

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&RELTYPE=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

	N°60 (1941)
	N°61 (1942)
	N°62 (1943)
	N°64 (1943)
	N°65 (1943)
	N°66 (1943)
	N°68 (1943)
	N°69 (1943)
	N°70 (1943)
	N°71 (1943)
	N°72 (1944)
	N°73 (1943)
	N°74 (1944)
	N°75 (1944)
	N°78 (1944)
	N°79 (1944)
	N°80 (1944)
	N°81 (1944)
	N°82 (1944)
	N°83 (1944)
	N°84 (1944)
	N°85 (1944)
	N°86 (1945)
	N°87 (1945)
	N°88 (1945)
	N°89 (1945)
	N°90 (1945)
	N°91 (1945)
	N°92 (1945)
	N°93 (1945)
	N°94 (1945)
	N°95 (1946)
	N°96 (1946)
	N°97 (1946)
	N°98 (1944)
	N°99 (1945)
	N°100 (1945)
	N°101 (1946)
	N°102 (1946)
	N°103 (1946)
	N°104 (1946)
	N°105 (1946)
	N°106 (1946)
	N°107 (1947)
	N°108 (1947)
	N°109 (1947)
	N°110 et 111 (1947)
	N° 112 (1947)
	N° 113 (1947)
	N° 114 (1947)
	N° 115 (1947)
	N° 116 (1947)
	N° 117 (1947)
	N° 118 (1948)
	N° 119 (1948)
	N° 120 (1948)
	N° 121 (1948)
	N° 122 (1947)

	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 143 (1950)
	N° 144 (1950)
	N° 145 (1951)
	N° 146 (1951)
	N° 147 (1951)
	N° 148 (1951)
	N° 149 (1951)
	N° 150 (1951)
	N° 151 (1951)
	N° 152 (1951)
	N° 153 (1952)
	N° 154 (1952)
	N° 155 (1952)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	N° 135 (1948)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1948
Collation	1 vol. (p. [490-504]) : ill. ; 28 cm
Nombre de vues	20
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (76)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.76

...

P1329

8° Ku. 107. (72)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



L'OPTIQUE ET LE FONCTIONNEMENT
DU MICROSCOPE PHOTOGRAPHIQUE
L'OBJECTIF POLYCHROMAT
par MM. G. A. Boutry et P. Billard

PUBLICATION N° 135
(Extrait de la Revue de Métallurgie, XLV, n° 12, 1948)



L'Optique et le fonctionnement
du microscope photographique

L'Objectif polychromat



L'Optique et le fonctionnement du microscope photographique L'Objectif polychromat

par G.-A. BOUTRY et P. BILLARD (*)

1

Le microscope oculaire paraît avoir terminé son évolution. En même temps, son usage devient plus fréquemment occasionnel, ou préliminaire. A la mémoire, au dessin, on substitue de plus en plus l'émulsion photographique. Cette altération de son emploi a-t-elle été accompagnée d'une évolution parallèle de l'instrument lui-même? En adaptant une chambre noire au microscope oculaire, a-t-on procédé à un examen de ces conditions nouvelles de fonctionnement? La première partie de ce mémoire sera consacrée à la recherche, par des moyens rapides et élémentaires, des conditions optimales de fonctionnement du microscope photographique.

A. — EFFICACITÉ RÉSOUVANTE

On peut la définir comme le rapport des dimensions linéaires du plus petit détail discernable par l'œil seul sur l'objet et du plus petit détail discernable sur l'épreuve microphotographique, l'observation se faisant dans chaque cas à la distance minimum de vision distincte et dans les conditions d'éclairage les plus favorables. Les propriétés de l'instrument, de l'émulsion, de l'œil interviennent l'une après l'autre pour la déterminer.

1° La limite de séparation des émulsions photographiques a déjà fait l'objet d'études dont l'essentiel est résumé dans un ouvrage de M. Lovichi (1); on a pourtant procédé, au laboratoire, à quelques expériences des-

tinées à vérifier ou préciser des résultats déjà connus. Pour étudier les variations de la limite de résolution d'une émulsion donnée en fonction de la lumination et du contraste de l'objet éclairé, variables principales, mais non uniques en microphotographie, on a utilisé un jeu de mires de Foucault-Bigourdan dessinés en noir sur blanc (contraste 1) dont on a exécuté des copies photographiques dans des conditions de lumination ajustées de façon à obtenir des contrastes variables. Les mires ainsi réalisées

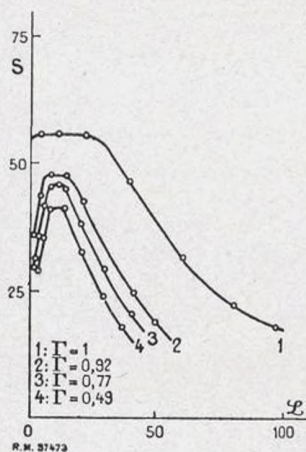


Fig. 1. — Agfa phototechnique Ortho (plaques).

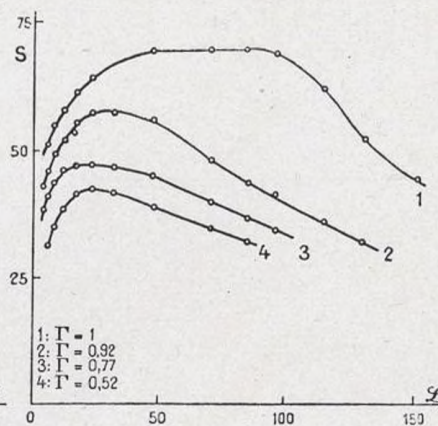


Fig. 2. — Emulsion pour enregistrement cinématographique.

(*) Communication présentée aux Journées Métallurgiques de la Société Française de Métallurgie, le 10 octobre 1947.

avaient des contrastes égaux respectivement à : 1; 0,92; 0,77; 0,52; 0,26; 0,11. En opérant de cette manière,

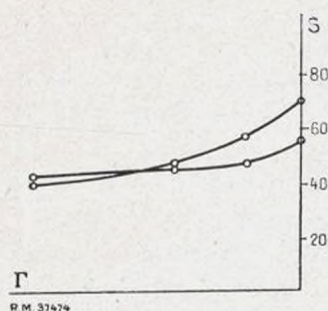


Fig. 3

il est difficile d'obtenir une densité et un contraste bien constants en tous points d'une mire donnée; on y est parvenu pour les quatre premières, dont le contraste et les densités étaient définis et constants à 0,01 près. L'exécution des mires à contraste très faible, qui obligeait à des sous-expositions considérables, n'a pas été assez

bonne pour qu'on fasse état ici des résultats qu'elles ont fourni. Les mires étaient ensuite photographiées à l'aide de deux objectifs photographiques; on s'était assuré que leur limite de résolution sur l'axe était nettement meilleure (quatre fois plus faible) dans les conditions d'emploi que la limite de résolution des émulsions employées. Les éclairagements utilisés étaient invariables, les temps de pose croissants. Le champ angulaire utilisé était petit (de l'ordre de 3 degrés); aucun astigmatisme n'était décelable sur les images.

Les figures 1, 2, 3 résument les résultats obtenus pour deux émulsions. La première, étendue sur plaques, était une émulsion préparée en vue de la reproduction photomécanique, de contraste élevé et de sensibilité relativement grande; les mesures qu'elle a fournies ont été d'une régularité remarquable (la zone marginale des plaques n'était pas utilisée). La seconde, étendue sur film cinématographique, était destinée à l'enregistrement sonore. Le développement, poussé à fond dans tous les cas, a été conduit avec les précautions aujourd'hui classiques en sensimétrie. Le révélateur était composé, selon une formule courante (métol 3 g, hydroquinone 5 g, bromure de potassium 1 g). Les propriétés des objectifs utilisés ne permettaient pas l'étude de clichés de grande finesse de grain.

Sur les figures 1 et 2, la lumination est exprimée en une même unité arbitraire; en ordonnées, figure la résolution obtenue, exprimée en nombre de traits par millimètre, séparés sur les clichés. L'examen de ceux-ci était fait au microscope dans des conditions d'éclairage et de grossissement telles que les propriétés de l'œil ne pussent intervenir que d'une façon négligeable.

Toutes les courbes obtenues montrent qu'il existe un domaine de lumination dans lequel la limite de résolution reste constante. Pour chacune des deux émulsions, ce domaine est d'autant plus étroit que le contraste de l'objet éclairé est plus petit; l'effet est particulièrement marqué pour l'émulsion cinématographique (fig. 2). Ce domaine ne coïncide pas avec le « domaine de pose correcte » tel qu'on le définit en sensimétrie; il paraît correspondre, au contraire, à la région dans laquelle la courbe caractéristique de l'émulsion, variant rapidement, prend ses valeurs les plus grandes (fin de la zone de sous-

exposition proprement dite). La lumination moyenne assurant le pouvoir séparateur maximum varie comme le contraste de l'objet; cette variation, faible dans le cas de l'émulsion pour reproduction photomécanique, est plus accusée pour le film cinématographique. Pour des luminations plus grandes que celles qui assurent, toutes choses égales d'ailleurs, le pouvoir séparateur maximum, toutes les courbes obtenues mettent en évidence une décroissance de la résolution suivant une loi non linéaire et d'ailleurs différente dans les deux cas. Il est parfaitement possible d'obtenir un « rendu » correct sur un cliché avec une limite de séparation deux fois moins bonne que le maximum permis par l'émulsion utilisée. Dans la zone des luminations faibles, le pouvoir séparateur tombe avec une extrême brutalité. L'objet du présent mémoire n'étant pas ici, on s'abstiendra de proposer et de développer des explications de ces phénomènes; sur le rôle joué par la diffusion photographique, l'inégale sensibilité des grains de l'émulsion, etc..., on pourra consulter, entre autres, les références (1) et (2) de la bibliographie.

La limite de résolution obtenue varie avec le contraste de l'objet, et cette variation est particulièrement rapide dans le domaine des contrastes élevés (fig. 3), entre $C=1$ et $C=0,9$ pour la première émulsion, $C=1$ et $C=0,75$ pour la seconde. Entre le contraste 1 et le contraste 0,52, le pouvoir séparateur, exprimé comme il l'est sur les figures, passe de 54 à 41 pour l'émulsion n° 1, de 69,5 à moins de 36 pour l'émulsion n° 2.

Tous ces faits doivent avoir des conséquences défavorables en microphotographie. On sait qu'en choisissant des émulsions spécialement préparées à cet effet, par l'emploi de révélateurs de composition convenable, il est possible d'obtenir des clichés dans lesquels on sépare nettement des dimensions linéaires inférieures à 10 microns; même en opérant ainsi, une limite de résolution aussi basse ne peut être obtenue qu'en ajustant avec beaucoup de soin la lumination employée; — celle-ci sera variable en général avec le contraste de l'objet, de sorte qu'on ne peut espérer qu'une unique microphotographie, même très bien faite, puisse toujours suffire à l'examen d'une préparation donnée; — enfin, si le pouvoir séparateur d'une émulsion, pour le contraste 1, vaut a , on fera bien d'admettre que, travaillant sur un objet dans lequel les contrastes varient entre 1 et 0,5 (cas très fréquent), le pouvoir séparateur effectivement obtenu avec des poses bien correctes, pourra ne pas dépasser $a/2$ dans les zones les moins contrastées. Pour toutes ces raisons, il paraît prudent de considérer, dans les raisonnements qui suivent, qu'on ne doit pas espérer, en pratique, obtenir des limites de résolution meilleures que 20 microns dans l'exécution des clichés microphotographiques.

Les fabricants feraient sagement d'indiquer, pour les émulsions destinées à cet usage, les limites de séparation obtenues effectivement et l'ordre de grandeur des luminations correctes.

2° Pour que le pouvoir séparateur dont l'objectif est capable soit entièrement utilisé, nous admettrons, d'après ce qui précède, que le négatif doit être exécuté avec un grandissement γ_m tel que l'on ait

$$\frac{1,22 \lambda}{2 \sin u_2} = 20 \mu$$

en désignant par u_2 le demi-angle d'ouverture des faisceaux sortant. Comme la condition des sinus donne :

$$\sin u_2 = \frac{1}{\gamma} n_1 \sin u_1$$

on aura donc

$$\gamma_m = \frac{40 n_1 \sin u_1}{1,22 \lambda}$$

c'est-à-dire pour la raie verte du spectre du mercure ($\lambda = 0,546 \mu$).

$$\gamma_m = 60 n_1 \sin u_1$$

relation qui, appliquée à trois séries courantes d'objectifs actuels, permet d'établir le tableau I.

Sur les seize objectifs de ce tableau, six seulement ont un grandissement propre dépassant la valeur minimum qui permettrait, par leur seul emploi, d'obtenir un négatif utilisant pleinement leur pouvoir séparateur; deux de ces derniers ont d'ailleurs un grandissement propre dépassant beaucoup cette valeur. Il est clair que les constructeurs n'ont pas été guidés dans le choix des agrandissements par les considérations qui précèdent; aussi bien, jamais les objectifs actuels ne sont employés, même en photographie, qu'associés à une combinaison « oculaire ».

3° La limite de séparation donnée par l'œil examinant l'épreuve finale sera, en première approximation, uniquement fonction des contrastes offerts par celle-ci : car nous pouvons choisir au mieux les conditions d'éclairément. Admettons que les contrastes de l'objet ont été

TABLEAU I

	Ouverture numérique	Grandissement pour lequel l'objectif est construit	Grandissement photographique minimum
Objectifs allemands (examen par transparence)	0,15	6	9
	0,30	10	18
	0,65	26	39
	0,95	40	57
	1,30	64	78
Objectifs français (examen par transparence)	0,18	7	10,8
	0,42	16	25,2
	0,65	30	39
	0,90	60	54
	1,30	92	78
Objectifs autrichiens (métallographie)	0,15	8	9
	0,25	15	15
	0,40	30	24
	0,65	65	39
	0,95	85	57
	1,30	150	78

TABLEAU II

Ouverture numérique	$\Gamma_{\text{minim.}} = 450 n_1 \sin u_1$
0,15	67,5
0,30	135
0,65	292,5
0,95	427,5
1,30	585

fidèlement reproduits. Posons, d'après les résultats d'Arnulf (3) qu'entre les contrastes 1 et 0,5 cette limite est peu variable et que, pour l'examen pratiqué sans fatigue par un observateur « normal », elle doit atteindre environ deux minutes d'arc. Cela correspond, sur l'épreuve étudiée à distance de 25 cm, à une dimension linéaire de 150 microns. Le grandissement total à utiliser vaut donc au moins

$$\Gamma_m = \frac{300 n_1 \sin u_1}{1,22 \lambda}$$

ce qui donne, pour la raie verte du mercure les chiffres du tableau II.

Actuellement, les microphotographies à faible contraste sont malheureusement fréquentes : on pourra être amené, pour résoudre à coup sûr des détails dans des régions de contraste 0,25 par exemple, à doubler les valeurs de γ et de Γ données ci-dessus : dans ce domaine, en effet, la limite de résolution des émulsions courantes et celle de l'œil paraissent toutes deux doubler. Les images obtenues seront alors de qualité médiocre; les valeurs minima de Γ ne doivent être dépassées de beaucoup qu'en cas d'absolue nécessité.

B. — LUMINATION, CHAMP ET PROFONDEUR DE CHAMP

Les raisons pour lesquelles on vient de considérer la possibilité de prendre des microphotographies à l'aide de l'objectif seul vont commencer d'apparaître.

1° Le rapport Γ_m/γ_m est égal à 7,5. Les luminations à employer, dans les cas où la photographie est prise directement au grandissement Γ_m et dans le cas où l'on se contente du grandissement γ_m , sont donc entre elles dans le rapport 1/56 environ. En admettant la loi de réciprocité, suffisante ici, le temps de pose à employer dans le premier cas sera environ cinquante-six fois plus grand dans le premier cas que dans le second. Or, même avec les statifs les plus stables, la microphotographie exige impérieusement des poses aussi courtes que possible : l'amplitude des déplacements relatifs de l'objet et de l'objectif (vibrations) est multipliée par le grandissement utilisé. L'expérience montre l'intérêt de cette remarque, valable aussi pour le microscope électronique. On doit utiliser le temps de pose le plus court possible, c'est-à-dire travailler avec un grandissement aussi petit que le permettent les propriétés de l'objectif et de l'émulsion. Les épreuves seront agrandies ultérieurement jusqu'à atteindre ou dépasser Γ_m .

TABLEAU III

Ouverture numérique	Grandissement	Δl_1 microns	Δl_2 microns	Profondeur de champ photographique totale (microns)	Profondeur de champ visuelle, le grossissement étant numériquement égal au grandissement ci-contre (microns)
0,10	45	33	54,6	87,6	177,1
0,15	68	14,5	24,3	38,8	68,4
0,20	90	8,15	13,6	21,7	44,5
0,30	135	3,5	5,9	9,4	19,6
0,35	158	2,66	4,3	7	14,4
0,50	225	1,15	2,0	3,15	6,93
0,65	293	0,6	1,15	1,75	4,1
0,95	428	0,11	0,4	0,51	1,75

Pour que la granulation du négatif, agrandie, ne soit pas trop gênante sur l'épreuve finale, il convient pourtant de choisir un agrandissement qui n'utilise pas au maximum le pouvoir séparateur de l'émulsion : c'est une raison de plus pour laquelle, même pour des émulsions à grain fin, nous avons défini γ_m pour une limite de résolution de 20 microns (1).

2° La profondeur de champ du microscope photographique est bien différente, dans sa grandeur et dans les lois qu'elle suit, de celle que l'on connaît à l'instrument oculaire. Soit γ le grandissement linéaire utilisé. Au cercle de diffusion toléré sur l'image, de diamètre $2\Delta y_2$ correspond, dans le plan objet, un cercle de diamètre

$$2\Delta y_1 = \frac{2\Delta y_2}{\gamma}$$

Appelons 2ρ le diamètre de la pupille d'entrée (2), l la distance qui sépare celle-ci du plan de mise au point correcte. On établit, à l'aide du raisonnement utilisé pour tout objectif photographique que la profondeur du champ linéaire vaut

$$\Delta l_1 \approx l \frac{2\Delta y_1}{\rho}$$

Notons que $\frac{\rho}{l} = \tan u_1$, par définition. On obtient donc :

$$\Delta l_1 \approx 2\Delta y_1 \cotang u_1 = \frac{\cotang u_1}{2\Delta y_2} \gamma$$

Soit encore Δ le tirage (distance séparant l'image de la pupille de sortie), P la convergence de l'instrument ; on a toujours très sensiblement

$$\gamma = P\Delta$$

et la relation précédente peut encore s'écrire :

$$\Delta l_1 = \frac{2\Delta y_2 \cotang u_2}{P\Delta}$$

A cette profondeur de champ, il convient d'ajouter celle qui provient de la diffraction donnée par l'objectif et qui vaut, comme on sait :

$$\Delta l_2 \approx \frac{\lambda n_1}{4 \left[n_1 \sin \frac{u_1}{2} \right]^2}$$

Le tableau III et la figure 4 indiquent à quels résultats on doit s'attendre.

Les calculs résumés ci-dessus admettent un cercle de diffusion toléré, sur l'image finale, de 150 microns. Pour

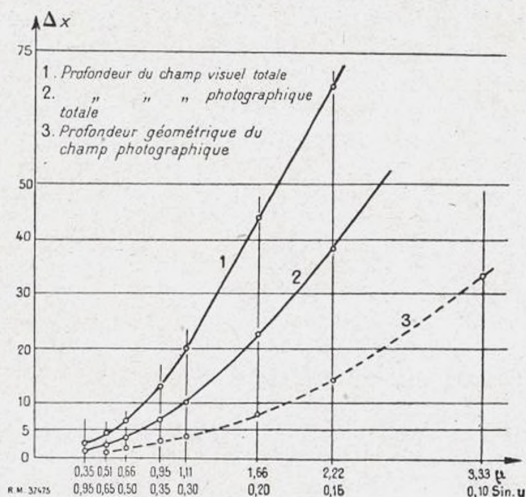


Fig. 4

des images qui seront vues sous des diamètres apparents égaux, la profondeur de champ photographique est toujours inférieure ou égale à la moitié de la profondeur de champ visuelle; l'expérience confirme aisément le fait, qui est un des inconvénients graves de la microphotographie, spécialement en métallographie, où beaucoup de préparations offrent des reliefs non négligeables; pour ne pas l'exagérer, il convient de n'utiliser ni grossissements excessifs ni combinaisons inutilement ouvertes.

3° Dans tous les microscopes photographiques actuels, l'image donnée par l'objectif est reprise et agrandie par un système de projection dont la construction diffère le plus souvent peu de celle des oculaires visuels; le cercle de champ image est défini par les dimensions d'un diaphragme placé dans le plan d'une image intermédiaire, à l'intérieur de la monture de ce système projecteur. Soit α_2 l'angle que fait avec l'axe le rayon moyen d'un pinceau convergent au bord du champ ainsi défini; il dépend du projecteur utilisé, et nullement de l'objectif. Soit P la convergence du microscope; comme la pupille de sortie est très voisine du foyer image de l'ensemble, on a toujours à peu près, et en l'absence de distorsion :

$$\varnothing_1 = \frac{2 \tan \alpha_2}{P} = \frac{2 \tan \alpha_2}{p \cdot \gamma_1}$$

où \varnothing_1 est le diamètre linéaire du champ objet ainsi défini. Ce champ est toujours fort petit, ce qui est dommage : dans l'examen oculaire, l'observateur est libre d'observer la préparation en déplaçant celle-ci dans son plan à l'aide d'une platine mobile; en microphotographie, on se voit souvent condamné à conserver des images incomplètes, ou à multiplier le nombre des clichés.

Un exemple précisera; soit un « oculaire de projection » de puissance 100 dioptries, un tirage du tube de 250 mm; posons $\alpha_2 = 25^\circ$. L'inclinaison α_1 du rayon moyen d'un faisceau parti du bord du champ objet est alors de l'ordre du degré d'arc, avec les diamètres des diaphragmes utilisés dans les combinaisons actuelles. Admettons qu'on désire porter cette inclinaison à 4° (on verra plus loin que la chose est possible) : il faudra quadrupler le diamètre du système projecteur, sans en modifier la puissance; c'est là une entreprise désespérée.

En d'autres termes, même avec des objectifs parfaits, l'emploi d'un « oculaire de projection » rend impossible l'obtention de champs élevés dans le microscope photo-

graphique. Mais on vient de voir que, pourvu qu'on ait donné à l'objectif un grossissement propre au moins égal à γ_m , l'oculaire de projection devenait au moins inutile : c'est une seconde raison majeure pour en éviter l'emploi. Il suffit d'agrandir ultérieurement le négatif observé, opération qui n'exige que des qualités usuelles de l'objectif d'agrandissement.

4° Si l'objectif est employé seul, la manière dont est définie le champ qu'il donne ne se distingue pas de ce qu'on observe avec n'importe quel objectif photographique. En général, la pupille d'entrée n'est définie et invariable que pour un certain champ de pleine ouverture, autour duquel règne un champ de contour dans la définition duquel interviennent en général les montures de tous les verres utilisés. Même en supposant l'objectif parfaitement corrigé, son pouvoir séparateur ne restera pas constant dans toute l'étendue du champ, puisque l'ouverture des faisceaux entrant est variable avec l'inclinaison. Dans toutes les combinaisons actuelles, ces effets ne sauraient être mis en évidence : le champ effectif est limité par une énorme courbure de l'image qui rend en général l'objectif inutilisable dès que les inclinaisons des rayons moyens entrant deviennent un peu fortes.

5° Admettons qu'on dispose d'un objectif donnant une image plane dans les limites étendues; dans une photographie de format imposé faite avec cet objectif seul, on doit, pour conserver le champ le plus grand possible, ne pas dépasser le grossissement minimum compatible avec la résolution qu'on désire obtenir. Dans une certaine mesure, l'obtention d'un grand champ et la résolution des détails de faible contraste sont des exigences contradictoires. Il y a intérêt à augmenter les contrastes obtenus sur l'image, en étudiant spécialement les objectifs à ce point de vue.

On résumera comme suit cette étude préliminaire :

Les résultats obtenus avec le microscope photographique doivent être améliorés.

— en opérant avec l'objectif seul, avec grossissement ultérieur du négatif obtenu.

— en utilisant alors des grossissements primaires au moins égaux au grossissement minimum défini ci-dessus;

— en dépassant le moins possible ces valeurs minima;

— en construisant des objectifs spécialement pour cet usage, dans lesquels la courbure du champ sera réduite et les contrastes de l'image améliorés.

II

Dans le calcul d'un système optique, la première difficulté qui se présente est dans le choix rationnel des conditions qu'on cherchera à réaliser, et dans l'ordre de leur préséance; car il faut sacrifier l'utile à l'indispensable. On a déjà dit que le développement historique

du microscope est celui d'un instrument oculaire : la construction actuelle de ses objectifs s'en ressent fortement.

La correction de l'aberration de sphéricité, la vérification de la condition des sinus à toutes ouvertures s'im-

posent dans tous les cas. L'usage oculaire, d'une part, la nécessité d'utiliser des sources de grande brillance, qu'on ne savait réaliser qu'émettant des lumières complexes, a forcé les constructeurs à utiliser tous les degrés de liberté restants à corriger aussi complètement que possible le chromatisme de position ou de diamètre apparent. Le terme final de ce long travail a été la série des objectifs *apochromatiques*, dans lesquels l'aberration de sphéricité et la coma sont corrigées pour deux radiations et où les images correspondant à trois radiations se forment dans le même plan de front. Ces résultats furent obtenus en abandonnant toute tentative de corriger la courbure du champ, et en tolérant un *chromatisme de grandeur* qu'on demandait à des oculaires compensateurs de réduire.

De tels objectifs sont particulièrement mal adaptés à l'usage photographique. On a déjà vu que le champ acceptable en est très petit. Surtout, aucun système de projection concevable ne saurait donner dans un même plan deux images, de même diamètre linéaire, de deux objets superposés qui ne sont pas de même taille. Il en résulte que l'image projetée n'est pas véritablement, et ne peut pas être achromatique. Tous les métallographes savent bien qu'on n'obtient de clichés acceptables qu'en munissant la source blanche de filtres jaunes ou verts supprimant l'extrémité la plus réfrangible du spectre. Le chromatisme résiduel de ces images en diminue parfois gravement le contraste (sensibilité des émulsions au bleu et au violet) et nuit ainsi à la qualité des épreuves et au pouvoir séparateur obtenu.

Ce sont d'autres conditions, d'ailleurs évidentes, qu'il faudrait imposer à l'ensemble objectif-oculaire de projection pour parvenir à un achromatisme photographique acceptable. De toutes façons, l'obtention d'un achromatisme photographique vraiment bon est une entreprise très difficile, sinon désespérée, si l'on persévère dans l'emploi exclusif de systèmes dioptriques. Mais cet achromatisme est-il nécessaire? Si l'on excepte le cas, qui reste rare, de la microphotographie en couleurs, la réponse à cette question est négative : nous disposons aujourd'hui de sources monochromatiques de grande brillance.

Aucun microscopiste ne se résignera à ne photographier ses préparations qu'en un seul et invariable éclairage monochromatique : il est toujours, ou presque, intéressé par les variations de leur contraste avec la longueur d'onde. Mais ces variations, il les saisira mieux en exécutant deux ou plusieurs clichés successifs avec des éclairages monochromatiques de longueur d'onde variable. Une telle façon d'opérer ne sera acceptée que si elle est commode, rapide et peu dispendieuse : le même objectif doit pouvoir servir dans tous les cas.

L'ouverture et le grandissement numérique étant imposés, les qualités essentielles à exiger d'un objectif de ce genre sont donc, dans l'ordre d'importance :

a) la réduction de l'aberration de sphéricité et de la coma à toutes ouvertures, pour l'indice moyen du domaine d'emploi;

b) la réduction de la variation chromatique de ces aberrations dans tout le domaine d'emploi à des valeurs ne dépassant pas les maxima définis par la condition de Rayleigh calculée pour le plan de mise au point optima;

c) l'extension du champ de netteté acceptable, par réduction de la courbure et de l'astigmatisme dans toute la mesure du possible.

La variation de convergence avec la longueur d'onde étant négligée, un tel objectif sera incapable de donner des images en lumière blanche; chacune des images monochromatiques qu'il pourra fournir dans son domaine spectral d'emploi sera correcte.

Aucune combinaison actuelle ne satisfaisant à ces conditions, il reste à montrer que la construction de tels objectifs ne rencontre pas de difficultés particulières : on a donc établi, au laboratoire, un prototype d'après les indications ci-dessus.

Un problème d'optique dont la solution entraînait le calcul de doublets satisfaisant aux conditions a) et b) avait été résolu avec bonheur par M. J. Cojan (objectifs du spectrophotomètre enregistreur Boutry-Gillod). On a d'abord étudié les propriétés générales d'une famille de doublets à laquelle appartiennent les combinaisons remarquables qu'il avait utilisées.

Ces doublets, qui n'ont pas la forme classique des combinaisons, satisfaisant à la condition de d'Alembert,

TABLEAU IV

	Crown B 1858 Parra-Mantois	Silice fondue
R_1	+ 63,21 mm	+ 58,83 mm
e_1	3,10 —	8,0 —
R'_1	— 157,15 —	— 125,05 —
e (air)	3,14 —	10,0 —
R_2	— 54,91 —	— 49,38 —
e_2	3,50 —	5,0 —
R'_2	— 65,36 —	— 63,49 —
Ouverture max. .	f/4	f/3
Variation de l'aberration sphérique de e à 405	$\Delta \left[\frac{\delta x'}{f} \right]$ 0,0002	0,0004
Variation de la coma (même intervalle) . . .	$\Delta \left[\frac{\delta c}{f} \right]$ 0,0001	0,0009



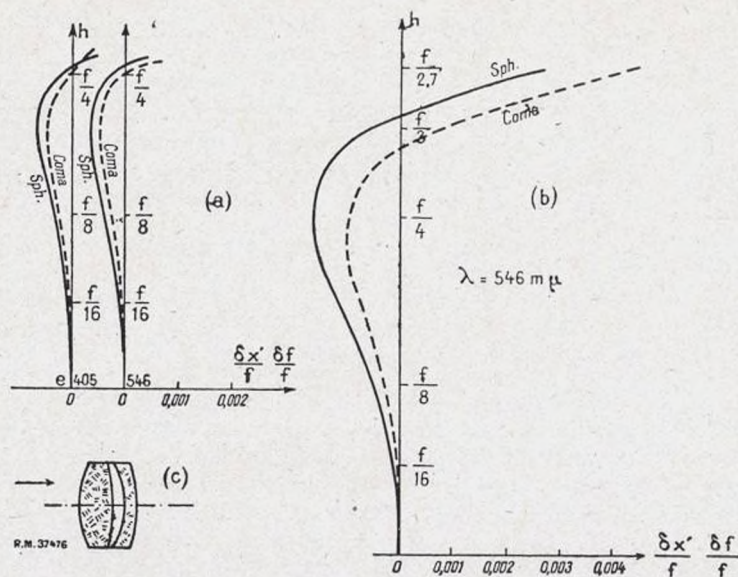


Fig. 5. — a) Variation chromatique de l'aberration sphérique de l'objectif en crown à $f/4$; b) Aberration sphérique de l'objectif en silice.

n'utilisent qu'une seule matière transparente. Ils se composent toujours, quand on les corrige pour l'infini, d'une lentille biconvexe suivie d'un ménisque divergent de cambrure négative; les deux lentilles sont séparées par une lame d'air dont l'épaisseur est maxima sur l'axe optique. L'interstice est en général négatif.

Un calcul algébrique est utile pour déterminer la zone de correction, à partir duquel les formes définitives sont déterminées par tâtonnement successifs. A titre d'exemple des résultats obtenus, nous donnerons les propriétés principales de deux doublets calculés pour une distance focale de 100 mm (tableau IV).

Les figures 5, 6, 7 résument les résultats relatifs à l'aberration de sphéricité et à la coma. Deux faits méritent mention : la correction reste remarquablement bonne pour des ouvertures déjà fortes; c'est ainsi qu'un objectif de silice de ce type satisfait à la condition de Rayleigh, pour une distance focale de 75 mm jusqu'à des ouvertures de l'ordre de $f/2,7$. La variation chromatique des aberrations, dans laquelle l'épaisseur de la lame d'air joue un rôle essentiel, est remarquablement lente. Le choix de la matière est déterminé par une règle évidente: la variation chromatique est d'autant plus faible que ν est plus petit; les verres légers (crown et fluor-crown), le quartz, le silice fondue, le fluorure de lithium sont particulièrement indiqués.

Quand on modifie les paramètres de construction, on constate une stabilité remarquable des corrections obtenues; les remarques suivantes aident à la conduite des calculs :

1° Si l'on conserve les paramètres de forme en chan-

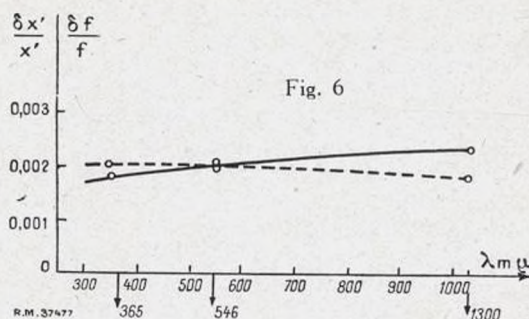


Fig. 6

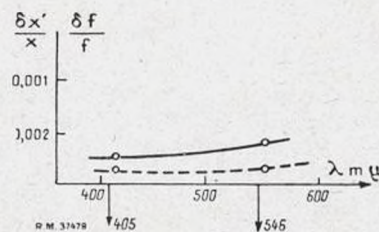


Fig. 7

geant de verre, on constate que la variation de la coma, en fonction de l'indice, est notablement plus rapide que celle de l'aberration de sphéricité. La coma tend à se sous-corriger fortement quand l'indice diminue;

2° pour changer l'ouverture utile d'un doublet déterminé, il suffit d'agir sur la cambrure de la lentille divergente, puissance et interstice restant constants. Pour des variations d'ouverture faibles, les courbes d'aberration et de coma se déplacent ensemble; pour des variations plus fortes, la coma croît plus vite que l'aberration de sphéricité;

3° enfin si l'on augmente l'épaisseur de la lame d'air, on tend vers la sous-corrrection; la coma varie un peu moins vite que l'aberration sphérique.

Les objectifs calculés pour des distances finies ne se distinguent pas par des propriétés particulières des doublets précédents; on n'étudiera pas autrement leurs propriétés.

Pour passer de là à l'objectif de microscope, la première préoccupation sera d'augmenter l'ouverture numérique : on utilisera l'artifice de Lister et l'on placera l'un derrière l'autre deux doublets du type précédent, retournés et corrigés pour des distances convenables. On dispose alors de degrés de libertés supplémentaires : chacun sait qu'il est avantageux de maintenir à chaque doublet des résidus d'aberration sphérique et de coma de sens opposés. C'est ce qui a été fait. La distance de mise au point adoptée était (position du plan image) de 250 mm; la condition de Rayleigh permettait de tolérer, dans le cas où la courbe d'aberration se replie une seule fois, une aberration zonale longitudinale variant de 12 à

TABLEAU V

	Objectif 1 Fluor-crown A 6365 $n \cong 1,465$ $v \cong 65$	Objectif 2 Fluor-Kron Schott FK6- 27363-4568 $n \cong 1,447$ $v \cong 68$
R_1	plan	plan
e_1	1,5	1,5
R'_1	+ 5,00	+ 5,00
e (air)	4,9	4,3
R_2	- 63,61	- 55,49
e_2	2,0	2,0
R'_2	- 54,56	- 5,00
E (air)	1,0	0,9
R_3	+ 7,629	+ 7,63
e_3	1,5	1,5
R'_3	- 6,684	+ 6,60
e (air)	1,50	1,30
R'_4	+ 30,0	+ 27,0
e_4	2,0	2,0
R_4	- 13,274	- 11,79
Ouverture numérique moyenne	0,35	0,35
Distance focale	9,6	9,9
Grandissement	25,0	24,3
Tirage	250,0	250,0
Distance frontale .. (suivant l'ongueur d'onde)	0,73 à 1,17 (1,00 pour la raie E)	0,73 à 1,15

15 mm suivant la longueur d'onde, qui variait dans les calculs de 6560 à 4040 Å, couvrant ainsi la quasi-totalité du visible.

Il n'y avait rien à dire jusqu'ici de l'astigmatisme et de la courbure de champ de ces systèmes, qui ne se distinguent pas par leur ordre de grandeur de ce qu'on obtient avec n'importe quel assemblage de doublets achromatiques-aplanétiques minces. A première vue, la correction de la courbure nécessite donc l'adjonction de systèmes optiques supplémentaires. Plusieurs artifices se présentent de suite à l'esprit :

a) projeter l'image objective à l'aide d'un « oculaire de projection » de convergence négative; c'est la solution qui fut utilisée autrefois par la firme Carl Zeiss dans les oculaires « Homal »; mais on a vu que cette façon

de faire entraîne une diminution considérable du champ, à moins de conserver à l'oculaire un grandissement très voisin de l'unité; de toute façon, la solution est compliquée, coûteuse et encombrante;

b) adjoindre à l'objectif un doublet collé, formé de deux verres différents et non achromatique; on montre facilement qu'un tel système possède une courbure de Petzval qu'on peut rendre négative, même pour des convergences nulles ou positives; mais l'emploi de cet artifice fait réparaître une variation chromatique des aberrations d'amplitude en général inadmissible;

c) placer au voisinage immédiat du plan de l'image paraxiale une lentille divergente simple; si φ est la courbure de l'image à corriger, la convergence de cette lentille devrait être en valeur absolue, de l'ordre de $D = n\varphi$. Cette combinaison très simple n'est pas réalisable : l'ordre de grandeur de D est trop grand. Cela est dommage: la position de l'image paraxiale, le grandissement, les aberrations résiduelles des faisceaux convergents en chaque point seront d'autant moins modifiés qu'une telle lentille serait placée plus près du plan de l'image à corriger;

d) mais il revient au même de placer une lentille divergente dans le plan de l'objet à examiner, ou très près de celui-ci : c'est cette dernière solution qui a été adoptée dans l'objectif finalement construit.

Il faut noter qu'une telle solution n'est pas générale : la présence d'une frontale divergente dans un objectif de microscope limite fatalement l'ouverture numérique réalisable, quelle que soit la combinaison qu'on place derrière elle. Mais on ne se proposait pas, dans ce premier travail, de construire une famille complète d'objectifs de microphotographie; il s'agissait de donner un exemple. L'ouverture numérique de l'objectif futur fut limitée d'avance à 0,35 environ. D'autres solutions plus générales et capables d'ouvertures plus grandes existent, qui feront l'objet d'un mémoire ultérieur.

Cela dit, on rappelle que chacun des doublets formant l'essentiel de l'objec-

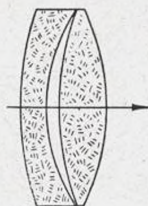


Fig. 8

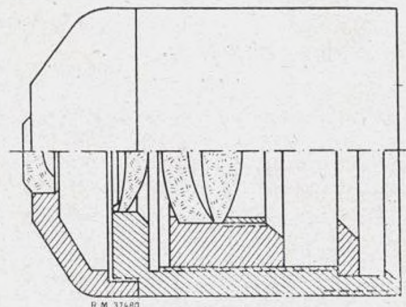


Fig. 9

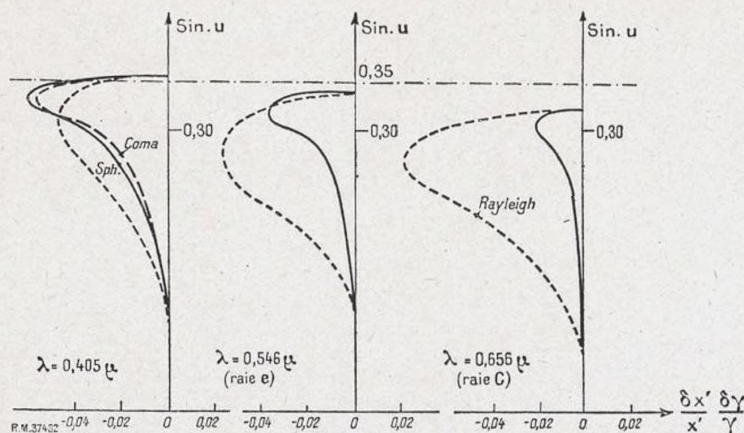


Fig. 11. — Aberration sphérique et coma, objectif 2.
En traits interrompus : limites tolérables d'après le critère de Rayleigh.

tif possède un ménisque divergent tourné vers la lumière incidente (fig. 8), que la stabilité des corrections est remarquable et que l'association de deux doublets l'un derrière l'autre fournit des degrés de liberté nouveaux : il était séduisant de chercher si une modification de l'épaisseur d'air et du ménisque frontal du premier doublet ne permettrait pas, sans ajouter aucun verre, d'obtenir la réduction de courbure du champ désirée.

C'est ce qui fut fait. On a imposé, au cours du calcul, une condition supplémentaire dictée par des considérations de simplicité de fabrication et d'emploi : la face avant de la frontale serait plane. D'autre part, la réduction de la courbure a été limitée par le désir de conserver une distance frontale encore importante.

Deux projets ont ainsi été étudiés, en admettant l'usage de deux crown-fluor de Parra-Mantois. Le calcul à partir de la silice fondue ou du fluorure de lithium n'a pas été terminé, étant donné les difficultés encore insurmontables d'approvisionnement; il aurait conduit à des résultats meilleurs. Le tableau V donne les caractéristiques primitives de ces objectifs.

La figure 9 donne l'aspect de l'objectif-type dans sa monture. Les figures 10, 11, 12 donnent les courbes d'aberrations. Le calcul n'est pas présenté comme le meilleur possible; on remarque, sur la figure 11,

que le choix des conditions de correction initiales aurait pu être mieux fait et aboutir à une aberration zonale moyenne plus faible que celle qui a été obtenue; telles que, ces combinaisons sont utilisables dans le domaine spectral C-G'.

Le rayon de courbure moyen de l'image donné par le calcul dans les deux cas était de l'ordre de 20 mm. L'astigmatisme mérite une mention spéciale. Il n'a pas été pris en considération dans le calcul des projets précédents. Ce n'est qu'après coup qu'on a calculé sa valeur pour diverses inclinaisons; au bord d'un champ de $2 \times 1^{\circ}46'$, la quantité $(As) = \frac{s-l}{ls}$ prend la valeur

0,038 dioptrie, alors que la condition de Rayleigh restreinte pour l'astigmatisme à une différence de marche de $1/4$ de longueur d'onde, donne pour la radiation $\lambda = 0,58 \mu$ la valeur 0,024 dioptrie; l'astigmatisme devrait donc sûrement rester négligeable dans un cercle de champ dépassant un diamètre de 20 mm.

Dans les objectifs 1 et 2 du projet, le grandissement minimum γ_m serait de 21 pour la raie verte du mercure : il est dépassé, et la photographie avec l'objectif seul est possible; l'agrandissement ultérieur de l'image devra être fait avec un grandissement voisin de 6,5; sur les épreuves finales, on devrait obtenir une netteté acceptable dans un cercle de 130 mm de diamètre.

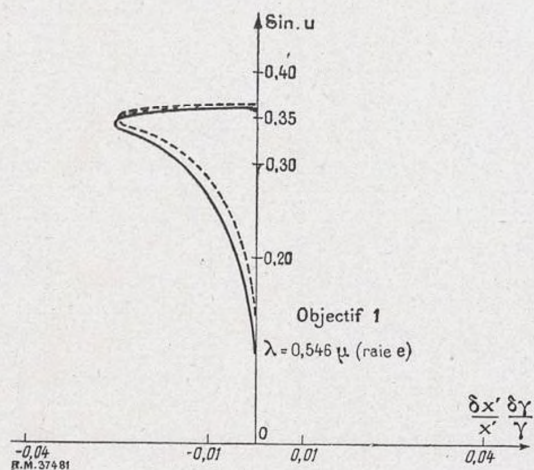


Fig. 10. — Aberration sphérique et coma, objectif 1.

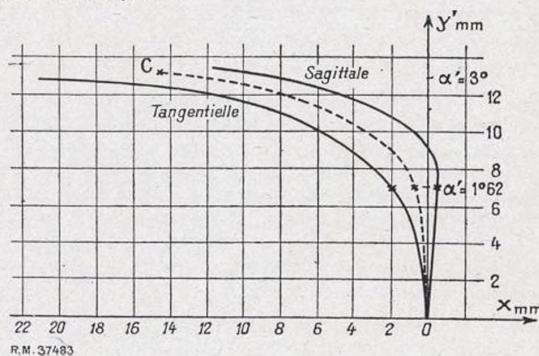


Fig. 12. — Courbure de champ et astigmatisme, objectif 2.

III

L'objectif issu du projet n° 2 a seul pu être construit. Les verres ont été taillés par les soins de la Société Générale d'Optique que nous remercions de son aimable concours. Le montage a été effectué par l'atelier de mécanique du Laboratoire d'Essais, avec des tolérances de centrage qui n'atteignent certainement pas ce qu'on aurait pu réaliser dans un atelier spécialisé; grâce aux soins apportés à ce travail par M. Salmon, chef de cet atelier, un résultat très satisfaisant a cependant été obtenu.

Par suite de diverses retouches, la distance focale de l'objectif terminé est de 10,4 mm environ et la courbure du champ a été un peu diminuée. Les grandissements utilisés dans les essais ont été compris entre 24 et 25.

1° On a d'abord mesuré la courbure du champ image. La méthode utilisée est fort simple (fig. 13).

Un microscope muni d'un objectif de faible ouverture M peut se déplacer le long de son axe optique au moyen d'un pignon et d'une crémaillère. Ces déplacements $\Delta\varphi$ sont mesurés à l'aide du d'un vernier solidaire du corps du microscope le long d'une règle horizontale rigide R; celle-ci peut tourner autour d'un axe vertical OO' passant

à peu près par le point nodal image de l'objectif essayé, qui est fixe. Le tout repose sur un socle. L'ensemble source-condenseur-objet (plan) - objectif est disposé de façon que son axe optique coïncide avec celui du microscope de mesure quand la rotation de R est nulle. Celle-ci est repérée le long d'un secteur de cercle divisé disposé sur le socle. Pour chaque direction de R on met au point sur l'image nette d'une portion de l'objet. La mesure consiste à noter le déplacement de M le long de R. La précision est faible: l'ouverture des faisceaux sortant de l'objectif est très étroite. Les résultats obtenus se traduisent par le tableau VI.

Le rayon de courbure polaire, déduit des mesures précédentes, est environ :

$$R_0 = 32 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

le rayon de courbure moyen, pour un diamètre de champ de 24 mm est

$$R_m \approx 24 \text{ mm}$$

Il était intéressant de comparer la courbure ainsi déterminée à celle du champ image de quelques objectifs de microscope actuels de caractéristiques voisines. Trois d'entre eux ont été étudiés; les rayons de courbure polaire trouvés ont été les suivants :

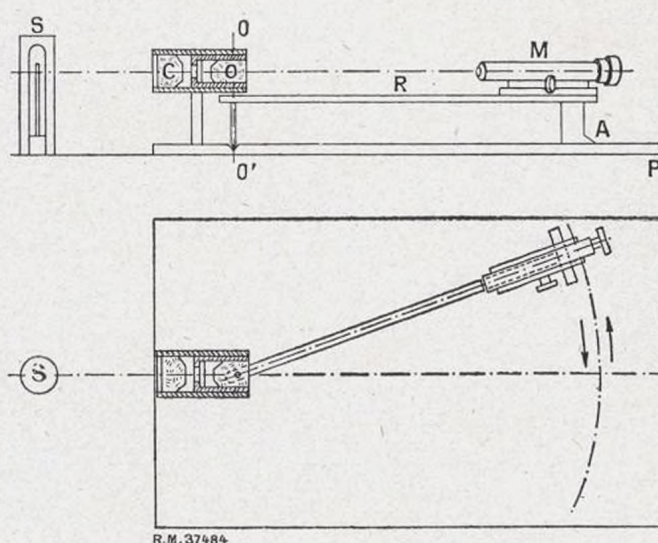


Fig. 13

TABLEAU VI

(w) Degrés et centièmes de degrés	8° 56	7° 82	5° 51	4° 70	2° 33	0	3° 23	4° 82	6° 32	8° 70
$\Delta\varphi$ (mm)	50	29,5	20,2	14,3	2,5	0	4,5	11	22,5	51
x (l) (mm)	53,2	32,3	21,5	15,9	3,6	0	5	12,5	31,2	54,1
y (l) (mm)	37,2	34,0	24,0	20,5	10,3	0	14,1	21	27,5	37,8

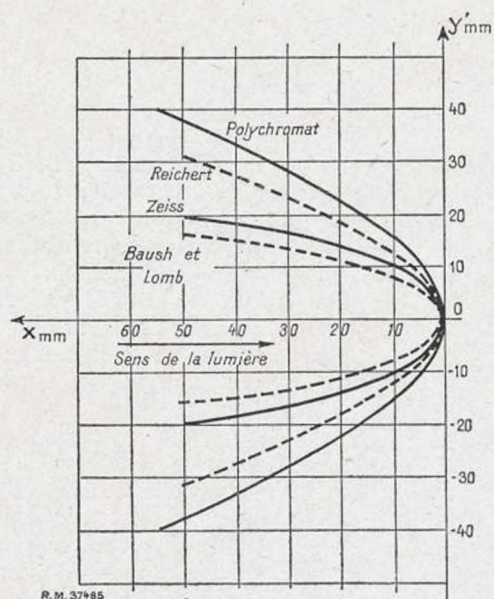


Fig. 14.

Apochromat Zeiss		
$f=8,7$ mm	$\sin u=0,40$	$R_0=9$ mm
Baush & Lomb métallographique		
$f=8$ mm,	$\sin u=0,50$	$R_0=6,5$ mm
Reichert métallographique		
$f=10,4$ mm,	$\sin u=0,35$	$R_0=14$ mm

Ces quatre objectifs n'ont pas la même convergence; on sait que la courbure polaire du champ image est proportionnelle à la puissance de l'objectif pour un type de combinaison déterminée; en ramenant toutes les déterminations à la distance focale de 10 mm, les rayons de courbure trouvés se comparent comme suit :

Objectif nouveau	$R_0=31$ mm
Objectif Zeiss	$R_0=10,5$ mm
Objectif B & L	$R_0=8$ mm
Objectif Reichert	$R_0=13,5$ mm

la figure 15 résume ces résultats.

2° Avec tous ces objectifs commerciaux, les pointés étaient rendus impossibles par l'astigmatisme au-delà de l'inclinaison $\pm 4^\circ$; les pointés avec l'objectif nouveau pouvant être étendus au-delà de l'inclinaison $\pm 8^\circ$, on a mesuré, avec le même montage, l'objet étant une préparation de lycopode, l'ordre de grandeur de l'astigmatisme

TABLEAU VII

Inclinaisons (w)	Astigmatisme dioptries	Valeurs de la quantité h^2 (As) en fractions de longueurs d'onde (5460 Å)
$+8^\circ 1$	0,057	2,2
$+4^\circ 3$	0,0212	
$+1^\circ 9$	0,0129	0,5
$+1^\circ 5$	inappréciable	
0	0	0
$-1^\circ 5$	inappréciable	
$-2^\circ 1$	0,0133	0,54
$-5^\circ 1$	0,0323	1,3
$-7^\circ 3$	0,0417	1,8
$-8^\circ 3$	0,0616	2,3

en divers points du champ. Les résultats sont remarquables (tableau VII).

La condition de Rayleigh étroite limite la quantité $h^2(As)$ à $1/2$ longueur d'onde : elle est trop dure et la netteté de l'image est encore très acceptable pour un champ de 8° , correspondant à une limite quatre fois plus forte. Voici qui illustre la manière dont la diffraction modifie la forme d'un pinceau au voisinage d'un foyer : projetons l'image sur un plan perpendiculaire à l'axe et passons par le pôle O (fig. 14); c'est

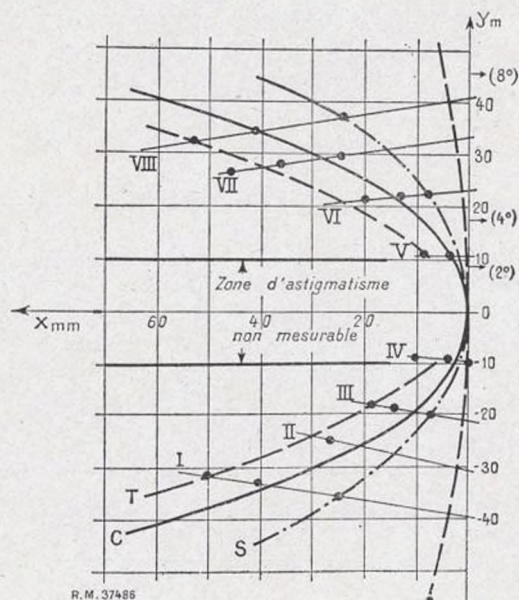


Fig. 15

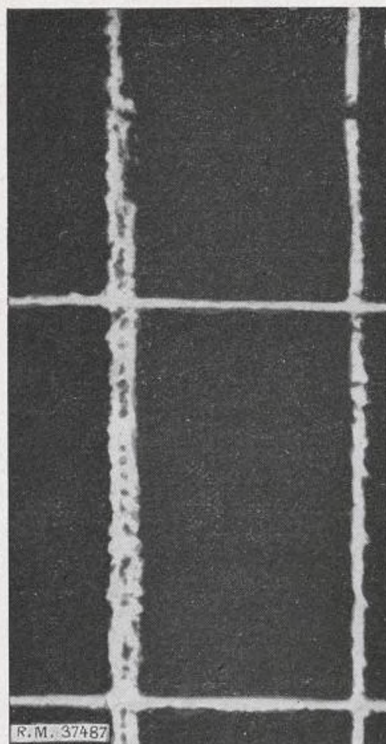


Fig. 16

tentera de suggérer au lecteur l'examen des deux figures 16 et 17; la première est une portion agrandie d'un cliché obtenu avec l'objectif Zeiss, en lumière blanche; l'agrandissement a été fait au rapport 6,8; la seconde est une portion d'un cliché fourni par l'objectif nouveau, agrandi 6,7 fois. La comparaison est faite dans des conditions rendues volontairement défavorables pour l'objectif nouveau: le fragment de cliché concernant l'objectif Zeiss a été pris au centre de son champ, alors que la figure concerne une portion du champ de l'objectif nouveau correspondant à une inclinaison moyenne des rayons de $2^{\circ},50$. Elle fait pourtant ressortir sans difficulté l'amélioration obtenue dans la qualité de l'image. L'aberration chromatique très visible, figure 16, causera

ce qu'on fait en prenant le cliché; au bord d'un champ de 5° , l'optique géométrique indique que l'image d'un point doit être remplacée par une tache dont le grand axe aurait plus d'un demi-millimètre de diamètre; sur les photographies des figures 19 et 21, qui ont été agrandies, ces taches devraient avoir plus d'un millimètre de diamètre; le lecteur constatera par lui-même qu'on n'observe rien de tel.

3° On ne disposait pas, au laboratoire, d'une installation permettant de mesurer avec quelque précision les aberrations résiduelles d'un objectif aussi convergent; une telle installation ne paraissant pas exister en France, au moins pour des distances image de 250 mm, on a dû abandonner cette étude et se contenter de comparer des microphotographies d'objets plus simples constitués par des lames de verre recouvertes d'une argenture opaque rayée de coups de rasoir. Il n'est pas possible de reproduire ici les microphotographies agrandies, dont le format serait trop grand; on se con-

Fig. 18

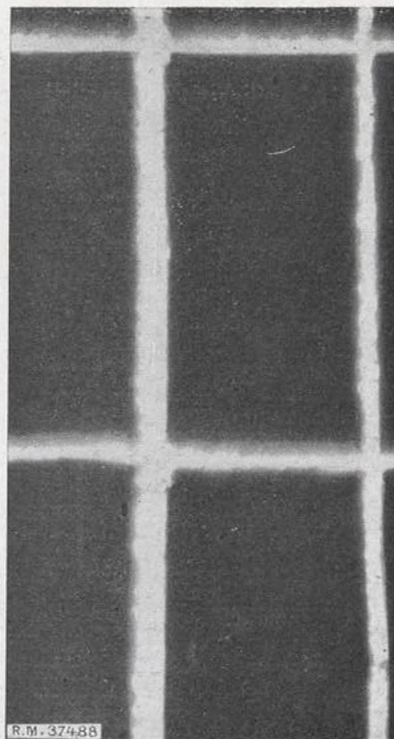


Fig. 17

normalement une perte de contraste préjudiciable à la limite de résolution; effectivement, dans tous les essais effectués, les clichés de l'objectif nouveau étaient plus contrastés que ceux qu'on a pu obtenir avec tous les autres objectifs essayés.

4° On a exécuté quelques microphotographies de diatomées. La figure 18 représente une portion d'un de ces clichés, exécuté en raie verte du mercure. Sur cette figure, le grandissement total est $\Gamma = 850$, très au-dessus du minimum résolvant pour l'émulsion utilisée. Les traits parallèles horizontaux visibles sur la carapace sont distants d'environ 1,14 microns. Or, le pouvoir séparateur théorique, au contraste 1 est ici de 0,95 micron: il est donc certainement très près d'être atteint et la cor-

rection d'un nouvel objectif peut être considérée comme suffisante.

5° L'amélioration essentielle apportée par le nouvel objectif est bien visible sur les figures 19, 20, 21, 22.

Les deux premières représentent, au même grandissement final de 50, une trame de photogravure formée de deux réseaux superposés à angle droit; l'écartement des traits opaques est de 0,12 mm.

La figure 19 est une photographie prise au grandissement initial de 24 avec l'objectif nouveau; la figure 20 a été obtenue au grandissement initial de 33,5 avec l'objectif Zeiss. Sur chaque figure, le cercle de champ total correspond à des inclinaisons moyennes de l'ordre de 7°50. Les trois cercles concentriques tracés sur les clichés correspondent, respectivement :

au champ qui serait visible avec un oculaire $\times 20$,

à un champ de $2 \times 1^{\circ}50$,

au champ visible avec un oculaire $\times 6$.

Les grandissements initiaux n'étant pas les mêmes, pour un

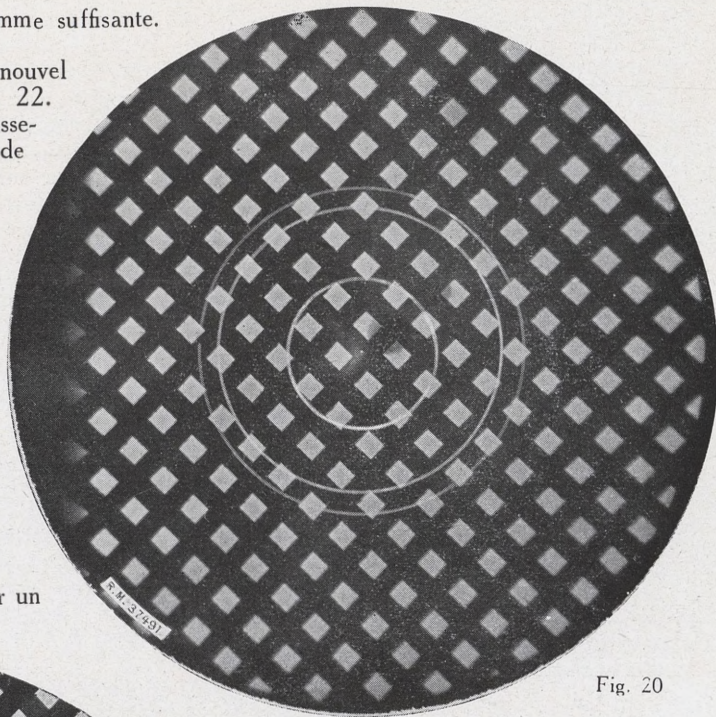


Fig. 20

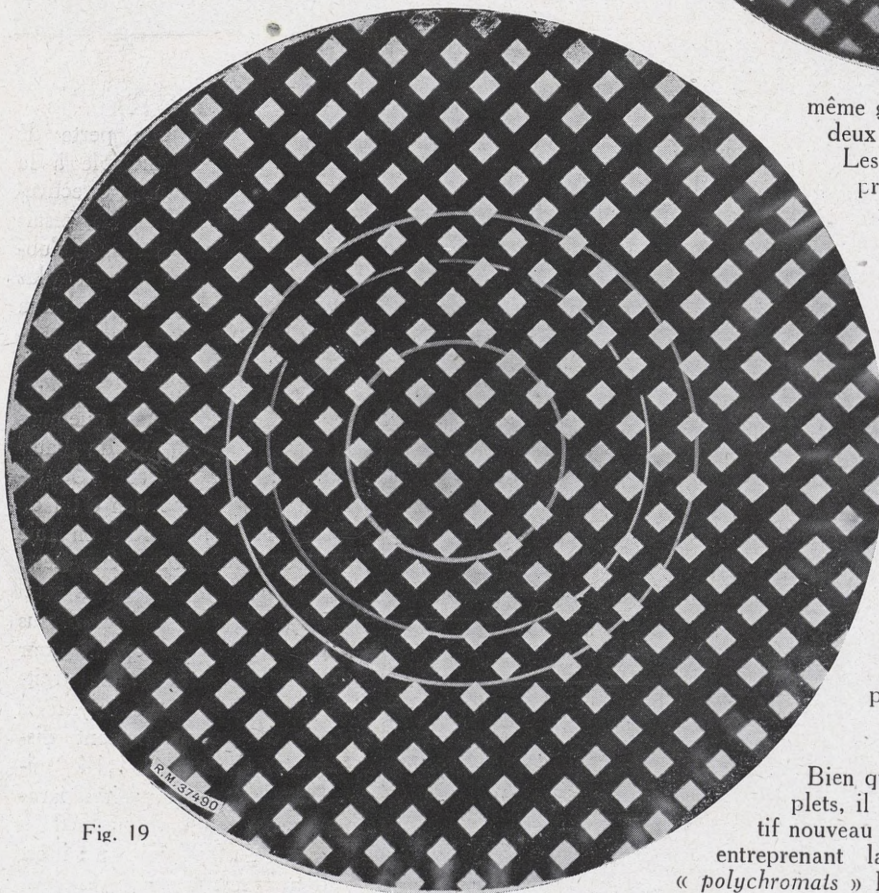


Fig. 19

même grandissement final, l'étendue linéaire des deux clichés est différente.

Les deux figures 21 et 22 représentent une préparation de poudre de lycopode, assez régulièrement distribuée sur tout le champ. Les grains ont un diamètre d'environ 20 microns; elles parlent d'elles-mêmes.

5° Les photographies des figures 19 et 20 permettent de comparer les distorsions données par les deux objectifs qui les ont fournies; les résultats sont exprimés par les courbes de la figure 23 : comme on pouvait s'y attendre, la réduction de la courbure est accompagnée d'une réduction substantielle de la distorsion. A l'inclinaison 3°, on voit que la distorsion est :

pour l'objectif nouveau

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = 0,022 \text{ environ}$$

pour l'objectif Zeiss

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = 0,076 \text{ environ}$$

Bien que les essais qu'on a décrits soient incomplets, il semble qu'on puisse affirmer que l'objectif nouveau a bien atteint les buts qu'on s'était fixés en entreprenant la construction. On propose d'appeler « polychromats » les objectifs satisfaisant aux conditions de correction posées dans ce mémoire.

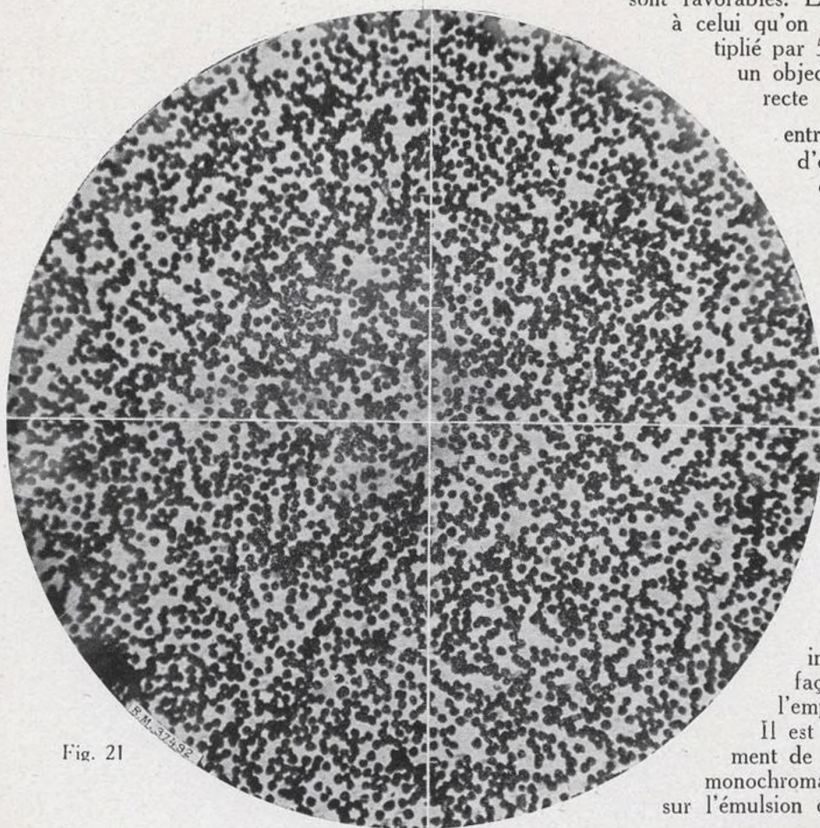


Fig. 21

IV

L'intention primitive des auteurs était non seulement de montrer qu'il était possible de diminuer la courbure du champ du microscope photographique actuel, mais encore de prouver qu'on peut étendre son usage, *de façon simple et commode*, dans l'ultra-violet proche, en profitant ainsi du gain de pouvoir séparateur (pour les émulsions comme pour l'objectif) qui accompagne une réduction de la longueur d'onde utilisée.

On dispose aujourd'hui d'une source fournissant avec une brillance énergétique très élevée une bande de radiation de moins de 50 Å de largeur au voisinage de la longueur d'onde 3 654 Å : c'est l'arc à vapeur de mercure sous une pression de l'ordre d'une dizaine d'atmosphères. Un certain nombre de lampes de ce type (HP 300 et HP 5000), étudiées au laboratoire, fournissaient jusqu'à 25 % de l'énergie totale qu'elles rayonnent dans cet étroit domaine; de plus, les raies voisines de cette région sont peu intenses : un isolement suffisant de la bande s'avère assez facile. Enfin, le maximum de sensibilité et de pouvoir séparateur des émulsions de bromure d'argent normales se trouve dans cette région : toutes ces conditions

sont favorables. Le pouvoir séparateur théorique, comparé à celui qu'on obtiendrait en lumière jaune, serait multiplié par 5/3. Il n'est pas plus difficile de calculer un objectif Polychromat donnant une image correcte dans tout le domaine spectral compris

entre 3 000 et 5 000 Å par exemple que d'établir la combinaison qui vient d'être décrite; seul, le manque de matière a empêché la réalisation immédiate d'un tel objectif.

On se souvient que la difficulté d'obtenir une mise au point correcte pour des radiations invisibles a découragé les efforts faits pour développer la micrographie en lumière ultra-violette, au point d'en faire presque abandonner l'emploi. Cette difficulté peut pourtant être levée à l'aide d'un artifice très simple.

Admettons qu'on dispose d'un objectif polychromat convenablement corrigé.

Un observateur à vue normale examine l'image fournie par la raie verte du mercure, à l'aide d'un oculaire positif, muni d'un réticule. Une lame à faces parallèles, inclinée à 45° peut être interposée sur le trajet de la lumière, de façon à éclairer simultanément l'oculaire et l'emplacement de l'émulsion photographique.

Il est possible, et facile, de construire l'instrument de façon que l'image examinée en éclairage monochromatique de longueur d'onde λ_1 soit au point sur l'émulsion quand l'observateur la voit nette et pro-

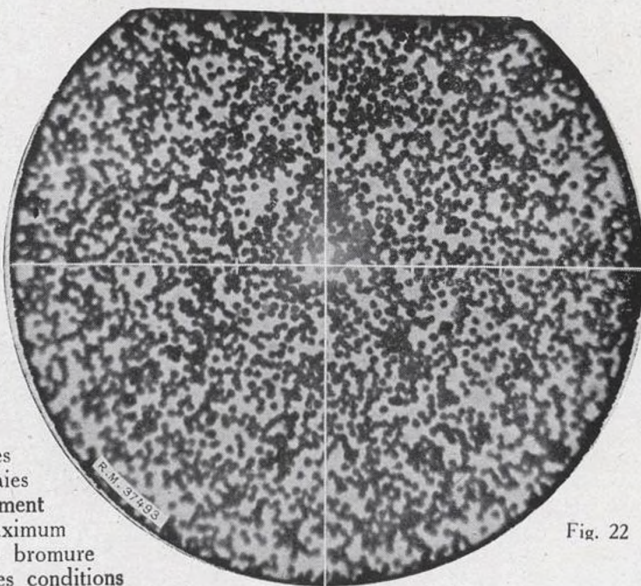


Fig. 22

jetée dans le plan du réticule : il suffit d'un statif rigide et de l'abandon du soufflet inutile et ridicule dont l'usage est actuellement universel (rappelons que l'objectif seul fournit l'image photographique). L'observateur, dont la latitude d'accommodation est importante, doit s'assurer que l'effet de parallaxe a disparu.

Ce résultat obtenu, il tire le tube porte oculaire de la quantité d_0 et ramène l'image au point dans le plan du réticule en agissant sur la distance qui sépare l'objet de l'objectif. Il est évident que si d_0 a une valeur convenable, c'est désormais l'image donnée par la radiation λ_2 qui sera au point sur l'émulsion; il ne reste plus qu'à interposer un filtre convenable et à exécuter le cliché.

Quel est l'ordre de grandeur de d_0 ? L'abscisse σ du plan objet comptée à partir du foyer, varie, quand on passe de λ_1 à λ_2 d'environ.

$$|\delta\sigma| \cong \frac{2f^2}{v\Delta}$$

il en résulte qu'une image monochromatique λ_1 existe encore à la distance $\Delta + d_0$ telle que

$$|d_0| \cong \frac{2\Delta}{v}$$

cette image sera encore correcte si d_0 n'est pas grand. Dans le cas d'un objectif en silice fondue, entre 5 460 et 3 654 Å, v calculé pour ce domaine serait de l'ordre de 90; il vient ainsi :

$$d_0 \cong 5,5 \text{ mm}$$

valeur très admissible en pratique.

Ce calcul paraît indiquer que d_0 sera le même quel

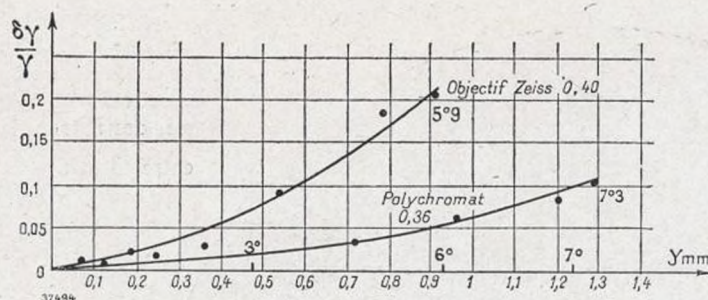


Fig. 23

que soit l'objectif et son agrandissement, pourvu que la même matière ait été employée dans la construction des lentilles. Cela n'est malheureusement pas exact : on a traité l'objectif comme un système mince et négligé la variation chromatique de ses plans principaux, qui dépend des paramètres de forme et d'épaisseur de

façon assez compliquée. Il en résulte que d_0 subira des variations quand on passera d'un objectif à un autre et qu'un étalonnage devra être fait par le constructeur.

En définitive, la construction d'un microscope à mise au point semi-automatique pour l'ultra-violet n'est pas plus difficile que celle d'un appareil photographique moderne de petit format, pourvu que l'ensemble des règles proposées dans ce mémoire soit accepté.

Un dernier artifice permet d'étendre encore le champ objet qu'un tel appareil pourrait explorer : il suffit d'exécuter les clichés sur un film cinématographique tendu sur des guides cylindriques dont le rayon de courbure serait de l'ordre de 35 mm. Dans de telles conditions, le format 24×36 mm serait couvert, ce qui correspondrait, avec un objectif $\gamma = 25$, à un rectangle de champ réel de $1 \times 1,5$ mm : on est bien loin des résultats actuels.

On projette de construire un instrument prototype conforme aux suggestions du présent mémoire : la collaboration d'une firme spécialisée sera nécessaire pour assurer l'exécution de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) A. LOVICH, *Sensitométrie des films sonores* (Ed. Lahure, 1943).
- (2) Mme Madeleine MARQUET, Limite de résolution des émulsions et efficacité des objectifs photographiques, *Science et Industries Photographiques*, XVIII, n° 5, mai 1947.
- (3) A. ARNULF, Etude de la limite de séparation visuelle; application à la vision dans les instruments, *Réunions de l'Institut d'Optique*, 7^e année, 1936, I.



