

50376
1960
43

50376
1960
43

FACULTE DES SCIENCES DE LILLE

DIPLOME D'ETUDES SUPERIEURES

* PROPRIETES OPTIQUES DES LAMES MINCES DE CUIVRE *



Sous la direction de
Monsieur le Professeur ROIG

Membres du Jury : M. ROIG, Président
M. BROCHARD
M. PELLEE

Présenté à LILLE, le 19 FEVRIER 1960
par Anne-Marie DUQUENNE et Suzanne EMERY

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

Nous nous proposons d'étudier les propriétés optiques des lames minces de cuivre dans le spectre visible et leurs variations au cours du temps.

Ce travail comporte trois parties :

- Réalisation de miroirs
- Recherche des méthodes d'étude des propriétés optiques de ces miroirs
- Mesures du pouvoir de réflexion et de transmission en fonction de la longueur d'onde (Mesures sur du cuivre frais et du cuivre vieilli).

Nous avons réalisé cette étude par un travail en équipe et les résultats de ces mesures font logiquement l'objet d'une seule rédaction, pour éviter les redites.

DESCRIPTION DE L'APPAREIL A METALLISATION

Les dépôts métalliques sont obtenus par évaporation thermique sous vide.

L'appareil de vaporisation utilise une pompe primaire à palettes et une pompe à diffusion à vapeur d'huile,

Ce groupe de pompage fait le vide dans une cloche de 30 cm de diamètre, et de 42 cm de hauteur, qui repose sur une platine en laiton par l'intermédiaire d'un joint de caoutchouc.

L'aspiration se fait par une ouverture percée dans la platine.

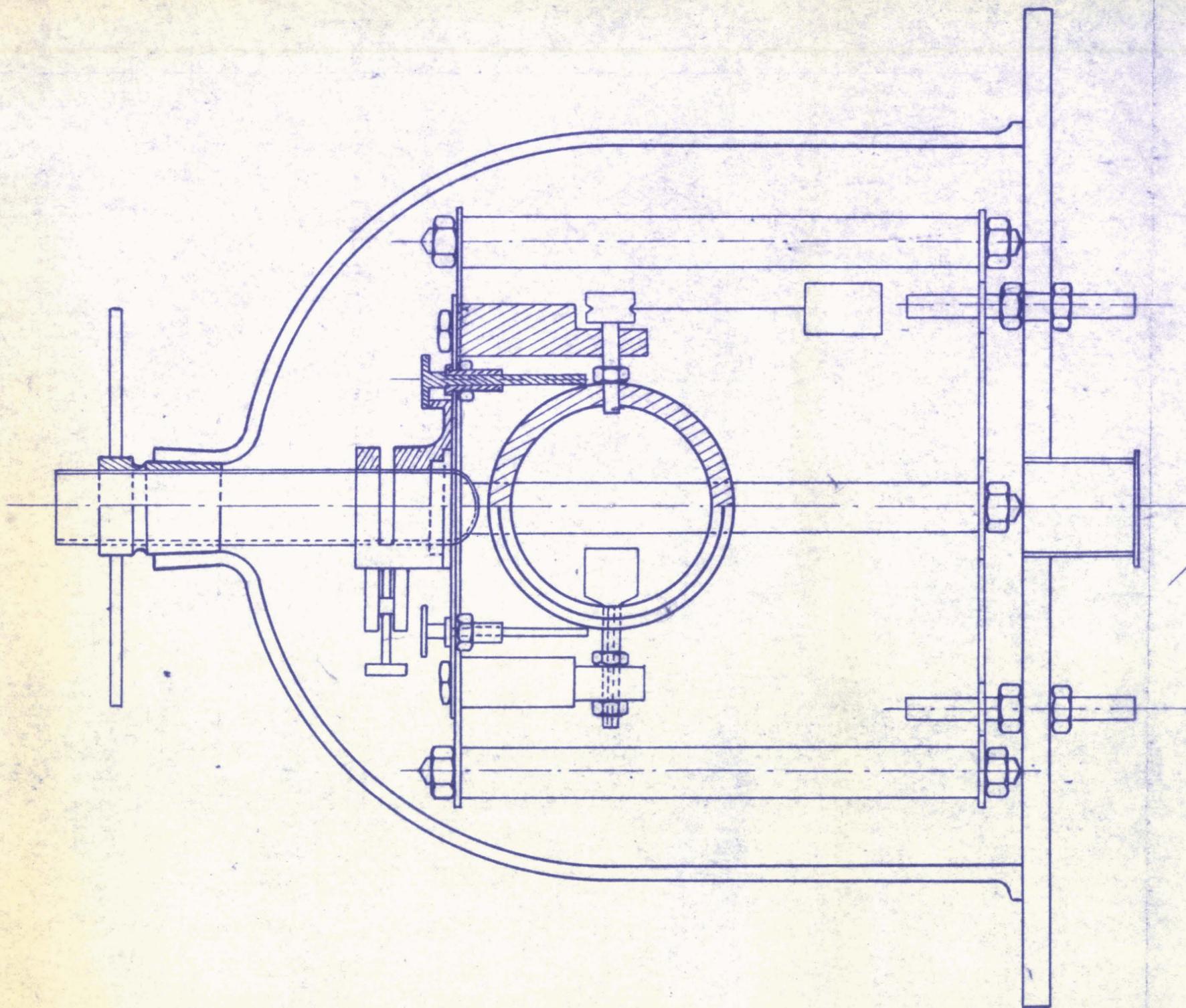
Pour avoir rapidement un bon vide, on dégage pendant le vide primaire. Ce nettoyage par bombardement ionique des surfaces est obtenu en établissant une décharge haute fréquence entre la platine et la cage métallique qui protège la cloche.

Le corps à évaporer est placé en contact direct avec un fil ou une lame métallique parcourus par un courant électrique. Ce courant de chauffage est amené dans la cloche par des électrodes bien isolées traversant la platine.

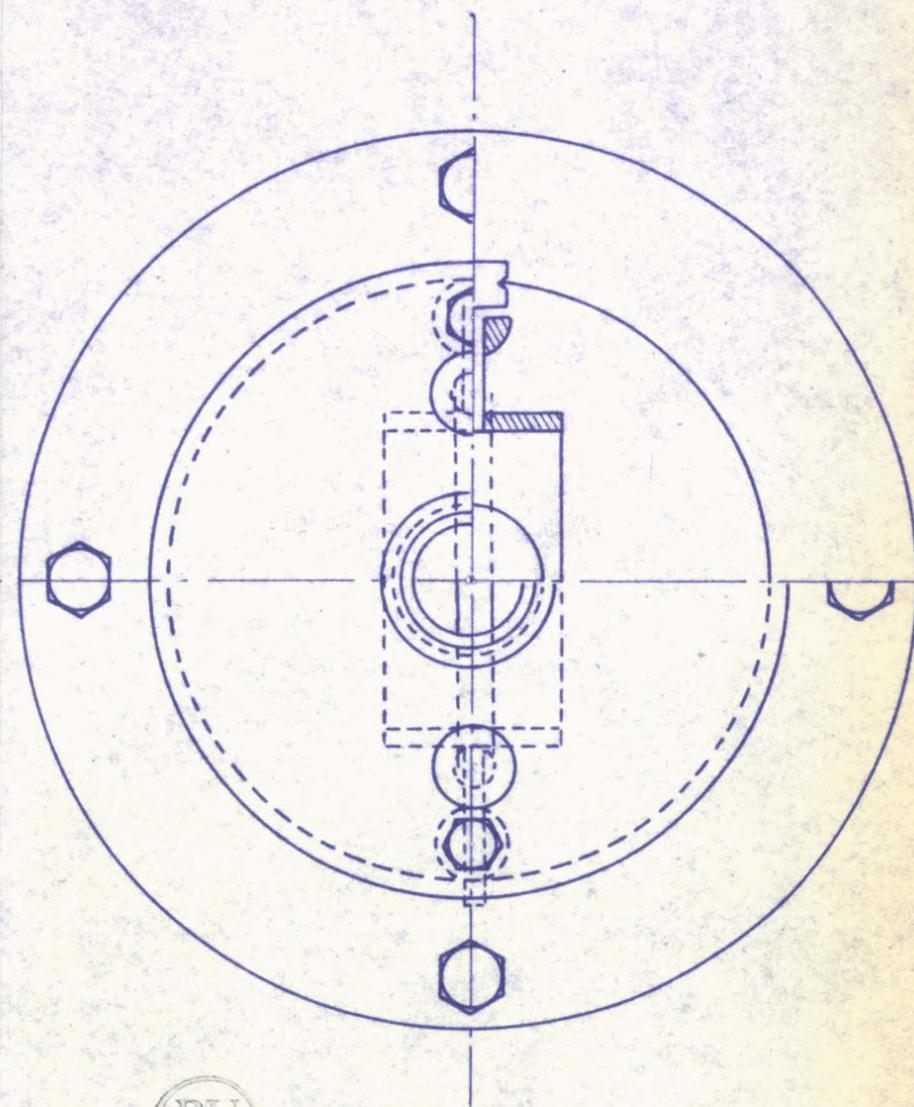
Les lames à recouvrir se trouvent placées à 25 cm des filaments.

Un dispositif rotatif réalisé par Monsieur ROIG et Mademoiselle DESCAMPS permet de métalliser successivement deux lames en ne faisant qu'une fois le vide.

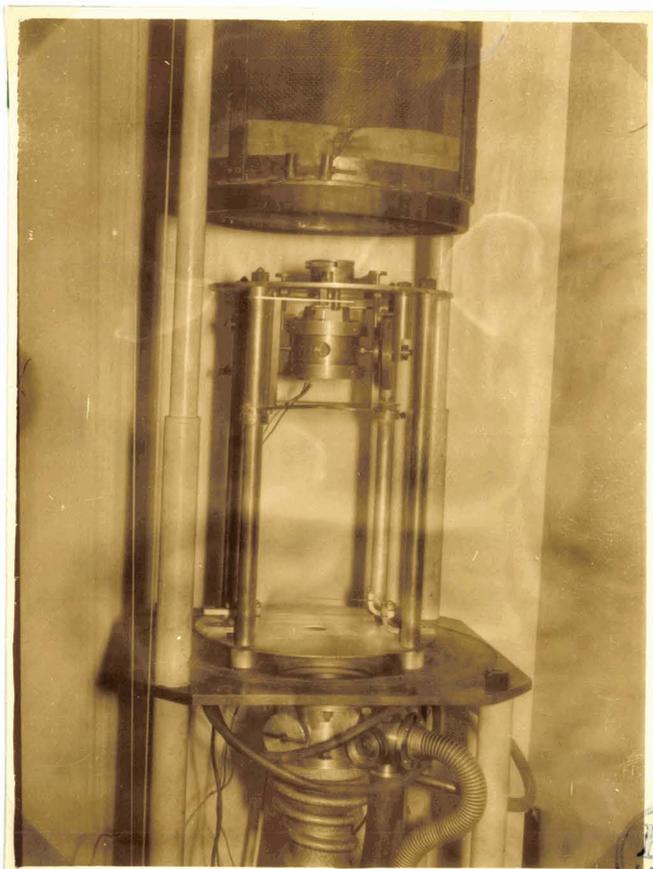
On obtient un dépôt à peu près uniforme par rotation des lames autour d'un axe vertical (cette rotation est commandée par un rodage situé au sommet de la cloche).



vers le pyromètre.



BU
LILLE



Vue intérieure de la cloche à vide.

EU
ALLE

U
LE

Un écran qui peut être manoeuvré de l'extérieur permet de réaliser le dégazage et le chauffage de la source avant le commencement de la projection sans souiller la surface à traiter.

On mesure la pression à l'aide d'une jauge d'ionisation et d'une jauge de Pirani que l'on a installée.

INSTALLATION ET ETALONNAGE DE LA JAUGE DE PIRANI

La mesure de la pression à l'aide d'une jauge de Pirani est basée sur la déperdition d'énergie d'un fil chauffé par suite de la conduction par les gaz résiduels.

Quand un fil est chauffé par un courant électrique, la perte de chaleur se fait par rayonnement, par conduction aux extrémités, par conduction gazeuse.

La perte d'énergie par conduction gazeuse est due au fait que les molécules du gaz qui viennent heurter le filament repartent avec une énergie plus grande transmise de proche en proche par les molécules aux parois de l'enceinte.

Quand le libre parcours moyen des molécules est très inférieur à la distance des filaments aux parois, la perte d'énergie par conduction gazeuse est indépendante de la pression. Mais ceci n'est plus vrai quand le libre parcours moyen des molécules devient supérieur à la distance des filaments aux parois.

Quand la pression est suffisamment basse, la perte d'énergie par conduction gazeuse dépend donc de la pression. Elle lui est proportionnelle. Elle dépend aussi évidemment de la température du filament et de l'enceinte, comme celle par rayonnement, conduction aux extrémités, et de la nature du gaz.

Pour mesurer la pression, Pirani utilise le fait que la déperdition d'énergie dépend de la pression. Il insère dans un des bras d'un pont de WHEATSTONE une lampe ordinaire. Il utilise deux méthodes :

- dans l'une, il maintient constante la température du filament, la variation d'énergie perdue ne dépend alors que de la variation de pression. Il mesure donc l'énergie supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes par conduction gazeuse.
- dans l'autre, il maintient le courant de chauffage constant et mesure les variations de résistance dues aux variations d'énergie perdues par conduction gazeuse.

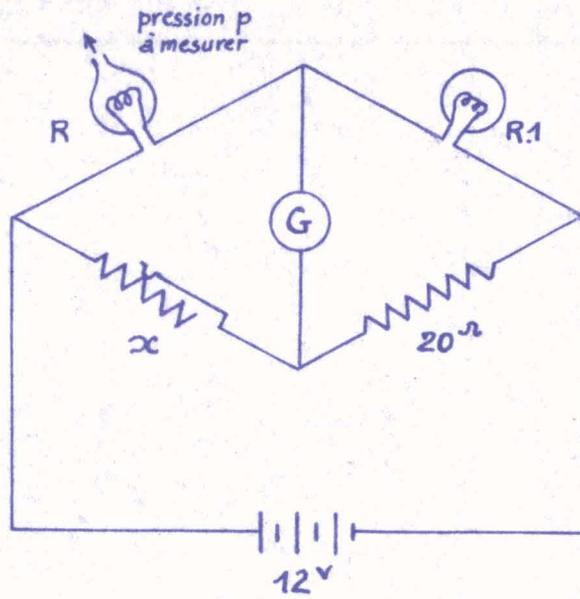
INSTALLATION

Nous avons utilisé cette deuxième méthode sans maintenir l'intensité constante mais en utilisant une deuxième lampe de comparaison identique à la première dans la branche en série d'un pont de WHEATSTONE alimenté sous tension constante.

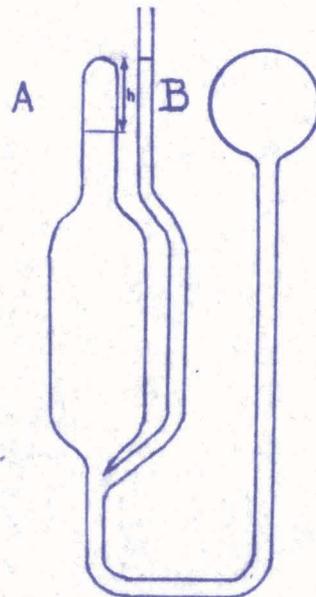
Nous avons donc réalisé ce pont en insérant dans deux branches du pont en série deux lampes MAZDA de 40 Watts (la résistance du filament est de 21Ω sous la pression atmosphérique et de 24Ω pour l'ampoule scellée).

L'atmosphère de l'une de ces lampes est celle de la cloche (Pour cela on a relié la calotte de l'ampoule au couvercle de la cloche par un rodage). Le filament de cette lampe est bien assujetti pour que sa position reste invariable par rapport aux parois; et la déperdition par les points d'attache est faible.

On protège cette lampe des courants d'air, par une cloche isolante.



Jauge de Pirani



Jauge de MacLeod

L'autre lampe est également placée sous cloche. Les températures ambiantes des deux lampes sont les mêmes.

Les deux autres branches sont constituées par des résistances A O I P peu sensibles aux variations de température; l'une d'elles est fixe (20 Ω); on donne à l'autre une valeur x telle que le pont soit équilibré.

Le pont est alimenté par une batterie d'accumulateurs de 12 volts de façon que les filaments ne soient pas portés au rouge.

ETALONNAGE

Après avoir monté la jauge, nous l'avons étalonnée à l'aide d'une jauge de MAC LEOD. Pour cela, nous avons placé l'ampoule ouverte dans une cloche à vide reliée à une jauge de MAC LEOD.

Le principe de la jauge de MAC LEOD consiste à isoler un volume déterminé V du gaz dont on veut mesurer la pression p et à comprimer ce gaz jusqu'à ce que son volume soit v . Soit alors h la valeur de la pression. D'après la loi de MARIOTTE :

$$V p = v h$$

D'où :

$$p = h \frac{v}{V}$$

p est faible par rapport à h . La pression h exprimée en mm de mercure peut donc être mesurée par la dénivellation h du mercure dans les deux tubes A et B.

Une division du tube A représentait la 2,264ème partie du volume total et onze divisions de ce tube correspondaient à 10 cm. d'où :

$$P_{\text{mm}} \text{ de Hg} = h_{\text{mm}} \frac{h_{\text{cm}} \times 11}{2,264 \times 10}$$

Pour étalonner, on faisait le vide dans l'appareil, puis on isolait celui-ci des pompes. On notait h et la résistance x après avoir laissé l'équilibre de pression s'établir.

x Ω	31,2	32	32,5	32,9	33,3	34
Pmm de Hg	0,304	0,273	0,252	0,235	0,222	0,189
x	34,4	35	35,5	36	36,5	37
p	0,187	0,169	0,155	0,143	0,129	0,115
x	37,5	38	38,5	39,1	39,6	40
p	0,103	0,093	0,081	0,07	0,061	0,054
x	40,5	41,1	41,7	42,4	43	43,4
p	0,045	0,036	0,026	0,019	0,012	0,0081
x	43,7	44	44,1	44,2		
p	0,0073	0,0052	0,0041	0,0020		



On a tracé la courbe $p = f(x)$, ce qui revient à porter en abscisse la variation relative de la résistance du filament. En effet, quand le pont est équilibré, on a :

$$20 R = R_1 x$$

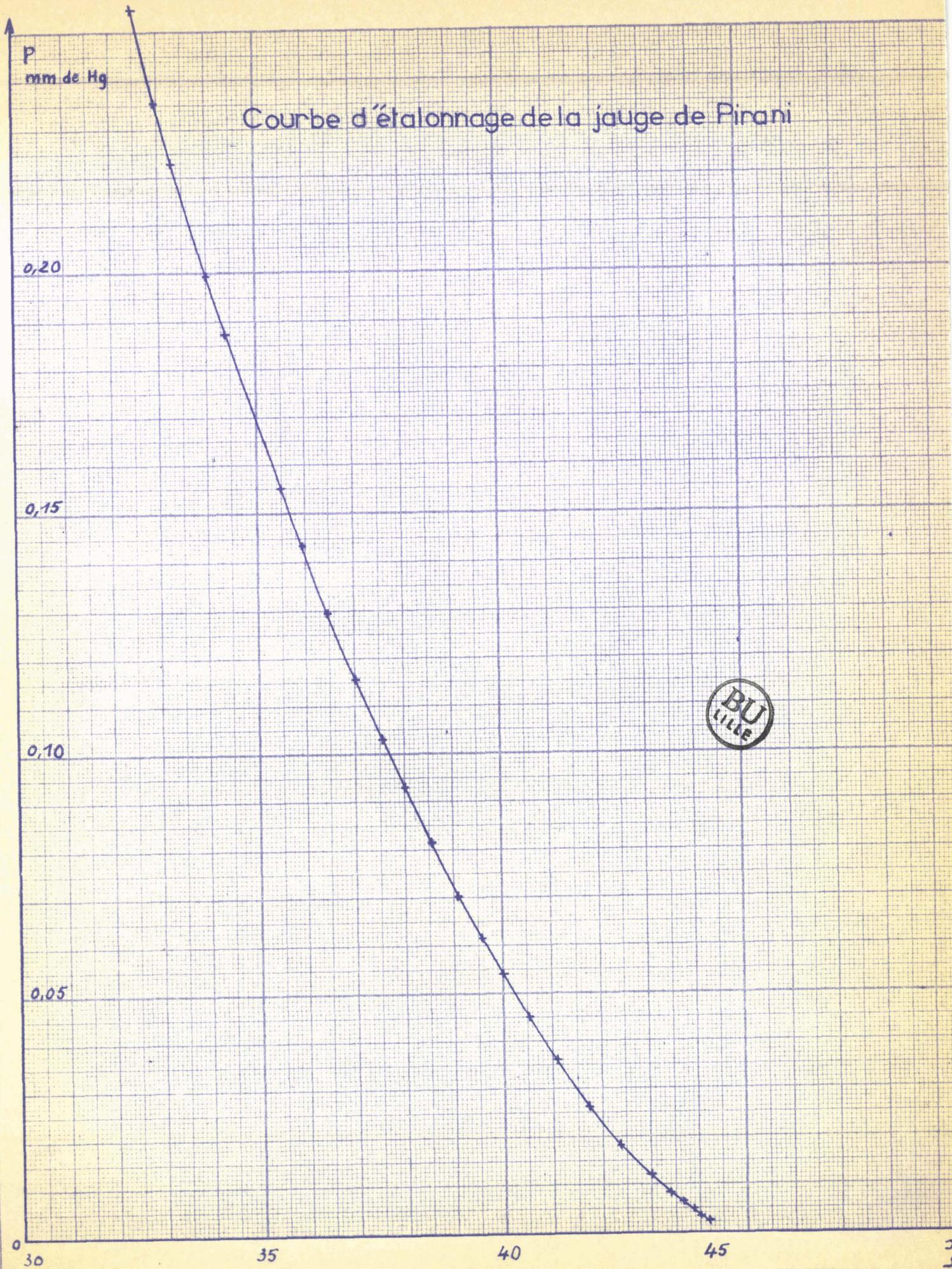
Soit u , la différence de résistance des deux filaments, due à la différence de pression qui règne dans les deux ampoules.

On a : $R = R_1 + u$

$$20 (R_1 + u) = R_1 x$$

.. /

Courbe d'étalonnage de la jauge de Pirani



$$x = 20 \left(1 + \frac{u}{R_1} \right)$$

A une translation près x est donc la variation relative de la résistance du filament.

Précision d'une mesure

On a fait plusieurs fois le vide dans l'appareil et on notait à chaque fois, pour une même valeur de x, la valeur de la pression indiquée par la jauge de MacLeod.

On a calculé les valeurs moyennes des pressions et les écarts moyens.

Résultats :

x	Ω	P _{mm deHg}	$\Delta p_{mm deHg}$	$\frac{\Delta p}{p}$
33		0,233	0,0039	$\frac{1}{60}$
35		0,169	0,0028	$\frac{1}{60}$
37		0,115	0,0028	$\frac{1}{40}$
39		0,07	0,001	$\frac{1}{35}$
41		0,037	0,001	$\frac{1}{35}$
43,7		0,0073	0,0002	$\frac{1}{35}$



Cette précision nous convient puisqu'il suffit de connaître une valeur approchée de la pression qui régné dans la cloche.

Pour mesurer la pression dans la cloche, on se servait de la jauge de Pirani pendant le vide primaire. On mettait la pompe secondaire en marche quand la pression atteignait la valeur de $\frac{1}{10}$ mm de mercure (soit environ $x = 37 \Omega$). Quand la pompe secondaire s'amorçait, la pression descendait rapidement à 10^{-3} mm de mercure, pression au-dessous de laquelle la jauge n'est plus sensible. On utilisait alors la jauge d'ionisation sensible à ces pressions. On commençait à vaporiser le métal quand la pression dans la cloche était de l'ordre de 10^{-4} mm de mercure. (ce qui correspond, pour l'air, à un libre parcours moyen de l'ordre de 50 cm)

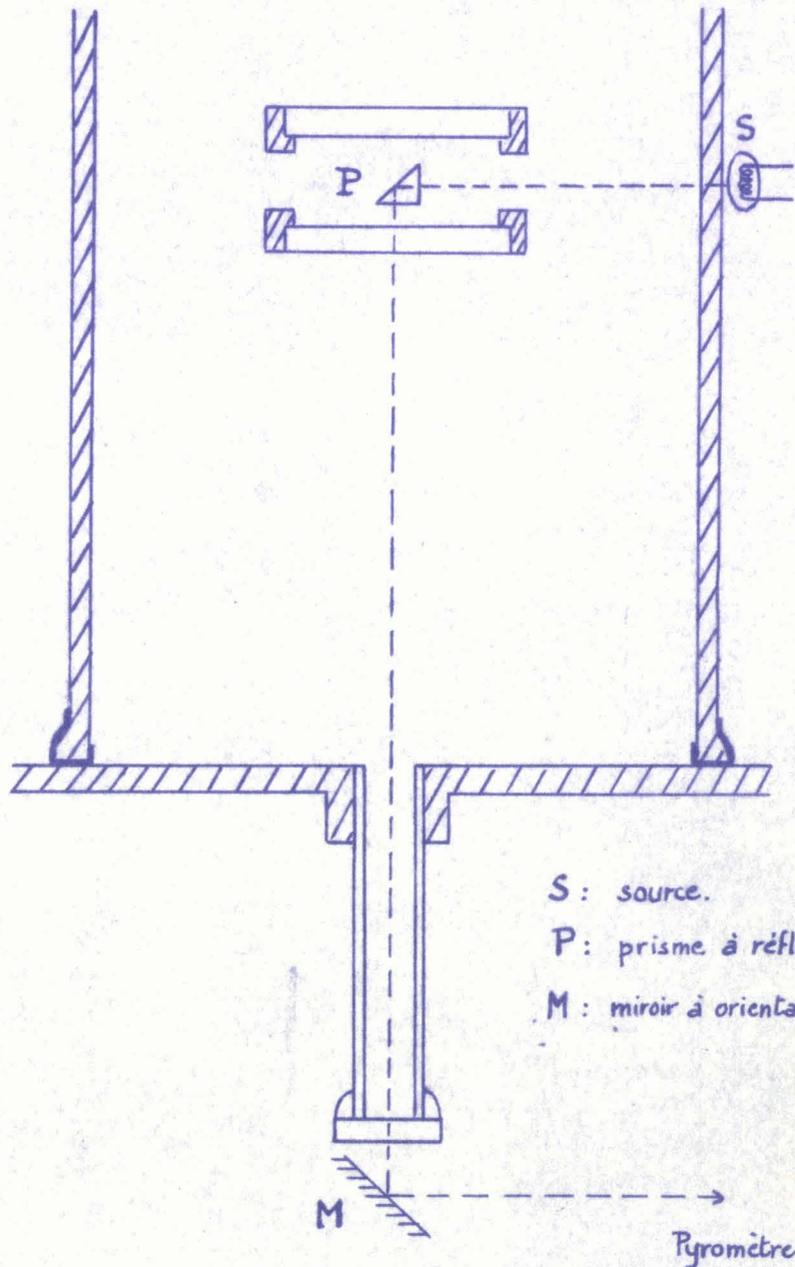
Quand le vide dans la cloche est suffisant, on commence donc la métallisation. Pour avoir des lames de densités optiques bien définies, on mesure durant la métallisation cette densité optique en employant un procédé photométrique utilisant un pyromètre Ribaud.

MESURE RAPIDE DE LA DENSITE OPTIQUE EN COURS DE DEPOT

Le cylindre qui porte les deux lames à métalliser contient en son centre un prisme P à réflexion totale. Sa paroi latérale est percée d'une ouverture circulaire au même niveau que P.

Par rotation du cylindre, on amène cette ouverture en face du filament d'une source fixée à l'extérieur de la cloche et d'intensité constante (le filament est parcouru par un courant d'intensité 4,4 ampères). Un tube de protection placé dans la cloche empêche la métallisation de la paroi devant S.

Le faisceau horizontal issu de S se réfléchit verticalement sur P, traverse la lame étudiée et sort de la cloche par une lame de verre plane située à l'extrémité d'un cylindre vertical porté par la platine. Ce faisceau est renvoyé dans le pyromètre par un miroir à orientation réglable.



Trajets des rayons lumineux
(pour la mesure de la densité optique)

Il traverse dans le pyromètre un coin absorbant solidaire d'un tambour gradué en degrés centigrades et en millimètres.

Ce coin permet de régler l'absorption de façon que l'éclat de l'image ainsi obtenue soit le même que celui du filament du pyromètre maintenu constant à l'aide d'un galvanomètre de zéro. Les faisceaux sont monochromatiques, un verre rouge ne laissant passer qu'une bande spectrale étroite de longueur d'onde effective λ .

Soit L_0 la luminance de l'image de la source après traversée de la lame non métallisée et soit T_0 la température d'un corps noir de luminance L_0 pour la radiation λ (On assimile S à un corps noir).

Les valeurs correspondantes pour la même image pendant le dépôt sont L et T.

D'après la loi de Wien donnant la luminance d'un corps noir à une température T et pour une radiation λ :

$$L_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \exp \left\{ - \frac{c_2}{\lambda T} \right\}$$

on a :

$$\text{Log } \frac{L}{L_0} = \frac{c_2}{\lambda} \left\{ \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right\} \quad (1)$$

Si τ est le pouvoir de transmission de la lame : $\tau = \frac{L}{L_0}$

$$\text{d'où : } d = - \log \tau = - \log \frac{L}{L_0}$$

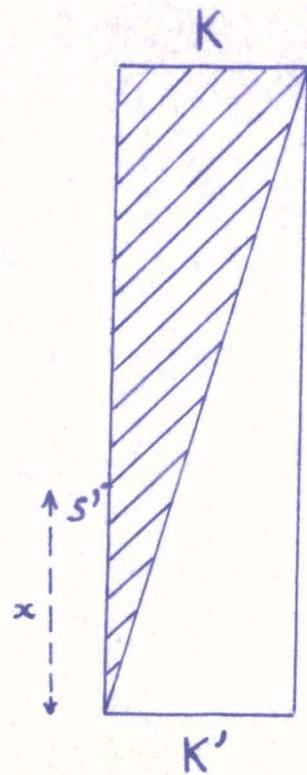
$$d = \frac{c_2}{\lambda} \log e \left\{ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right\}$$

$$c_2 = 14.320 \text{ microns-degrés}$$

$$\lambda = 0,64 \mu$$

Le tambour est gradué en degrés centigrades.

T_0 est fixe, on le détermine.



K : absorbant

K' : transparent

S' : image fixe de la source



Coin absorbant du pyromètre

La lecture de T donne alors d.

Remarquons que l'appareil mesure en réalité les densités optiques du coin, d'où l'on déduit la température de la source considérée comme un corps noir; si la source est quelconque, les mesures de densité sont correctes et elles seules nous intéressent. Seule la valeur mesurée pour T différerait de la valeur réelle.

Le tambour porte également une graduation en millimètres.

Des épaisseurs successives égales du coin absorbent la même fraction du flux reçu : le facteur de transmission est donc fonction exponentielle décroissante de l'épaisseur qui est fonction linéaire du déplacement du coin par rapport à l'image fixe S' de la source, c'est-à-dire à la grandeur x de la figure.

(1) peut s'écrire :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C_2 \log e} \log \frac{L}{L_0}$$

or : $\frac{L}{L_0} = \alpha^{k(x - x_0)}$

d'où : $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C_2 \log e} k(x - x_0) \log \alpha$

T_0 est constant. On gradue le tambour en mm en prenant comme origine la position correspondant à x_0

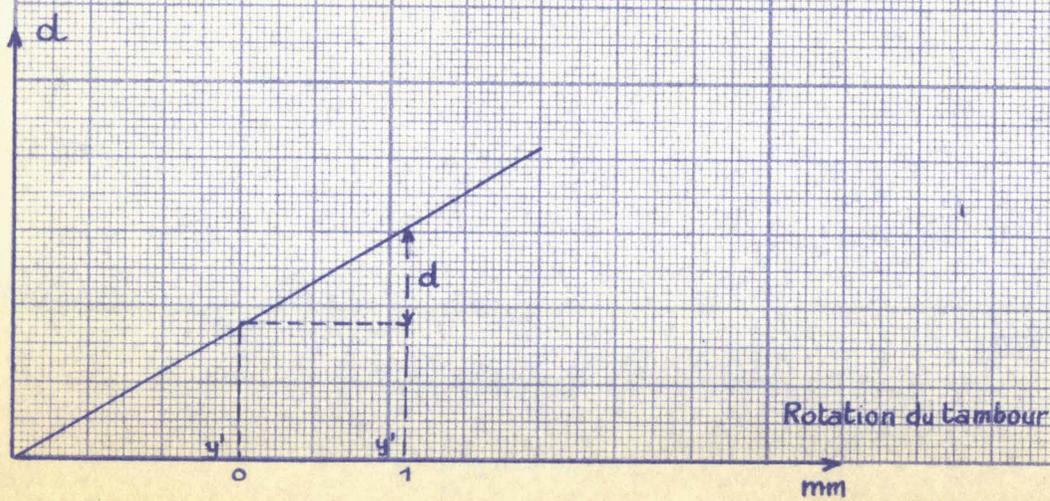
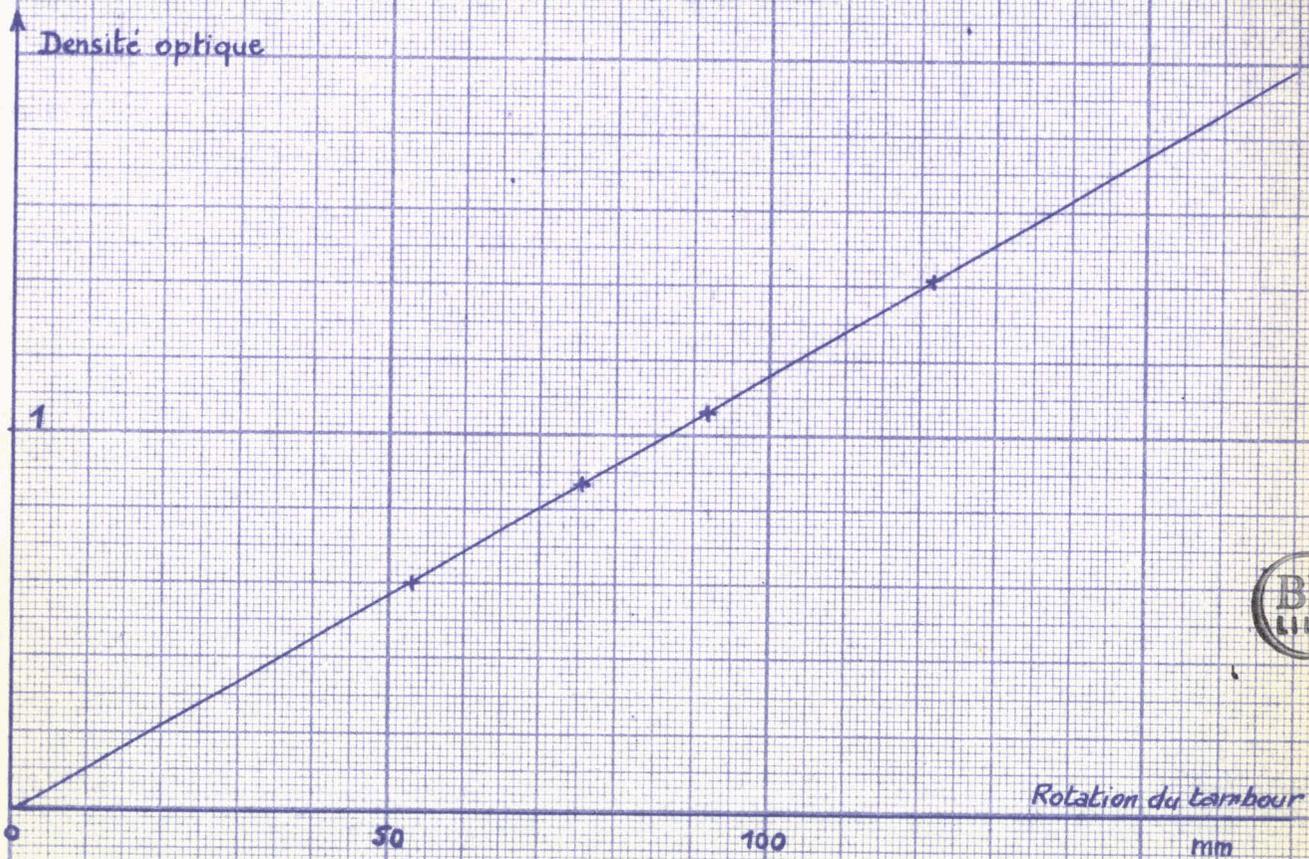
Pour la graduation y, on a donc :

$$\frac{1}{T} = a + b y$$

a dépend de T_0 et de l'appareil, b ne dépend que de l'appareil.

La densité optique est alors une fonction linéaire de y.

Densité optique mesurée au spectrophotomètre en fonction de la rotation du tambour



$$d = \left\{ \frac{C_2}{\lambda} \log_e b \right\} y + \frac{C_2}{\lambda} \log_e \left\{ a - \frac{1}{T_0} \right\}$$

La courbe d'étalonnage de l'appareil a été établie par Mademoiselle COLLET (1) en prenant :

$$\begin{cases} T_0 = 1.873^\circ \text{ K} \\ \lambda = 0,64 \mu \end{cases}$$

Pour déterminer la densité optique, nous avons porté la source S à une température T_0 différente de 1.873° K mais que l'on a laissé constante.

Avant la métallisation, on note sur le tambour la graduation y'_0 .

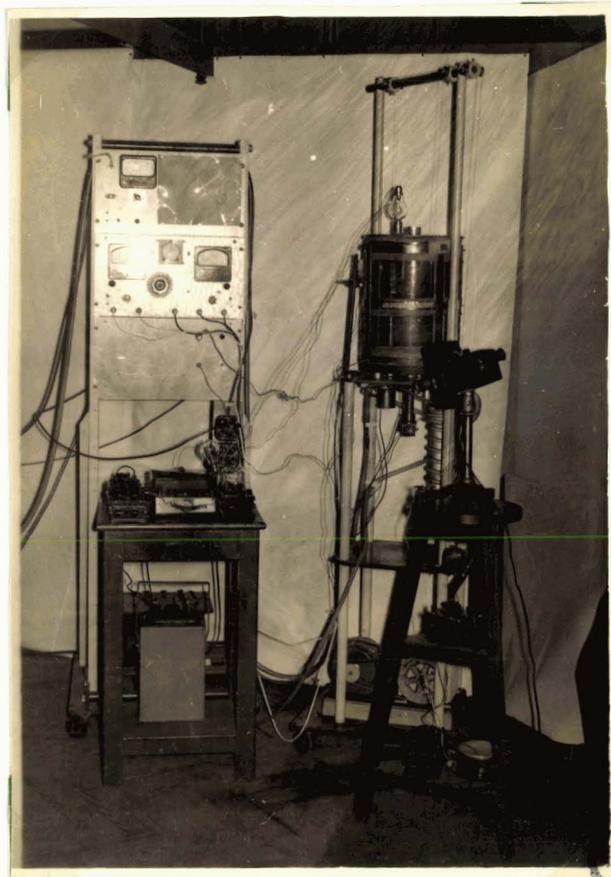
Au cours de la métallisation, on note y'_1 .

On en déduit d d'après la courbe.

Tableau de mesures

Pont de WHEATSTONE
pour jauge de
FIRANI

Accumulateurs



Cloche à vide

Pyromètre Ribaud

Pompe de diffusion
à vapeur d'huile

Pompe primaire à
palettes



Matériel utilisé pour la réalisation
des miroirs

2° CHAPITRE

NETTOYAGE DES LAMES

Cette opération est très importante. La nature, la solidité et l'adhérence des couches obtenues en dépendent.

Si la lame a été préalablement métallisée, elle subit un premier bain d'acide nitrique étendu puis est rincée à l'eau.

On élimine ensuite les corps gras par un bain d'ammoniaque, on parfait le dégraissage par un lavage au teopol puis à l'eau oxygénée.

On rince à l'eau ordinaire et à l'eau distillée.

On laisse sécher sous cloche.

Lorsque cette lame est sèche, on la frotte au papier Joseph puis on la polit avec une peau de chamois très propre que l'on a préalablement dégraissée dans un bain d'ammoniaque, rincée à l'eau distillée et séchée à l'abri de l'air.

Pour vérifier si ce nettoyage est satisfaisant, on souffle sur la lame, la buée doit se répartir uniformément.

On termine la préparation de la surface à traiter par un nettoyage ionique. Cette opération consiste en un dégazage énergétique de la surface. Elle est réalisée en même temps que le dégazage de la cloche au moyen de la décharge électrique à haute fréquence, pendant que s'effectue le vide.

La surface ainsi obtenue peut être considérée comme parfaitement propre. On la métallise dès que le vide est suffisant. La technique de métallisation dépend du métal à déposer.

TECHNIQUES DE L'ARGENTURE ET DE L'ALUMINURE

Nous avons argenté et aluminé quelques lames suivant les procédés décrits dans le diplôme de Mademoiselle COLLET (1)

TECHNIQUE DE L'ARGENTURE

- Pour vaporiser l'argent, on peut placer des cavaliers d'argent sur des filaments de tungstène. Ces filaments nécessitent une préparation spéciale pour obtenir l'adhérence de l'argent fondu au tungstène.

Préparation des filaments :

On utilise des filaments rectilignes de tungstène de 10 cm de longueur et de 6/10 mm de diamètre.

Après les avoir nettoyés à la toile émeri, on les décape électrolytiquement. Pour cela, on fait l'électrolyse d'une solution d'acide sulfurique à 10%, l'anode étant un fil de platine et la cathode, le filament de tungstène. On alimente par une batterie de 6 volts, on fait passer un courant de 0,4 ampères pendant 5 minutes.

On essuie le filament au papier Joseph et on laisse sécher sous cloche.

L'argent fondu colle très mal au tungstène, on fait alors une deuxième électrolyse destinée à recouvrir d'une mince couche d'argent les filaments ainsi décapés afin d'améliorer l'adhérence des globules d'argent fondu.

Dans cette deuxième électrolyse, l'anode est un fil d'argent, la cathode, le filament de tungstène décapé.

L'électrolyte a la composition suivante :

(eau distillée	500 cm ³
(nitrate d'argent cristallisé	7,5 g
(cyanure de potassium.....	12,5 g

On alimente par une batterie de 6 volts, on fait passer un courant de 1,5 mA pendant 10 minutes.

On laisse ensuite sécher sous cloche les filaments ainsi argentés.

Lorsqu'on a préparé deux tels filaments, on les place entre les électrodes fixées sur la platine. On enroule sur ces filaments des fils d'argent de façon à obtenir des cavaliers de 4 mm de long. On en met dix sur chacun. On replie les extrémités des fils d'argent et on serre les cavaliers à la pince pour qu'ils adhèrent bien.

Quand le vide est suffisant, on fait passer un courant de 8 à 9 ampères dans les filaments.

Par ce procédé, les globules d'argent fondu restent collés aux filaments : tous les cavaliers d'argent se vaporisent.

Nous avons aussi utilisé une autre méthode :

- On vaporise des plaques d'argent décapé à la toile émeri dans des gouttières de tantale, par passage d'un courant d'intensité 12 ampères (ces gouttières sont faites dans des bandes de tantale de 0,1 mm d'épaisseur et de 4 mm de largeur.)

Cette méthode nécessite une préparation moins longue que la précédente et donne de bons résultats.

TECHNIQUE DE L'ALUMINURE

Pour vaporiser l'aluminium, on n'utilise jamais le tungstène comme support car dès la fusion de l'aluminium, il se forme un alliage tungstène aluminium fusible, et le filament se coupe.

Nous avons procédé de la façon suivante :

On plie en zig zag une bande de tantale de 4 mm de large et de 0,1 mm d'épaisseur (la rigidité est ainsi diminuée et la lame de tantale casse moins facilement au refroidissement).

On entoure cette bande de feuilles d'aluminium de 3 mm de large, de 0,2 mm d'épaisseur et de 1,5 cm de long.

On fait passer dans les bandes de tantale un courant de 17 ampères.

En fondant, l'aluminium mouille toute la surface du tantale, ce qui empêche le tantale de se vaporiser.

Par cette méthode, on peut obtenir des miroirs de densité optique élevée.

TECHNIQUES CONCERNANT LE CUIVRAGE

Nous avons étudié différents procédés pour la vaporisation du cuivre.

- Nous avons d'abord utilisé des cavaliers de cuivre enroulés sur des filaments de tungstène décapés électrolytiquement comme pour l'argenture.

Nous avons mis sur chaque filament à 4 ou 5 mm d'intervalles 11 cavaliers de 5 spires d'un fil de cuivre de diamètre : $\frac{1}{20}$ mm.

Comme la quantité de cuivre était faible, nous n'avons obtenu qu'un faible dépôt de cuivre.

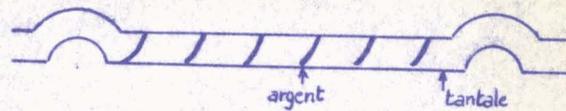
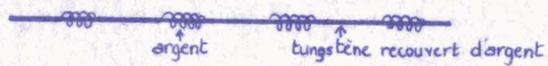
Nous avons alors augmenté progressivement le nombre de spires des cavaliers. Le courant de chauffage nécessaire à la vaporisation augmentait avec le nombre de spires. A partir de cavaliers de 8 ou 9 spires, les globules de cuivre fondu, étant trop gros, nécessitaient un courant de chauffage intense (environ 25 ampères) pour se vaporiser.

Un voile d'impuretés dû à la vaporisation des supports venait souiller la lame.

Cette méthode ne permet donc que d'obtenir de faibles dépôts de cuivre.

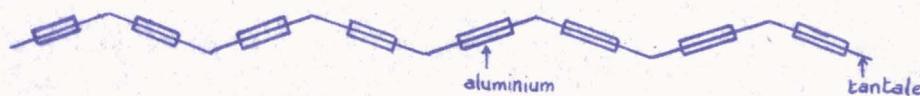
- Nous avons alors essayé un ruban de tantale de 0,1 mm d'épaisseur et de 4 mm de large.

On le pliait en forme de gouttière en V dans laquelle on plaçait de petites plaques de cuivre. A chaque extrémité de la gouttière on formait un crochet afin de diminuer la rigidité et d'éviter la rupture.

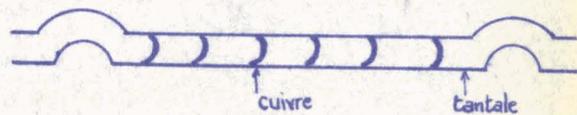
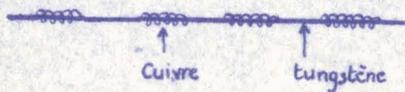


(V)

Argenture



Aluminure



(U)

Cuivrure

En effet, durant les mesures de densité optique, on arrête le courant de chauffage; en se refroidissant, le filament se trempe et devient très cassant.

On a chauffé jusque 25 ampères et le cuivre ne s'est presque pas vaporisé. Nous n'avons pas augmenté le courant de chauffage car une partie du tantale et des supports se seraient vaporisés.

Pour condenser sur le cuivre la chaleur dégagée par le ruban de tantale, on a alors essayé une gouttière en U

Le cuivre a commencé à fondre à 21 ampères. On a augmenté le courant de chauffage jusqu'à 23 ampères.

Nous avons obtenu une couche de cuivre satisfaisante.

Par cette dernière méthode, nous avons réalisé un jeu de lames de cuivre que l'on a laissé vieillir pendant un mois. Nous avons ensuite étudié leurs pouvoirs de réflexion et de transmission en fonction de la longueur d'onde.

Lame n°	1	2	3	4	5	6	7
Densité optique mesurée au pyromètre Ribaud	1,5	0,93	0,9	0,68	0,44	0,33	0,22



Nous avons également étudié un jeu de lames de cuivre frais.

Pour cela on mesurait leurs pouvoirs de réflexion et de transmission dès leur sortie de la cloche.

Pour pouvoir faire la comparaison entre lames vieilles et lames fraîches, on a donné au 2ème jeu de lames des densités optiques à peu près égales à celles des lames du premier jeu, (en mesurant d , au cours de la métallisation, à l'aide du pyromètre).

Lame n°	1'	2'	3'
d	0,95	0,53	0,34

METHODES DE MESURE DU POUVOIR REFLECTEUR ET DU POUVOIR
DE TRANSMISSION

On étudie le pouvoir réflecteur et le pouvoir de transmission des lames de cuivre en fonction de la longueur d'onde à l'aide d'un spectrophotomètre visuel JOBIN et YVON.

Une lampe pointolite envoie un faisceau de lumière blanche séparé en 2 parties par un prisme à réflexion totale qui intercepte la moitié du faisceau incident. Soient (I) le faisceau réfléchi par le prisme et (II) le faisceau transmis.

- Le faisceau (I) traverse le système à étudier
- Le faisceau (II) traverse deux Glazebrook

Les deux faisceaux se rejoignent sur un cube de Lummer à trois plages. La plage centrale réfléchit le faisceau (II), les deux plages externes transmettent le faisceau (I).

Les images de la source ainsi obtenues sont mises au point et superposées sur une fente qui sert d'entrée à un monochromateur. L'oculaire du monochromateur met au point sur l'image des plages.

Grâce à un prisme escamotable, on peut, au lieu d'envoyer le faisceau dans le monochromateur obtenir directement les images en lumière blanche dans un viseur. Ce dispositif permet de vérifier la superposition des deux images.

L'appareil permet de comparer, pour chaque longueur d'onde, le faisceau (I) après traversée du système à étudier au faisceau (II) arrivant

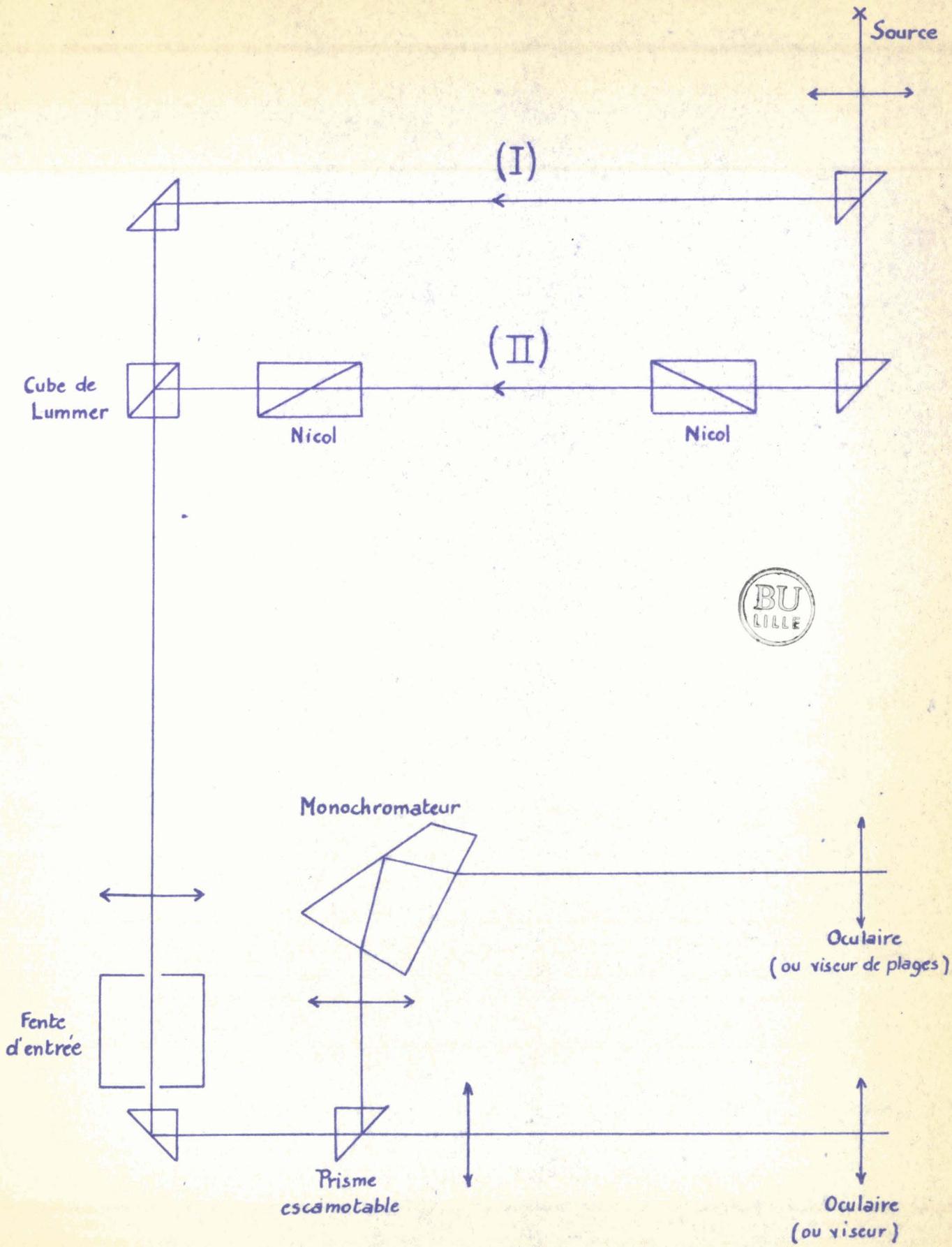
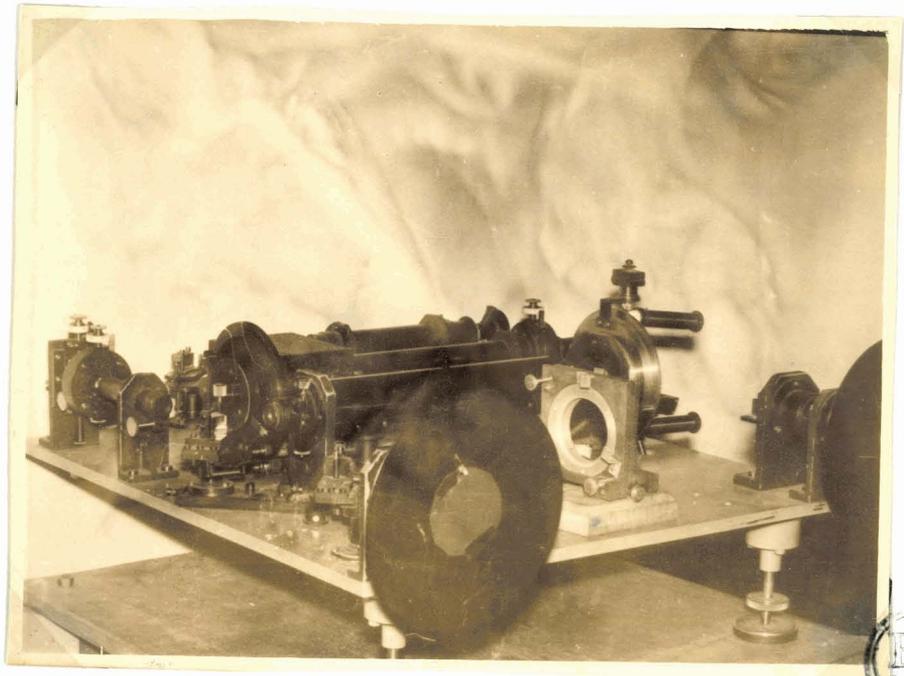


Schéma du spectrophotomètre



SPECTROPHOTOMETRE



sur le premier Glazebrook (c'est-à-dire au faisceau (I) avant traversée du système).

Le polariseur est solidaire d'un limbe gradué en degrés avec un vernier permettant de lire la minute. On règle les nicols de façon qu'ils soient croisés pour la graduation zéro. On réalise alors l'égalité des plages par rotation du polariseur.

La lecture de l'angle correspondant permet la comparaison de ces faisceaux.

Cette opération peut être répétée pour toutes les longueurs d'onde grâce au monochromateur que l'on a commencé par régler. Pour cela, on prend comme source une lampe à sodium, on place l'index du monochromateur devant la graduation 0, 5893 μ du plateau; on desserre la vis qui rend le plateau solidaire du prisme et on tourne le prisme jusqu'à ce que la lumière jaune du sodium soit visible dans l'oculaire.

Pour avoir une bonne précision, on rend les fentes aussi fines que possible.

Les longueurs d'onde sont évaluées à $\pm 5 \text{ \AA}$ près.

MESURE DU POUVOIR DE TRANSMISSION

Soient I_0 l'intensité du faisceau émis par la source et I celle du faisceau après traversée de la lame.

Si T est le pouvoir de transmission de la lame, on a :

$$I = I_0 T$$

Soit Θ l'angle de rotation du polariseur correspondant à l'égalité des plages, on a :

$$I_0 T = I_0 \sin^2 \Theta$$

$$\text{d'où } T = \sin^2 \Theta$$

or $d = \log \frac{1}{T}$

soit

$$d = \log \frac{1}{\sin^2 \Theta}$$

..//..

Mais la source était trop éblouissante, nous interposions un verre absorbant sur le faisceau I, pour travailler aux environs de : $\Theta = 45^\circ$
Nous avons opéré autour de 45° car :

- pour Θ petit, l'erreur de lecture est considérable
- pour Θ grand, on risque de ne pouvoir égaliser les plages au voisinage de
 $I = I_0$

L'intensité du faisceau qui arrive sur la lame n'est plus alors celle du faisceau qui arrive sur le premier Glazebrook. Soient I_1 et I_0 celles-ci. On commence par comparer I_1 à I_0 en réalisant l'égalité des plages.

On note Θ :

$$I_1 = I_0 \sin^2 \Theta$$

On ajoute ensuite la lame sur le faisceau (I). Soit I_2 l'intensité du faisceau de sortie. On a l'égalité des plages pour l'angle Θ' :

$$I_2 = I_0 \sin^2 \Theta'$$

or $I_2 = I_1 T$

d'où

$$T = \frac{\sin^2 \Theta'}{\sin^2 \Theta} \quad \text{et} \quad d = \log \frac{\sin^2 \Theta}{\sin^2 \Theta'}$$

Pour chaque lame, on étudie d et T en fonction de la longueur d'onde.

./...

MESURES DU POUVOIR REFLECTEUR

Dans son diplôme d'Etudes Supérieures (1) Mademoiselle COLLET a étudié des lames de pouvoir réflecteur **voisin** de l'unité. Elle a employé la méthode suivante :

Soient deux lames de pouvoir réflecteur R. Elle les place sur le faisceau (I), faces métallisées en regard, en leur donnant un écart angulaire tel que seul le faisceau directement transmis traverse la fente du monochromateur. Soient I l'intensité de ce faisceau directement transmis et I₀ celle du faisceau issu de la source. Si Θ est l'angle donnant l'égalité des plages :

$$I = I_0 \sin^2 \Theta$$

Elle réalise ensuite la superposition des différentes images.

On a :

$$I' = I_0 \sin^2 \Theta'$$

Comme on admet une bande spectrale d'une certaine largeur, il y a addition des intensités des faisceaux successifs :

$$I' = I (1 + R^2 + R^4 + \dots + R^{2n} + \dots)$$

$$I' = \frac{I}{1 - R^2} \quad \text{ou} \quad 1 - R^2 = \frac{I}{I'}$$

SOIT :

$$1 - R^2 = \frac{\sin^2 \Theta}{\sin^2 \Theta'}$$

d'où R

Mais, en général, les deux lames n'ont pas le même pouvoir réflecteur. En combinant alors trois lames deux par deux, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - R_1 R_2 \\ 1 - R_2 R_3 \\ 1 - R_3 R_1 \end{array} \right.$$

soit R₁ R₂ ; R₂ R₃ ; R₃ R₁

En combinant enfin ces produits, on obtient R₁ , R₂ , R₃

Pour étudier le pouvoir réflecteur de nos lames de cuivre, qui sont généralement moins voisines de l'unité, nous avons employé une méthode légèrement différente.

Sur le faisceau (I) on interpose deux lames, faces cuivrées en regard. En agissant sur les vis de réglage de leur support, on amène le faisceau directement transmis sur la fente. On tourne le polariseur d'un angle Θ pour obtenir l'égalité des plages.

Si T est le pouvoir de transmission du système, I_0 l'intensité du faisceau issu de la lampe, I celle du faisceau transmis, on a :

$$I = I_0 T = I_0 \sin^2 \Theta$$

On amène ensuite le faisceau une fois réfléchi sur la fente par réglage des vis calantes du porte lames. Soient Θ' l'angle dont on tourne le polariseur, I' l'intensité du faisceau qui arrive sur la fente.

Si R_1 et R_2 sont les pouvoirs réflecteurs des lames, on a :

$$I' = I R_1 R_2 = I_0 \sin^2 \Theta'$$

d'où

$$R_1 R_2 = \frac{I'}{I} = \frac{\sin^2 \Theta'}{\sin^2 \Theta}$$

En combinant deux à deux trois lames de pouvoirs réflecteurs R_1 , R_2 , R_3 on obtient les produits :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = R_1 R_2 \\ P_2 = R_1 R_3 \\ P_3 = R_2 R_3 \end{array} \right.$$

On en déduit R_1 , R_2 , R_3

$$R_1^2 = \frac{P_1 P_2}{P_3} \quad R_2^2 = \frac{P_1 P_3}{P_2} \quad R_3^2 = \frac{P_2 P_3}{P_1}$$

Les lames auxiliaires 1 et 2 sont des lames d'aluminium de pouvoir réflecteur voisin de 0,9; elles se conservent longtemps sans altération, ce qui permet de faire la mesure de P_1 en fonction de λ une fois pour toutes.

Pour obtenir le pouvoir réflecteur des lames de cuivre, il suffisait de les combiner avec chacune des lames témoins d'aluminium.

PRECISION DES MESURES DE T ET R

Les valeurs de T et R sont obtenues en réalisant l'égalité de plages. L'erreur relative $\frac{\Delta I}{I}$ commise dans l'appréciation de l'égalité est à peu près indépendante de la valeur absolue de la brillance, si elle n'est ni trop petite ni trop grande. (on règle la brillance en faisant varier la largeur des fentes).

1) ERREUR SUR T

$$T = \frac{I'}{I} \quad \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta I'}{I'} + \frac{\Delta I}{I}$$

Nous venons de voir que $\frac{\Delta I'}{I'} = \frac{\Delta I}{I}$

$$\text{d'où} \quad \frac{\Delta T}{T} = 2 \frac{\Delta I}{I}$$

Donc l'erreur relative sur T est sensiblement constante.

Elle est indépendante de Θ . Mais on ne peut cependant pas prendre Θ quelconque. (Pour avoir une valeur de Θ déterminée, on dispose un écran auxiliaire sur le faisceau II). Pour des valeurs de Θ grandes, une faible variation de I entraîne une grande variation de Θ . Il faudrait alors, au cours des mesures sur une même lame, changer d'écran auxiliaire.

Pour les valeurs de Θ petites, une grande variation de I entraîne une faible variation de Θ . L'appareil manque de sensibilité.

On se place donc dans des conditions telles que Θ ne soit ni trop faible, ni trop grand : vers 45°

$\frac{\Delta I}{I}$ ne dépendant pas de Θ , calculons cette quantité en prenant $\Theta = 45^\circ$

$$I = I_0 \sin^2 \Theta$$

$$I = 2I_0 \sin \Theta \cos \Theta \Delta \Theta$$

$$\frac{\Delta I}{I} = 2 \cotg \Theta \Delta \Theta$$

Cette relation nous montre que $\Delta \Theta$ est d'autant plus petit que $\cotg \Theta$ est plus grand donc que Θ est plus faible (C'est une vérification de ce que nous avons trouvé expérimentalement).

Pour chaque valeur de Θ , on fait 5 à 6 pointés. Pour $\Theta = 45^\circ$, nous avons trouvé $\Delta \Theta = 6$ minutes.

donc ;
$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{2 \times 18}{10.000} = \frac{36}{10.000}$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{72}{10.000} \quad \text{soit pratiquement}$$

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{1}{100}$$

2) ERREUR SUR R

$$R_3^2 = \frac{P_2 P_3}{P_1}$$

$$2 \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta P_1}{P_1} + \frac{\Delta P_2}{P_2} + \frac{\Delta P_3}{P_3}$$

or : $P = \frac{I'}{I} \quad \frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta I}{I} = \text{ete}$

donc : $\frac{\Delta R_3}{R_3} = 3 \frac{\Delta I}{I}$

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{108}{10.000}$$

SOIT : $\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{100}$

Comme précédemment, on utilise des valeurs de Θ de l'ordre de 45°

4° CHAPITRE

RESULTATS DES MESURES POUR LES LAMES DE CUIVRE

ANCIENNEMENT PREPAREES

LAME 1

λ microns	d	T	R
0,450	1,426	0,038	0,504
0,500	1,203	0,063	0,463
0,525	1,180	0,066	0,465
0,550	1,218	0,061	0,505
0,600	1,359	0,044	0,664
0,650	1,550	0,028	0,753
0,675	1,660	0,022	0,765
0,700	1,721	0,019	0,799
0,710	1,701	0,020	
0,725	1,586	0,026	0,952

LAME 2

λ	d	T	R
0,450	0,980	0,105	0,341
0,475	1,003	0,099	0,365
0,500	0,990	0,102	0,387
0,525			0,380
0,550	0,852	0,144	0,370
0,575	0,825	0,149	0,375
0,600	0,851	0,141	0,416
0,650	0,952	0,112	0,560
0,690	1,085	0,082	
0,700	1,112	0,077	0,623
0,710	1,110	0,078	
0,725	1,069	0,085	0,761



LAME 3

λ	d	T	R
0,450	0,942	0,114	0,299
0,475	0,955	0,112	0,325
0,500	0,955	0,112	0,347
0,525			0,355
0,550	0,797	0,159	0,344
0,575	0,775	0,168	0,350
0,600	0,809	0,156	0,385
0,650	0,904	0,125	0,508
0,690	1,021	0,095	
0,700	1,040	0,093	0,528
0,710	1,040	0,093	
0,725	0,991	0,102	0,653

LAME 4

λ	d	T	R
0,450	0,706	0,197	0,182
0,475	0,730	0,185	
0,500	0,732	0,186	0,214
0,525			0,210
0,550	0,590	0,257	0,208
0,575	0,565	0,272	0,220
0,600	0,596	0,253	0,249
0,650	0,695	0,202	0,351
0,700	0,820	0,151	0,383
0,725	0,790	0,162	0,479

LAME 5



λ	d	T	R
0,450	0,504	0,313	0,109
0,475	0,510	0,309	0,119
0,500	0,506	0,312	0,118
0,550	0,456	0,349	0,091
0,590	0,385	0,412	
0,600	0,377	0,419	0,126
0,610	0,381	0,413	
0,650	0,462	0,345	0,194
0,700	0,542	0,287	0,249
0,725	0,535	0,292	0,359

LAME 6

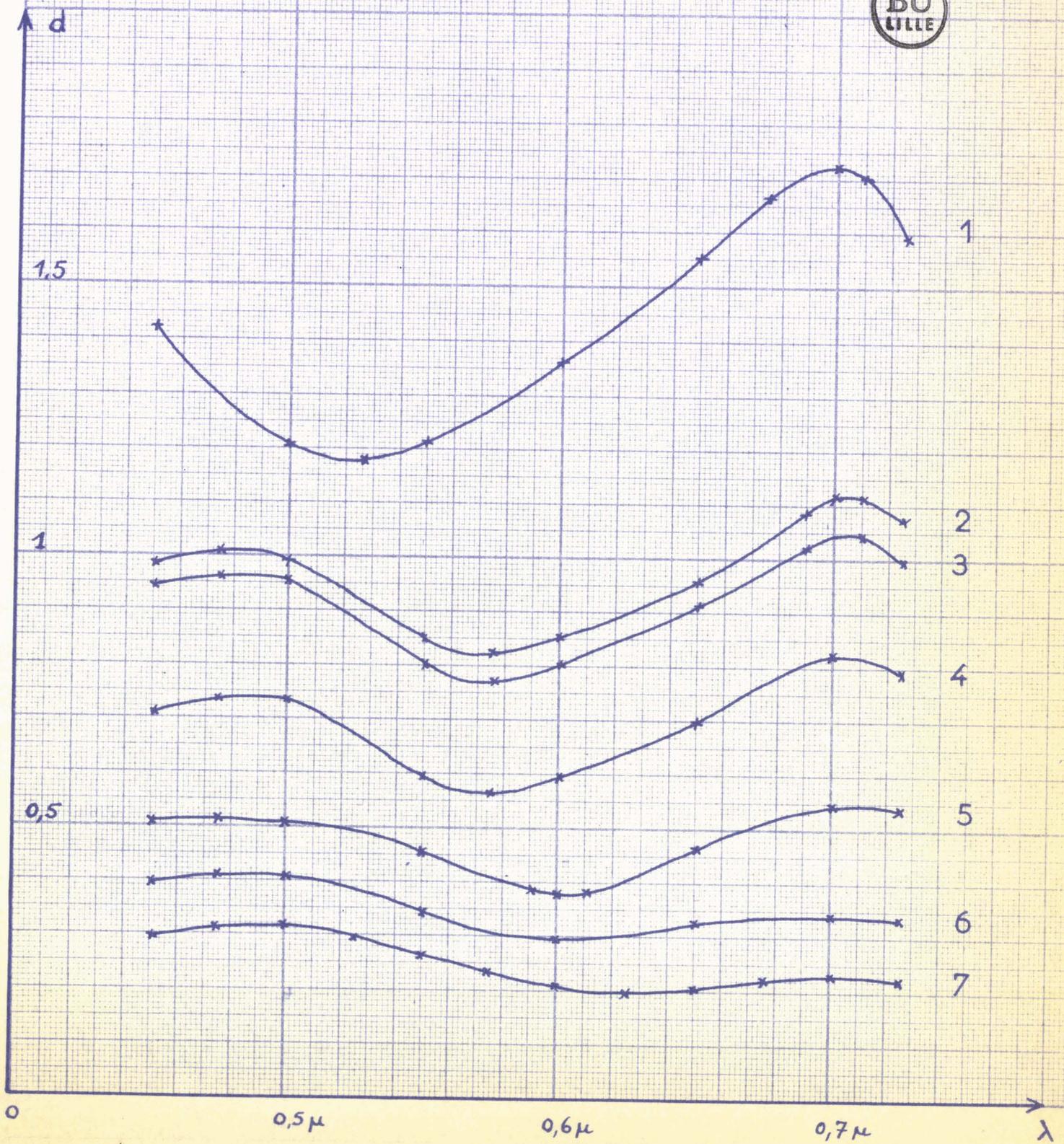
λ	d	T	R
0,450	0,396	0,402	0,090
0,475	0,410	0,389	
0,500	0,405	0,394	0,107
0,550	0,337	0,460	0,077
0,600	0,291	0,512	0,105
0,650	0,324	0,475	0,134
0,700	0,340	0,457	0,134
0,725	0,338	0,459	0,135

LAME 7

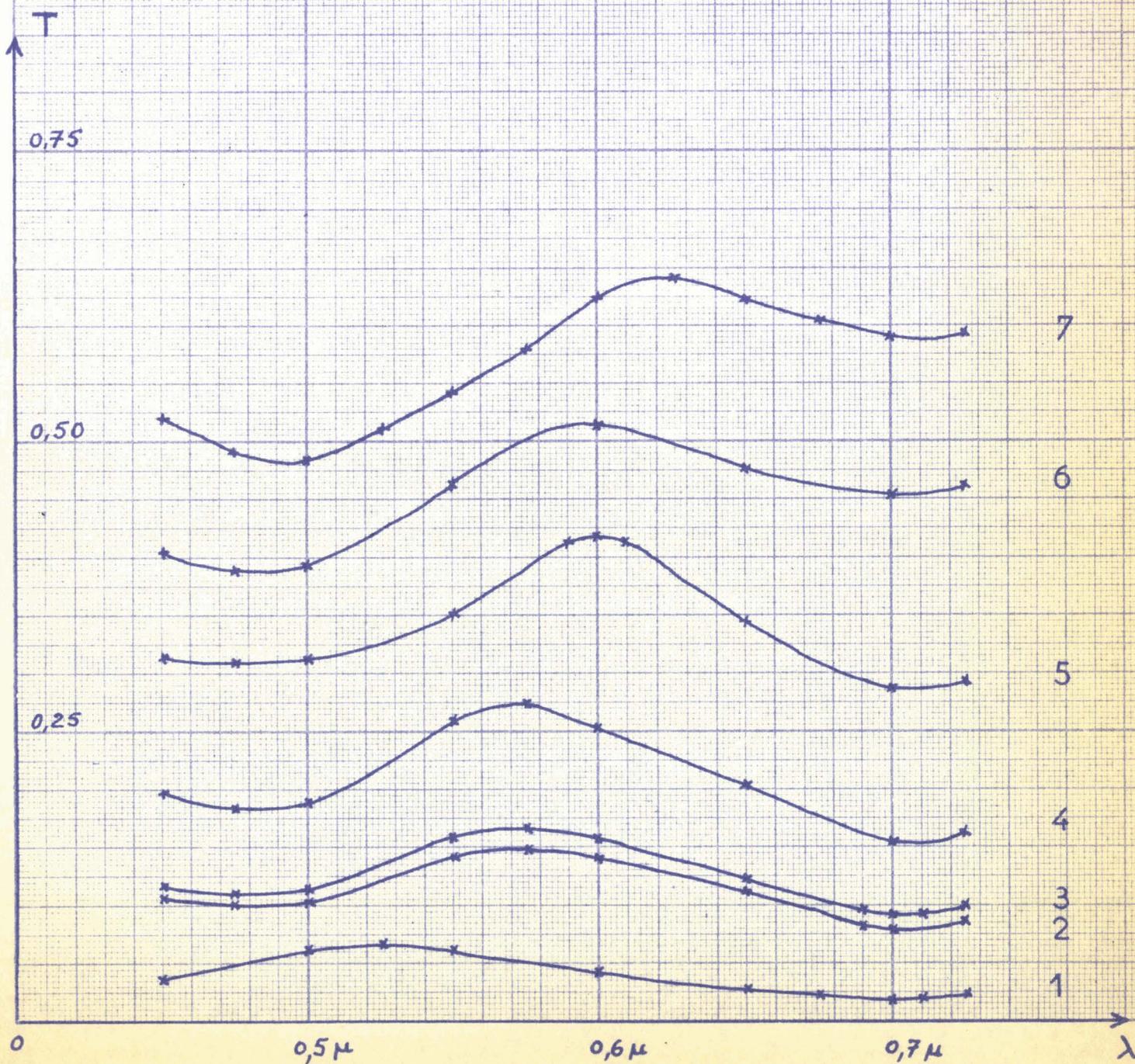


λ	d	T
0,450	0,295	0,507
0,475	0,309	0,491
0,500	0,315	0,484
0,525	0,291	0,512
0,550	0,265	0,543
0,575	0,237	0,580
0,600	0,205	0,623
0,625	0,196	0,636
0,650	0,208	0,619
0,675	0,217	0,607
0,700	0,229	0,590
0,725	0,217	0,593

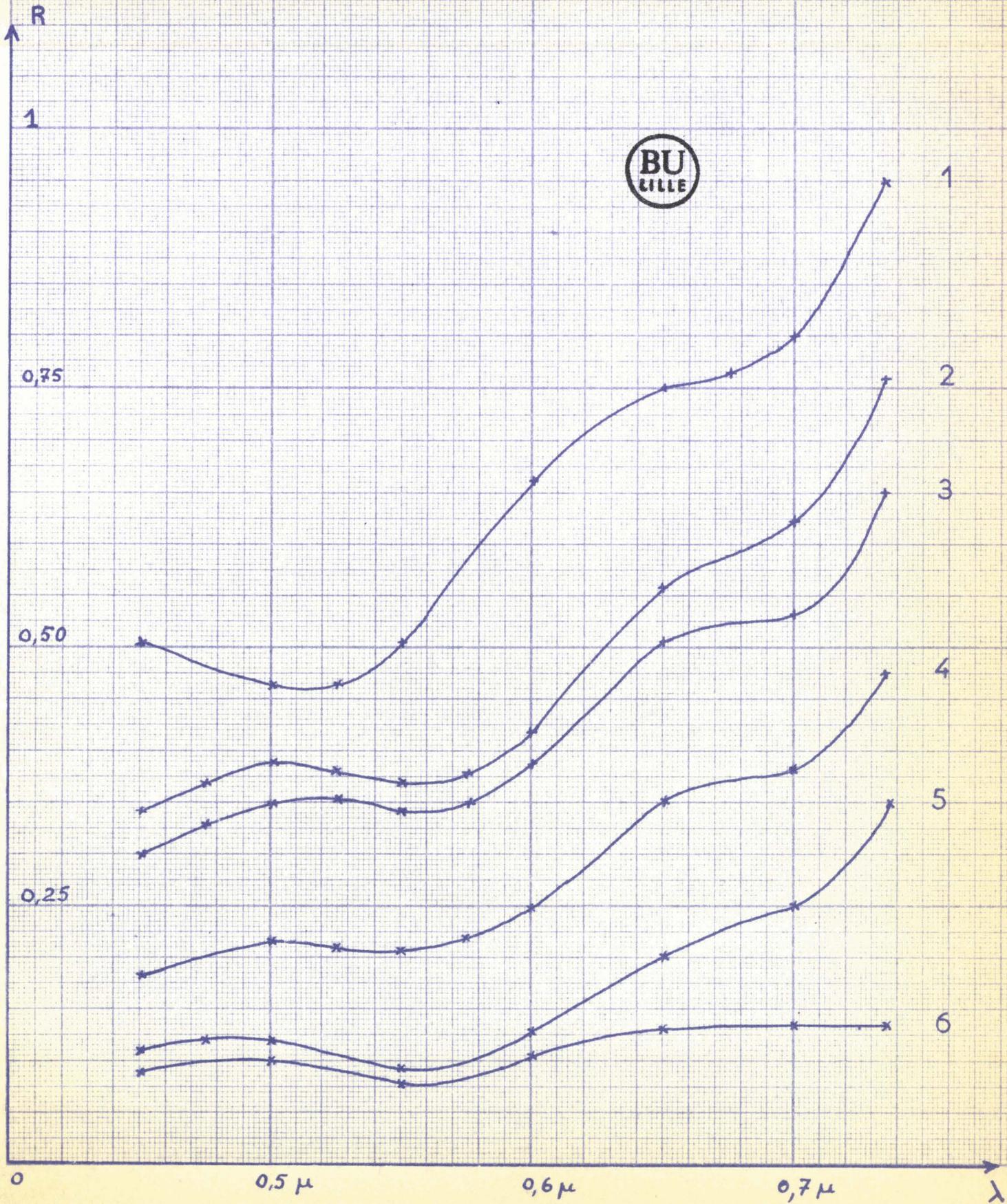
Densité optique en fonction de la longueur d'onde
pour les lames vieilles



Pouvoir de transmission en fonction de la longueur d'onde pour les lames vieilles



Pouvoir de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour les lames vieilles



D'après les courbes, on voit que le pouvoir de transmission varie en fonction de la longueur d'onde. Il présente un maximum dans le spectre visible. Ce maximum se déplace vers les longueurs d'onde décroissantes quand l'épaisseur de cuivre augmente. Pour le jeu de lames étudiées, il se déplace de $0,620 \mu$ à $0,515 \mu$. Ce maximum est encadré de deux minima :

- l'un, situé dans le rouge vers $0,710 \mu$, ne se déplace pratiquement pas avec les différentes lames.

- l'autre, situé dans le bleu, se déplace vers le violet quand l'épaisseur de cuivre augmente.

Pour les lames 6 et 7, le minimum dans le rouge a une valeur plus grande que celui dans le bleu, tandis que pour les autres lames, on a le phénomène contraire.

En examinant une feuille de papier blanc à travers les différentes lames du jeu, on constate que : elle paraît orangée pour les lames de faible épaisseur (6 et 7), puis jaunâtre (lame 5) et verte (le vert se mêlant d'un peu de bleu) quand l'épaisseur de cuivre augmente; ce qui est en accord avec les résultats des mesures.

Nous retrouvons d'autre part les résultats donnés par A. ARON (2) (dans son exposé relatif aux lames minces métalliques) : des lames de faible épaisseur présentent en lumière transmise des colorations variables avec l'épaisseur; au contraire, les lames plus épaisses présentent une teinte caractéristique du métal pratiquement indépendante de l'épaisseur.

Quant au pouvoir de réflexion, les courbes nous montrent que :

- pour la lame n° 6, il varie peu en fonction de la longueur d'onde. Il est pratiquement le même pour le rouge et le bleu, il ne présente qu'un léger minimum dans le jaune. La couche de cuivre est, en ce cas, très mince et le pouvoir réflecteur mesuré se rapproche de celui du dioptre verre-air.

./..

- pour les autres lames, il augmente du bleu au rouge, et plus rapidement vers le rouge; cette augmentation croît avec l'épaisseur de cuivre. Le minimum qui se trouvait dans le jaune pour la lame 6 se déplace vers le bleu quand l'épaisseur augmente.

De même que précédemment, ces résultats sont confirmés par une expérience rapide : on examine une lampe à incandescence par réflexion sur les différentes lames; elle paraît blanche pour la lame 6, puis rose et de plus en plus rouge à mesure que l'épaisseur de cuivre croît.

La couleur de la lumière réfléchie est approximativement complémentaire de celle de la lumière transmise.

On note la rapide augmentation du pouvoir réflecteur à l'extrémité rouge du spectre visible; elle doit vraisemblablement se poursuivre dans le proche infra-rouge.

5° CHAPITRE

RESULTATS DES MESURES POUR LES LAMES DE CUIVRE FRAICHES

LAME 1'

λ	d	T	R
0,450	1,036	0,092	0,488
0,500	0,852	0,141	0,414
0,550			0,375
0,550	0,754	0,176	0,372
0,575	0,752	0,177	0,412
0,600	0,806	0,156	0,472
0,650	0,974	0,106	0,587
0,680	1,035	0,092	
0,700	1,042	0,091	0,583
0,720	1,012	0,097	
0,730	0,980	0,105	0,702



TABLE 2'

λ	d	T	R
0,450	0,715	0,193	0,313
0,475	0,715	0,193	0,330
0,500	0,683	0,208	0,340
0,530			0,295
0,550	0,528	0,297	0,278
0,575	0,493	0,321	0,326
0,600	0,480	0,330	0,406
0,610	0,490	0,324	
0,650	0,517	0,304	0,457
0,700	0,624	0,238	0,457
0,710	0,620	0,239	
0,730	0,601	0,250	0,585



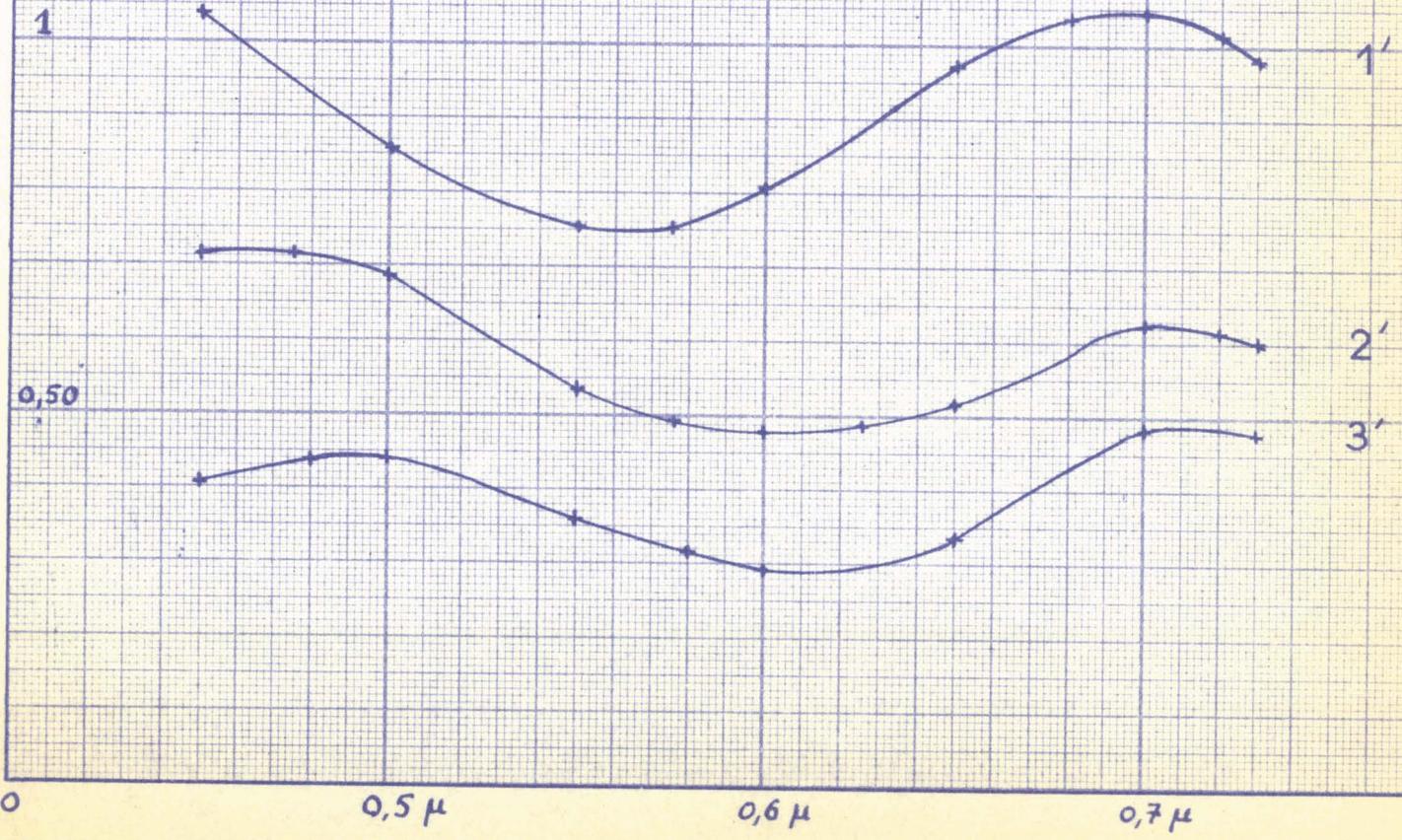
TABLE 3'

λ	d	T	R
0,450	0,406	0,393	0,254
0,480	0,442	0,361	0,265
0,500	0,444	0,359	0,271
0,530			0,255
0,550	0,358	0,438	0,233
0,580	0,315	0,489	0,302
0,600	0,295	0,519	0,264
0,650	0,339	0,458	0,331
0,700	0,486	0,327	0,355
0,710	0,495	0,316	
0,730	0,480	0,331	0,482

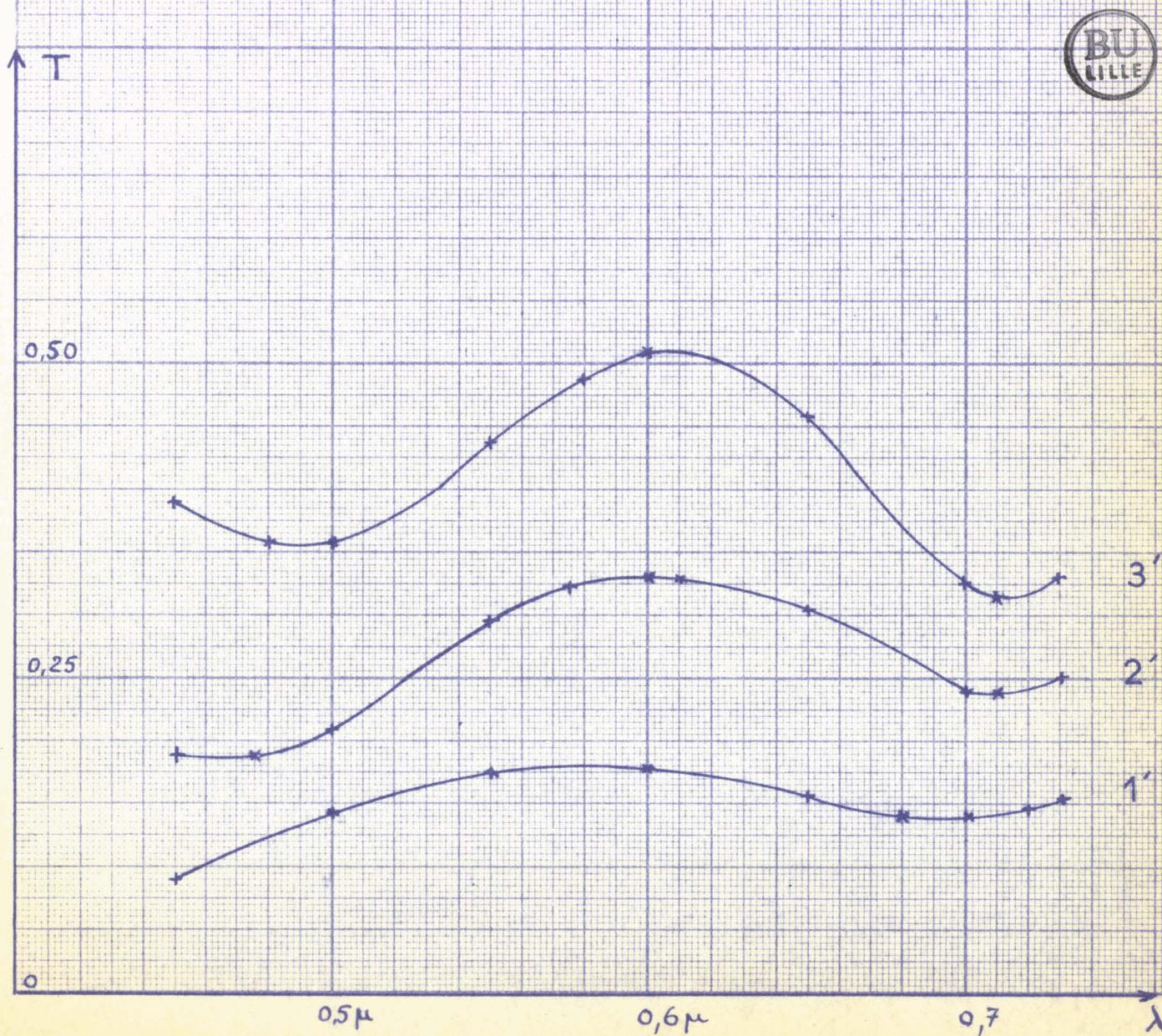
Densité optique en fonction de la longueur d'onde pour les lames fraîches



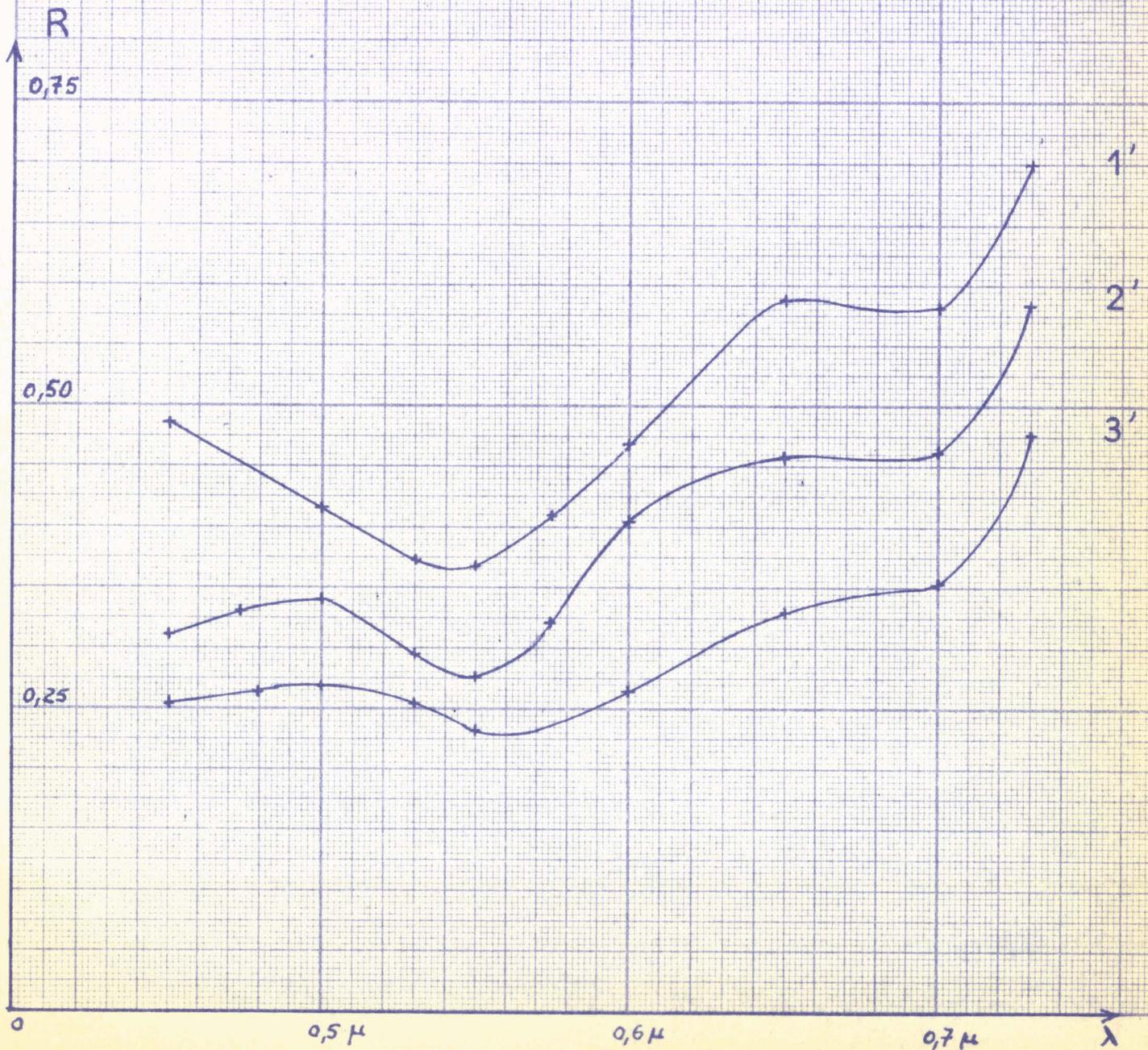
d



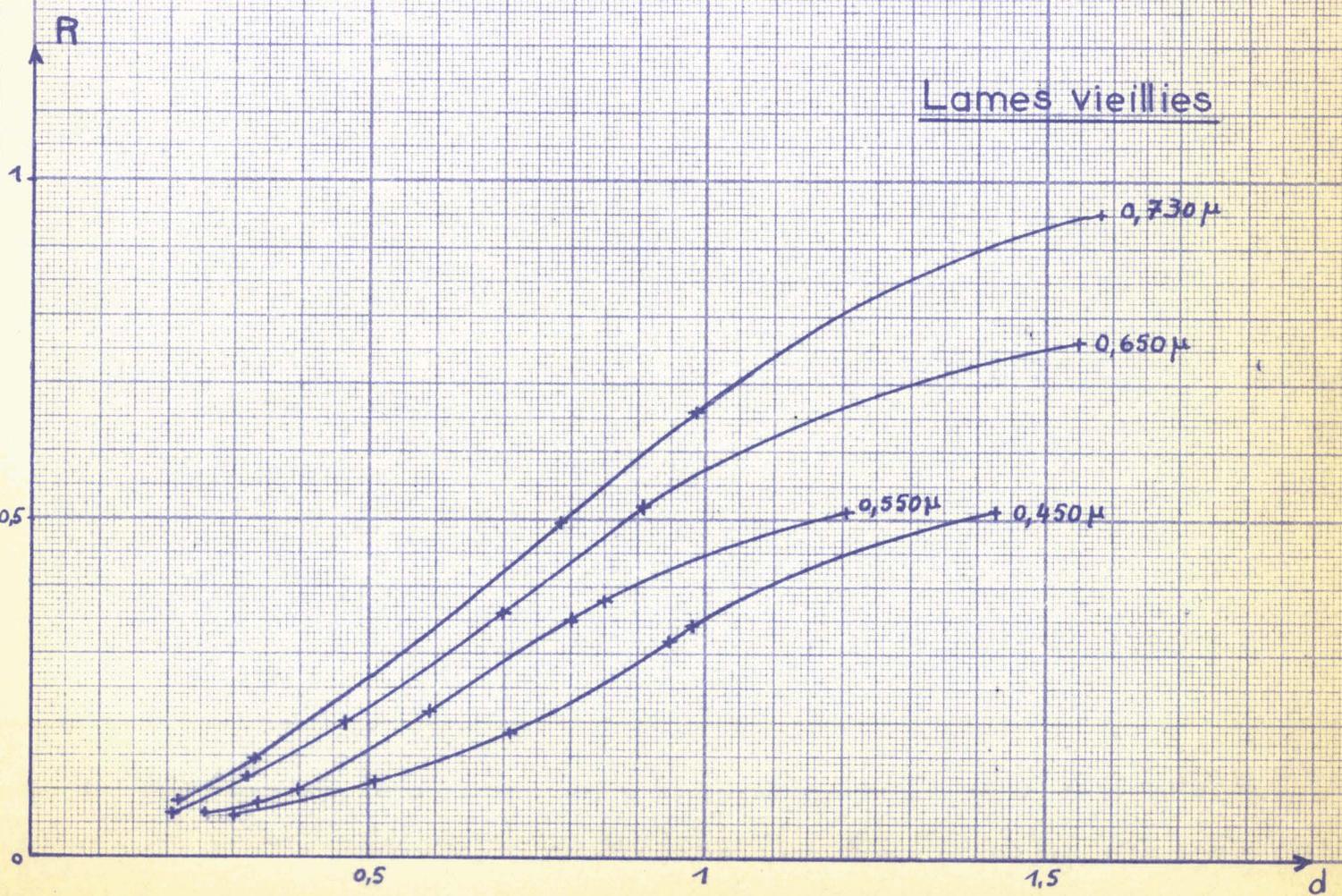
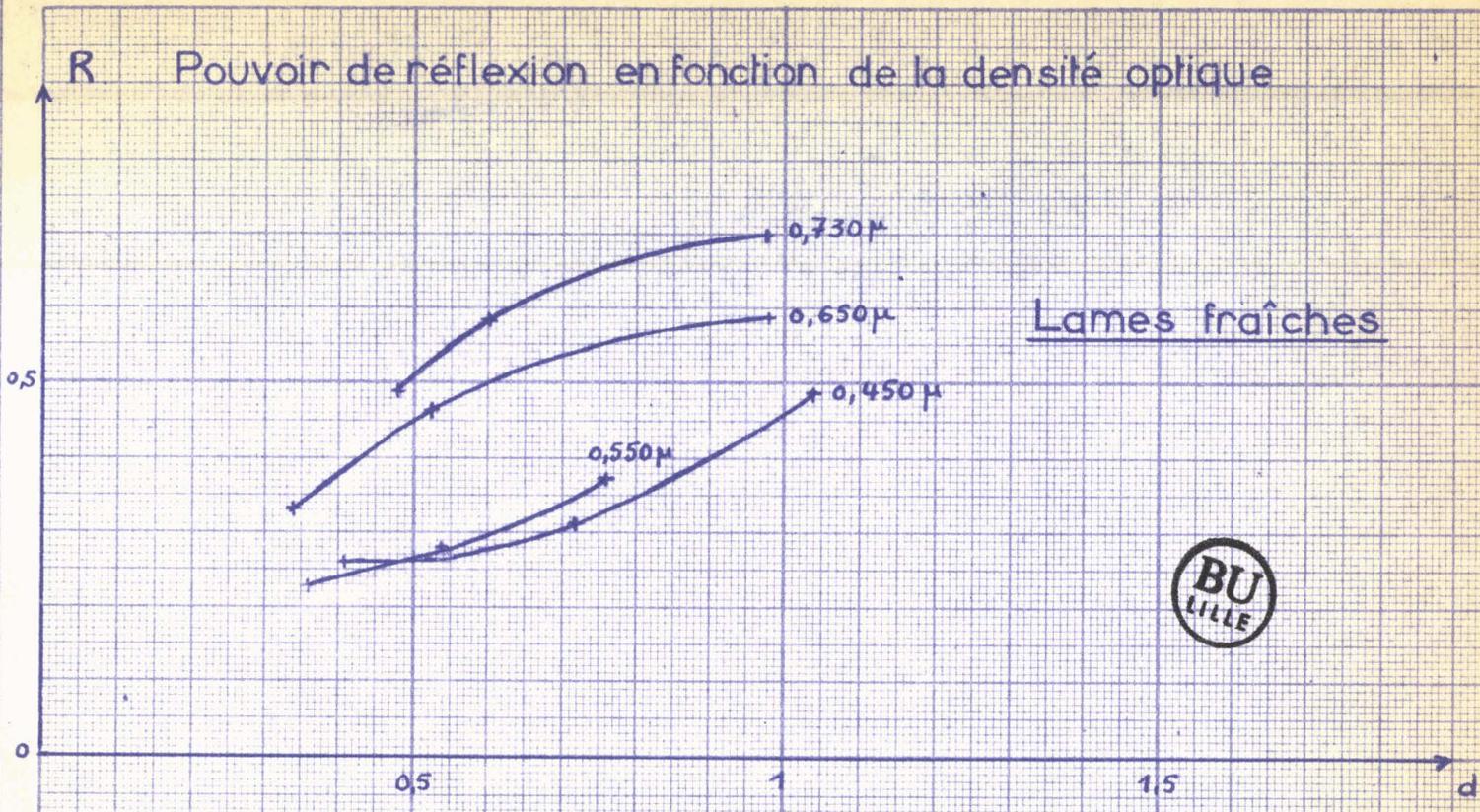
Pouvoir de transmission en fonction de la longueur d'onde pour les lames fraîches



Pouvoir de réflexion en fonction de la longueur d'onde
pour les lames fraîches



R Pouvoir de réflexion en fonction de la densité optique



On voit que l'allure générale des courbes $T = f(\lambda)$ et $R = g(\lambda)$ est sensiblement la même pour le cuivre frais et le cuivre vieilli. Mais les lames 1' 2' 3' de densités optiques voisines de celles des lames 3 4 6 ont des pouvoirs réflecteurs plus élevés. Le pouvoir réflecteur du cuivre diminue donc avec le temps. (une partie du cuivre s'oxyde en Cu_2O , oxyde cuivreux).

Pour rendre plus facile la comparaison entre les lames fraîches et les lames usées, nous avons construit, pour quelques valeurs de λ les courbes donnant le pouvoir réflecteur en fonction de la densité optique dans les 2 cas.

Ces courbes montrent que :

- Pour les faibles densités optiques, le pouvoir réflecteur diminue nettement avec le temps pour toutes les longueurs d'onde.
- A mesure que la densité optique croît, cette diminution est de moins en moins accentuée
- Pour les densités optiques voisines de 1, le vieillissement ne fait pratiquement pas varier le pouvoir réflecteur.

Ce résultat peut d'ailleurs s'expliquer : l'oxydation modifie d'autant plus les propriétés du cuivre que la couche est plus mince.

ESSAIS AU COLLODION

Pour l'étude des lames fraîches : au lieu de faire des pointés dès leur sortie de la cloche, on peut les protéger de l'oxydation par l'air en les recouvrant d'une mince couche d'une substance influant peu sur les pouvoirs de transmission et de réflexion.

Nous avons essayé des pellicules de collodion : nous étalons une goutte de collodion sur toute la surface et nous laissons sécher. Pour obtenir une fine pellicule, nous avons dilué le collodion utilisé dans un mélange d'éther et d'alcool. Après divers essais, nous avons utilisé la concentration suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4} \text{ cc collodion} \\ 6 \text{ cc éther} \\ 2,5 \text{ cc alcool} \end{array} \right.$$

Nous avons ensuite étudié si ce revêtement ne modifie pas les pouvoirs de transmission et de réflexion de la lame.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

pour $\lambda = 0,65 \mu$

$$\begin{array}{l} - \text{ lame non recouverte de collodion : } \\ - \text{ lame recouverte de collodion : } \end{array} \left\{ \begin{array}{l} T = 0,817 \\ R = 0,0429 \\ T = 0,808 \\ R = 0,0517 \end{array} \right.$$

./..

Voyons si les écarts entre ces valeurs correspondent aux erreurs absolues faites sur T et R.

L'erreur absolue sur T, pour T = 0,8 est $\frac{6}{1000}$

Or, l'écart obtenu est $\frac{9}{1000}$

L'erreur absolue sur R, pour R = 0,05 est $\frac{5}{10.000}$

et l'écart obtenu est $\frac{9}{1000}$

Pour une lame peu absorbante, le collodion modifie peu la valeur de T car il est lui-même transparent. Mais la lame ayant un très faible pouvoir réflecteur, la réflexion sur le dioptre collodion - air augmente R.

Remarquons d'ailleurs, que pour de telles lames, la réflexion sur la face cuivre-verre intervenant aussi notablement, la valeur de R est voisine du coefficient de réflexion du verre non métallisé.

Par contre, le procédé peut être intéressant pour protéger des lames épaisses.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux montrent que le pouvoir réflecteur augmente brusquement dans le rouge à partir de $0,7 \mu$. On peut se demander si cette croissance du pouvoir réflecteur se prolonge dans le proche infra-rouge. Il serait alors intéressant de faire l'étude des lames de cuivre dans cette zone de longueurs d'onde.

On constate d'autre part que le vieillissement affecte surtout les propriétés optiques des lames de cuivre de faible densité optique. Or, le revêtement de collodion ne pourrait être intéressant que pour les lames de cuivre épaisses. Il faudrait donc étudier un autre revêtement (par exemple la silice).



- BIBLIOGRAPHIE -

(1) Diplôme d'Etudes Supérieures de Mademoiselle E. COLLET
(Institut de Physique de LILLE, FEVRIER 1953)

(2) A. ARON : Annales de physique 1946, 361 à 494

P. ROUARD : Revue d'optique 1938, 92 et 100

C. DUFOUR : Le vide, 1948

J. STRONG : Procedure in experimental physics

TOLANSKY : Multiple beam interferometry of surface and film



Cette étude a été faite sous la conduite de
Monsieur ROIG, Professeur et Directeur de l'Institut de Physique
de la Faculté des Sciences de LILLE.

Nous tenons à lui témoigner ici notre profonde
gratitude pour l'aide et les conseils qu'il nous a donnés ainsi
que pour les encouragements qu'il nous a prodigués.

Nous y joignons nos remerciements à l'égard de
Messieurs les Professeurs et Membres des Laboratoires qui nous
ont, sans réserve, fait profiter de leur expérience.
