



**HAL**  
open science

## Propriétés optiques des lames minces solides

P. Cotton, P. Rouard

► **To cite this version:**

P. Cotton, P. Rouard. Propriétés optiques des lames minces solides. Journal de Physique et le Radium, 1950, 11 (7), pp.461-479. 10.1051/jphysrad:01950001107046100 . jpa-00234295

**HAL Id: jpa-00234295**

**<https://hal.science/jpa-00234295>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## V. — MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES LAMES MINCES SOLIDES

### PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES LAMES MINCES SOLIDES

Par P. COTTON et P. ROUARD.

#### Sommaire.

- |  |   |
|--|---|
| <p>1. INTRODUCTION.</p> <p>2. RECHERCHES THÉORIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES LAMES MINCES.</p> <p>3. PRÉPARATION DES LAMES MINCES.</p> <p style="padding-left: 20px;">31. <i>Projection cathodique.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">32. <i>Projection thermique.</i></p> <p style="padding-left: 40px;">321. Source.</p> <p style="padding-left: 40px;">322. Dispositifs auxiliaires.</p> <p style="padding-left: 40px;">323. Montages spéciaux.</p> <p style="padding-left: 40px;">324. Préparation des couches antireflets.</p> <p style="padding-left: 20px;">33. <i>Méthodes mécaniques.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">34. <i>Méthodes chimiques.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">35. <i>Nettoyage des surfaces à traiter.</i></p> <p>4. PROPRIÉTÉS OPTIQUES.</p> <p style="padding-left: 20px;">41. <i>Lames absorbantes.</i></p> <p style="padding-left: 40px;">411. Détermination des constantes optiques au moyen des lames épaisses.</p> <p style="padding-left: 40px;">412. Facteurs de réflexion et de transmission des lames épaisses.</p> <p style="padding-left: 40px;">413. Facteurs de réflexion et de transmission des lames très minces; détermination de leurs constantes optiques.</p> | <p style="padding-left: 20px;">414. Énergie absorbée dans une lame absorbante mince.</p> <p style="padding-left: 20px;">415. Changements de phase.</p> <p style="padding-left: 20px;">416. Évolution des lames.</p> <p style="padding-left: 20px;">42. <i>Lames transparentes.</i></p> <p>5. APPLICATIONS.</p> <p style="padding-left: 20px;">51. <i>Lames antireflets.</i></p> <p style="padding-left: 40px;">511. Lames transparentes antireflets simples.</p> <p style="padding-left: 40px;">512. Lames transparentes antireflets multiples.</p> <p style="padding-left: 40px;">513. Lames transparentes antireflets dont l'indice varie d'une façon continue.</p> <p style="padding-left: 40px;">514. Résultats obtenus.</p> <p style="padding-left: 20px;">52. <i>Couches transparentes à facteur de réflexion élevé.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">53. <i>Filtres interférentiels.</i></p> <p style="padding-left: 40px;">531. Filtres interférentiels par réflexion.</p> <p style="padding-left: 40px;">532. Filtres interférentiels par transmission.</p> <p style="padding-left: 40px;">533. Filtres à réflexion totale frustrée.</p> <p style="padding-left: 20px;">54. <i>Polariseurs à couches minces.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">55. <i>Protection des lames et des miroirs.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">56. <i>Interféromètre de Perot-Fabry.</i></p> <p style="padding-left: 20px;">57. <i>Applications diverses.</i></p> <p>6. CONCLUSIONS.</p> |
|--|---|

### 1. INTRODUCTION.

On désigne sous le nom de lames minces des couches, transparentes ou non, dont les épaisseurs peuvent aller du diamètre atomique ou moléculaire à quelques microns. Les propriétés des corps en lames minces sont en général différentes des propriétés du même corps pris à l'état massif. Nous nous occuperons, dans le présent travail, uniquement des propriétés optiques des lames minces solides.

Du point de vue strictement optique, ces lames minces peuvent être transparentes (en général les diélectriques) ou présenter un coefficient d'absorption  $k = \frac{\alpha}{\nu}$  plus ou moins grand pour une radiation déterminée. Il n'y a évidemment pas de solution de continuité pour  $k$ . Toutes les valeurs

sont possibles et peuvent même se présenter pour le même corps, pris sous la même épaisseur, suivant la longueur d'onde utilisée. On peut donc obtenir des lames ayant des propriétés extrêmement diverses pour la même épaisseur, ce qui est très intéressant du point de vue des applications.

Autrefois ces lames étaient préparées presque exclusivement par voie chimique ou par projection cathodique, ce qui donnait le plus souvent des couches plus ou moins altérées. Depuis une vingtaine d'années, les progrès de la technique du vide ont permis d'utiliser l'évaporation thermique pour cette préparation. On obtient ainsi des couches beaucoup mieux définies parce que pratiquement identiques, du point de vue chimique, au corps dont on est parti. Pourtant, dans certains cas parti-

culiers, on utilise encore la méthode chimique (34) <sup>(1)</sup> et la projection cathodique (31).

Les premières recherches avaient surtout un but scientifique (étude de la constitution de la matière, détermination des propriétés optiques et des constantes optiques, etc.). Dans les dernières années, l'importance industrielle de ces couches s'est beaucoup accrue. Le champ de leurs applications s'est en effet très élargi et il en est résulté un grand nombre de recherches ayant un caractère plus pratique.

Quelques études d'ensemble ont déjà paru, donnant une bibliographie assez complète. Elles sont d'ailleurs surtout consacrées aux lames minces métalliques. Citons d'abord l'article assez ancien de H. F. Fruth [1.1] dans lequel on trouvera des détails sur la projection cathodique et ses applications antérieures à 1931, et celui de K. Richter résumant les principaux faits établis en 1932 avec une bibliographie assez étendue [1.2]. Plus récemment H. Lange [1.3] a écrit un article de documen-

tation, avec de nombreuses références. A. Andant a commencé une série d'articles dans le *Bulletin de l'Union des physiciens*. Seul le premier, consacré à la préparation des couches minces, a paru [1.4]. Enfin, le travail le plus important à notre connaissance est celui de A. Aron [1.5]. Terminé en 1940, il n'a malheureusement pu être publié qu'en partie en 1947. On en trouvera le texte complet aux Archives originales du C. N. R. S. sous le n° 234.

Les travaux cités ci-dessus se rapportent à l'ensemble des propriétés des lames, aussi bien optiques qu'électriques ou physico-chimiques.

En ce qui concerne les lames transparentes, P. Jacquinot [1.6] a donné une excellente mise au point de la question en 1942. On y trouvera une bibliographie critique très bien faite, consacrée surtout à l'abaissement du facteur de réflexion des surfaces optiques. Citons également un article très intéressant de A. Arnulf [1.7] se rapportant à la même question.

## 2. RECHERCHES THÉORIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES LAMES MINCES.

Étant donnée une lame mince d'épaisseur et d'indice connus (ce dernier étant complexe dans le cas des couches absorbantes) on peut tout d'abord se proposer de déterminer ses propriétés optiques théoriques pour diverses valeurs de l'épaisseur et une incidence déterminée ou pour diverses valeurs de l'incidence et une épaisseur déterminée.

Réciproquement, les propriétés optiques ayant été mesurées, on peut chercher à en déduire les paramètres caractérisant la lame (indice réel ou complexe, épaisseur).

Des problèmes analogues se posent pour des couches multiples ou pour des couches dont l'indice varie de façon continue.

Ces calculs sont tous, en fait, basés sur la théorie électromagnétique de la lumière. Une application aux lames minces de la théorie quantique de la réflexion métallique n'a pas encore été tentée, à notre connaissance.

Dans un article tout récent F. Abelès [2.1] a donné un exposé d'ensemble très documenté des principaux travaux théoriques faits, durant ces dernières années, sur les couches simples ou multiples, qu'elles soient absorbantes ou non.

Dans le cas particulier des couches transparentes on se reportera, pour tous les travaux antérieurs à 1942 à l'article déjà cité de P. Jacquinot [1.6]. On pourra consulter, sur ce même sujet : W. Weinstein [2.2], A. W. Crook [2.3], J. A. Wilken [2.4],

B. S. Blaisse et J. J. Van der Sande [2.5]. (Ces derniers auteurs ont étudié le cas d'un nombre indéterminé de couches).

La théorie complète des couches, simples ou multiples, peut être conduite de deux façons : ou bien en écrivant les équations de Maxwell et en les intégrant, ou bien en opérant suivant la méthode utilisée par Perot et Fabry pour la théorie de leur interféromètre, c'est-à-dire en considérant les amplitudes complexes des divers rayons réfléchis et en faisant leur somme.

La première méthode conduit, dans le cas de  $n$  couches, à intégrer  $2n + 1$  équations linéaires à  $2n + 1$  inconnues. Elle a été employée d'abord par P. Drude [2.6]. Les publications de cet auteur constituent, à notre avis, le travail de base auquel on se référera utilement. Avant lui W. Voigt [2.7] s'était occupé de questions analogues.

De nombreuses publications ont apporté à ces Mémoires de Drude divers perfectionnements et en ont étendu les résultats au cas des couches multiples. Un effort a été tenté en particulier pour simplifier les formules obtenues en incidence normale. Nous citerons F. Kaempf [2.8], A. Partzsch et W. Hallwachs [2.9], P. Rouard [2.10]. En incidence oblique, on pourra consulter les travaux de K. Försterling [2.11], K. Försterling et V. Fredericksz [2.12], A. Vašíček [2.13]. Nous reviendrons sur cette question.

Un autre procédé de résolution des équations de Maxwell, très employé dans ces dernières années, utilise le calcul matriciel. Citons comme auteurs ayant opéré ainsi : H. Herpin [2.14] qui a étudié

<sup>(1)</sup> Les numéros de paragraphes sont indiqués entre parenthèses. Les numéros correspondant à des références bibliographiques entre crochets.

un système stratifié quelconque, F. Abelès [2.15] et [2.16], F. Scandone et L. Ballerini [2.17], B. S. Blaisse [2.18].

Enfin quelques auteurs ont utilisé pour ces calculs, optiques, la notion d'impédance qui s'est révélée si féconde en Électricité, en Mécanique et en Acoustique. Depuis l'époque où P. Curie a mis en évidence pour la première fois les analogies formelles qui existent entre les équations régissant le mouvement des systèmes mécaniques et celles qui commandent les mouvements de l'électricité dans les circuits électriques, les succès de cette méthode ne se comptent plus. On peut ainsi étudier les propriétés optiques des couches minces d'une manière simple en utilisant les méthodes connues depuis longtemps en électricité et profiter des résultats déjà obtenus par les électrotechniciens (*voir* notamment : L. Brillouin ou S. A. Schelkunoff [2.19]). L'impédance optique peut, par exemple, être définie comme étant le quotient  $\frac{E_l}{H_l}$  des composantes parallèles au plan de séparation de deux milieux différents des vecteurs champ électrique et champ magnétique. Une couche mince se comporte alors comme un quadripole optique. Cette méthode est utilisée, en particulier par R. Kronig, B. S. Blaisse et J. J. Van der Sande [2.20], B. H. Billings [2.21], R. B. Muchmore [2.22] et M. E. Rose [2.23].

D'autres auteurs ont employé la méthode utilisée par Perot et Fabry, notamment : M. Cau [2.24], M. Perrot [2.25] et, plus récemment, D. Caballero [2.26], A. Vašiček [2.27] et F. Abelès [2.28]. Elle conduit, dans le cas de  $n$  couches, à des relations de récurrence comme l'ont montré les trois derniers

auteurs cités. Les formules que l'on obtient ainsi s'appliquent à un nombre quelconque de couches.

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont identiques, ce qui confirme leur légitimité.

Quand l'indice de réfraction varie d'une manière continue, on obtient des couches qui ont des propriétés très intéressantes. Un certain nombre d'auteurs se sont occupés de ce cas particulier. Citons M. Schlick [2.29], H. Schröder [2.30], B. S. Blaisse [2.31], W. Geffken [2.32], W. Kofinik et E. Menzer [2.33] et enfin M. E. Rose [2.23].

Les calculs effectués à partir des formules que fournit la théorie électromagnétique de la lumière sont assez longs. Ce fut le mérite de M. Perrot [2.34] de montrer que le problème pouvait être résolu graphiquement. La méthode de M. Perrot, développée et améliorée par P. Cotton [2.35] et D. Malé [2.36] permet de tracer très rapidement et très facilement par exemple les courbes donnant les facteurs de réflexion et de transmission ainsi que les changements de phase correspondants, en fonction de l'épaisseur et des constantes optiques. J. Obreimov [2.37] et A. B. Winterbottom [2.38] ont employé des méthodes analogues.

L'avantage des méthodes graphiques sur celles qui permettent de tracer les courbes point par point est qu'elles utilisent certains résultats simples de géométrie élémentaire qui montrent immédiatement l'existence des minima ou des maxima des facteurs de réflexion ou de transmission, des variations brusques de phase, etc. et permettent de trouver, avec une approximation suffisante, les valeurs numériques correspondantes.

### 3. PRÉPARATION DES COUCHES MINCES.

La préparation des couches minces peut s'effectuer de plusieurs façons : projection cathodique, évaporation thermique, méthodes chimiques, méthodes mécaniques. La littérature sur ce sujet est très abondante, chaque auteur modifiant les méthodes générales pour les adapter au but particulier qu'il poursuit. Nous ne donnerons qu'un aperçu de ces différents procédés, renvoyant pour plus de détails aux mémoires originaux.

**31. Projection cathodique.** — Très utilisée autrefois, elle a un peu perdu de son intérêt depuis la mise au point de l'évaporation. Elle est cependant encore employée dans le cas de corps se vaporisant difficilement ou pour obtenir d'une manière simple des dépôts très uniformes sur de grandes surfaces (S. Tolansky [3.1]). Enfin, elle reste la seule possible dans le cas où l'on ne peut pas obtenir un vide très poussé (support de la couche ayant une tension de vapeur appréciable, installation à vide insuffisante, etc.).

On trouvera une étude d'ensemble et une bibliographie de la question dans les articles déjà cités de H. F. Fruth [1.1], de A. Aron [1.5] et de A. Andant [1.4], ainsi que dans un article de N. D. Morgulis [3.2].

Comme travaux récents citons ceux de A. Guntherschulze [3.3], C. H. Townes [3.4] et R. Seeliger [3.5].

Le fait que la projection cathodique s'effectue dans des vides peu poussés ( $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  mm de mercure) peut conduire à des modifications de la nature chimique du corps projeté ou de sa structure : voir par exemple J. B. Nathanson et C. L. Bartberger [3.6], M. Perrot [3.7].

**32. Projection thermique ou évaporation.** — C'est le procédé le plus employé à l'heure actuelle. Il s'applique en effet à un très grand nombre de corps et permet d'obtenir des dépôts aussi étendus qu'on le désire (grands miroirs de télescope ou de projecteurs par exemple). De plus, en raison du vide plus poussé qui règne dans l'enceinte où s'effectue

tue la projection ( $10^{-5}$  mm de mercure), la nature du dépôt est plus voisine de celle du corps dont on est parti.

La pression des gaz résiduels a une très grande importance. La nature des couches, leur structure, leurs propriétés physiques, etc. en dépendent.

Parmi les travaux récents sur ce sujet mentionnons ceux de O. Beeck, A. E. Smith et A. Wheeler [3.8], G. Hass [3.9] et [3.10], G. Hass et N. W. Scott [3.11], H. A. Stahl [3.12], R. C. Williams et R. C. Backus [3.13], H. Levinstein [3.14] et J. Robillard [3.15]. On trouvera dans ce dernier article une bibliographie assez importante sur la structure des couches métalliques minces. Ces différents auteurs se sont occupés également de la vitesse de projection. Cette vitesse doit être suffisamment élevée sinon la structure des couches est altérée (couches en amas globulaires). Enfin une contribution importante à l'étude des divers facteurs qui conditionnent une évaporation thermique a été apportée récemment par O. S. Heavens [3.16].

Ce procédé de préparation étant, en fait, le plus employé nous allons donner quelques détails pratiques pour sa mise en œuvre. On trouvera un exposé assez détaillé de l'appareillage nécessaire dans les ouvrages de J. Strong [3.17] et A. Arnulf [3.18], dans les articles de M. Banning et Paul [3.19], A. Andant [1.4], P. Jacquinet [1.6], etc. Cet appareillage fait du reste l'objet de réalisations industrielles, parfois très importantes [3.20], [3.21] et [3.22]. On trouvera des détails sur les installations allemandes, utilisées durant la guerre, dans les B. I. O. S., J. I. O. A. et C. I. O. S. [3.23].

Nous allons donner ci-dessous quelques détails correspondant à des techniques spéciales.

321. *Source*. — Le chauffage du corps à évaporer peut être réalisé de différentes manières :

a. Le corps est placé en contact direct avec un fil ou une lame métalliques de forme et de dimensions convenables parcourus par un courant électrique. C'est le procédé le plus simple et le plus généralement utilisé. Le choix du métal réfractaire dépend évidemment du corps à vaporiser. Il peut y avoir en effet projection simultanée du corps à vaporiser et du métal support (R. C. Williams [3.24]), rupture du filament par attaque, ou mauvaise adhérence du corps à vaporiser avec le métal réfractaire chauffant. On sera guidé dans le choix nécessaire par les données de W. C. Caldwell [3.25] et de L. O. Olsen, C. S. Smith et E. C. Crittenden [3.26].

b. Le corps à évaporer peut être placé dans un creuset réfractaire formé sur le filament chauffant. Cette technique a été utilisée en particulier par Olsen, Smith et Crittenden (*voir* ci-dessus). Ces auteurs, ainsi que N. W. Scott [3.27], signalent une réduction possible du corps réfractaire par le corps projeté.

Dans le cas de l'évaporation de corps particulièrement réfractaires, H. M. O'Bryan [3.28] utilise un creuset en carbone ou en molybdène. Ce creuset est chauffé par bombardement électronique.

c. Le chauffage par induction haute fréquence a été utilisé par Gross [3.29], H. N. Otis [3.30] et H. Lassen [3.31] en général pour des métaux faciles à évaporer. Par contre le chauffage par pertes diélectriques n'a pas été encore employé à notre connaissance. La technique des miroirs ardents : F. Trombe [3.32] permettra peut-être la réalisation de certaines projections très difficiles.

322. *Dispositifs auxiliaires*. — La platine qui supporte la cloche à projection est le plus souvent traversée par une ou plusieurs électrodes soigneusement isolées. Les unes servent à l'entrée du courant de chauffage (qui, dans certains cas, peut atteindre 2 à 3 000 Å). D'autres servent au dégazage de la cloche et de la surface à traiter (*voir* § 35). De plus, un écran, qui peut être manœuvré de l'extérieur, permet de réaliser un chauffage de la source, avant le commencement de la projection, sans risquer de souiller la surface à traiter. Ces dispositifs ont fait l'objet de réalisations diverses dont on trouvera un exposé dans les différents mémoires cités.

Un contrôle de l'épaisseur de la couche déposée est nécessaire dans bien des cas. On peut l'obtenir en vaporisant une quantité connue de matière sur la surface à recouvrir, placée à une distance déterminée de la source (procédé généralement utilisé dans l'industrie). Pour des recherches plus précises on peut mesurer, au cours de la projection, les propriétés optiques de la surface à recouvrir ou d'une surface auxiliaire, traitée en même temps. Les réalisations de montages permettant ces mesures sont nombreuses; signalons en particulier celles de C. Dufour [3.33], J. Roig [3.34] et A. Andant [3.35].

323. *Montages spéciaux*. — L'évaporation à partir d'une source unique ne fournit pas une couche d'épaisseur uniforme sur un plan. La loi de répartition des épaisseurs est semblable à celle que l'on obtient quand on étudie l'éclairement par une source lumineuse.

Pour obtenir un dépôt d'épaisseur rigoureusement uniforme on doit donc utiliser un montage spécial. Pour traiter une grande surface (miroir de télescope par exemple) on peut, comme le fait J. Strong [3.17], utiliser plusieurs sources convenablement réparties. Dans le cas de surfaces de petites dimensions (lames d'interféromètres par exemple) on peut, avec Fisher et Platt [3.36] faire tourner la surface sur elle-même en orientant convenablement l'axe de rotation, ou disposer, comme le font Brian O'Brien et T. A. Russel [3.37], un disque réducteur convenablement ajouré entre la source et la surface traitée. Cette dernière technique, très souple, permet de réaliser

des dépôts dont l'épaisseur varie suivant une loi bien déterminée; on peut ainsi obtenir des miroirs paraboliques à partir de surfaces sphériques (J. Strong [3.38]) ou des lentilles asphériques (L. G. Schulz [3.39]).

Pour certaines applications : coins photométriques, lames pour apodisation, etc. il faut que le dépôt ait les mêmes propriétés le long d'une droite; on pourra alors utiliser le montage de P. Jacquinet [3.40].

La réalisation de couches antireflets, de couches à facteur de réflexion élevé, de filtres interférentiels, de polariseurs, etc. a conduit divers auteurs à mettre au point des techniques de préparation de couches superposées, chacune ayant une épaisseur et un indice déterminé. On conçoit facilement que la préparation de ces couches impose de contrôler, à chaque instant, l'épaisseur de chaque couche pendant sa préparation. De plus la couche multiple doit être préparée en une seule opération, c'est-à-dire sans faire rentrer l'air dans la cloche. On trouvera ci-contre le schéma de l'appareil réalisé pour cet usage par P. Jacquinet et C. Dufour [3.41] aux laboratoires de Bellevue.

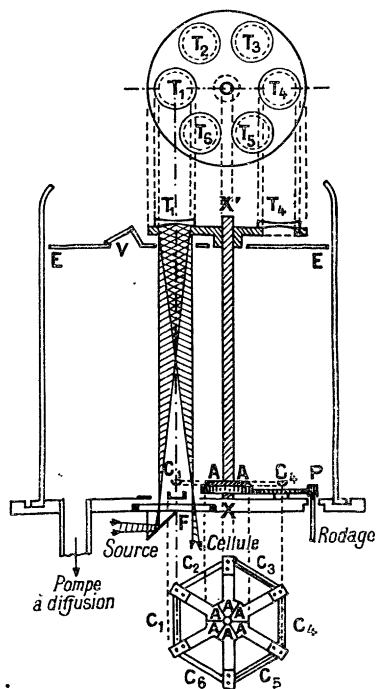


Fig. 1. — Schéma du mécanisme pour évaporation de couches multiples.

324. *Préparation des couches transparentes antireflets.* — Pour constituer les couches transparentes antireflets, les corps que l'on utilise sont généralement des fluorures alcalins, alcalino-terreux ou

mixtes. Pour avoir des détails expérimentaux on pourra consulter utilement S. Bateson et A. J. Bachmeier [3.42], S. Bateson [3.43], J. Bannon [3.44] et J. E. Tyler [3.45] qui emploient le fluorure de magnésium, G. S. Monk [3.46] qui utilise NaF et French [3.47] qui emploie la cryolithe. De nombreux brevets sont consacrés à cette question. On trouvera quelques détails sur les brevets allemands dans les publications des Services de Recherches des Alliés [3.48].

33. **Méthodes mécaniques.** — Un exemple de ces méthodes est fourni par le procédé mis au point par K. Blodgett [3.49] (enlèvement d'un film d'arachidate de cadmium et d'acide arachidique à la surface de l'eau). De même, W. Lotmar [3.50] signale que l'on peut obtenir une couche antireflets en recouvrant la surface du verre d'un vernis convenable. L'uniformité d'épaisseur de la couche est obtenue par centrifugation.

Le dépôt par précipitation de silice gélatineuse, suivi d'un essorage et d'une cuisson, a reçu des applications industrielles. Il a été employé notamment pendant la guerre en Allemagne [3.51]. On trouvera des détails dans l'article de A. Arnulf et R. Genty [3.52] ainsi que dans de nombreux brevets.

34. **Méthodes chimiques.** — L'argenture chimique, très utilisée autrefois, fait encore l'objet d'applications dans le domaine industriel [3.53]. On pourra consulter à ce sujet Barnard [3.54], Vinokoussof [3.55], R. Morgan et R. D. Myers [3.56]. Dans un article de P. B. Upton [3.57] on trouvera des indications sur les procédés par réduction des solutions aqueuses (126 références). Citons encore pour mémoire le platinage, le cuivrage du verre (S. Wein [3.58]), la dorure (Gibson [3.59]).

On utilise actuellement de telles méthodes pour déposer des substances difficiles à évaporer comme la silice ou l'oxyde de titane. On obtient des couches minces de ces corps en produisant par réaction chimique à la pression normale, une vapeur qui se dépose sur le corps à traiter. De nombreux brevets allemands se rapportent à ces procédés. On en trouvera l'analyse dans un article de Tanner et Lockhart [3.60]. Ces méthodes sont surtout employées pour réaliser des dépôts à fort indice de réfraction. On les a également utilisées pour des revêtements de silice sur de grandes surfaces [3.61].

Mentionnons également l'attaque du verre par les acides dilués pour obtenir des couches squelettes de silice. On réalise ainsi des couches antireflets sur certains verres. La technique varie suivant les auteurs. En général on plonge la surface à traiter dans un bain d'acide dilué ( $\text{NO}_3\text{H}$  par exemple). On trouvera des détails expérimentaux précis dans des publications de F. L. Jones et H. J. Homer [3.62], H. Schröder [3.63], F. H. Nicoll

et F. E. Williams [3.64] et dans un article de M<sup>lle</sup> F. Flamant [3.65]. Ce procédé fournit en général des couches assez efficaces parce que leur indice varie d'une façon continue. Il a fait l'objet d'un certain nombre de brevets [3.66].

Enfin signalons une méthode mixte utilisée par certains auteurs. Pour obtenir de la silice, G. Hass et N. W. Scott [3.67] projettent tout d'abord une couche de SiO qu'ils oxydent ensuite. On peut rapprocher de ce procédé l'oxydation anodique contrôlée des surfaces aluminées dans le but de former une couche protectrice d'alumine (G. Hass et N. W. Scott [3.68]).

**35. Nettoyage des surfaces à traiter.** — Cette question est très importante parce que la nature, la solidité et l'adhérence des couches obtenues en dépendent, quel que soit le procédé de préparation utilisé.

Il n'y a pas, à l'heure actuelle, de technique universelle de nettoyage. Chaque opérateur a ses tours de main, qu'il n'indique pas toujours, et il n'existe, à notre connaissance, aucune étude d'ensemble de cette question. De toutes façons on a intérêt à commencer les opérations de nettoyage immédiatement après le polissage de la surface.

Le nettoyage par agents chimiques (SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub> bouillant, eau régale, mélange sulfochromique, acide nitrique, ammoniac, etc.) a le défaut de provoquer une attaque superficielle de certains verres. Il ne peut être appliqué qu'à des verres résistants.

Le nettoyage par agents physiques est souvent préférable. On peut utiliser des solvants ou des poudres absorbantes ne rayant pas la surface.

Pour les miroirs de télescopes J. Strong [3.69]

commence par enduire soigneusement la surface avec de la lanoline; il en enlève ensuite la plus grande partie avec un tampon de feutre et achève l'opération avec du carbonate de chaux précipité. Il recommence plusieurs fois

Quel que soit le procédé de nettoyage employé, tous les auteurs utilisant l'évaporation sont d'accord pour terminer la préparation de la surface à traiter par un nettoyage ionique et pour en souligner l'importance. Cette opération consiste en un dégazage énergique de la surface qui parachève l'action des agents oxydants ou des absorbants. Elle peut être effectuée à l'aide d'une flamme (Lord Rayleigh [3.70]) mais on préfère généralement la réaliser au moyen d'une décharge électrique à haute tension dans la cloche même où s'effectue la projection. Pour cela on établit une différence de potentiel de l'ordre de 3 000 à 5 000 volts entre la cloche et une électrode, lorsque la pression dans l'enceinte est comprise entre 10<sup>-3</sup> et 10<sup>-4</sup> mm de mercure. L'intensité du courant de décharge varie suivant les dimensions de la cloche à projection (40 à 50 mA pour une cloche de 30 cm de diamètre). Une dizaine de minutes suffisent généralement pour achever le nettoyage. La surface de la cible est portée à une température élevée par le choc des ions accélérés par la décharge. J. Strong [3.69] complète l'action de la chaleur par celle de l'oxygène. Pour cela il dégaze la surface pendant un certain temps, puis rince la cloche avec de l'oxygène et dégaze à nouveau. Il répète trois ou quatre fois l'opération. La surface ainsi obtenue peut être considérée comme parfaitement propre. Il convient alors de la traiter le plus rapidement possible.

#### 4. PROPRIÉTÉS OPTIQUES.

Dans ce qui va suivre nous nous occuperons surtout des facteurs de réflexion et de transmission, de la détermination des constantes optiques et enfin des changements de phases à la réflexion et autres études polarimétriques. Nous traiterons successivement des lames absorbantes et des lames transparentes bien que, en réalité, il n'y ait pas entre elles de solution de continuité : on peut passer insensiblement des couches absorbantes aux couches transparentes. L'étude de ces dernières a fait de grands progrès depuis 10 ans, à cause surtout des problèmes soulevés par les applications pratiques. Toutefois, comme ces études ont une certaine importance militaire, les résultats de nombreux travaux commencent seulement à être publiés.

**41. Lames absorbantes.** — On peut classer les recherches qui s'y rapportent en trois catégories :

a. Étude des couches relativement épaisses, et

dont les propriétés peuvent par conséquent être assimilées à celles du métal massif, en vue par exemple de la détermination des constantes optiques du métal qui les constitue.

b. Recherche d'un métal pouvant constituer des lames minces permettant de résoudre un problème déterminé.

c. Étude des propriétés optiques des lames minces d'un corps en fonction de l'épaisseur de la lame et de la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Cette classification est évidemment arbitraire et certains travaux peuvent appartenir à la fois à deux de ces catégories.

411. *Détermination des constantes optiques au moyen des lames épaisses.* — Le remplacement du métal massif poli par une lame d'épaisseur suffisante, pour la détermination des constantes optiques, présente un certain nombre d'avantages. Tout

d'abord certains métaux ne peuvent être obtenus à l'état massif en échantillons de dimensions suffisantes pour permettre la réalisation d'un miroir; ensuite certains métaux s'oxydent rapidement à l'air, ce qui introduit une couche superficielle de propriétés différentes; enfin le polissage crée généralement une couche de transition qui est elle aussi une cause d'erreur.

L'idéal est d'étudier la couche dans le vide même qui a servi à la produire. C'est ce qu'ont réalisé un certain nombre d'auteurs, en particulier ceux qui se sont occupés des métaux très facilement altérables comme les alcalins et les alcalino-terreux.

Dans un article important, publié en 1938, J. B. Nathanson [4.1] passe en revue les méthodes polarimétriques de détermination des constantes optiques et les résultats obtenus à cette époque. Il donne, en particulier, des indications sur les variations des constantes optiques avec le mode de préparation de la surface, la température, l'état physique, la longueur d'onde, et le nombre de charges (*fig. 2*).

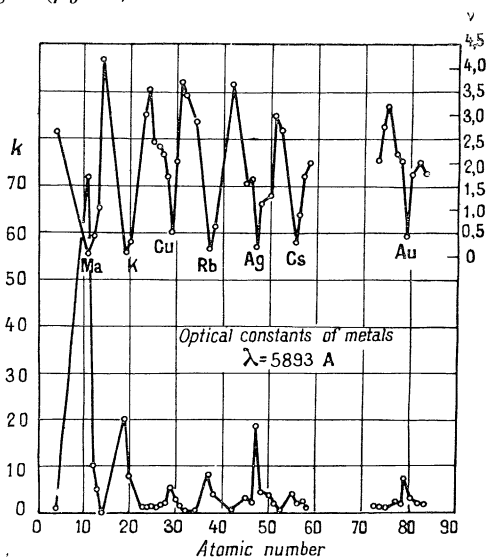


Fig. 2. — Constantes optiques des métaux massifs en fonction du nombre de charges (J. B. Nathanson). Au premier minimum de la courbe du haut, lire Na au lieu de Ma.

H. E. Ives et H. B. Briggs, dans une série de publications, ont déterminé systématiquement les constantes optiques des métaux alcalins : K [4.2], Na [4.3], Rb et Cs [4.4]. Ils emploient la méthode de W. Voigt, modifiée par Minor, en usage pour les métaux massifs, et opèrent en général sous le vide qui a servi à préparer les couches.

De son côté H. M. O'Bryan [4.5] a étudié une dizaine de métaux Al, Ba, Be, Ca, Ce, Mg, Mn, Ge, La et Sr. Les mesures étaient effectuées dans le vide, par la méthode de Brewster légèrement modifiée. Il en a déduit la constante diélectrique  $\epsilon$

et la conductibilité  $\sigma$  de chacun de ces métaux.

Citons également R. J. Maurer [4.6] qui, au cours d'une étude sur l'effet photoélectrique du sodium et du baryum, a déterminé les constantes optiques de ces deux métaux.

R. Kretzmann [4.7] a étudié les propriétés optiques des lames métalliques épaisses dans le visible et le proche infrarouge par une méthode polarimétrique. Il donne des résultats pour Ag, Au et Cu entre 5 000 et 10 000 Å. J. R. Collins et R. O. Bock [4.8] ont exposé en 1943 une méthode de mesure polarimétrique des constantes optiques. R. O. Bock [4.9] l'a appliquée aux lames de Be, Mg et Zn dans l'air et F. Bueche [4.10] l'a utilisée, moyennant une légère modification, à l'étude dans le vide des métaux suivants : Ni, Co, Fe, Mn, Cd. G. Hass [4.11] a étudié l'aluminium et l'argent sous le vide pour des lames épaisses. Il a également déterminé le facteur de réflexion de ces lames et l'influence des impuretés. Enfin W. H. Brattains et H. B. Briggs [4.12] se sont occupés du germanium dans l'infrarouge et le visible. Ils déterminent l'épaisseur de la couche dans l'infrarouge où le germanium est transparent et en déduisent, par l'équation de P. Drude,  $\nu$  et  $\alpha$  pour les parties du spectre où Ge est absorbant.

Bien d'autres auteurs se sont occupés de cette question mais nous sommes surtout attachés aux travaux publiés depuis 1936. Il reste d'ailleurs beaucoup à faire dans ce domaine.

412. *Facteurs de réflexion et de transmission des lames épaisses.* — Dans la plupart des cas, les auteurs qui se sont occupés de cette question avaient pour but, soit d'obtenir des miroirs à facteur de réflexion élevé dans un domaine spectral déterminé, soit de réaliser des filtres absorbants, soit enfin d'étudier l'évolution de ces lames en fonction du temps.

Dans un important Mémoire, publié en 1939, G. B. Sabine [4.13] donne les courbes montrant les variations de facteur de réflexion avec la longueur d'onde, entre 400 et 4 400 Å, pour Al, Ag, Pb, Mn, Be, Pd, Pt, Ni, Ti, Au, Cd, Zn, Te, Mo, Zr, Bi, Mg, Cr, Sb et Cu (*fig. 3*). Il a essayé un grand nombre d'autres métaux pour lesquels il ne donne pas de résultats parce que la couche se détruit rapidement à l'air ou parce qu'il n'a pu les projeter avec le matériel dont il disposait (Co, Cb, Ir, Rh, Si, Ta, Ur, V).

Miss M. Banning [4.14] s'est occupée de Al, Cu, Ag et Be entre 1 200 et 2 000 Å sous le vide ayant servi à préparer les couches, alors que G. B. Sabine exposait ses lames quelques instants à l'air avant de faire ses mesures.

Dans le but de trouver une couche ayant un facteur de réflexion constant dans le visible et l'ultraviolet Clewell et J. Wulff [4.15] ont étudié des couches de Al, Be, Mg et Si ainsi que des couches d'alliages



formés à partir de ces corps. Ils ont montré qu'une couche comportant : Al 85 pour 100, Ag 10 pour 100

et Si 5 pour 100 a sensiblement le même facteur de réflexion (80 à 85 pour 100) entre 2 300 Å et

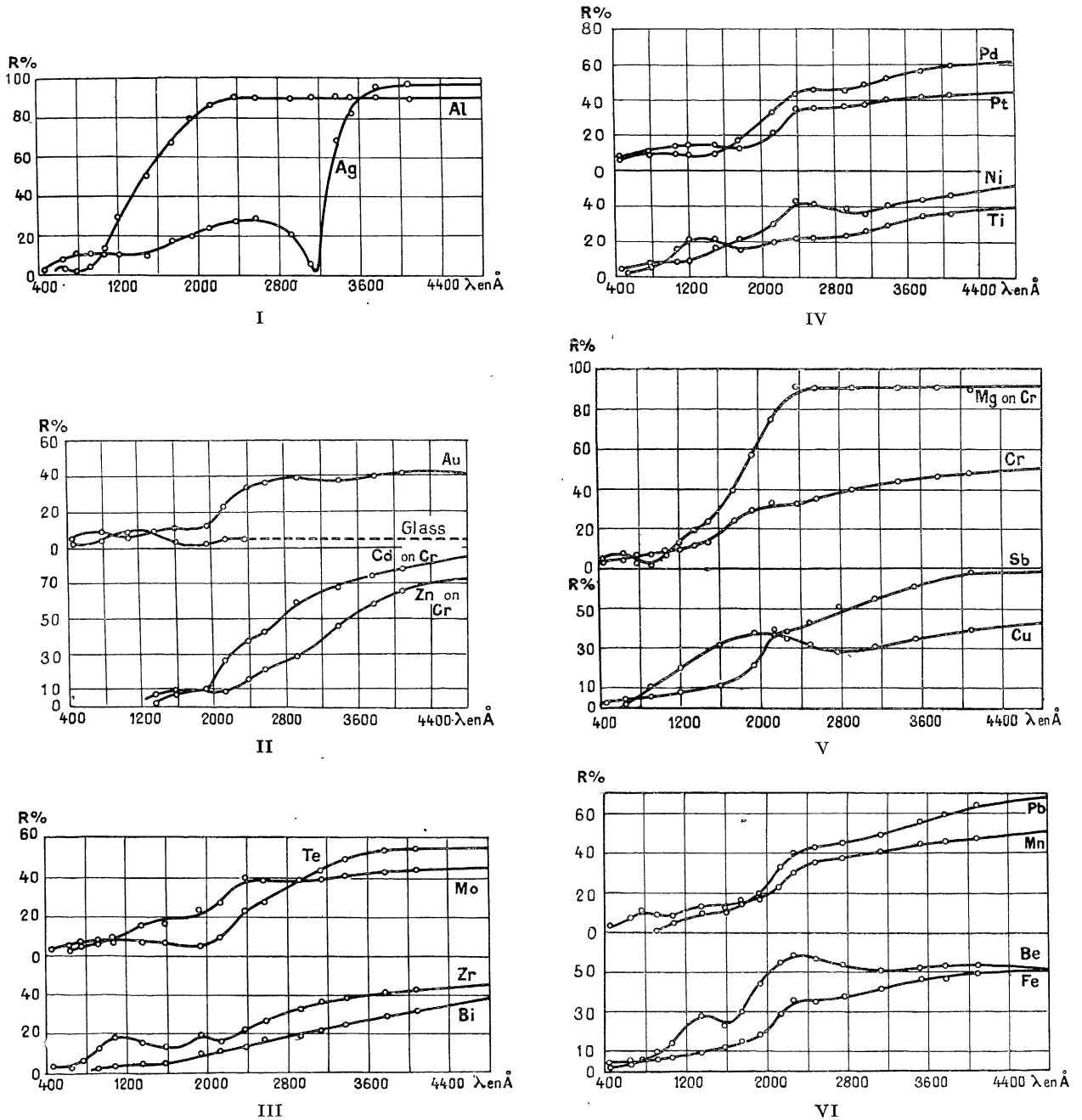


Fig. 3. — Variation du facteur de réflexion de couches épaisses de divers métaux avec la longueur d'onde (G. B. Sabine.)

5 800 Å. B. K. Johnson [4.16] a également travaillé, dans le même domaine de longueurs d'onde, avec des couches d'aluminium évaporé, d'argent chimique et de platine cathodique.

Citons encore deux études faites en lumière

blanche, dans les buts plus pratiques, l'une de L. Dunoyer [4.17] sur l'aluminium, l'autre de F. Benford et W. A. Ruggles [4.18] sur Al, Ag, Au, Ni, Cr, Mo et W.

L'étude des facteurs de transmission de lames

épaisses en incidence normale a été faite en particulier par H. Hartzler [4.19] dans le but de déterminer les bandes de transparence dans l'ultraviolet pour Cu, Ag, Au, Mg, Al, Sn, Pb, As, Sb et Bi. Parmi ces corps, seul l'argent a une bande de transparence dans cette région du spectre.

I. Becker et A. Shaper [4.20] ont étudié des couches de Se, d'épaisseur comprise entre 2 et 25  $\mu$ , obtenues par projection cathodique, dans le but de déterminer les variations de facteur de transmission en fonction de la longueur d'onde et de la température.

Enfin Walkenhorst [4.21] a étudié les couches d'aluminium pour des longueurs d'onde comprises entre 0,5 et 9  $\mu$  et les a comparées aux couches d'argent. Il a aussi étudié l'influence des conditions de projection sur les propriétés optiques des lames obtenues.

413. *Facteurs de réflexion et de transmission des lames absorbantes très minces. Détermination de leurs constantes optiques.* — Les propriétés optiques des couches absorbantes très minces ont été relativement peu étudiées. Pour tous les travaux antérieurs à 1937 on pourra se reporter à un article d'ensemble de P. Rouard [4.22] consacré à cette question. A cette époque, où les lames étaient préparées presque exclusivement par projection cathodique, les métaux peu altérables : Au, Ag et Pt avaient été surtout l'objet d'études systématiques : P. Rouard [4.23] H. Murmann [4.24] et F. Goos [4.25]. Comme autres corps étudiés citons le fer par M. Cau [4.26] et l'antimoine par C. F. Veenemans [4.27]. Enfin H. W. Edwards et R. P. Petersen [4.28] s'étaient occupés d'un alliage Al-Mg.

On a fait par la suite des travaux analogues sur un très petit nombre de métaux. P. J. Haringhuizen, D. A. Was et A. M. Kruithof [4.29] ont de nouveau étudié en 1937 les lames minces d'or. Ils les obtenaient par évaporation, contrairement aux précédents auteurs cités. Malgré un mode différent de préparation des couches, leurs résultats sont comparables à ceux qui les ont précédés, en particulier ces auteurs ont mis en évidence des variations de  $\nu$  et de  $\kappa$  avec l'épaisseur de la couche. M. Dühmke [4.30] a étudié les facteurs de réflexion des couches minces de rhodium dans le proche infrarouge.

J. B. Nathanson et C. L. Bartberger [3.6] se sont intéressés aux lames minces de fer cathodique déjà étudiées par M. Cau et d'autres auteurs. A cette occasion ils ont tracé des courbes théoriques donnant les facteurs de réflexion de couches minces peu absorbantes en fonction des constantes optiques de la couche, du support et de l'épaisseur. G. Essers Rheindorf [4.31] a étudié l'indice complexe de couches d'argent, préparées par évaporation, d'épaisseur comprise entre 60 et 450  $\text{Å}$ . Ses résultats sont tout à fait comparables à ceux que F. Goos [4.25] a obtenus pour l'or cathodique (*fig. 4 a et 4 b*). Ces courbes mettent en évidence des résultats généraux

déjà signalés par d'autres auteurs : B. Pogany [4.32], H. Fritze [4.33] et P. Rouard [2.10] à la suite de P. Drude [2.6]. L'indice d'extinction  $\kappa$  tend vers zéro avec l'épaisseur tandis que, au contraire, l'indice de réfraction de la couche croît.

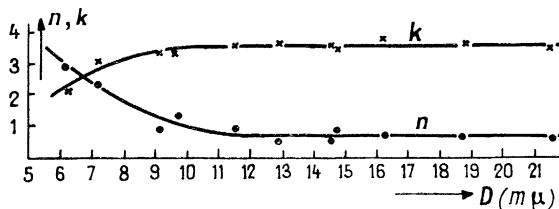


Fig. 4 a. — Variations de  $n$  et  $k$  en fonction de l'épaisseur pour l'argent (G. Essers-Rheindorf).

Citons enfin les travaux de M. Perrot [2.25] sur le chrome déposé par voie cathodique et par évaporation. C'est à l'occasion de ces travaux que M. Perrot a mis au point les procédés graphiques dont nous avons parlé précédemment et qui lui ont permis d'expliquer les faits observés.

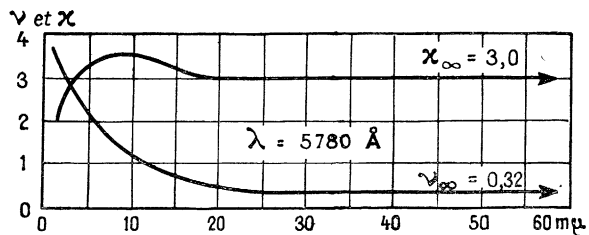


Fig. 4 b. — Variation de  $n$  et  $\nu$  en fonction de l'épaisseur pour l'or (F. Goos).

Toute une série d'études ont été consacrées aux particularités observées pour les propriétés optiques des couches minces. On pensait autrefois, à la suite des travaux de E. Hagen et H. Rubens [4.34] que les facteurs de réflexion des lames minces absorbantes, côté air et côté support, croissaient régulièrement avec l'épaisseur, tandis que le facteur de réflexion décroissait suivant une loi exponentielle. De plus il était admis que les lames minces métalliques avaient, par transparence, lorsque la lumière incidente était blanche, une couleur bien définie, caractéristique du métal (vert pour l'or, bleu pour l'argent, etc.).

En étudiant systématiquement les lames minces d'or, d'argent, de platine, préparées par voie cathodique, P. Rouard [4.35] a montré en 1932 que les facteurs de réflexion côté support passaient par un minimum très voisin de zéro. En collaboration avec P. Cotton [4.36] il a montré plus tard que de nombreuses couches minces d'autres métaux : Al, Be, Cu, Zn et Mg, préparées par voie thermique ou

cathodique, présentaient la même particularité. Pour une épaisseur convenable des couches de ces métaux, déposés sur verre, la surface verre-métal est « sans reflets ». F. Goos avait, en 1936 [4.25], retrouvé les résultats de P. Rouard pour Ag et Au et les avait étendus aux radiations de l'ultraviolet et de l'infrarouge proche. A la même époque D. B. Langmuir et C. H. Cartwright et de nombreux autres auteurs, utilisant des lames minces transparentes, réussissaient à observer le même phénomène côté air et à le rendre non sélectif, grâce à l'emploi de couches multiples comme on le verra au paragraphe 51.

En ce qui concerne les couches métalliques minces, l'existence d'un minimum (d'ailleurs non nul), de facteur de réflexion côté support avait été prévu par F. Kaempff [2.8] pour le platine, métal à constantes optiques relativement élevées. Il était imprévisible théoriquement pour l'or et l'argent en prenant pour constantes optiques de la couche mince celles du métal massif.

Par la suite F. Goos [4.25], en étudiant des lames d'argent déposées sur quartz a montré que les facteurs de réflexion de telles lames côté air et côté quartz pouvaient passer, lorsque la lumière incidente est monochromatique, de longueur d'onde  $\lambda = 2\,653 \text{ \AA}$ , par un maximum très net et que, de plus, le facteur de réflexion côté support pouvait devenir, pour une même épaisseur de métal, nettement supérieur au facteur de réflexion côté air, contrairement à tous les résultats expérimentaux et théoriques alors connus.

D'autre part, M. Perrot et P. Rouard [4.37] puis M. Perrot [4.38] étudiant des lames minces préparées par projection cathodique à partir d'une cathode ou d'un fil de chrome (lames à coefficient d'extinction très faible), ont mis en évidence le fait que les facteurs de réflexion et de transmission de telles couches peuvent passer par une série de maxima et de minima quand l'épaisseur du dépôt croît.

414. *Energie absorbée dans une lame absorbante mince.* — Tout récemment l'étude de l'énergie absorbée dans une lame métallique à faible coefficient d'extinction a conduit P. Cotton [4.39] à un résultat intéressant, car il montre que l'on peut observer avec les ondes lumineuses des propriétés qui semblaient jusque-là l'apanage des ondes hertziennes.

L'énergie effectivement absorbée dans une lame mince peu absorbante présente une succession de maxima et de minima quand l'épaisseur de la couche croît, ainsi que le montre la figure 5. Dans le cas d'une lame sans support, dont les deux faces sont en contact avec l'air, l'énergie absorbée peut, pour une épaisseur de « résonance », dépasser l'énergie absorbée par le métal massif. P. Cotton a confirmé expérimentalement ces résultats théoriques [4.40]

que F. Scandone et L. Ballerini [4.41] avaient trouvés indépendamment à la même époque.

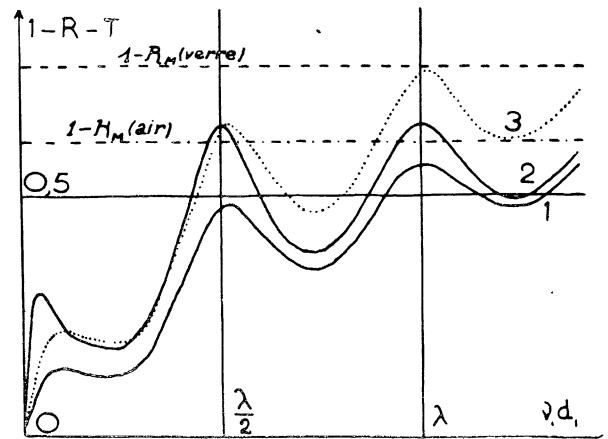


Fig. 5. — La courbe n° 1 correspond au cas où la lumière incidente tombe sur la lame métallique côté air. La courbe n° 3 au cas où la lumière incidente tombe sur la lame métallique côté verre. La courbe n° 2 au cas où la lame métallique est sans support.

415. *Changements de phase.* — Les changements de phase à la réflexion normale ont été peu étudiés. On trouvera la bibliographie des travaux antérieurs à 1937 dans un article de P. Rouard [2.10]. Comme travaux théoriques récents citons ceux de P. Rouard [4.42], M. Perrot [4.43] et de D. Malé [4.44].

Les études polarimétriques ont été assez nombreuses durant ces dernières années. Elles ont en général pour but la détermination des constantes optiques (411). On trouvera une mise au point bibliographique de cette question dans un article récent de F. Suhner [4.45].

416. *Evolution des lames.* — Sitôt obtenues, les lames évoluent, même si on les laisse sous le vide qui a servi à les préparer. L'étude de cette évolution spontanée a suscité un certain nombre de travaux, mais la question est loin d'être éclaircie. Parmi ces travaux on peut citer ceux de A. Jagersberger [4.46] sur l'argent et l'or, ceux de H. W. Edwards et R. P. Petersen [4.28] sur l'aluminium et les alliages Al-Mg. Ces derniers auteurs ont étudié l'influence du temps et des gaz adsorbés sur les facteurs de réflexion et de transmission. Le facteur de réflexion des lames qui réfléchissent 90 pour 100 au moins de la lumière incidente, diminue d'une façon marquée durant les deux premières minutes après la projection. Une deuxième diminution apparaît quand on fait rentrer l'air dans la cloche à projection. Ici aussi le changement est d'abord très rapide; il est ensuite beaucoup plus lent surtout dès que la pression atmosphérique

est atteinte. Un troisième changement se produit alors, il n'est pas marqué sur les courbes. Il est très petit et demande plusieurs jours pour être complet. D'après H. W. Edwards et R. P. Petersen le premier changement serait dû à une cristallisation du métal, d'abord amorphe; le second proviendrait en partie de l'accroissement de pression et en partie d'une oxydation; enfin le troisième changement traduirait l'action combinée d'une cristallisation et d'une oxydation qui gagnent les parties les plus protégées. Le fait que la dureté du métal s'accroît lentement pendant plusieurs semaines semble corroborer cette dernière assertion.

G. Hass [4.47] s'est intéressé aux couches d'Ag et Al et a étudié les variations avec le temps que subit la lumière elliptique obtenue par réflexion sous une incidence oblique. Il a déterminé également l'influence des gaz adsorbés sur les propriétés optiques des couches. Son travail comporte, de plus, une étude de la structure des couches par diffraction électronique (évolution en fonction de la température).

M. Perrot [4.48] a retrouvé le phénomène dit du «vieillissement spontané» signalé par certains des auteurs précédents, en opérant dans le vide qui a servi à la préparation des couches. De plus, il a montré que les propriétés optiques varient lorsqu'on met les lames en contact avec l'air, cette variation peut ou non disparaître lorsqu'on place à nouveau la lame sous le vide.

N. Cabrera [4.49] a étudié spécialement l'évolution des couches d'aluminium dans l'air sec ou humide avec le temps. Dans le cas de couches épaisses le facteur de réflexion reste invariable. Avec le temps les couches plus minces voient leur facteur de réflexion diminuer tandis que leur facteur de transmission croît. Cet auteur interprète ces résultats en admettant qu'il se forme une couche transparente d'alumine aux dépens de l'aluminium.

On reviendra plus loin sur cette question de l'oxydation (57).

D'autres auteurs se sont occupés de l'influence de la température sur les propriétés des couches. Signalons en particulier le travail de W. Berndt [4.50] consacré aux couches de Sb, As, Te, Fe et Ag condensés à basse température. Cet auteur a montré que le facteur de réflexion croît brusquement et de façon irréversible lorsqu'on amène le dépôt à la température ordinaire.

Hilsch [4.51] n'a pu mettre en évidence, sur des couches minces de zinc, l'influence de la supraconductibilité sur les facteurs de réflexion.

**42. Lames transparentes.** — Elles ont été surtout étudiées au point de vue de leurs applications et nous reviendrons sur cette question aux paragraphes 51 et 52. Cependant certains auteurs se sont occupés de la détermination des constantes optiques de ces lames.

H. S. Coleman, A. F. Turner et O. A. Ullrich [4.52] ont étudié l'indice des couches de  $MgF_2$  en fonction de la température de la cible au moment du dépôt et ont mis en évidence de légères variations de cet indice avec l'orientation cristalline du dépôt.

B. H. Billings et M. Hyman [4.53] se sont intéressés à l'indice de réfraction et à la dispersion de la stibnite  $Sb_2S_3$  en lames minces dans l'infrarouge, domaine de longueur d'onde où ce corps est transparent.

Citons encore A. Rothen et Miss M. Hanson [4.54] qui ont mesuré l'ellipticité de la lumière réfléchie par une surface métallique couverte d'une couche transparente d'épaisseur comprise entre 25 Å et 4 μ. Ils ont constaté que la formule de P. Drude qui permet le calcul de la vibration elliptique obtenue par réflexion oblique, s'applique bien dans ce cas.

Enfin R. Tousey [4.55] a étudié les propriétés optiques du quartz évaporé et de la silice fondue dans l'extrême ultraviolet et L. G. Schulz [4.56] s'est intéressé à l'indice de réfraction des couches de LiF préparées par évaporation.

## 5. APPLICATIONS.

Dans ce Chapitre nous indiquerons quelques-unes des applications des lames minces. Nous traiterons tout d'abord des lames antireflets, puis des lames à facteur de réflexion élevé. Nous insisterons ensuite plus particulièrement sur les filtres interférentiels et nous donnerons enfin quelques indications sur la protection des miroirs, sur les progrès récents réalisés en interférométrie grâce à l'emploi de couches multiples, et sur quelques autres applications.

**51. Lames antireflets.** — On avait constaté depuis longtemps que certains objectifs, construits avec des verres tendres, avaient une transparence

qui s'accroissait avec le temps [5.1]; ce n'est pourtant qu'en 1916 que Kollmorgen [5.2] réalisa les premiers traitements chimiques de verres pour réduire leur facteur de réflexion. Mais la diminution de la réflexion ne devint une question vraiment à la mode que lorsque G. Bauer [5.3] en 1934 parvint à la réaliser au moyen de couches de fluorures alcalins. Cette réalisation fut, du reste, purement fortuite. De son côté J. Strong [5.4] dès 1936 s'occupait de cette question aux États-Unis d'Amérique, et précisait les conditions nécessaires pour obtenir de bons résultats. Depuis, de très nombreuses recherches ont été entreprises, dont les résultats sont souvent couverts par des brevets. A l'heure

actuelle, la plupart des objectifs sortent traités des usines, c'est-à-dire recouverts de couches antireflets.

Des articles généraux permettent de suivre les progrès accomplis durant ces dernières années : citons notamment ceux de P. Jacquinot [1.6], K. B. Blodgett [5.5], A. Smakula [5.6], K. M. Greenland [5.7], et, plus récemment ceux de A. Arnulf [1.7] et [3.18] et de Strickland [5.8]. On trouvera dans ces articles une abondante bibliographie.

511. *Lames transparentes antireflets simples.* — Il semble que trois procédés principaux sont actuellement utilisés pour former les couches antireflets simples : évaporation thermique (324), dépôts mécaniques (33) et attaque ménagée du verre (34). Nous avons parlé de ces procédés aux paragraphes indiqués.

On trouvera dans l'article déjà cité de P. Jacquinot [1.6] un exposé très complet des résultats obtenus avec une seule couche mince transparente déposée sur du verre, du point de vue de la réduction du facteur de réflexion de ce dernier.

Ces couches simples transparentes sont d'ailleurs surtout utilisées dans ce but. Elles sont faciles à préparer et souvent suffisantes pour obtenir un résultat convenable malgré leur chromatisme marqué. Pour les objectifs photographiques, par exemple, les surfaces internes sont recouvertes, par évaporation, d'une couche de fluorure. Les surfaces externes, moins bien protégées, sont laissées nues ou sont recouvertes d'un dépôt de silice, moins efficace mais plus résistant. On trouvera une étude comparative des efficacités des différents dépôts à base de fluorures avec des détails expérimentaux et pratiques dans un excellent article de A. Arnulf [5.9]. Quelques indications bibliographiques sur les résultats obtenus sont données au paragraphe 514.

512. *Lames transparentes antireflets multiples.* — Pour améliorer la qualité optique des couches antireflets (diminution de la sélectivité) et aussi pour accroître leur solidité, certains auteurs ont préconisé l'emploi de couches multiples. Parmi ceux-ci nous citerons C. H. Cartwright et A. F. Turner [5.10] qui les premiers ont appliqué le procédé en 1939 avec une couche de saphir évaporée sur un dépôt mince de quartz. P. King et L. B. Lockhart [5.11] ont, en 1946, fait la théorie des couches multiples et donné quelques résultats expérimentaux relatifs à des revêtements à deux et trois couches [5.12]. Indiquons également un article de A. Dell [5.13] qui donne une théorie mathématique simple des couches multiples. Cet auteur s'est intéressé aux couches de cryolithe et signale l'existence, dans ces dépôts, d'une couche superficielle à indice plus élevé que celui des couches profondes.

Enfin dans l'article déjà cité, H. A. Tanner et

L. B. Lockhart [3.60] ont analysé les brevets allemands pris pendant la guerre. Ils indiquent des résultats expérimentaux obtenus avec des couches triples.

513. *Lames transparentes antireflets dont l'indice varie de façon continue.* — L'idéal serait d'obtenir, comme nous l'avons dit plus haut, une couche dont l'indice varierait de façon continue depuis celui du verre jusqu'à celui de l'air. On supprimerait ainsi la discontinuité optique à la surface de séparation air-verre. Malheureusement la réalisation pratique de telles couches est impossible car il n'existe pas de corps solides transparents ayant des indices inférieurs à 1,3 à l'état massif. On peut abaisser cet indice massif en projetant dans certaines conditions de vide, mais les couches ont alors une résistance mécanique faible.

Il est cependant possible d'obtenir des couches présentant un gradient d'indice. En particulier l'attaque chimique des verres et leur vieillissement spontané conduisent souvent à des couches inhomogènes (34). On a également réussi à obtenir des couches à gradient d'indice connu en projetant simultanément sur la surface traitée deux corps d'indices différents [5.14]. Ces couches ont une grande efficacité.

514. *Résultats obtenus.* — On aura une idée des résultats obtenus dans le traitement des objectifs photographiques en consultant C. H. Cartwright [5.15], Tyler, Morse et Jewett [5.16], Moen [5.17], Fracastoro et Giacchetti [5.18], B. S. Blaisse [5.19].

En ce qui concerne l'amélioration de la clarté dans les jumelles à prisme, on trouvera des renseignements dans un article de A. Arnulf et M. Françon [5.20]. Pour le microscope quelques données numériques sont fournies par Locquin [5.21.]

Signalons enfin que M. Hymann Jr et B. H. Billings [5.22] ont employé le procédé pour l'obtention de fenêtres transparentes pour l'infrarouge (lame de chlorure d'argent recouverte de  $Sb_2S_3$ ).

Les essais mécaniques des couches antireflets ne sont pas, à l'heure actuelle, nettement codifiées. On trouvera quelques renseignements à ce sujet dans un papier de D. M. Packer [5.23] et surtout dans un article de Townsley [5.24].

52. **Couches transparentes à facteur de réflexion élevé.** — En général il s'agit de diviser un faisceau lumineux en deux parties sans absorption (télémetros, loupes et microscopes binoculaires, etc.). Ce problème peut être résolu au moyen de couches métalliques d'épaisseur convenable (Ag, Al, Pt, etc.); mais une partie de la lumière est perdue par absorption.

On arrive, à l'heure actuelle, à supprimer presque complètement l'absorption dans le spectre visible,

sans effet sélectif, en utilisant des couches transparentes.

La plus simple de ces couches est constituée par un dépôt d'une substance transparente très réfringente, d'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  sous l'incidence d'utilisation. On peut aussi alterner des couches à indices faible et élevé.

C'est vraisemblablement A. H. Pfund [5.25] qui a été le premier, en 1934, à réaliser de telles couches. Il préconisait alors l'emploi du sulfure de zinc et prévoyait que la stibnite ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) et l'oxyde de titane pourraient être utilisés dans ce but.

On trouvera dans un article de K. M. Greenland [5.26] des courbes spectrales de transmission de différents types de couches (simples ou multiples).

L'efficacité des couches simples fait l'objet d'un article de K. Hammer [5.27]. Après une étude théorique de la question (influence de l'indice et de l'épaisseur de la couche, des indices des milieux en contact avec le dépôt, de la longueur d'onde de la radiation considérée), cet auteur donne les résultats des expériences qu'il a faites. Il signale entre autres que, pour une couche de  $\text{ZnS}$  de 580 Å d'épaisseur, la transmission et la réflexion sont pratiquement indépendantes de  $\lambda$ , et qu'une couche de sulfure d'antimoine, transmettant et réfléchissant 47,5 pour 100 (absorption 5 pour 100), paraît légèrement jaune orangé par transmission.

Citons comme autres auteurs s'étant occupés de cette question R. Messner [5.28] qui emploie  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  et M. Pruvost et F. Dourneau [5.29] qui utilisent  $\text{TiO}_2$  ou  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ . Les corps très légèrement absorbants peuvent également présenter de l'intérêt pour réaliser de telles couches. On a employé dans ce but  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : F. Dourneau [5.30],  $\text{PbS}$  : Smethurst [5.31] et A. A. S. Moore [5.32], le mélange complexe obtenu par projection cathodique à partir d'une cathode de chrome : P. Rouard et M. Perrot [5.33], le silicium : P. Cotton [5.34].

Dans un article récent, K. Hammer [5.35] donne des indications sur les corps à employer en pratique suivant le but que l'on se propose et pour obtenir des couches résistantes.

Enfin, C. H. Cartwright et A. F. Turner [5.36] ont mis en lumière, dans une courte note, l'intérêt de l'emploi des couches multiples. On trouvera des détails expérimentaux dans un article de M. Banning [5.37] qui, comme eux, a utilisé  $\text{TiO}_2$  produit par réaction en phase gazeuse et des couches doubles  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ .

**53. Filtrés interférentiels.** — On a souvent besoin d'isoler dans un spectre une bande étroite de longueur d'onde. Les monochromateurs à prismes ou à réseaux permettent d'obtenir ce résultat mais leur prix est relativement élevé, leur clarté faible et leur emploi impossible pour certains usages

(Photographie). Les filtres par absorption (verres, gélatines, liquides absorbants) sont d'un prix plus abordable, mais leurs bandes passantes sont relativement très larges. Malgré le très grand nombre de substances et de combinaisons de filtres absorbants étudiées on ne peut faire varier à volonté la position dans le spectre et la largeur de cette bande passante.

La réalisation des filtres de Christiansen et appareils analogues a constitué un sérieux progrès mais le rendement est resté faible et on est gêné par la lumière diffusée provenant des radiations non transmises.

Pour aller plus loin on a d'abord fait appel aux phénomènes de polarisation chromatique en lumière parallèle. B. Lyot [5.38] le premier a réalisé un filtre de ce type utilisant la double réfraction du quartz. La bande passante est alors très étroite (1 Å) mais sa position dans le spectre est fixée une fois pour toutes par l'épaisseur de quartz traversée et cette dernière ne peut varier à volonté. Ces filtres ont de plus un champ angulaire peu étendu. Ils ont été perfectionnés récemment par B. H. Billings [5.39] qui a mis au point un dispositif permettant de déplacer la bande passante dans une partie du spectre. Leurs conditions d'emploi et leur prix limitent cependant leur utilisation. Aussi a-t-on cherché, dans ces dernières années, à résoudre le problème en utilisant les phénomènes d'interférence dans les couches minces.

Plusieurs types de ces filtres interférentiels sont utilisés actuellement : filtres interférentiels par réflexion, filtres interférentiels par transmission, filtres interférentiels à réflexion totale frustrée.

**531. Filtrés interférentiels par réflexion.** — Dans leur forme la plus simple, ces filtres sont constitués par un miroir parfaitement réfléchissant sur lequel on a déposé une couche mince d'un corps transparent d'épaisseur optique égale à un quart d'une certaine longueur d'onde fondamentale  $\lambda_0$ . La surface extérieure de cette couche transparente est recouverte d'une couche métallique très mince.

Un tel filtre est, en définitive, un étalon de Perot-Fabry employé par réflexion en lumière parallèle quasi-normale et dont la lame arrière est parfaitement réfléchissante. L'épaisseur optique de l'étalon est ici très faible puisque égale à  $\frac{\lambda_0}{4}$ ; l'air est remplacé par une lame mince solide transparente.

Lorsqu'il est convenablement construit, un tel filtre réfléchit 100 pour 100 de la radiation de longueur d'onde  $\frac{\lambda_0}{2p}$  et 0 pour 100 de la radiation de longueur d'onde  $\frac{\lambda_0}{2p+1}$ .

La longueur d'onde fondamentale  $\lambda_0$  est caractéristique du filtre.

Les filtres interférentiels de ce type sont dérivés d'un filtre électromagnétique utilisé pendant la

guerre pour les ondes hertziennes ultra-courtes. On a là un excellent exemple de l'application à l'Optique des résultats obtenus en Électricité.

La théorie de ces filtres a été donnée en 1947 par L. N. Hadley et D. M. Dennison [5.40]. Les méthodes de récurrence mises au point par D. Caballero [2.26], A. Vašíček [2.27] et F. Abelès [2.28], et dont nous avons parlé plus haut, ont permis de la simplifier.

En ce qui concerne la réalisation pratique de ces filtres on pourra consulter L. N. Hadley et D. M. Dennison [5.41]. D'abord utilisés dans l'infrarouge [5.42] ils ont été ensuite adaptés au visible.

Une couche mince métallique ayant une résistance électrique égale à l'impédance caractéristique de l'espace libre (377 ohms par  $\text{cm}^2$ ) absorbe toute l'énergie pour une longueur d'onde particulière si elle est montée en quart d'onde devant un miroir parfait. Sur ce principe B. H. Billings [5.43] a construit un bolomètre très sensible pour l'infrarouge.

532. *Filtres interférentiels par transmission.* — Dans leur forme la plus simple, ces filtres sont

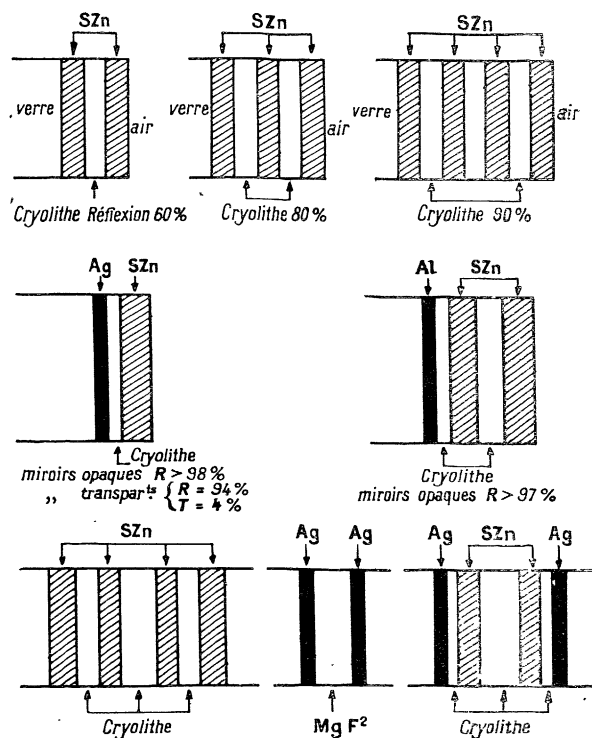


Fig. 6. — Filtres interférentiels (C. Dufour).

constitués par une lame mince transparente à faces planes et parallèles, limitée par deux couches minces métalliques d'épaisseur uniforme. Cette couche multiple est déposée, par évaporation, le plus souvent sur du verre. La couche transparente a une épaisseur

de quelques longueurs d'onde seulement. On peut donc dire que ces filtres sont des étalons de Perot-Fabry de très faible épaisseur, dont la lame d'air est remplacée par une lame transparente solide.

Dans ces conditions, si on opère en lumière parallèle et si l'on désigne par  $n$  l'indice de la lame mince transparente et par  $e$  son épaisseur, la différence de marche entre deux rayons émergents successifs tels que 1, 2, 3, ..., sera  $\delta = 2ne$  (aux changements de phase à la réflexion près). L'intensité de la lumière transmise sera maximum pour toutes les radiations dont la longueur d'onde satisfait à la relation

$$2ne = k\lambda \quad (k \text{ entier}).$$

Les premiers de ces filtres ont été réalisés en Allemagne pendant la guerre. On en trouvera une première description dans un rapport de J. A. Sanderson et R. L. Ueberall [5.44]. La théorie des filtres simples a été d'abord faite par L. N. Hadley et D. M. Dennison [5.40]; R. L. Mooney [5.45] l'a étendue aux cas des filtres à cinq couches minces. Les méthodes de récurrence dont on dispose maintenant et qui fournissent des formules générales pour un nombre quelconque de couches, facilitent considérablement, comme nous l'avons déjà dit, cette théorie que C. Dufour [5.46] a d'ailleurs simplifiée en la rattachant à celle de l'étalon de Perot-Fabry.

En ce qui concerne la construction et l'étude expérimentale de ces filtres on trouvera quelques détails dans l'article de L. N. Hadley et D. M. Dennison [5.41] et dans un article plus détaillé de M. Banning [5.47].

De tels filtres sont fabriqués industriellement à l'heure actuelle dans divers pays [5.48]. L'ordre d'interférence est habituellement compris entre 2 et 10 (H. M. O'Bryan [5.49]). La longueur d'onde moyenne de la bande passante peut être choisie à volonté dans le visible ou le proche infrarouge; elle peut être légèrement déplacée en inclinant le filtre sur le faisceau lumineux. La largeur de la bande passante est, en général, comprise entre 50 et 250 Å; elle ne peut guère descendre au-dessous de 20 Å. Le facteur de transmission maximum est de l'ordre de 20 à 30 pour 100; le facteur de transmission minimum 6 à 7 pour 1000. Les filtres usuels, ayant une largeur de bande de 200 Å environ dans le spectre visible, peuvent être utilisés avec un faisceau d'ouverture  $\frac{f}{3}$ .

On fabrique actuellement des filtres analogues à un coin d'air limité par des lames semi-métallisées pour lesquels la longueur d'onde de la bande passante varie d'un point à l'autre du filtre (voir par exemple A. F. Turner et O. A. Ullrich [5.50]). Le premier de ces auteurs [5.51] a également réalisé un filtre, constitué avec des lames minces d'or, qui est un excellent passe-bande pour tout le visible.

Ces appareils offrent le grand avantage de pouvoir être intercalé sur le trajet d'un faisceau lumineux sans le dévier, car ils fonctionnent comme une lame à faces parallèles; de plus ils ne modifient pas l'état de polarisation du faisceau.

Grâce aux couches multiples on arrive à construire des filtres passe-haut, passe-bas et passe-bande très intéressants parce qu'ils sont peu absorbants dans la bande passante.

533. *Filtres à réflexion totale frustrée.* — Ces filtres utilisent le phénomène de la « réflexion totale frustrée » dû à la pénétration de l'onde évanescente dans le milieu d'indice le moins élevé [5.52]. On les construit en plaçant un filtre interférentiel par transmission entre deux prismes à réflexion totale utilisés très près de l'incidence limite. On remplace ainsi la réflexion des lames métalliques semi-transparentes des filtres précédents par la réflexion totale frustrée sur la face hypoténuse de deux prismes. Ils ont été décrits et construits récemment par P. Leurgans et A. F. Turner [5.35] et étudiés par C. Dufour. Ce type de filtre polarise la lumière. Son intérêt est surtout grand dans les régions du spectre où l'on ne possède pas de substances réfléchissantes de faible absorption. Ils sont en particulier utilisés dans l'infrarouge.

54. *Polariseurs à couches minces.* — Le principe de ces appareils est analogue à celui des anciennes piles de glaces. Les lames de verre sont

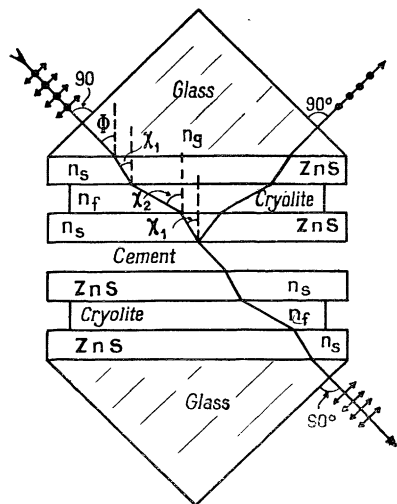


Fig. 7. — Schéma d'un polariseur à couches minces (M. Banning).

remplacées par des couches minces. Pour les construire on dépose sur les faces hypoténuses de deux prismes rectangles trois couches minces superposées. On colle ensuite ces faces hypoténuses de

manière à obtenir un cube. Dans ces conditions la moitié environ de la lumière incidente est réfléchie, tandis que l'autre moitié est transmise. Toutes deux sont polarisées rectilignement dans des plans perpendiculaires. La figure 6 représente un tel appareil construit par M. Banning [5.47] avec des couches de sulfure de zinc et de cryolithe déposées dans l'ordre indiqué.

Ces appareils paraissent être jusqu'à présent, surtout utilisés dans l'infrarouge. Ils sont alors constitués par l'empilement de couches de nitrate de cellulose et de sélénium. On trouvera des détails pratiques dans un article de A. Elliot, E. J. Ambrose et R. Temple [5.54].

55. *Protection des lames et des miroirs.* — On a pensé depuis longtemps à recouvrir les métaux à l'état massif ou les lames métalliques d'une couche mince, transparente et inaltérable, pour les protéger contre l'action des agents atmosphériques. Il semble bien que le premier qui ait réalisé une telle couche par voie thermique a été H. W. Edwards [5.55] qui déposait ainsi de la silice sur des miroirs d'argent. Depuis cette époque cette idée a été reprise en particulier par G. Hass et N. W. Scott [5.56] qui ont fait une étude systématique des couches de monoxyde de silicium [5.57] déposées par évaporation. Les couches évaporées de monoxyde de silicium ont été également employées, à l'échelle industrielle, en Allemagne pendant la guerre, pour protéger les miroirs aluminés (*voir* [5.58]).

Une autre façon de procéder, employée par G. Hass [5.59], consiste à obtenir une couche d'alumine protectrice en oxydant anodiquement un dépôt épais d'aluminium.

Cette couche protectrice peut d'ailleurs servir à accroître le facteur de réflexion du miroir. Cette possibilité a été signalée par A. F. Turner [5.60] et une étude théorique de la question a été faite par P. Cotton [2.35], F. Abelès [5.61] et M. Perrot [5.62]. On arrive actuellement à construire des miroirs qui réfléchissent 99 pour 100 de la lumière incidente et qui sont pratiquement inaltérables.

Un problème analogue se pose à propos des lames d'interféromètres de Perot-Fabry, nous y reviendrons dans le paragraphe suivant.

56. *Interféromètre de Perot-Fabry.* — L'interféromètre de Perot-Fabry était, jusqu'à ces dernières années, constitué essentiellement par deux lames de verre ou de quartz recouvertes sur leurs faces en regard d'un dépôt métallique transparent. Suivant le but poursuivi on utilisait, pour réaliser ces dépôts, de l'argent, de l'aluminium, du nickel, etc. Ces métaux ayant un fort coefficient d'extinction il en résultait, en particulier pour les forts pouvoirs séparateurs, une faible luminosité rendant difficile l'emploi des sources de faible brillance.



Pour l'étude des radiations émises par ces sources une première amélioration avait été obtenue par P. Rouard et M. Perrot [5.33] grâce à l'emploi de couches très faiblement absorbantes, d'épaisseur optique voisine de  $\frac{\lambda}{4}$ , obtenues par projection cathodique, à partir d'une cathode de chrome. Ces auteurs avaient, d'ailleurs, fait ressortir tout l'intérêt présenté par l'emploi de lames d'étalon recouvertes d'une couche transparente d'indice de réfraction égal à 3 pour résoudre ce problème.

Une deuxième amélioration avait consisté, l'étalon étant utilisé par transmission, à éviter au faisceau incident la traversée de la première lame (entrée claire). On trouvera des renseignements sur cette façon d'opérer, qui permet de métalliser au maximum la première lame, dans un article de C. Dufour [5.63].

Pour aller plus loin et pour donner à l'interféromètre de Perot-Fabry le pouvoir séparateur le plus grand possible et une grande luminosité, des études systématiques ont été entreprises. Outre la thèse de C. Dufour [5.46] on pourra consulter les articles de H. Kuhn, L. Bradley, R. J. Bright, D. A. Jackson et J. G. W. Series [5.64].

Enfin, plus récemment l'emploi des couches minces transparentes pour recouvrir les lames d'étalons a permis des progrès importants. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des couches multiples. On trouvera une excellente étude d'ensemble de la question dans la thèse de C. Dufour déjà citée, dans les Communications faites au Colloque sur les lames minces solides par C. Dufour et P. Jacquinot et dans un Ouvrage récent de S. Tolansky [5.65].

À la suite de ces perfectionnements, l'interféromètre de Perot-Fabry est devenu l'instrument le plus employé pour les recherches de structures fines et hyperfines et pour l'étude des raies faibles situées au voisinage de raies intenses. Ses qualités et sa commodité d'emploi le font actuellement préférer par les spectroscopistes à la lame de Lummer et Gehrcke et même à l'échelon de Michelson.

**57. Applications diverses.** — Ce qui précède suffit à montrer tout l'intérêt que présente l'étude des lames minces solides. Ces dernières ont cependant bien d'autres applications possibles. En particulier la réalisation d'écrans absorbants neutres de densité optique déterminée a préoccupé un certain nombre d'auteurs. Aux travaux anciens de Schuch [5.66] et de F. Artigas [5.67] consacré le premier à des couches minces de platine, le second à des couches mixtes d'argent et de platine utilisées pour réaliser des écrans absorbants neutres dans la région du visible, il faut ajouter ceux plus récents de Brian O'Brien et T. A. Russel [5.68] et de M. Banning [5.69]. Ce dernier auteur a étudié le palladium, le tungstène ainsi qu'un alliage : le chromel A (80 pour 100 Al, 20 pour 100 Cr). Cet alliage donne,

lorsqu'il est évaporé dans des conditions convenables, des lames minces neutres, dans un intervalle spectral compris entre 2 400 et 15 000 Å. La variation maximum de la densité optique, entre ces limites de longueur d'onde, est de 12 pour 100 environ.

Grâce à un appareillage ingénieux P. Jacquinot [5.70] a obtenu des lames minces particulièrement neutres, dont les lignes d'égale densité optique sont des droites. Il a préparé ainsi des coins photométriques à variation linéaire ou quelconque de densité, des filtres interférentiels à longueur d'onde variable suivant la région choisie et des écrans qui, placés devant les prismes des spectrographes, permettent d'obtenir une apodisation marquée des raies spectrales. On conçoit tout l'intérêt de cette dernière réalisation pour la mise en évidence des satellites faibles situés au voisinage immédiat de raies intenses.

Les écrans absorbants ont reçu également une application intéressante à la microscopie de phase. À l'Institut d'Optique de Paris on a réalisé des lamelles de contraste de phase en déposant sur du verre une couche d'aluminium en forme de couronne donnant à la fois la variation de phase et l'atténuation d'amplitude désirée [5.71].

Nous avons déjà vu, d'autre part, que J. Strong [3.17] avait utilisé l'aluminium pour métalliser les grands miroirs de télescope. La méthode est maintenant classique. On trouvera quelques détails originaux dans la Communication de cet auteur faite au Colloque de Marseille. J. Strong [5.72] a, d'ailleurs, utilisé la même technique pour augmenter la luminosité des spectres donnés par les réseaux de diffraction utilisés par réflexion. On trouvera quelques indications sur les résultats obtenus dans un article de A. B. Focke [5.73].

M. Auwarter [5.74], dans un article d'ensemble, a donné les caractéristiques et les avantages du rhodium pour la fabrication des miroirs. Quelques données expérimentales permettent de comparer le rhodium à l'argent, au platine, au silicium et à l'aluminium. Le rhodium a des propriétés optiques plus indépendantes de la longueur d'onde que les corps que nous venons de citer. Certaines firmes allemandes l'ont utilisé pour métalliser les miroirs de projecteur en raison de son grand facteur de réflexion (85 pour 100) et de sa résistance aux agents atmosphériques [5.75].

Indiquons également que, pour suivre l'oxydation superficielle des métaux, on étudie depuis longtemps les propriétés optiques des lames minces solides. Les couches d'oxyde obtenues peuvent être soit transparentes, soit absorbantes. Dans un article récent, A. B. Winterbottom [5.76], qui a beaucoup travaillé cette question, donne une bibliographie importante sur les recherches entreprises dans ce sens et sur les résultats obtenus.

Enfin, pour terminer, signalons deux applications

curieuses qui montrent les possibilités parfois imprévues des couches minces. La première est la réalisation de couches photoémisives semi-transparentes à structure granulaire (skyatron) et la seconde

l'obtention d'une couche conductrice et transparente permettant le chauffage du verre sans altérer ses propriétés optiques (dispositifs anti-givrants) [5.77].

## 6. CONCLUSIONS.

Nous avons essayé de ne passer sous silence aucun des travaux importants dont nous avons pu avoir communication. Malheureusement certains auteurs sont assez discrets quant à leurs références bibliographiques et aussi quant à la façon dont ils ont obtenu leurs résultats. D'autre part nous ne disposons pas d'une documentation complète relative aux brevets.

Le nombre de travaux entrepris dans les dernières

années et cités dans cet article montre que la question est très étudiée à l'heure actuelle. La réalisation de couches antireflets, de lames à facteur de réflexion élevé, de diviseurs de faisceaux absorbants, de filtres interférentiels, de miroirs, etc. montre que l'intérêt porté à l'étude des lames minces n'est pas d'origine purement spéculative; la science pure et les réalisations techniques sont, dans ce domaine, étroitement mêlées.

Manuscrit reçu le 22 novembre 1949.

## BIBLIOGRAPHIE.

- [1. 1] FRUTH H. F. — *Physics*, 1932, **2**, 280.  
 [1. 2] RICHTER K. — *Kolloid. Z.*, 1932, **61**, 208.  
 [1. 3] LANGE H. — *Kolloid. Z.*, 1937, **78**, 109 et 231.  
 [1. 4] ANDANT A. — *Bull. Union Physiciens*, 1946, **40**, 113 à 127.  
 [1. 5] ARON A. — *Ann. Phys.*, 1946, **12**, 361 à 494.  
 [1. 6] JACQUINOT P. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1942, **21**, 15.  
 [1. 7] ARNULF A. — *Le Vide* (Paris), 1946, **1**, 129.  
 [2. 1] ABELÈS F. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1949, **28**, 11.  
 [2. 2] WEINSTEIN W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 576.  
 [2. 3] CROOK A. W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 954.  
 [2. 4] WILCKEN J. A. — *Phil. Mag.*, 1925, **49**, 105.  
 [2. 5] BLAISSE B. S. et VAN DER SANDE J. J. — *Physica* (Pays-Bas), 1947, **13**, 413.  
 [2. 6] DRUDE P. — *Ann. Physik*, 1891, **43**, 126 et 51; 1894, 595; *Ann. Physik*, 1893, **50**, 620.  
 [2. 7] VOIGT W. — *Wied. Ann.*, 1887, **31**, 233 et 1888, **35**, 76.  
 [2. 8] KAEMPF F. — *Ann. Physik*, 1905, **16**, 308.  
 [2. 9] PARTZSCH A. et HALLWACKS W. — *Ann. Physik*, 1913, **41**, 247.  
 [2.10] ROUARD P. — *Ann. Physique*, 1937, **7**, 291.  
 [2.11] FÖRSTERLING K. — *Ann. Physik*, 1937, **30**, 745.  
 [2.12] FÖRSTERLING K. et FREDERICKS V. — *Ann. Physik*, 1913, **40**, 201; 1914, **43**, 1221.  
 [2.13] VAŠIČEK A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 623.  
 [2.14] HERPIN H. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **225**, 182.  
 [2.15] ABELÈS F. — *C. R. Acad. Sc.*, 1948, **226**, 1808.  
 [2.16] ABELÈS F. — *Thèse Doctorat*, Paris, 1949.  
 [2.17] SCANDONE F. et BALLERINI L. — *Nuovo Cimento*, 1946, **3**, 81 et *Colloque Marseille*, 1949.  
 [2.18] BLAISSE B. S. — *Nederl. T. Nat. Kunde*, 1948, **14**, 317.  
 [2.19] SCHELKUNOFF S. A. — *Bell. Syst. Techn. J.*, 1938, **17**, 17. — BRILLOUIN L. — *Waves propagation in periodical structure*, Mc Graw-Hill, Londres, New-York.  
 [2.20] KRONIG R., BLAISSE B. S. et VAN DER SANDE J. J. — *Applied Res. B. Netherland*, 1947, **1**, 63.  
 [2.21] BILLINGS B. H. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 407.  
 [2.22] MUCHMORE R. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 20.  
 [2.23] ROSE M. E. — *Phys. Rev.*, 1943, **63**, 111.  
 [2.24] CAU M. — *Ann. Physique*, 1929, **11**, 354.  
 [2.25] PERROT M. — *Ann. Physique*, 1944, **19**, 150.  
 [2.26] CABALLERO D. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 176.  
 [2.27] VAŠIČEK A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 623.  
 [2.28] ABELÈS F. — *C. R. Acad. Sc.*, 1946, **223**, 1112.  
 [2.29] SCHLICK M. — *Über die Reflexion des Lichts in einer inhomogenen Schicht* (*Diss.*, Berlin, 1904).  
 [2.30] SCHRÖDER H. — *Ann. Physik*, 1941, **39**, 55.  
 [2.31] BLAISSE B. S. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 315.  
 [2.32] GEFFKEN W. — *Ann. Physik*, 1941, **40**, 385.  
 [2.33] KOFINK F. et MENZER E. — *Ann. Physik*, 1941, **39**, 388.  
 [2.34] PERROT M. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1943, **22**, 20 et 1944, **23**, 185.  
 [2.35] COTTON P. — *Ann. Physique*, 1947, **12**, 209.  
 [2.36] MALÉ D. — *J. Phys. Rad.*, 1945, **12**, 40 S.  
 [2.37] OBRIMOV J. — *Z. Okzper. theor. Fiz.* (U. R. S. S.), 1944, **14**, 431 à 438.  
 [2.38] WINTERBOTTOM A. B. — *Trans. Faraday Soc.*, 1946, **42**, 487.  
 [3. 1] TOLANSKY S. — *J. Sc. Instr.*, 1936, **13**, 261 à 263.  
 [3. 2] MORGULIS N. D. — *Usp. fiz. Nank.* (U. R. S. S.), 1946, **28**, 202-204.  
 [3. 3] GUNTHERSCHULZE A. — *Z. Physik*, 1941, **118**, 145 à 153 et 1942, **119**, 79 à 99. — GUNTHERSCHULZE A. et TOLMIEN W. — *Z. Physik*, 1942, **119**, 685 à 695.  
 [3. 4] TOWNES C. H. — *Phys. Rev.*, 1944, **65**, 319 à 327.  
 [3. 5] SEELIGER E. — *Z. Physik*, 1942, **119**, 482 à 492.  
 [3. 6] NATHANSON J. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1939, **29**, 417 à 426. — BARTBERGER C. L. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 92 A.  
 [3. 7] PERROT M. — *Cahiers de Physique*, 1943, **16**, 78-79.  
 [3. 8] BECK O., SMITH A. E. et WHEELER A. — *Proc. Roy. Soc.*, 1940, **177** A, 62 à 90.  
 [3. 9] HASS G. — *Koll. Z.*, 1942, **100**, 248 à 254.  
 [3.10] HASS G. — *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 174 A.  
 [3.11] HASS G. et SCOTT N. W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1949, **39**, 179 à 184.  
 [3.12] STAHL H. A. — *J. Appl. Phys.*, 1949, **20**, 1.  
 [3.13] WILLIAMS R. C. et BACKUS R. C. — *J. Appl. Phys.*, 1949, **20**, 98.  
 [3.14] LEVINSTEIN H. — *J. Appl. Phys.*, 1949, **20**, 306.  
 [3.15] ROBILLARD J. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1949, **28**, 129 à 145.  
 [3.16] HEAVENS O. S. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 385.

- [3.17] STRONG J. — *Procedures in experimental Physics* Prentice Hall, inc. 13<sup>e</sup> édition, 1947, 151 à 187.
- [3.18] ARNULF A. — *Cours d'optique théorique et instrumentale*, Paris.
- [3.19] BANNING M. et PAUL. — *Rev. Sc. Instr.*, 1944, **15**, 152
- [3.20] NELSON J. H. — *Metal Industr.* (Grande Bretagne), 1948, **73**, 343 à 345, 369 à 371, 373.
- [3.21] JOUANNIGOT M. — *Le Vide*, 1948, **3**, 381 à 384.
- [3.22] X.... — *Rev. Sc. Instr.*, 1945, **16**, 18.
- [3.23] C. I. O. S. 9 (Combined Intelligence Objectives subcommittee) Schott und Genossen of Jena, p. 49. — *J. I. O. A.*, Final Report n° 9 (Joint Intelligence Objectives Agency Washington, D. C. London H. M. Stationary Office). German vacuum evaporation methods of producing first surface mirrors, semi-transparent mirrors and non-reflecting films. — *B. I. O. S.*, 1183 (British Intelligence Objectives subcommittee, London H. M. Stationary Office). Antireflection surface on glass, optical cements and etching resist for fines lines. — *B. I. O. S.*, 1342 German optical mirrors and Reflectors. — *B. I. O. S.*, 1215 German Methods of Rhodiumizing, Aluminizing antireflection surface coating and allied subject.
- [3.24] WILLIAMS R. C. et BACKUS R. C. — *J. Appl. Phys.*, 1949, **20**, 98.
- [3.25] CALDWELL W. C. — *J. Appl. Phys.*, 1941, **12**, 645.
- [3.26] OLSEN L. O., SMITH C. S. et CRITTENDEN E. C. — *J. Appl. Phys.*, 1945, **16**, 425.
- [3.27] SCOTT N. W. — *Colloque de Marseille*, 1949 (discussion).
- [3.28] O'BRYAN H. M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 122 à 127.
- [3.29] GROSS F. — *Z. Physik*, 1930, **64**, 520.
- [3.30] OTIS H. N. — *Phys. Rev.*, 1933, **44**, 843 à 849.
- [3.31] LASSEN H. — *Physik Z.*, 1934, **35**, 172.
- [3.32] TROMBE F. — *Verres et Réfractaires*, 1949, **3**, 83 à 96.
- [3.33] DUFOUR C. — *Le Vide*, 1948, **3**, 480.
- [3.34] ROIG J. — *Colloque de Marseille*, 1949.
- [3.35] ANDANT A. — *Colloque de Marseille*, 1949.
- [3.36] FISHER R. A. et PLATT R. J. — *Rev. Sc. Instr.*, 1937, **8**, 505 à 507.
- [3.37] BRIAN O'BRIEN et RUSSEL T. A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1934, **24**, 54 A.
- [3.38] STRONG J. et GAVIOLA E. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 153 à 162. — STRONG J. — *Procedures in experimental Physics*, 180 à 185.
- [3.39] SCHULZ L. G. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 349; *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 509; *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 435 à 441.
- [3.40] JACQUINOT P. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 381.
- [3.41] DUFOUR C. — *Le Vide*, 1948, **16**, 5.
- [3.42] BATESON S. et BACHMEIER A. J. — *Nature*, 1946, **158**, 133-134.
- [3.43] BATESON S. — *J. Soc. Glass Techn.*, 1947, **31**, 170 à 193.
- [3.44] BANNON J. — *Nature*, 1946, **157**, 446.
- [3.45] TYLER J. E. — *Rev. Sc. Instr.*, 1947, **18**, 367.
- [3.46] MONK G. S. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 571-572 L.
- [3.47] FRENCH. — *Nature*, 1940, **146**, 687.
- [3.48] *J. I. O. A.*, 9; *B. I. O. S.*, 1183; *B. I. O. S.*, 1215.
- [3.49] BLODGETT K. et LANGMUIR I. — *Phys. Rev.*, 1937, **51**, 964 à 982. — BLODGETT K. — *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 391 à 404.
- [3.50] LOTMAR W. — *Jubilaumschrift « 125 Jahre Kern Aarau »*.
- [3.51] *B. I. O. S.*, 1183.
- [3.52] ARNULF A. et GENTY R. — *Comm. Labo. Inst. Opt.*, 1948, **2**, 5 à 11.
- [3.53] *B. I. O. S.*, 1342.
- [3.54] BARNARD R. D. — *Ind. and. Eng. Chem.*, 1943, **35**, 637-638.
- [3.55] VINOKOUSOFF M. — *Ind. Opt. Mec.* (U. R. S. S.), 1939, **6-7**, 17 à 19.
- [3.56] MORGAN R. et MYERS R. D. — *J. Frank. Inst.*, 1948, **246**, 363.
- [3.57] UPTON P. A. — *J. Electrodepositors Tech. Soc.* (Grande Bretagne), 1946-1947, **22**, 45 à 70.
- [3.58] WEIN S. — *Metal Finish*, 1948, **46**, 58 à 60, 69.
- [3.59] GIBSON C. S. — *Nature*, 1937, **140**, 279-280.
- [3.60] TANNER H. A. et LOCKHART L. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1946, **36**, 701 à 706.
- [3.61] ALLEN HEANY J. — *Brevet U. S. A.*, **2**, 442, 976 (8 juin 1948).
- [3.62] JONES F. L. et HOMER H. J. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 654 A. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1941, **31**, 34 à 37.
- [3.63] SCHRÖDER H. — *Z. Tech. Phys.*, 1941, **20**, 38 à 43.
- [3.64] NICOLL F. H. et WILLIAMS F. E. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1943, **33**, 434 à 435.
- [3.65] FLAMANT F. — *Comm. Labo. Inst. Opt.*, 1948, **2**, 19 à 25.
- [3.66] B. français 913.665; B. français 880.419.
- [3.67] HASS G. et SCOTT N. W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1949, **39**, 79.
- [3.68] HASS G. et SCOTT N. W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1949, **39**, 532.
- [3.69] STRONG J. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 451.
- [3.70] Lord RAYLEIGH. — *Scientific Papers*.
- [4. 1] NATHANSON J. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1938, **28**, 300.
- [4. 2] IVES H. E. et BRIGGS H. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1937, **27**, 181.
- [4. 3] IVES H. E. et BRIGGS H. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 238 à 246.
- [4. 4] IVES H. E. et BRIGGS H. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1937, **27**, 395 à 400.
- [4. 5] O'BRYAN H. M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 122 à 127.
- [4. 6] MAURER R. J. — *Phys. Rev.*, 1940, **57**, 653.
- [4. 7] KRETZMANN R. — *Ann. Physik*, 1940, **37**, 303 à 325.
- [4. 8] COLLINS J. R. et BOCK R. O. — *Rev. Sc. Instr.*, 1943, **14**, 135.
- [4. 9] BOCK R. O. — *Phys. Rev.*, 1945, **68**, 210 à 213.
- [4.10] BUECHE F. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 806.
- [4.11] HASS G. — *Ann. Physik*, 1938, **31**, 245.
- [4.12] BRATTAIN W. H. et BRIGGS H. B. — *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 174.
- [4.13] SABINE G. B. — *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 1064 à 1069.
- [4.14] BANNING M. — *Phys. Rev.*, 1941, **59**, 914 A.
- [4.15] CLEWELL D. H. et WULFF J. — *Phys. Rev.*, 1933, **44**, 952 A.
- [4.16] JOHNSON B. K. — *Proc. Phys. Soc.* (Grande Bretagne), 1941, **53**, 258 à 264.
- [4.17] DUNOYER L. — *C. R. Acad. Sc.*, 1945, **220**, 686.
- [4.18] BENFORD F. et RUGGLES W. A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1942, **32**, 174 à 184.
- [4.19] HARTZLER H. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1934, **24**, 339.
- [4.20] BECKER A. et SHAPER I. — *Z. Techn. Phys.*, 1944, **122**, 49 à 61.
- [4.21] WALKENHORST. — *Z. Techn. Phys.*, 1941, **22**, 15.
- [4.22] ROUARD P. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1938, **17**, 1 à 40.
- [4.23] ROUARD P. — *C. R. Acad. Sc.*, 1932, **195**, 869; *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1934, **13**, 73 et [2.10].
- [4.24] MURMANN H. — *Z. Physik*, 1933, **80**, 161 et 1936, **101**, 643.
- [4.25] GOOS F. — *Z. Physik*, 1936, **100**, 95; *Z. Physik*, 1936, **102**, 702; *Z. Physik*, 1937, **106**, 606
- [4.26] CAU M. — *Ann. Physique*, 1929, **11**, 354.
- [4.27] VEENEMANS C. F. — *Arch. Neerl. Sciences exactes et naturelles*, 1933, **14**, 84.
- [4.28] EDWARDS H. W. et PETERSEN R. P. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1937, **27**, 87 à 98.
- [4.29] HARINGHUIZEN P. J., WAS D. A. et KRUIHOF A. M. — *Physica*, 1937, **4**, 695.
- [4.30] DÜHMKE M. — *Physik Z.*, 1943, **44**, 10 à 17.

- [4.31] ESSERS RHEINDORF G. — *Ann. Physik*, 1937, **28**, 297.  
 [4.32] POGANY B. — *Ann. Physik*, 1916, **49**, 531.  
 [4.33] FRITZE H. — *Ann. Physik*, 1915, **47**, 763.  
 [4.34] HAGEN E. et RUBENS H. — *Ann. Physik*, 1902, **8**, 432.  
 [4.35] ROUARD P. — *C. R. Acad. Sc.*, 1932, **195**, 869 et 1933, **196**, 339.  
 [4.36] ROUARD P. et COTTON P. — *C. R. Acad. Sc.*, 1949, **228**, 1706 à 1708.  
 [4.37] PERROT M. et ROUARD P. — *Cahiers de Physique*, 1943, **13**, 30 à 40. *Cahiers de Physique*, 1943, **17**, 63 à 73.  
 [4.38] PERROT M. — *C. R. Acad. Sc.*, 1941, **213**, 238; *Cahiers de Physique*, 1943, **16**, 78; *C. R. Acad. Sc.*, 1943, **216**, 38.  
 [4.39] COTTON P. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **224**, 334.  
 [4.40] COTTON P. — *Colloque de Marseille*, 1949.  
 [4.41] SCANDONE F. et BALLERINI L. — *Nuovo Cimento*, IX, 1946, **3**, 26.  
 [4.42] ROUARD P. — *Cahiers de Physique*, 1941, **1**, 25 à 35.  
 [4.43] PERROT M. — *C. R. Acad. Sc.*, 1942, **215**, 175 et 1943, **216**, 150.  
 [4.44] MALÉ D. — *Bull. Union Physiciens*, 1949, **43**, 105; *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1950, **29**, 27 à 32.  
 [4.45] SUHNER F. — *Verres et Réfractaires*, 1949, **3**, 3.  
 [4.46] JAGERSBERGER A. — *Z. Physik*, 1934, **89**, 557 et 1934, **89**, 564.  
 [4.47] HASS G. — *Z. An. Chem.*, 1947, **254**, 96-106.  
 [4.48] PERROT M. — *Colloque de Marseille*, 1949.  
 [4.49] CABRERA N. — *C. R. Acad. Sc.*, 1944, **218**, 994; 1947, **224**, 1558 et 1713; 1947, **225**, 59.  
 [4.50] BERNDT W. — *Z. Physik*, 1940, **115**, 17.  
 [4.51] HILSCH R. — *Physik Z.*, 1939, **40**, 592.  
 [4.52] COLEMAN H. S., TURNER A. F. et ULLRICH O. A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 521.  
 [4.53] BILLINGS B. H. et HYMAN M. JR. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 119 à 121.  
 [4.54] ROTHEN A. et HANSON M. — *Rev. Sc. Instr.*, 1948, **19**, 839; 1949, **20**, 66.  
 [4.55] TOUSEY R. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 655.  
 [4.56] SCHULZ L. G. — *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1948, **23**, 25.  
 [5. 1] TAYLOR H. D. — The adjustment and testing of telescope objectives (T. Cook, York, Grande-Bretagne 1896).  
 [5. 2] KOLLMORGEN F. — *Trans. Soc. Ill. Eng.*, 1916, **11**, 220.  
 [5. 3] BAUER G. — *Ann. Physik*, 1934, **19**, 434. \*  
 [5. 4] STRONG J. — *Phys. Rev.*, 1936, **49**, 209 A. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 73.  
 [5. 5] BLODGETT K. — *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 391.  
 [5. 6] SMAKULA A. — *Z. Instr. Kunde*, 1940, **60**, 33; *Glastechn. Berichte*, 1941, 377; *Physik Z.*, 1942, **43**, 217.  
 [5. 7] GREENLAND K. M. — *Nature*, 1943, **152**, 290.  
 [5. 8] STRICKLAND. — *J. Mot. Pict. Eng.*, 1947, **49**, 27.  
 [5. 9] ARNULF A. — *Comm. Labo. Inst. Opt.*, 1948, **2**, 1.  
 [5.10] CARTWRIGHT C. et TURNER A. F. — *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 675 A.  
 [5.11] KING P. et LOCKHART L. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1946, **36**, 513.  
 [5.12] LOCKHART L. B. et KING P. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 689.  
 [5.13] DELL A. — *Proc. Roy. Soc.*, 1949, B **62**, 81.  
 [5.14] LEITZ. — Brevet français 906.370.  
 [5.15] CARTWRIGHT C. H. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 110.  
 [5.16] TYLER J. E., MORSE R. S. et JEWETT F. B. JR. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1942, **32**, 211.  
 [5.17] MOEN L. — *Brit. J. Phot.*, 1946, **93**, 239.  
 [5.18] FRACASTRO et GIACCHETTI. — *Atti Fondaz. G. Ronchi* 1947, **2**, 147.  
 [5.19] BLAISSE B. S. — *Focus*, 1947, **7**, 105.  
 [5.20] ARNULF A. et FRANÇON M. — *Comm. Labo. Inst. Opt.*, 1944, **1**, 18.  
 [5.21] LOCQUIN M. — *Microscopie*, 1948, **1**, 12.  
 [5.22] HYMANN M. et BILLINGS B. H. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 113.  
 [5.23] PACKER D. M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1937, **27**, 983 A.  
 [5.24] TOWNSLEY. — *Rev. Sc. Instr.*, 1945, **16**, 143.  
 [5.25] PFUND A. H. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1934, **24**, 99.  
 [5.26] GREENLAND K. M. — *J. Sc. Instr.*, 1946, **23**, 48.  
 [5.27] HAMMER K. — *Z. Techn. Phys.*, 1943, **24**, 169.  
 [5.28] MESSNER R. — D. R. P. 718.040, Zeiss Werke.  
 [5.29] PRUVOST M. et DOURNEAU F. — *Comm. Labo. Inst. Opt.*, 1948, **2**, 38.  
 [5.30] DOURNEAU F. — *Colloque de Marseille*, 1949.  
 [5.31] SMETHURST. — *J. Sc. Instr.*, 1945, **22**, 52.  
 [5.32] MOORE A. A. S. — *J. Sc. Instr.*, 1945, **22**, 111 et 1945, **22**, 130.  
 [5.33] ROUARD P. et PERROT M. — *Cahiers de Physique*, 1943, **13**, 30.  
 [5.34] COTTON P. — *J. Physique et Radium*, 1950, **11**, 375.  
 [5.35] HAMMER K. — *Optik*, 1948, **3**, 495.  
 [5.36] CARTWRIGHT C. H. et TURNER A. F. — *Phys. Rev.*, 1939, **55**, 1128 A.  
 [5.37] BANNING M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 688.  
 [5.38] LYOT B. — *C. R. Acad. Sc.*, 1933, **197**, 1593.  
 [5.39] BILLINGS B. H. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 521 A et 738.  
 [5.40] HADLEY L. N. et DENNISON D. M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 451.  
 [5.41] HADLEY L. N. et DENNISON D. M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 483.  
 [5.42] HADLEY L. N. et DENNISON D. M. — *Phys. Rev.*, 1946, **69**, 258 A.  
 [5.43] BILLINGS B. H. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 407.  
 [5.44] SANDERSON J. A. et UEBERALL R. L. — Report H. 2731 Navy Department office of Research and Invention.  
 [5.45] MOONEY R. L. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1946, **36**, 256.  
 [5.46] DUFOUR C. — *Thèse de Doctorat*, Paris, 1949.  
 [5.47] BANNING M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 792.  
 [5.48] Compagnie des Compteurs, Montrouge, Seine, France. — FARRAND (Grande Bretagne). — BAIRD Com. (U. S. A.). — BAUSCH and LOMB (U. S. A.). — OFFICINE GALILEO, Firenze (Italie).  
 [5.49] O'BRYAN H. M. — *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 134 A.  
 [5.50] TURNER A. F. et ULLRICH O. A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 662 A.  
 [5.51] TURNER A. F. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 982 A.  
 [5.52] ARZELIÈS H. — *C. R. Acad. Sc.*, 1948, **226**, 478. — ABELÈS F. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **224**, 1494.  
 [5.53] LEURGANS P. et TURNER A. F. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 983 A.  
 [5.54] ELLIOT A., AMBROSE E. J. et TEMPLE R. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1948, **38**, 212.  
 [5.55] EDWARDS H. W. — *Rev. Sc. Instr.*, 1937, **8**, 453.  
 [5.56] SCOTT N. W. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1946, **36**, 711 A. — SCOTT N. W. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 394.  
 [5.57] ZINTL. — *Z. Ang. Chem.*, 1940, **245**, 1.  
 [5.58] *J. I. O. A.*, **9**, 26.  
 [5.59] HASS G. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1949, **39**, 532.  
 [5.60] TURNER A. F. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1946, **36**, 711 A.  
 [5.61] ABELÈS F. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **224**, 733.  
 [5.62] PERROT M. — *Rev. opt. Théor. Instr.* 1947, **26**, 202.  
 [5.63] DUFOUR C. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1945, **24**, 11.  
 [5.64] KUHN H., BRADLEY L., BRIGHT R. J., JACKSON D. A. et SERIES J. G. W. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 422.  
 [5.65] TOLANSKY S. — Multiple Beam Interferometry of surfaces and films (Clarendon Press, Oxford, 1948).  
 [5.66] SCHUCH E. — *Ann. Physik*, 1932, **13**, 297.  
 [5.67] ARTIGAS F. — *Rev. Opt. Théor. Instr.*, 1926, **5**, 217.  
 [5.68] BRIAN O'BRIEN et RUSSEL T. A. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1934, **24**, 54 A.  
 [5.69] BANNING M. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1947, **37**, 686.  
 [5.70] JACQUINOT P. — *J. Phys. et Radium*, 1950, **11**, 422.  
 [5.71] KASTLER A. — *Bull. Union Physiciens*, 1948, **42**, 216.  
 [5.72] STRONG J. — *Phys. Rev.*, 1936, **49**, 291.  
 [5.73] FOCKE A. B. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1936, **26**, 235.  
 [5.74] AUWÄRTER M. — *J. Appl. Phys.*, 1939, **10**, 705.  
 [5.75] *B. I. O. S.*, 1215.  
 [5.76] WINTERBOTTOM A. B. — *J. O. S. A.*, 1948, **38**, 1074.  
 [5.77] *Rev. Sc. Instr.*, 1948, **19**, 539; *J. Frank. Instr.*, 1948 **246**, 185; *The Glass Industry*, 1948, **29**, 404; Brevet français, XIII, 3-945.541.