est trop adhérent au verre et il arrive le plus souvent que le décollement ne se produise pas, ou se produise au prix de multiples éclats.

B) Deux couches métalliques.

L'intérêt des deux couches métalliques est que l'on obtient ainsi des décollements plus faciles. Ceux-ci se produisent entre les deux métaux. On choisit évidemment ces deux métaux de sorte que le décollement ne se produise pas entre le verre et le premier ; l'évaporation d'une deuxième couche serait alors une complication inutile.

Or on a vu ci-dessus que l'aluminium adhérerait très bien au verre, il semble donc tout indiqué pour constituer la première couche.

Il y a une autre importante raison qui fait prendre la première couche en aluminium. C'est le fait que la méthode de reproduction peut être étendue aux réseaux et que la plupart de ceux-ci sont fournis recouverts d'aluminium. Ainsi c'est toujours l'aluminium qui sert de première couche et le décollement dépend à la fois de la nature et des conditions d'évaporation de la deuxième couche.

a- Aluminium sur aluminium. L'expérience montre que si la deuxième couche est évaporée sur la première sans laisser rentrer l'air dans la cloche à vide entre les deux, c'est

à-dire en évitant toute oxydation de la première couche, le décollement ne se produit pas. Si, au contraire, on laisse rentrer l'air dans la cloche après l'évaporation de la première couche. Il y a décollement entre les deux.

Ces deux résultats conduisent à attribuer le décollement à l'alumine qui se forme sur la première couche séparant celle-ci de la seconde (fig. 10 C). Le décollement se produit ainsi, soit à cause de la fragilité de l'alumine, soit à cause de sa faible adhérence sur l'une ou l'autre couche d'aluminium.

b- Argent, cuivre ou or sur aluminium. L'expérience montre dans ces cas que : avec ou sans entrée d'air entre l'évaporation des deux couches, le décollement se produit bien entre elles. Il n'y a donc pas lieu de faire intervenir le rôle de l'alumine. On peut considérer comme suffisante la discontinuité qui existe à l'échelle atomique quand on passe de la couche d'aluminium à la couche d'argent, de cuivre ou d'or (fig. 10 B).

Cette discontinuité n'existait pas, on l'a vu, ou était insuffisante entre deux couches d'aluminium évaporées successivement sans entrée d'air. Le décollement devient plus facile quand on passe de l'argent au cuivre et à l'or. Il reste toujours plus facile que lorsque ces métaux sont utilisés seuls. Le décollement ainsi réalisé, la méthode à une couche métallique, redonne la matrice telle qu'elle était à l'origine et la méthode à deux couches métalliques la redonne couverte d'aluminium (dans le cas d'un réseau, la matrice était aluminée à l'origine et après réplique elle a gardé son aluminium). Quant à la réplique (couche d'araldite collée sur verre) elle est couverte d'aluminium, argent, cuivre ou or suivant les cas.

7). Pour permettre l'utilisation ultérieure, il y a lieu d'oter les couches métalliques. Sur la matrice, le nettoyage est moins délicat grâce à la bonne résistance du verre aux agents chimiques et mécaniques. Sur la réplique le nettoyage est toujours très délicat car l'araldite est assez fragile. Elle se raye facilement par le papier Joseph et même le coton et de plus elle supporte très mal les acides.

A). L'aluminium ne se dissout facilement que par la potasse très concentrée. Pour éviter les risques d'attaque de l'araldite il est préférable d'amalgamer d'abord par le chlorure mercurique et de rincer par la potasse peu concentrée ensuite.

B). L'argent n'est attaquable facilement que par l'acide nitrique et chaque fois que nous l'avons utilisé, l'araldite a été profondément dépolie. C'est une raison qui a elle seul nous a fait abandonner l'utilisation de l'argent.

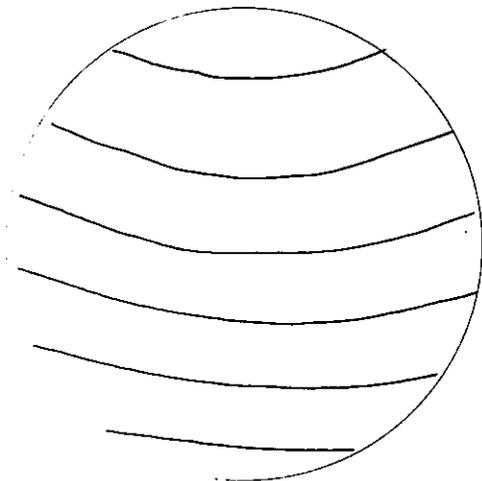
C). Le cuivre est attaquable par l'acide nitrique (même inconvénient que ci-dessus) et par l'ammoniaque à l'air lentement. On préfère amalgamer le cuivre par le chlorure mercurique et rincer par la potasse. La potasse étant ici un peu plus concentrée que pour l'aluminium.

D). L'or se dissout facilement dans le mercure, l'action est instantanée. On rince ensuite à l'eau. L'enlèvement de la couche métallique sur une réplique doit se faire le plus tôt possible après le décollement. Cette nécessité n'apparaît pas tellement avec aluminium, argent et or mais il est probable qu'elle existe à une échelle réduite. Elle est évidente, par contre, avec le cuivre.

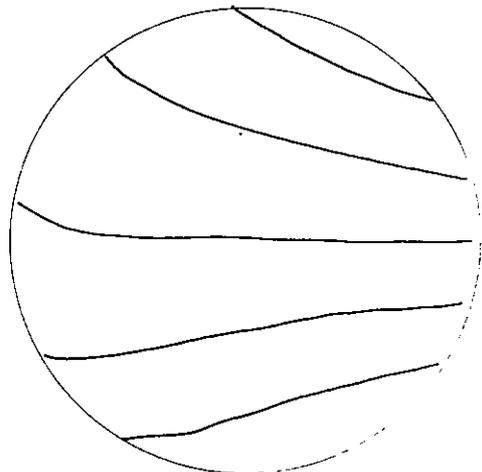
Si on laisse une réplique, couverte de cuivre, après le décollement, il apparaît très vite à sa surface de fines craquelures qui forment un réseau très serré. Le cuivre semble partagé en morceaux irréguliers sans se détacher de l'araldite. Ces craquelures sont dues semble-t-il à une contraction du cuivre beaucoup plus rapide que celle de l'araldite. Comme cette araldite est collée au verre et d'épaisseur 1 à 3/100 mm, on comprend qu'elle ne se contracte pas aussi vite que la couche de cuivre d'environ 100 Å d'épaisseur. Les lignes de ruptures du cuivre restant imprimées à la surface de l'araldite sous forme de sillons, la réplique est inutilisable. On ne s'expose pas à cet inconvénient si le cuivre est ôté avant que ce phénomène ne se produise.

3. RESULTATS OBTENUS au cours des ESSAIS de REPLIQUES de LAMES .

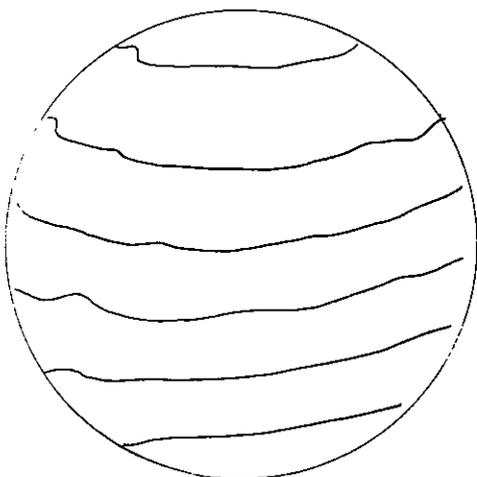
De nombreux essais ont été faits pour étudier chaque fois une étape particulière de la réalisation des répliques. Ainsi quand nous portions notre attention sur la facilité de décollement d'un métal, il nous arrivait de négliger la suite du processus et de ne pas attacher d'importance à la qualité de la réplique obtenue. C'est ce qui explique que les



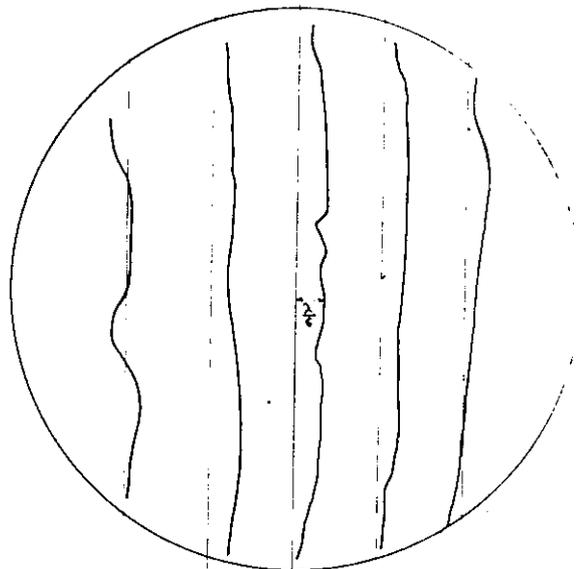
111 *Etalon-Matrice*



112 *Etalon-Support*

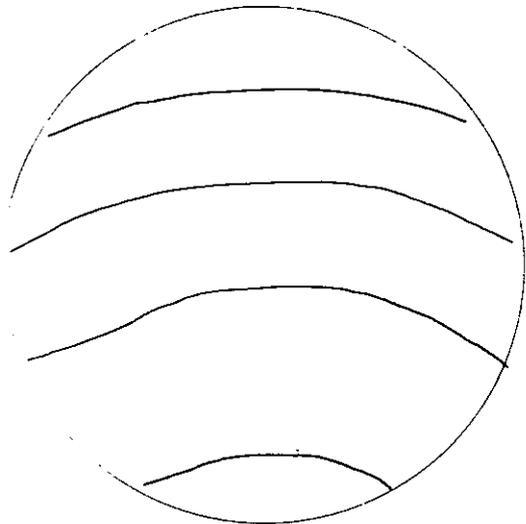


113 *Etalon-Réplique*

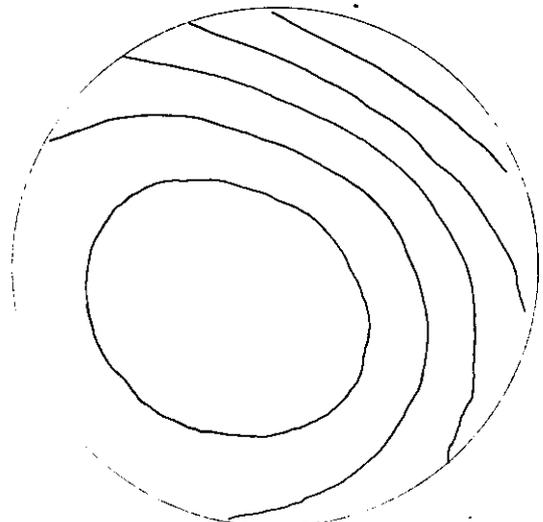


114 *Matrice-Réplique*

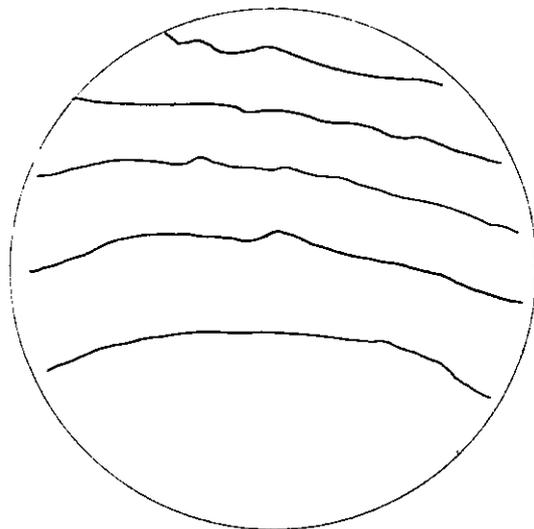
Fig. 11
Essai du 13-11-59



121 Etalon-Matrice



122 Etalon-Support



123 Etalon-Replique

fig.12 - Essai du 16-11-59

résultats que nous allons exposer ne soient pas tous concluants. Chaque fois nous nous efforcerons de trouver une explication aux défauts observés et par suite, nous dirons ce qui doit être fait pour avoir une bonne réplique. Cette bonne réplique de lame n'a, en fait, pas été obtenue par suite du manque de temps. Son obtention constitue l'étape suivante du travail effectué cette année.

Essai du 13-11-1959

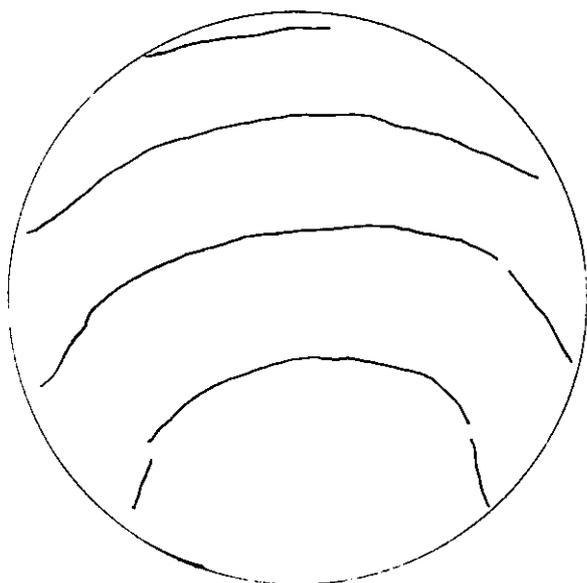
Cet essai est l'illustration d'un mode d'utilisation des répliques même non planes. Supposons que deux lames soient courbes. Si l'une s'encastre exactement dans l'autre, l'épaisseur entre les deux est constante et ces deux lames, dans un spectromètre Fabry-Perot, se comportent comme deux lames planes. Il en est de même si il ne s'agit pas de courbure, mais de défauts irréguliers ; il suffit que les défauts soient complémentaires. Or la technique des répliques se prête particulièrement bien à la fabrication de lames complémentaires. Dans cet essai l'étalon étant une lame plane de référence, la matrice possède une courbure à peu près régulière. Le support de verre de la réplique est quelconque. La réplique une fois réalisée montre une courbure semblable à celle de la matrice. Et l'observation de la matrice et de la réplique montre une disparition de la courbure. Seuls des défauts locaux, viennent limiter la qualité de cette paire de lames. Cette réplique a été faite avec deux couches d'aluminium et rentrée d'air entre les évaporations.

Essai du 16-11-1959 .

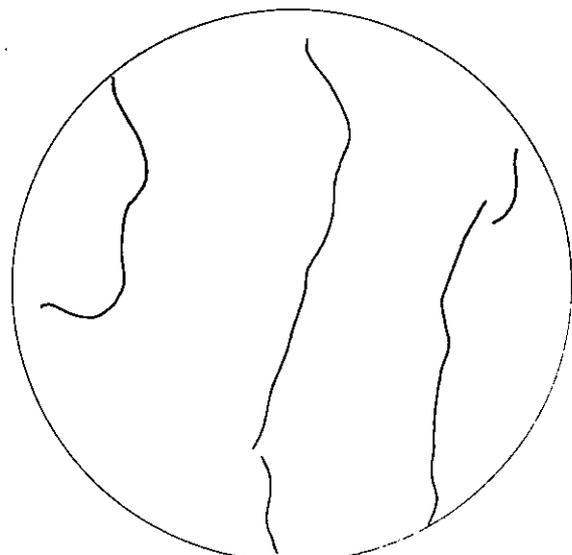
Figure 12. L'étalon étant une lame plane de référence. La matrice présente une courbure à peu près régulière. Le support est courbe lui aussi mais sa qualité est nettement plus mauvaise. La réplique, réalisée à une couche d'argent a une forme qui se rapproche beaucoup de celle de la matrice. De plus sa qualité par rapport au support est nettement améliorée. Les défauts dus au nettoyage par l'acide nitrique sont ici assez faibles.

Essai du 23-11-1959 .

Figure 13. Ici on a seulement tracé les franges du couple matrice-support et matrice-réplique. Cette réplique étant faite à une couche d'argent et, nettoyé à l'acide nitrique, sa surface est grandement détériorée.



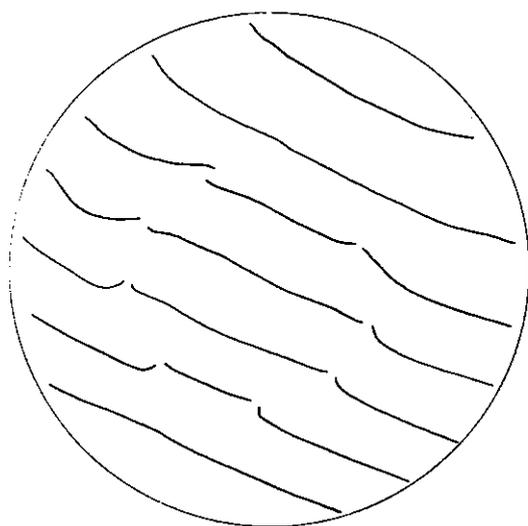
13-1 *Matrice-Support*



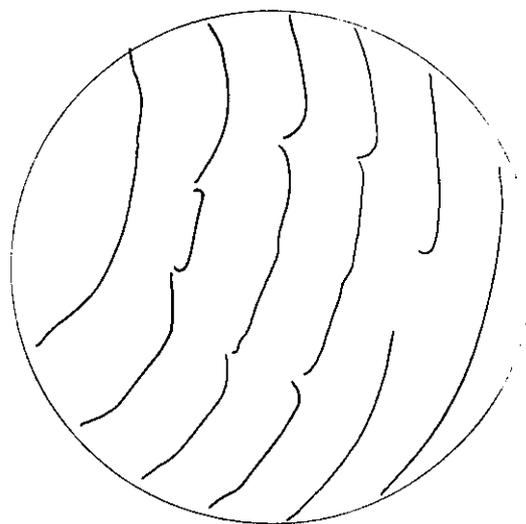
13-2 *Matrice-Réplique*

Fig. 13

Essai du 23-11-59



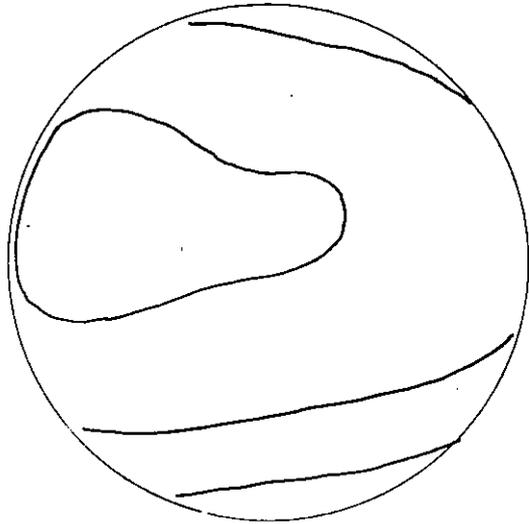
14-1



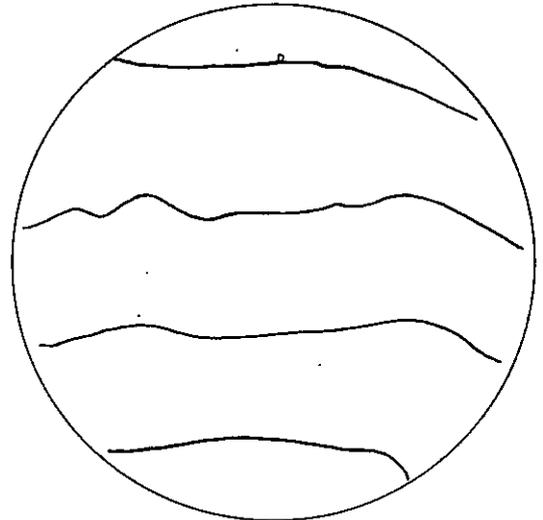
14-2

Fig. 14

Auréole sur l'araldite
3-2-60

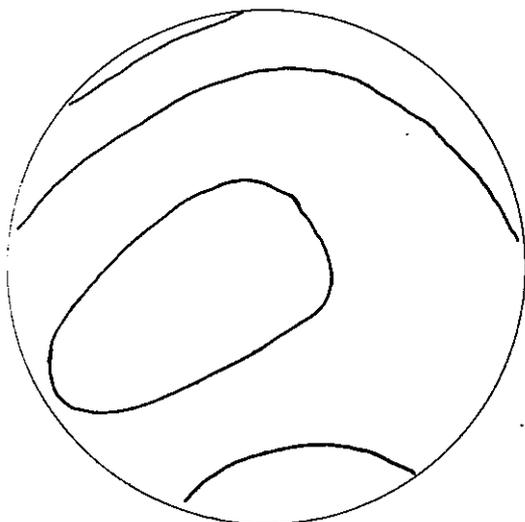


15.1 *Matrice-Support*

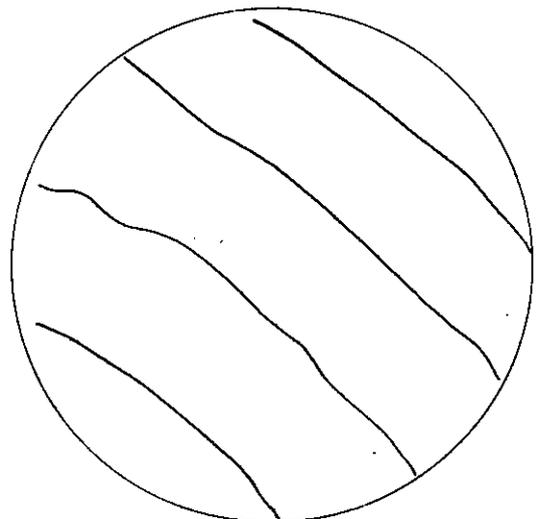


15.2 *Matrice-Réplique*

fig. 15
Essai du 3-2-60

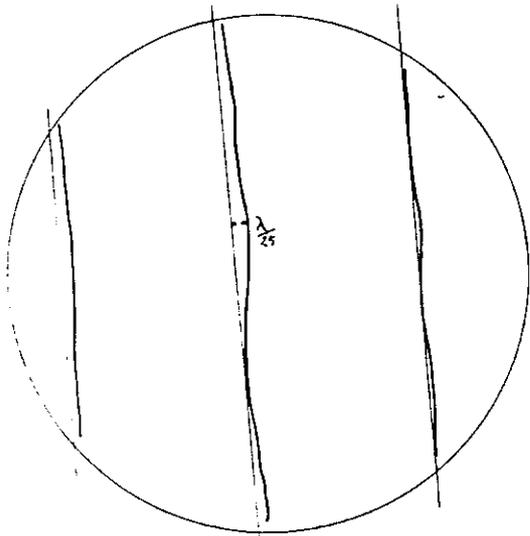


16.1 *Matrice-Support*

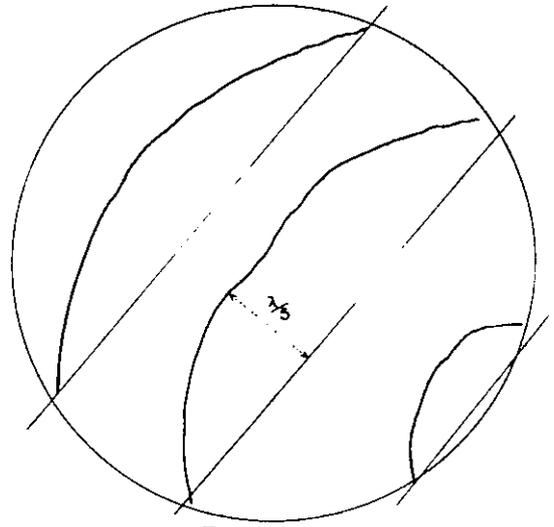


16.2 *Matrice-Réplique*

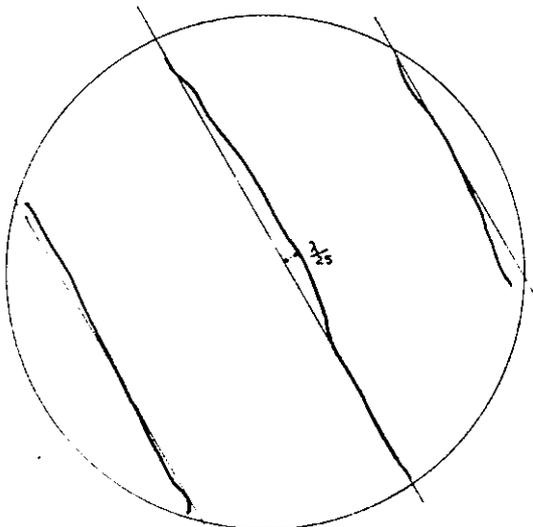
fig. 16
Essai du 3-2-60



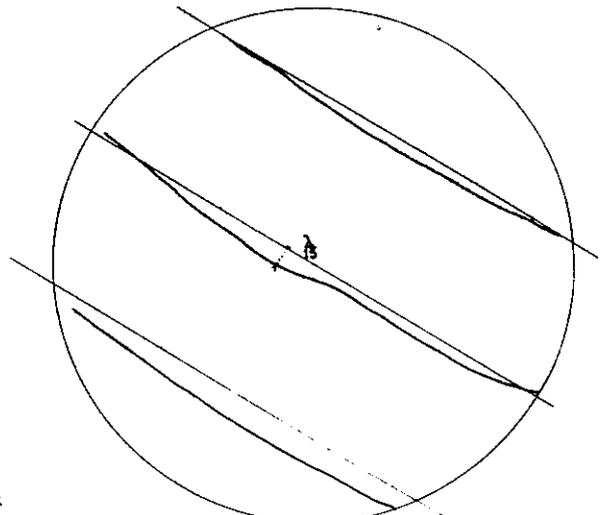
17-1 Etalon-Matrice
Avant



17-2 Etalon-Support

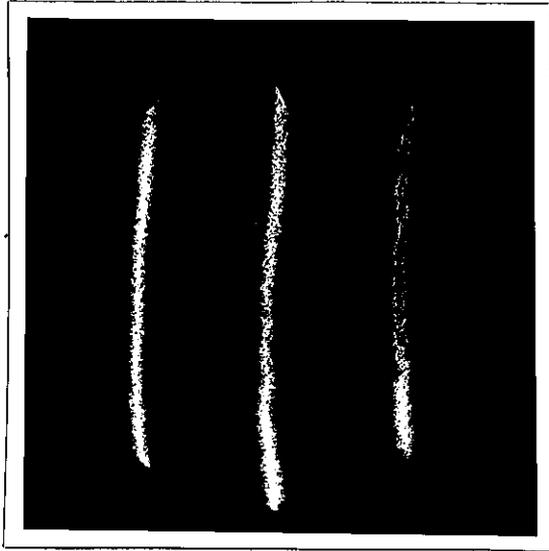


17-3 Etalon-Matrice
Après

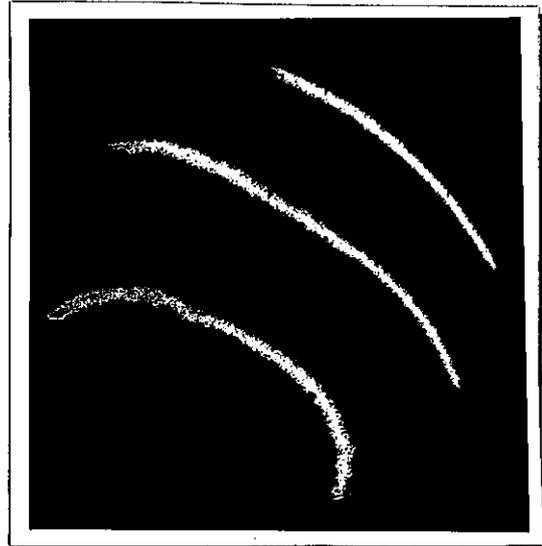


17-4 Etalon-Réplique

Fig. 17
Essai du 5-4-60



18-1 Etalon-Matrice



18-2 Etalon-Support



18-3 Etalon-Réplique

Fig. 18 - Essai du 5.4.60

La qualité de l'ensemble passe cependant de $\lambda/2$ à $\lambda/6$ environ.

Essai du 3-2-1960 .

Fig. 14 . Cette réplique a été réalisée avec deux couches d'aluminium sans prendre la précaution signalée antérieurement qui consiste à verser un excès d'araldite. Une auréole s'est formée et elle se traduit ici par une discontinuité sur la surface.

Fig. 15 . Réplique à une couche de cuivre. La qualité du support de verre par rapport à la matrice est λ environ. Après réplique ce même couple a la qualité $\lambda/6$ environ.

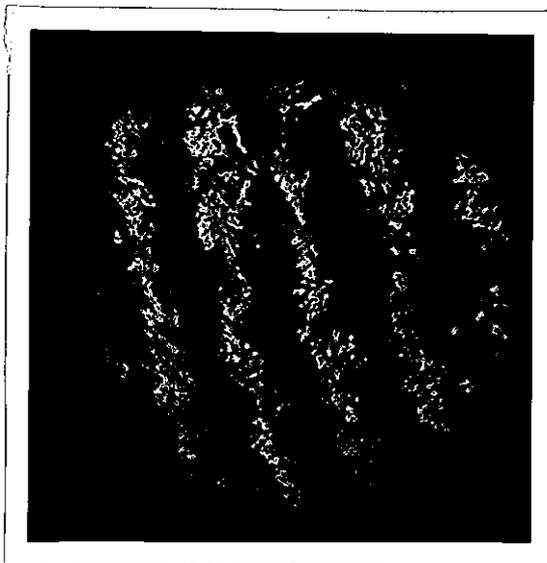
Fig. 16. Réplique à deux couches d'aluminium. La qualité du support de verre passe de λ avant à $\lambda/6$ environ après la réplique par rapport à la matrice.

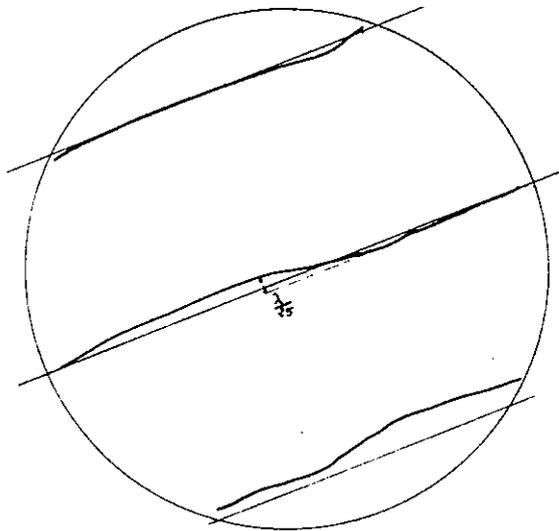
Essai du 5-4-1960 .

Fig. 17 et 18. Réplique à une couche de cuivre sur une couche d'aluminium. Par rapport à un étalon de très bonne qualité, et qui ne sert pas dans la réplique proprement dite, la lame matrice montre une qualité $\lambda/25$, la même avant et après la réplique donc elle n'a pas été détériorée.

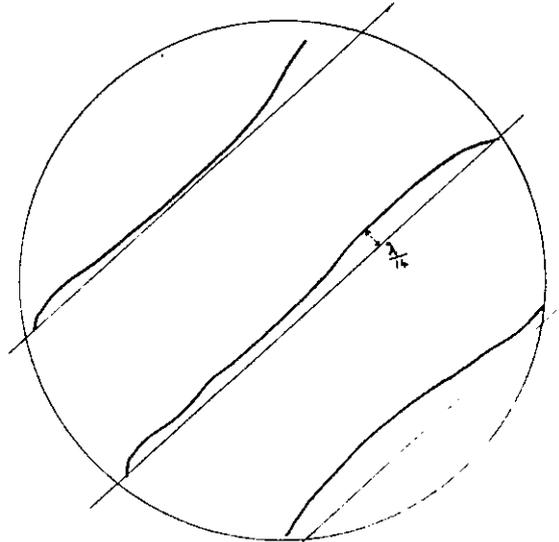
Le support de la réplique par rapport au même étalon a une qualité de $\lambda/3$. La réplique obtenue est un peu moins bonne que la matrice : $\lambda/15$. On note un faible dépoli qui est sans doute dû à une polymérisation incomplète lors du décollement et qui s'est poursuivie ensuite. La photographie fig. 18-3 , montre l'influence de ce dépoli sur les franges du coin d'air.

Essai du 18-4-1960. fig. 19.

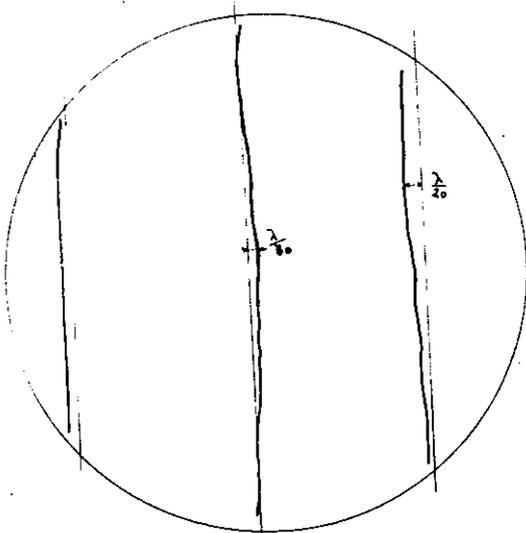




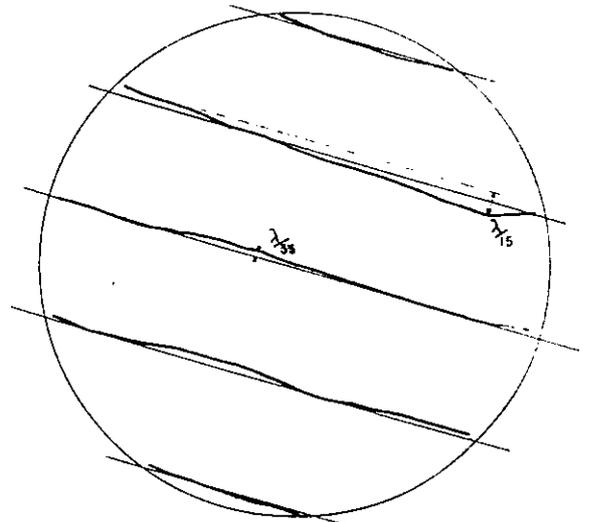
201 Etalon-Matrice



202 Etalon-Support



203 Etalon-Réplique



204 Matrice-Réplique

fig. 20
Essai du 24-4-60

Le défaut précédent qui a entraîné un faible dépoli, s'est aggravé ici et le dépoli est beaucoup plus profond.

Les photographies de la figure 19 montrent son influence sur les franges avec deux interfranges différents.

Essai du 24-4-1960.

Figure 20. Réplique à une couche d'or sur une couche d'aluminium. Par rapport à un étalon : la matrice est à $\lambda/25$, la lame qui sert de support est à $\lambda/14$.

Après la réplique, la matrice est toujours à $\lambda/25$ et la réplique est d'une qualité identique. La matrice et la réplique observées ensemble montrent une qualité du même ordre. On observe encore, comme le 5-4-60, un faible dépoli qui semble s'aggraver quand les lames sont observées à une température un peu supérieure.

4. REPLIQUES de RESEAUX.

En même temps que se poursuivaient les essais de répliques de lames nous avons tenté d'appliquer la même technique à des réseaux. Nous avons choisi des réseaux Bausch et Lomb de 32 x 32 mm à 600 traits au millimètre.

Lors du premier essai, la matrice était une réplique de réseau fournie par le fabricant. Dans les essais suivants nous avons utilisé comme matrice des répliques fabriquées au cours des essais précédents. De cette manière nous avons réalisé un certain nombre de répliques de réseaux qui semblent avoir les mêmes qualités de luminosité que le réseau original. Cependant, comme là n'était pas le but de notre étude, les qualités des répliques n'ont pas été étudiées à fond ; en particulier, elles ne l'ont pas été en cours d'utilisation.

5. CONCLUSION .

A la suite de tous ces essais, nous avons réalisé des répliques de lames faiblement dépolies mais dont la qualité atteignait tout de même $\lambda/20$. Nous avons réalisé aussi des répliques de réseaux apparemment de bonne qualité. On peut donc conclure que la technique dans son principe et dans la réalisation du décollement est au point. Il subsiste cependant

le défaut de micropoli observé sur les répliques de lames. Celui-ci n'est pas très gênant pour les réseaux et pour les lames devant être utilisées dans un Michelson.

Par contre, pour les lames de Fabry-Perot, il y a lieu de prendre toutes précautions afin de le supprimer ou tout au moins de le réduire au maximum. Par exemple en laissant l'araldite se polymériser à froid très longtemps pour éviter une déformation d'origine thermique ou bien en utilisant une substance adhésive plus résistante comme certaines résines polyester.

CONCLUSION

Nous avons essayé de mettre en évidence l'importance des lames planes en spectroscopie interférentielle et en particulier dans le spectromètre Fabry-Perot où les performances sont fonctions directement de la qualité des lames.

Nous avons ensuite exposé deux méthodes qui permettent plus ou moins complètement, de connaître la qualité d'une lame par l'observation des franges localisées d'égale épaisseur. Nous avons enfin décrit, dans le détail de sa technique, une méthode de reproduction de surfaces. Cette technique a été appliquée surtout aux lames planes devant être utilisées, soit dans un Michelson soit dans un Fabry-Perot. Elle a été appliquée aussi à la réplique de réseaux et, bien qu'aucune tentative poussée n'ait été faite cette année dans ce sens, elle est applicable aussi à la réplique de lames d'un Fabry-Perot sphérique.

Cette étude devrait être complétée maintenant par la réalisation d'un montage simple, utilisant la monture de Fabry-Perot à lames horizontales et déplacement mécanique, qui servirait à avoir une idée précise de la topographie des lames. D'autre part la technique de réalisation des répliques doit encore être améliorée pour permettre à coup sûr la fabrication de très bonnes lames de Fabry-Perot.

Enfin la fabrication de répliques de réseaux devrait s'accompagner d'une vérification de leurs qualités, et c'est encore l'utilisation, dans un spectrographe, qui donnera les meilleurs résultats.

TABLE des MATIERES

Introduction.	1
<u>I° Partie : Spectromètre Fabry-Perot. Coefficient de finesse limite</u>	2
I. Fonctionnement du spectromètre Fabry-Perot	2
II. Limitation des qualités par les défauts des lames	3
A. Limitation de la finesse enregistrée	3
B. Perte de luminosité due aux défauts de surface.	4
III . Conclusion	5
<u>II° Partie : Contrôle de la Planéité des lames.</u>	6
I. Observation des franges du coin d'air.	6
1. Principe	6
2. Réalisation d'un montage.	6
3. Précision des mesures	7
II. Utilisation d'une monture de F.P. à déplacement mécanique.	10
1. Principe. Description de la monture.	10
2. Montage utilisé pour l'observation.	11
3. Fonctionnement du système.	11
a) Déplacement de la lame mobile	11
b) Finesse	12
c) Déformation des lames	13
Conclusion.	14
<u>III° Partie : Réalisations de reproductions de lames à qualités interféro. métriques.</u>	15
1. Principe de la méthode.	15
2. Etapes de la réalisation	16
3. Résultats obtenus au cours des essais de répliques de lames.	19
4. Répliques de réseaux.	22
5. Conclusion.	22
<u>CONCLUSION.</u>	24

BIBLIOGRAPHIE

- | | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------|
| (1) . R.Chabbal | Journal des recherches du C.N.R.S. | 1953 - 24 |
| (2) . R.Chabbal | Journal de Physique et le Radium | 1958 - 19 |
| (3) . R.Chabbal | Thèse | Paris 1957 |
| (4) . Seya et Goto | Sciences of Light | 1956 - 5 n° 2. |
| (5) . Hass et Erbe | Journal of the Opt. Soc. of America | 1959 - 49 n° 10. |

2ème S U J E T

LE CHOIX DE LA RADIATION QUI DEVRA DÉFINIR
LE NOUVEL ÉTALON PRIMAIRE DE LONGUEUR.-

I N T R O D U C T I O N.-

Quand la Convention, en 1875, institua le système métrique, elle se préoccupa de définir un certain nombre d'étalons naturels auxquels elle rattacha les unités qu'elle venait de définir.

En ce qui concerne la mesure des longueurs, elle adopta comme étalon naturel la longueur du méridien terrestre. Le mètre fut défini comme la quarante millionième partie de la longueur d'un méridien ; une règle réalisant cette longueur d'un mètre fut construite et déposée aux Archives Nationales.

Quelques années plus tard, en 1889, une Commission Internationale réunie à PARIS constata que les dernières mesures géodésiques conduisaient à une valeur différente pour la longueur du méridien, de celle adoptée lors de la définition du mètre. Le mètre des Archives se trouvait avoir une longueur inférieure de 0,2 mm à la quarante millionième partie de la longueur du méridien. Afin de ne pas changer toutes les mesures effectuées jusque là, elle décida d'adopter le mètre des Archives comme étalon primaire de longueur ou plus exactement une copie qui en fut réalisée. Le mètre fut donc défini comme la distance à 0° C séparant deux traits sur le prototype en platine irridié sanctionné par la Conférence Générale des Poids et Mesures de 1889, et déposé au pavillon de Breteuil à SEVRES.

Ainsi l'étalon primaire de longueur était un étalon à traits. Ceux-ci étaient gravés sur un plan contenant les fibres neutres de la barre, c'est-à-dire que leur

.../...

distance n'était pas altérée par les flexions qui se produisaient éventuellement. Pour comparer l'étalon primaire de longueur à une copie on disposait les deux règles parallèlement et on visait successivement, avec des microscopes, les traits sur l'une puis sur l'autre. On appréciait de cette manière la coïncidence des traits ou on mesurait l'écart. On arrivait dans cette opération à assurer la coïncidence des traits à $0,1\mu$ près, donc à définir la longueur du mètre avec une précision de l'ordre du dix millionième (10^{-7}). Il est à noter que pour obtenir effectivement une telle précision la température de 0°C doit être déterminée à $0,001^{\circ}\text{C}$ près.

Les physiciens n'ont pas seulement à mesurer des longueurs définies par des repères matériels : il est fort important aussi de pouvoir mesurer les longueurs d'onde des radiations émises par les corps dans diverses circonstances. Pour ce faire il faut comparer le mètre étalon à la longueur d'onde que l'on cherche à mesurer. Il s'agit ici de mesure absolue. Ce problème a été résolu dès 1887-1889 par Michelson et Morley (1) qui utilisèrent le phénomène d'interférence pour réaliser une véritable graduation de l'espace. La mesure de la longueur d'onde se ramenant à un décompte des interférences couvrant la longueur du mètre-étalon.

Ainsi pour la raie rouge du Cadmium Michelson donna la valeur de la longueur d'onde = $\lambda = 0,6438470\mu$.

En 1906, Benoit, Fabry et Perot refirent cette mesure absolue de longueur d'onde de la raie rouge du Cadmium et trouvèrent à 0°C et 760 mmHg :

$$\lambda = 0,64384696 = 0,00000002\mu.$$

C'est cette longueur qui fut adoptée par les spectroscopistes comme étalon de longueur d'onde. Afin de se garantir contre des modifications ultérieures possibles résultant d'une plus grande précision, ils définirent une nouvelle unité : l'Angström (\AA) tel que la raie rouge du Cadmium a exactement comme longueur d'onde $\lambda = 6438,4696 \text{\AA}$.

.../...

Tant que les mesures de Benoit, Fabry et Perot seront considérées comme exactes le mètre vaudra exactement 10^{10} \AA .

A ce moment donc l'étalon primaire de longueur est le mètre étalon de SEVRES et la raie rouge du Cadmium constitue un étalon secondaire. Dès 1889 Michelson propose d'inverser cette situation et de choisir comme étalon primaire la longueur d'onde de la raie rouge du Cadmium, le mètre étalon devenant alors un étalon secondaire dont la longueur serait $\frac{1\ 000\ 000}{0,64384696}$ fois la longueur d'onde de cette raie. Cette idée ne fut pas acceptée à ce moment là, mais dernièrement la question s'est posée à nouveau de savoir si la longueur d'onde d'une raie particulièrement bien connue et monochromatique ne pourrait pas être érigée en étalon primaire de longueur. Elle présenterait l'avantage d'être facilement reproductible en n'importe quel lieu et on disposerait ainsi d'un étalon vraiment naturel. Il y a lieu cependant d'étudier la précision de la définition d'une telle longueur d'onde

PRECISION DE LA DEFINITION DES LONGUEURS D'ONDE.-

En attendant l'admission d'une longueur d'onde comme étalon primaire de longueur, on a utilisé des longueurs d'onde comme étalons secondaires et on les a comparées aux longueurs d'onde à mesurer.

Pour qu'une raie soit admise comme étalon on doit disposer d'une lampe émettrice d'un fonctionnement simple et sûr, la raie doit être aisément isolable et suffisamment intense, les interférences qu'elle peut donner doivent être visibles à une grande différence de marche, enfin la raie doit être reproductible fidèlement et être précisément définie.

Cette qualité de définition de la longueur d'onde d'une raie est fonction de plusieurs paramètres : d'abord la largeur de la raie spectrale considérée, ensuite la température, la pression et éventuellement le champ électrique ou magnétique

.../...

qui est à l'origine de l'émission de la raie, enfin sa structure hyperfine.

A) - LARGEUR NATURELLE DES RAIES SPECTRALES

Les atomes émetteurs de la raie considérée étant immobiles, et aucun champ n'intervenant, la raie émise a une certaine largeur dite naturelle.

Cette largeur naturelle s'explique en théorie classique par l'amortissement de l'oscillateur harmonique linéaire et en théorie quantique par la durée de vie Δt des états énergétiques qui introduit une incertitude ΔE sur les niveaux d'énergie.

D'après le principe d'incertitude d'Heisenberg on a $\Delta t \cdot \Delta E \approx h$

Or la relation de Planck donne la fréquence de la radiation émise par un atome passant de l'état d'énergie E_n à l'état d'énergie E_m : $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$

D'où la longueur d'onde de la raie. Si E_n et E_m sont déterminés avec une certaine imprécision, il en est de même de ν donc de la longueur d'onde λ . La largeur naturelle $\Delta \lambda_N$ d'une raie est faible, cependant le rapport $\frac{\Delta \lambda_N}{\lambda}$ est de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-9} .

Le pointé du centre d'une raie dont la largeur serait la largeur naturelle pourrait donc se faire avec une précision supérieure à 10^{-9} .

B) - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE (effet Doppler)

La largeur naturelle reste bien inférieure en fait à celle qu'entraînent d'autres causes d'élargissement dont la première par son importance est l'agitation thermique des atomes. Dans une source les atomes en mouvement présentent par rapport à l'observateur une vitesse radiale, il s'en suit un effet Doppler-Fizeau qui modifie la longueur d'onde émise par chaque atome et crée statiquement un élargissement de la raie.

Cette largeur Doppler dépend de la température et de la masse moléculaire.

On a
$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda} = 0,72 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

et $\Delta\lambda_0/\lambda$ est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} . Donc si on apprécie le centre d'une raie à 1/50 de sa largeur près, on arrive à une précision de l'ordre de 10^{-8} dans la définition de la longueur d'onde. Cette précision peut être améliorée en réduisant l'effet Doppler par l'utilisation du jet atomique comme nous le verrons plus loin.

Encore ces deux causes d'élargissement (élargissement naturel et effet Doppler) produisent-elles des raies symétriques, donc relativement faciles à pointer avec précision.

C) INFLUENCE DE LA PRESSION

Les chocs des atomes les uns contre les autres provoquent un élargissement des raies qu'ils émettent. Pour des pressions de l'ordre du cm de Mercure, on arrive à un élargissement voisin de celui dû à l'effet Doppler ou supérieur alors que l'élargissement dû à la pression peut être négligé quand on utilise des pressions de l'ordre du dixième de millimètre de Mercure. Mais la pression introduit un élargissement dissymétrique (2). C'est-à-dire que le centre de gravité de la raie est déplacé et de graves erreurs sont possibles si on utilise différentes sources ou les mêmes après des temps d'utilisation différents.

Par exemple avec le Krypton sous 1 mm de Hg le déplacement est en valeur relative de $6 \cdot 10^{-8}$. Si on n'est pas certain de la valeur de la pression à une fraction de mm de Hg près, il est donc illusoire de pointer le centre de la raie avec précision. On se placera plutôt dans le cas où le déplacement est minimum, c'est-à-dire ici à une pression inférieure à 0,05 mm de Hg, on a alors un déplacement inférieur à 10^{-8} .

D) INFLUENCE DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

Les variations du champ électromagnétique provoquant l'émission des raies induisent des variations de la longueur d'onde de ces raies. Ces variations sont au moins de 10^{-9} en valeurs relatives.

Nous verrons plus loin que ces variations on conduit W G Fastie à préconiser l'utilisation de raies d'absorption où aucun champ électromagnétique n'intervient.

E) STRUCTURE HYPERFINE DES RAIES

Les raies émises par les éléments naturels sont en général complexes car elles proviennent d'atomes différents ; les isotopes. Les masses différentes des noyaux et le spin non nul des noyaux de masse impaire entraînent une décomposition de la raie en multiples composantes quelquefois non résolues par les appareils interférentiels.

Cette structure hyperfine fut étudiée dès 1892 par A.A. Michelson (3) qui la déduisait de l'observation d'une variation de la visibilité des franges d'interférence avec la différence de marche.

En 1928 A.Pérard (4) a montré qu'une raie possédant une structure hyperfine non résolue était inutilisable en métrologie par suite d'une variation de la longueur d'onde apparente avec la différence de marche. Bien que cela soit souvent difficile, il est des cas où, partant d'une substance naturelle, il est possible d'isoler une composante hyperfine et d'utiliser seulement cette raie. C'est ainsi que MM. Cojan et Lemmier (5) ont isolé un certain nombre de composantes hyperfines des raies du Mercure naturel par filtrage magnétique. D'autre part un procédé graphique a aussi été utilisé à l'isolement d'une composante hyperfine : Mc Nally (6) ; Deverall Meisner Zissis (7). Cependant la solution la plus simple consiste maintenant à utiliser des sources monoisotopiques ; nous en verrons plusieurs exemples dans la suite.

F) LIMITATION INSTRUMENTALE DE LA PRECISION

Nous venons de voir des causes d'imprécision dans la définition de la longueur d'onde d'une raie (largeur naturelle, effet Doppler, pression, champ électromagnétique, structure hyperfines). Nous devons maintenant nous préoccuper de l'obtention réelle de cette raie. Autrement dit l'appareil d'analyse spectrale qui fournit la raie n'introduit-il pas une imprécision supérieure à celles que nous avons étudiées ?

Si une radiation était monochromatique, un appareil quelconque en donnerait une raie de largeur $\Delta\lambda$ telle que $\lambda/\Delta\lambda = R$ (R pouvoir de résolution de l'instrument). Or avec l'interféromètre de Fabry-Perot, on montre que la résolution n'est limitée que par le défaut de finesse de la raie à analyser et peut être indéfiniment accru si celle-ci devient plus fine ; donc le problème se ramène à utiliser une raie aussi fine que possible.

LES SOURCES DE RAIES HAUTEMENT MONOCHROMATIQUES.--

Lampe à vapeur de Cadmium de Michelson

~~Cette source est celle qui fut utilisée lors de la définition de l'unité angstrom à partir de la raie rouge du Cadmium. La température étant fixée à 320°C, la tension à 400 à 600 volts et le courant alternatif à 3 mA.~~

Elle présente le défaut de fonctionner à haute température. On a pour $T = 590^\circ \text{K}$ et $M = \text{II}2$ un élargissement Doppler de

$$\Delta\lambda_D/\lambda = 1,65 \cdot 10^{-6}$$

La tension aussi est élevée et provoque un effet Stark sensible. Enfin de nombreux isotopes sont présents et si aucune structure hyperfine n'a été d'abord relevée pour la raie rouge, c'est qu'une coïncidence fait que ces isotopes provoquent un élargissement asymétrique. En effet l'ordre d'interférence limite est de 390 000 au lieu de 600 000 que l'on devrait atteindre si $\Delta\lambda_D$ entrerait seul en jeu.

Cette lampe à vapeur de Cadmium est maintenant remplacée par la lampe Osira qui, grâce au gaz rare qu'elle contient, permet de n'utiliser qu'une tension de 200 V. ou par le tube Shiller à cathode creuse qui fonctionne à la température de l'air liquide. Ces lampes fournissent une finesse plus grande et permettent de définir la longueur d'onde de la raie rouge du Cadmium à $0,0001 \text{ \AA}$ près. C'est-à-dire avec une précision de $2 \cdot 10^{-8}$.

Sources fonctionnant avec un seul isotope

Ces sources présentent d'une manière générale, l'avantage de supprimer les inconvénients introduits par la structure hyperfine des raies. Elles ont été utilisées principalement avec le Krypton 84 et 86 et avec le Mercure 198.

Kösters et Engelhard (8) utilisant l'isotope 84 et 86 du Krypton isolés par diffusion thermique ont construit une lampe fonctionnant à $63 \text{ }^\circ\text{K}$ sous $0,02 \text{ mm Hg}$. Grâce à cette source ils ont pu observer des interférences jusqu'à l'ordre 1.400.000 c'est-à-dire avec 80 cm de différence de marche.

Meggers (9) utilisant l'isotope 198 du mercure isolé à partir de l'Or naturel par bombardement de neutrons (10) (11) a construit une lampe sans électrode, donc à longue durée de vie, excitée en haute fréquence (100 MHz), contenant de l'Argon sous 3 mm de Hg et fonctionnant à moins de 30° C . La présence de cette pression d'Argon peut provoquer un déplacement vers le rouge de $0,0001 \text{ \AA}$ par mm de Hg. L'ordre d'interférence atteint fut de 1 000 000 avec la raie $\lambda 5461 \text{ \AA}$. Il semble que cette lampe permette la définition des longueurs d'onde à $0,0002 \text{ \AA}$ près par rapport à la raie rouge du Cadmium.

Enfin au Laboratoire N.Bohr de Copenhague la méthode de déviation des ions permet d'utiliser divers isotopes purs pour la production de raies très fines.

.../...

En particulier des essais ont été faits avec le Mercure 202 pur à 98,06 % sans structure hyperfine (I2).

De même le Cadmium II4 a aussi été utilisé (Leningrad)

Sources de raies d'absorption

En 1957, Fastie (I3) propose l'utilisation d'une raie d'absorption comme étalon. Alors qu'en émission la précision ne peut pas dépasser 10^{-9} (champ électromagnétique, température, pression) en absorption tout champ est supprimé, pression et température peuvent être exactement connus, donc on peut attendre une précision absolue à condition de résoudre le problème de la mesure des longueurs d'onde des raies d'absorption.

Pour cela Fastie propose l'absorption de l'iode naturel (isotope pur I 254) sur le fond constitué par la raie verte du Mercure 204. Toutefois ici se présente un élargissement dû au spin nucléaire, ce qui exclut toute amélioration par l'utilisation du jet atomique. A ce point de vue il serait préférable d'utiliser la raie 2537° Å du Mercure I98 élargie et réabsorbée par un jet atomique de Mercure.

Sources utilisant le jet atomique

Cette méthode permet l'élimination de l'élargissement Doppler. Elle fut proposée par Bogros dès 1926 en émission (I4), puis en 1932 en absorption (I5).

Meissner applique la méthode avec un jet atomique de Calcium (I6). Il utilise pour cela du Calcium contenant 97 % de Calcium 40 et étudie la raie de résonance λ 4226° Å. Les franges d'interférence sont encore bien définies avec une différence de marche de 130 cm, soit un ordre d'interférence de 3,08 millions.

Barger et Kessler utilisent le jet atomique en émission de Mercure I98 (I7). Ils étudient plus particulièrement la raie 2537° Å et atteignent une différence de marche de 2,04 m soit un ordre d'interférence de 8,1 millions.

Ils en déduisent la largeur de la raie λ 2537 dans ces conditions qui est

.../...

de $0,0016 \text{ cm}^{-1}$ (contre une largeur de $0,012 \text{ cm}^{-1}$ pour la raie λ 6056 du Krypton 86 proposée comme étalon primaire de longueur).

Baird à OTTAWA et Engelhard à BRAUSCHWEIG expérimentent des jets atomiques de Krypton mais leurs résultats ne sont pas connus.

CONCLUSION.-

La conclusion à tirer d'une telle étude sur "le choix de la radiation qui devra définir le nouvel étalon primaire de longueur" nous est imposée par la résolution de la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures qui s'est tenue le 14 OCTOBRE 1960 à PARIS et qui décide :

- 1°) le mètre est la longueur égale à 1650763,74 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de Krypton 86.
- 2°) la définition du mètre en vigueur depuis 1889, fondée sur le Prototype international en platine irridié, est abrogée.
- 3°) etc ...

Cette raie qui constitue donc maintenant l'étalon primaire de longueur fut préconisée en 1957 puis choisie en 1960 "parce qu'elle peut être produite avec un minimum de perturbations dans une lampe à décharge à cathode incandescente, cette lampe étant refroidie au voisinage du point triple de l'azote 63°K, parce que les perturbations résiduelles peuvent être mesurées, parce qu'elle souffre peu de l'autoabsorption et parce que sa luminance est suffisante"

La mesure de la longueur d'onde ainsi choisie a été faite par rapport à la raie rouge du Cadmium $\lambda = 6438,4696 \cdot 10^{-10}$ mètre de manière à sauvegarder la validité des tables spectroscopiques actuelles et à assurer la continuité de la longueur du mètre.

Cette comparaison s'est faite dans l'air et on passe à la longueur d'onde dans le vide par la formule de dispersion de l'air d'Edlén.

.../...

D'après le Conseil National des Recherches d'OTTAWA, le mètre garderait la même longueur qu'auparavant à 2.10^{-7} près, il ne serait donc raccourci que d'une quantité comparable à l'incertitude sur le prototype international en platine.

D'après sa définition, la radiation choisie est une radiation théorique produite sous pression nulle et avec une intensité nulle de courant électrique ; elle est donc obtenue par extrapolation et la précision de sa définition est aujourd'hui de 3.10^{-9} . C'est-à-dire que le mètre a une longueur définie à quelques diamètres atomiques près.

Un comparateur moderne permettra de mesurer les étalons à traits avec une précision de 1.10^{-8} , la température étant stabilisée au millième de degré.

Enfin il nous faut terminer en citant les recherches actuelles tendant à améliorer encore la définition de l'étalon primaire de longueur. Nous voulons parler de Kessler à WASHINGTON (jet atomique de Mercure 198 en émission) - Baird à OTTAWA et Engelhard à BRAUSCHWEIG (jet atomique Krypton 86 en émission).

T A B L E D E S M A T I E R E S

	PAGES
I. INTRODUCTION	1
II. PRECISION DE LA DEFINITION DES LONGUEURS D'ONDE	3
A - Largeur naturelle des raies spectrales	4
B - Influence de la température (effet Doppler)	4
C - Influence de la pression	5
D - Influence du champ électromagnétique	6
E - Structure hyperfine des raies	6
F - Limitation Instrumentale de la précision	7
III. SOURCES DE RAIES HAUTEMENT MONOCHROMATIQUES	7
A - Lampe à vapeur de Cadmium	
Lampe de Michelson	
Lampe Osira	
Tube Shifler	7 & 8
B - Sources monoisotopiques	
Krypton 84 et 86	
Mercure 198	
Mercure 202	
Cadmium 114	8 & 9
C - Sources de raies d'absorption	9
D - Sources à jets atomiques	
Calcium 40	
Mercure 198	
Krypton 84 et 86	9 & 10
IV - C O N C L U S I O N	11

B I B L I O G R A P H I E

- | | | | | |
|------|---|------------------------------|------------------|------------------|
| (1) | A.A. MICHELSON et E.W. MORLEY | - Ann. d. Sci. | 34.427
38.181 | (1887)
(1889) |
| (2) | W.J. HUMPHREYS et J.F. MOHLER | - | | |
| (3) | A.A. MICHELSON | -Phil. Mag. | 34.280 | (1892) |
| (4) | A. PERARD | -Rev. d'OPT. | 1 | (1928) |
| (5) | J.L. COJAN et R. LENNUIER | - C.R. Acad. Sci. 21.2, 30.5 | | (1949) |
| (6) | Mac NALLY | -J.O.S.A. | 39.1050 | (1949) |
| (7) | DEVERALL, MEISSNER et ZISSIS | -J.O.S.A. | 43.673 | (1953) |
| (8) | E. ENGELHARD | -P.V du CIPM | 23 A.165 | (1952) |
| (9) | MEGGERS | -J.O.S.A. | 38. 7 | (1948) |
| (10) | FERMI | -Proc. Roy. Soc. | I46A.483 | (1934) |
| (11) | WIENS et ALVAREZ | -Phys. rev. | 58.1005 | (1940) |
| (12) | J.R. RAND, Mc NALLY, GRIFFIN
ELKIN, BURKHART | -J.O.S.A | 39-1036 | (1949) |
| (13) | W.J. FASTIE | Colloque du CNRS-BELLEVUE | - | (1957) |
| (14) | BOGROS | C.R. Acad. Sci. | I83.124 | (1926) |
| (15) | BOGROS | Ann. Phys. | I7.199 | (1932) |
| (16) | MEISSNER et KAUFMANN | -J.O.S.A | 49.434 | (1959) |
| (17) | BARGER et KESSLER | -J.O.S.A | 50.651 | (1960) |