HAL
open science

Extension du domaine spectral de pouvoir réflecteur élevé des couches multiples diélectriques

F.A. Jenkins

To cite this version:

F.A. Jenkins. Extension du domaine spectral de pouvoir réflecteur élevé des couches multiples diélectriques. Journal de Physique et le Radium, 1958, 19 (3), pp.301-306. 10.1051/jphysrad:01958001903030100 . jpa-00235837

HAL Id: jpa-00235837

https://hal.science/jpa-00235837

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.

EXTENSION DU DOMAINE SPECTRAL DE POUVOIR RÉFLECTEUR ÉLEVÉ DES COUCHES MULTIPLES DIÉLECTRIQUES (*)

Par F. A. JENKINS,
Department of Physics, University of California, Berkeley, California, U. S. A.

Sommaire. — On discute deux moyens pour rendre les revêtements multi-diélectriques appliqués aux lames de Fabry-Perot utilisables dans une plus large région du spectre : 1) incorporation de couches de Sb_2O_3 pour permettre l'utilisation dans l'ultraviolet et 2) variation de l'épaisseur des couches élémentaires, en s'écartant de l'épaisseur $\lambda/4$, pour élargir le maximum de pouvoir réflecteur en fonction de la longueur d'onde. La technique de préparation de couches transparentes de Sb_2O_3 est décrite ; on en donne l'indice. Le calcul du déphasage à la réflexion des couches multiples non $\lambda/4$ montre que ses variations sont très rapides dans certaines régions du spectre. En conséquence, les filtres interférentiels préparés avec deux tels miroirs ont plusieurs bandes passantes très étroites, dont la longueur d'onde dépend peu de l'épaisseur de la couche médiane. Cette dernière propriété est vérifiée expérimentalement, et la finesse prévue est confirmée à un facteur 2 près. La forme générale des courbes déphasage-longueur d'onde montre qu'il peut être difficile, en recouvrant un miroir métallique d'un revêtement à multi-couches non $\lambda/4$, d'élargir la région de réflexion accrue sans introduire des régions étroites de réflexion trés basse. Ceci se vérifie expérimentalement. Le pouvoir réflecteur d'un miroir d'aluminium revêtu de 6 couche $\lambda/4$ est supérieur à 95 % dans un domaine de 2 800 Å ; de tels miroirs devraient être précieux dans tous les cas où de multiples réflexions sont utilisées.

Abstract. — Two ways of rendering multilayer coatings for Fabry-Perot plates usable over a wider region of the spectrum are discussed : (1) incorporation of Sb_2O_3 layers to permit use in the ultraviolet, and (2) variation of the thickness of the individual layers from the $\lambda/4$ condition to broaden the maximum of the curve of reflectance *versus* wavelength. The technique of producing clear films of Sb_2O_3 is described, and their refractive index is reported. Calculation of the phase shift on reflection from the de-tuned type of film shows that its dispersion is very large in certain regions of the spectrum. As a consequence, interference filters made with two such films show several pass-bands that are very sharp and vary only slightly in wavelength when the spacer thickness is changed. The latter prediction is experimentally verified, and the expected sharpness is confirmed within a factor of two. The general form of the phase shift curves shows that it may be difficult, by coating a metallic mirror with a de-tuned film, to broaden the region of enhanced reflection without introducing narrow regions of very low reflectance. Experimental tests confirm this. The reflectance of an aluminium mirror coated with a tuned 6-layer film exceeds 95 percent over 2 800 Å, and such mirrors should be valuable where many reflections are needed.

Introduction. — La supériorité des revêtements à couches multi-diélectriques pour l'interféromètre de Fabry-Perot, par rapport aux couches métalliques, est généralement admise, au moins pour les longueurs d'ondes inférieures à 6 000 Å [1]. Les couches multiples du type « classique », constituées d'empilements de couches $\lambda/4$ de sulfure de zinc et de cryolithe ou de fluorure de magnésium, voient leur domaine spectral d'utilisation limité au moins par deux facteurs : d'abord l'absorption du sulfure de zinc, qui limite leur emploi vers 4 000 Å, ensuite la largeur finie du maximum de réflexion, qui couvre au plus un domaine de seulement 1 100 Å. Divers auteurs [1], [2], [3], [4] ont proposé des moyens pour échapper à ces limitations. Le remplacement du sulfure de zinc par une autre substance transparente à l'ultra-violet a été utilisé par trois laboratoires différents utilisant l'iodure de rubidium [4], le chlorure de plomb [1] et l'oxyde d'antimoine [2] respectivement. L'élargissement du maximum de réflexion, au prix d'une certaine perte de pouvoir réflecteur, en changeant l'épaisseur des couches élémentaires, a été aussi signalé [1], [3]. Avec ces deux améliorations, il semble maintenant possible de couvrir entièrement le visible et le proche ultra-violet avec deux paires de lames d'interféromètre portant des revêtements convenables.

La communication suivante décrit certains progrès relatifs aux conditions de dépôt et aux propriétés des couches d'oxyde d'antimoine. Elle comprend aussi des résultats sur les variations de déphasage dans le cas des couches à bande de réflexion élargie, et discute leurs répercussions sur deux autres problèmes : leur influence sur la bande passante des filtres interférentiels comportant deux

(*) Ce travail a été financé en partie par une subvention de la « National Science Foundation ».

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphysrad:01958001903030100

miroirs de ce type [3] ; la possibilité d'élargir la région de pouvoir réflecteur amélioré pour les miroirs métalliques opaques recouverts de couches multiples diélectriques, en utilisant des couches non $\lambda/4$ au lieu de couches $\lambda/4$.

Couches de Sb_2O_3. — Détails expérimentaux. — Après la publication des résultats préliminaires obtenus avec cette substance [2], d'autres chercheurs [6] semblent avoir éprouvé quelques difficultés à obtenir des couches limpides, non absorbantes de Sb_2O_3. Utilisant comme source un creuset d'alumine chauffé extérieurement par un filament de tungstène, ils font état d'une certaine tendance à obtenir des couches brunes, plus diffusantes que les couches de ZnS de même épaisseur. Nous n'avions observé aucun effet analogue dans nos recherches précédentes, les couches restant généralement limpides jusqu'à des épaisseurs optiques de 15 000 Å. Les seuls résultats peu satisfaisants avaient été obtenus quand le chauffage préliminaire était conduit trop rapidement, entraînant la projection de petites parcelles sur la surface à traiter. Celles-ci semblaient être de petits cristaux projetés par la crépitation, à laquelle Sb_2O_3 semble spécialement sujet. La substance sublime à température relativement basse (rouge à peine visible) et un contrôle soigneux de la température est nécessaire.

Des dépôts brunâtres sembleraient indiquer une certaine décomposition avec libération d'antimoine, effet qui serait aggravé par les surchauffes locales. Pour vérifier cette hypothèse, une couche 3 λ a été préparée, en utilisant, pour le chauffage, un creuset de molybdène ouvert. La température du creuset nécessaire pour une vitesse d'évaporation raisonnable était d'environ 1 000 °C, et la couche obtenue était fortement colorée en brun.

Un type de creuset exempt de ce défaut, et qui s'est révélé d'utilité générale, a été élaboré, pour fournir essentiellement les conditions du corps noir dans l'espace contenant la substance à évaporer.

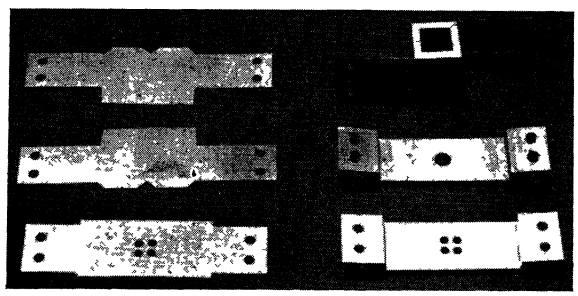

Fig. 1.

Il est constitué (*fig.* 1) d'une boîte cubique, de 1,9 cm de côté, de molybdène de 0,08 mm d'épaisseur. Il est formé de deux pièces (a, b) pliées et soudées par points, en quatre points, à l'aide de petits morceaux de feuille de platine. Le fond est rendu étanche par un ciment d'alundum pour hautes températures. Un couvercle de l'un des modèles (c, e, f) figurés, est monté au-dessus de cette boîte, à une très petite distance. Le courant de chauffage passe en parallèle dans le creuset et le couvercle ; si l'épaisseur de ce dernier est convenablement choisie, il se maintient à une température légèrement supérieure. On a ainsi avec une bonne approximation les conditions d'émission du corps noir, avec le minimum de surchauffes locales. La surface à traiter est située à 50 cm au-dessus du creuset et tourne de façon continue dans son plan pour améliorer l'uniformité des couches obtenues.

Les mesures de transmission des couches obtenues au spectromètre Beckman montrent que l'absorption commence à 3 000 Å et devient intense à 2 700 Å. L'indice de réfraction moyen, déterminé d'après les courbes de pouvoir réflecteur, varie de 2,29 pour 3 660 Å, à 2,04 pour 5 460 Å. Quand la vitesse d'évaporation est faible, les couches deviennent beaucoup moins homogènes, les minima de pouvoir réflecteur devenant progressivement inférieurs à celui du support. Dans un cas, où une couche de 5 700 Å d'épaisseur a été déposée en une demi-heure, cette diminution correspond suivant l'équation de Bauer [7] à une diminution de 16 % de l'indice de la couche entre les surfaces intérieure et extérieure. En accélérant l'évaporation, cet effet disparaît. Cette influence de la vitesse est en accord avec les résultats de Hall [8] sur des couches de fluorure de magnésium.

Performances des couches de Sb_2O_3. — Les couches multiples d'oxyde d'antimoine et de cryolithe se sont montrées très adaptées aux besoins de la spectroscopie interférentielle dans le proche ultra-violet. La figure 2 donne la courbe

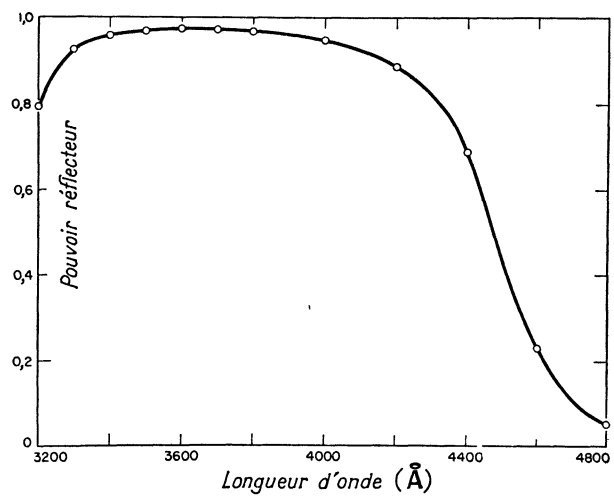

Fig. 2. — Neuf couches Sb_2O_3-cryolithe sur quartz.

expérimentale de pouvoir réflecteur d'une lame d'interféromètre recouverte de 9 couches. Elle a été déduite, en négligeant l'absorption, de la courbe de transmission mesurée sur un spectrophotomètre Cary. Les couches étaient contrôlées séparément à 3 660 Å. Le pouvoir réflecteur dans cette région est très supérieur à celui de l'aluminium, et fournit la finesse maximum compatible avec la planéité des lames. Ces couches semblent être d'une stabilité excellente, car aucun signe de vieillissement n'est apparu depuis plus d'un an. Ceci n'est pas le cas des deux autres substances proposées, RbI et $PbCl_2$ toutes deux sensibles à l'humidité de l'air. Les valeurs données ci-dessus pour l'indice des couches de Sb_2O_3 peuvent être confirmées en comparant la figure 2 avec les courbes théoriques correspondant à diverses valeurs de l'indice. Le meilleur accord est obtenu pour un indice voisin de 2,20.

Pour évaluer l'absorption de ce type de multi-couches, un filtre interférentiel à 11 couches a été préparé avec une couche médiane de cryolithe $\lambda/2$ pour 3 650 Å. La courbe de transmission de ce

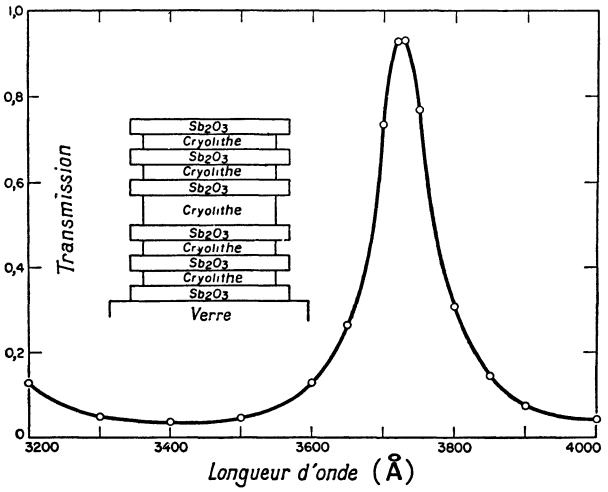

FIG. 3. — Transmission d'un filtre ultraviolet préparé pour λ 3 650 Å.

filtre (*fig.* 3), a une bande passante de 100 Å à mi-hauteur et un maximum de transmission de 93,6 %. Cette dernière valeur correspond à une absorption, pour un miroir à 5 couches, légèrement inférieure à 0,5 %. Un résultat analogue a été obtenu en appliquant la méthode de Giacomo [9] à une paire de lames de Fabry-Perot traitées avec 9 couches. Cette absorption est comparable à celle des multi-couches sulfure de zinc-cryolithe dans le milieu du visible, et est inférieure dans la région 3 000-4 000 Å, à celle des autres substances proposées.

MIROIRS A LARGE BANDE DE POUVOIR RÉFLECTEUR ÉLEVÉ ; COUCHES SEMI-RÉFLÉCHISSANTES POUR LE FABRY-PEROT. — On peut facilement accroître le pouvoir réflecteur d'un empilement de couches $\lambda/4$ au delà de la valeur justifiée par la planéité des lames [10] : il suffit d'utiliser un nombre de couches assez élevé. Au delà d'un certain nombre de couches, toutefois, on ne gagne plus rien sur le domaine spectral d'utilisation de ces miroirs. En conséquence, il vient évidemment à l'idée de varier l'épaisseur des couches élémentaires, en s'écartant de $\lambda/4$, pour élargir le domaine de pouvoir réflecteur élevé, à condition de garder pour le pouvoir réflecteur une valeur supérieure au minimum désiré.

Comme les propriétés optiques des couches minces peuvent être calculées par analogie avec des lignes électriques, on pourrait espérer trouver quelques indications sur le meilleur choix des épaisseurs dans les théories développées par les électriciens. Aucune indication de ce genre ne semble disponible ; aussi a-t-on utilisé des solutions plutôt intuitives du problème. Penselin et Steudel [1] ont adopté l'idée assez naturelle de faire varier les épaisseurs optiques, rapportées à une longueur d'onde moyenne, suivant une progression géométrique. Ce procédé, appliqué à un miroir à 13 couches, étend effectivement le domaine spectral utilisable à environ 2 000 Å. La figure 4

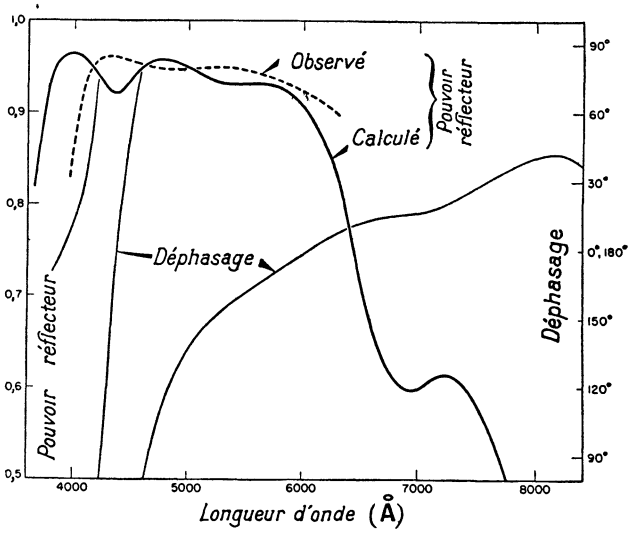

FIG. 4. — Ensemble de 13 couches quart d'onde suivant Penselin et Steudel.

1. $PbCl_2$	3 330 Å	8. Cryolithe	4 660 Å
2. MgF_2	3 440 Å	9. ZnS	4 950 Å
3. $PbCl_2$	3 600 Å	10. Cryolithe	5 280 Å
4. MgF_2	3 770 Å	11. ZnS	5 660 Å
5. ZnS	3 960 Å	12. Cryolithe	6 090 Å
6. Cryolithe	4 170 Å	13. ZnS	6 600 Å
7. ZnS	4 400 Å		

donne, en trait plein, le pouvoir réflecteur d'une telle multi-couche, calculé sur une machine I. B. M., modèle 650, et, en trait discontinu, le résultat expérimental donné dans l'article de Penselin et

Steudel. La couche n° 1 est déposée sur le support. L'accord entre le calcul et l'expérience est satisfaisant, compte tenu de la faible précision avec laquelle les indices utilisés pour le calcul sont connus. La courbe en trait léger donne le déphasage à la réflexion sur ce miroir, calculé par la machine en même temps que le pouvoir réflecteur. La dispersion de ce déphasage est si élevée par endroits, qu'il pourrait être nécessaire d'en tenir compte dans les mesures de longueurs d'ondes, avec un interféromètre ainsi traité, même sur le petit intervalle couvert par un ordre. Un autre effet de ce déphasage sera envisagé plus loin. Dans la préparation de ce type de couches, les épaisseurs optiques des couches élémentaires, repérées par les longueurs d'ondes pour lesquelles elles sont $\lambda/4$, couvrent un domaine de longueurs d'ondes très large, de 3 300 à 6 600 Å, ce qui est gênant. Un élargissement plus important du maximum, demanderait apparemment un contrôle dans un domaine de longueurs d'ondes encore plus large.

Une méthode différente, et non moins logique, a été utilisée par Baumeister et Stone [3]. Si on superpose deux empilements, formés chacun de couches $\lambda/4$ pour une même longueur d'onde, mais cette longueur d'onde étant choisie sensiblement différente pour chaque empilement, on peut espérer mettre bout à bout les deux régions de pouvoir réflecteur élevé, et obtenir un miroir avec une bande de réflexion de largeur double. Évidemment cette idée élémentaire ne donne pas un résultat satisfaisant, parce que les réflexions ne sont pas additives et doivent être considérées avec leurs phases respectives. En fait, la courbe calculée présente une ou plusieurs dépressions accentuées, vers les longueurs d'ondes où les deux maxima se rejoignent. Pour éviter cela, il faut ménager une transition entre les deux séries de couches. Pour le modèle à 15 couches décrit par Baumeister et Stone, plusieurs arrangements ont d'abord été essayés pour ces couches de transition, la courbe résultante étant calculée dans chaque cas. Comme la machine effectue la multiplication par la matrice figurant chaque couche en une demi-seconde, ceci n'est pas aussi long qu'il pourrait paraître. Après avoir obtenu une courbe acceptable, une dernière approximation a été obtenue en utilisant une méthode de relaxation, permettant d'ajuster au mieux l'épaisseur des couches. Dans le modèle final, toutes les épaisseurs peuvent être contrôlées dans le visible, entre 4 100 et 7 000 Å. Ce type de multi-couche a un pouvoir réflecteur élevé sur environ 3 000 Å, essentiellement sur tout le spectre visible, et s'est révélé très pratique pour le traitement des lames d'interféromètres utilisées dans cette région.

FILTRES INTERFÉRENTIELS « STABILISÉS » PAR LA DISPERSION DE PHASE. — Les propriétés spécifiques d'un filtre interférentiel composé de deux multicouches à large bande séparées par une couche $\lambda/2$ ont déjà été décrites [5]. Il a été montré que la variation rapide du déphasage en fonction de la longueur d'onde, par réflexion sur ces multicouches, fait apparaître plusieurs bandes passantes dans le visible, dont la position et la largeur sont déterminées plus par les variations du déphasage que par l'épaisseur de la couche médiane et le pouvoir réflecteur des miroirs. Ainsi dans la relation d'Airy pour les franges de Fabry-Perot, les maxima apparaissent pour

$$\sin^2\left[\frac{2\pi nt}{\lambda} - \Phi(\lambda)\right] = 0$$

où n et t représentent l'indice et l'épaisseur de la couche médiane, et $\Phi(\lambda)$ le déphasage à la réflexion. Plus cette expression varie rapidement, en fonction de λ, au voisinage du zéro, plus la bande passante est étroite. Dans le type de filtre proposé, la variation du second terme est prédominante. Les variations de t doivent être d'importance secondaire pour la détermination de la position et de la finesse des bandes, qui peuvent être ainsi considérées comme « stabilisées » par la variation rapide du déphasage.

Pour obtenir une vérification expérimentale de cette propriété, trois paires de filtres à 31 couches ont été préparées. Dans chaque paire, les deux filtres étaient identiques, exceptée l'épaisseur de la couche médiane. Les variations d'épaisseur de cette couche étaient obtenues en utilisant des longueurs d'ondes différentes pour régler l'épaisseur à $\lambda/2$. Pour la première paire, on a choisi les longueurs d'ondes 4 200 et 4 000 Å. Les bandes passantes obtenues se trouvaient à la même longueur d'onde, aux erreurs d'expérience près. Pour la seconde paire, on a augmenté la différence : de 4 200 à 3 650 Å ; ici on a observé un déplacement appréciable de la bande passante, variant de 1/245 de la longueur d'onde pour la bande la plus étroite, à 1/27 pour la bande la plus large. En comparant ce déplacement à la variation relative d'épaisseur 1/7,7, il est évident qu'on obtient un effet de stabilisation, de l'ordre de grandeur prévu. La troisième paire permettait de comparer un filtre avec une couche médiane contrôlée à 4 200 Å et un filtre sans couche médiane. La même série de bandes apparaissait dans les deux filtres, mais, dans le second, elles étaient déplacées de 30 à 190 Å vers le rouge. En calculant les courbes de déphasage, on a vérifié non seulement que ces déplacements étaient en accord avec la théorie, aux erreurs expérimentales près, mais encore que les valeurs absolues des longueurs d'ondes étaient correctes, avec des erreurs ne dépassant pas 2 % en moyenne.

En ce qui concerne les largeurs des bandes passantes, la théorie prévoit un affinement, comparé au cas d'une dispersion de phase nulle, dans un rapport voisin des valeurs précédentes. Les

résultats antérieurs avaient donné des largeurs faibles, mais plusieurs fois supérieures à la valeur théorique. Avec les nouveaux filtres, on a obtenu un meilleur accord. Une bande à 5 885 Å du filtre sans couche médiane, mesurée photographiquement avec un spectromètre à réseau concave de 6,4 m, donne une largeur à mi-hauteur de 12 Å, ou 35 cm^{-1}. La valeur théorique a été calculée avec précision d'après la dispersion de phase, $d\Phi/d\lambda = 14\ \mu$, et le pouvoir réflecteur, $R = 0{,}977$, mesuré sur le miroir à 15 couches. Ces valeurs fournissent une largeur $\Delta\sigma = 17\ cm^{-1}$, soit environ la moitié de la largeur observée. La différence pourrait être due au fait, suggéré par Giacomo [11], que les performances des couches possédant un $d\Phi/d\lambda$ élevé dépendent considérablement des variations d'uniformité des couches élémentaires.

Amélioration du pouvoir réflecteur des miroirs métalliques. — Il est bien connu qu'une amélioration considérable du pouvoir réflecteur d'un métal opaque peut être obtenue, sur un domaine restreint de longueur d'onde, en le recouvrant d'une multi-couche, composée d'un nombre relativement petit de couches $\lambda/4$. Dans la figure 5,

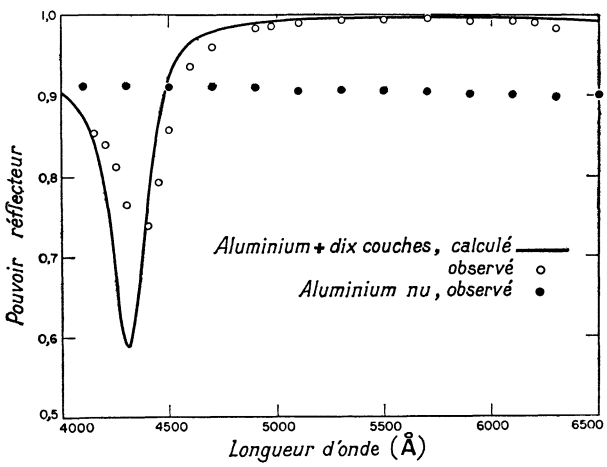

Fig. 5. — Pouvoir réflecteur de l'aluminium avec et sans couches.
Aluminium + six couches, calculé ——
observé o
Aluminium nu, observé ●

les points noirs montrent le pouvoir réflecteur d'un miroir d'aluminium, fraîchement préparé, tandis que la courbe et les cercles donnent les valeurs calculées et expérimentales, respectivement, pour la surface recouverte de 6 couches contrôlées à 5 500 Å. La couche en contact avec le métal est de cryolithe. Tandis que la surface non traitée réfléchit à peine plus de 90 % à cette longueur d'onde, le pouvoir réflecteur calculé du miroir traité est de 99,4 % et la valeur expérimentale en est très voisine.

Quoique le gain absolu pour une réflexion unique soit faible, de tels miroirs peuvent être intéressants quand on utilise de nombreuses réflections. Les astronomes consacrent des sommes fabuleuses à la construction de grands télescopes, puis perdent peut-être la moitié de la lumière sur les divers miroirs nécessaires pour l'amener au spectrographe. En interférométrie, l'interféromètre à grande différence de marche de Vaïsala [12] est limité, quant à la plus grande distance mesurable, par la perte de lumière lors des réflexions multiples. En spectroscopie d'absorption, les cuves à réflexions multiples emploient 50 réflexions ou plus. Dans ces instruments, c'est la différence entre le pouvoir réflecteur et l'unité qui compte, et un gain de quelques pour cent vaut la peine. A titre d'exemple, la figure 6 donne l'intensité des images dues à une

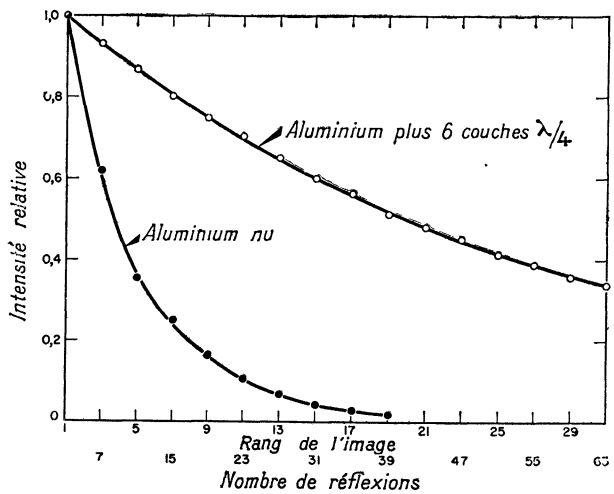

Fig. 6. — Intensités des images avec des miroirs de White.

série de réflexions sur des miroirs aluminiés du type décrit par White [13], avant et après traitement avec 6 couches. Les intensités ont été mesurées, avec une cellule photoélectrique, à 5 670 Å. La « durée de vie » de la lumière passe de 8 réflexions à 41, et même après 63 réflexions il subsiste une quantité appréciable de lumière.

Ces avantages pratiques évidents des miroirs traités montrent l'intérêt d'essayer d'élargir le domaine spectral de réflexion élevée en variant l'épaisseur des couches. Dans ce but, les courbes de pouvoir réflecteur ont été calculées sur la machine IBM 650 pour divers types de couches à bande de réflexion élargie déposées sur l'aluminium; les essais expérimentaux ont été faits sur des miroirs à réflexions multiples. Pour montrer les types de résultats obtenus, la figure 7 donne le pouvoir réflecteur d'un miroir traité avec 10 couches du type Penselin et Steudel [1], c'est-à-dire d'épaisseur optique variant en progression géométrique. Les résultats expérimentaux sont fâcheusement mauvais aux grandes longueurs d'ondes, mais l'accord avec la théorie est bon ailleurs, particu-

lièrement en ce qui concerne la région très étroite de réflexion faible dans le violet.

L'apparition de ces minima étroits est caractéristique de la combinaison de couches à épaisseurs variées et d'une surface métallique à haut pouvoir réflecteur. Ils ont essentiellement la même origine que les minima, plus larges et moins profonds,

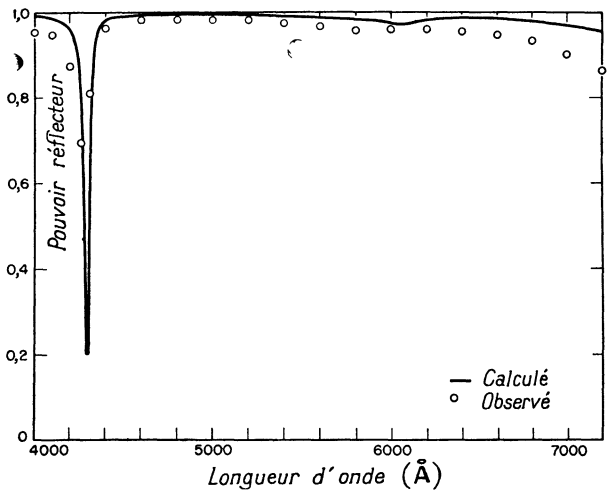

FIG. 7. — Dix couches sur aluminium.

1.	Cryolithe	$\lambda/4$ pour	6 230 Å
2.	ZnS	»	5 780 Å
3.	Cryolithe	»	5 400 Å
4.	ZnS	»	5 070 Å
5.	Cryolithe	»	4 770 Å
6.	ZnS	»	4 500 Å
7.	Cryolithe	»	4 270 Å
8.	Sb_2O_3	»	4 050 Å
9.	Cryolithe	»	3 860 Å
10.	Sb_2O_3	»	3 680 Å

obtenus avec des couches d'épaisseurs optiques égales, déposées sur un métal. Dans les deux cas, on peut considérer les bandes sombres comme les franges du spectre cannelé produit par l'interférence entre les lumières réfléchies par le miroir métallique et par le miroir diélectrique. La distance apparente entre ceux-ci dépend essentiellement du déphasage à la réflection sur les multicouches, qui, on l'a vu, varie rapidement avec la longueur d'onde. Figure 4, par exemple, le déphasage dans le bleu varie d'environ 2π sur 100 Å. Donc si une telle multi-couche est déposée sur un métal, on doit s'attendre à ce que, quelque part dans ce domaine, on trouve un déphasage de 180° entre les lumières réfléchies par la multi-couche et par le miroir, d'où une bande sombre.

Des essais ont été faits en vue d'éliminer cet effet, par exemple en déposant quelques couches supplémentaires donnant un pouvoir réflecteur élevé pour la longueur d'onde de la bande sombre. Quoiqu'on ait ainsi réduit l'importance de la bande sombre, à cette longueur d'onde, de façon appréciable, une ou plusieurs autres bandes apparaissent pour des longueurs d'ondes différentes. Il serait nécessaire de pouvoir ajouter une combinaison de couches dont la dispersion de phase compenserait celle de la multi-couche à large bande. Aucune combinaison ayant cette propriété n'a été trouvée jusqu'ici. On pourrait donc appeler cette bande sombre la « bête noire » de ceux qui essaient d'obtenir une réflexion uniformément élevée sur un domaine plus étendu de longueurs d'ondes en utilisant des couches d'épaisseurs optiques inégales.

En conclusion, on peut toutefois remarquer que la multi-couche à 6 couches égales illustrée par la figure 5 est remarquablement efficace. Les calculs montrent que le pouvoir réflecteur reste supérieur à 95 % sur un domaine supérieur à 2 800 Å, et reste supérieur à 99 % sur la plus grande partie de ce domaine. De tels miroirs, réglés pour le domaine de longueurs d'ondes désiré, devraient être très précieux. Dans de nombreuses applications les miroirs seraient utilisés sous des incidences différentes de zéro ; des formules ont été établies pour le calcul des couches multiples d'épaisseurs optiques égales, quelle que soit l'incidence, et seront bientôt publiées [14].

L'auteur désire remercier de leur aide inestimable, MM. P. W. Baumeister et Professor M. Jeppessen.

RÉFÉRENCES

[1] PENSELIN (S.) et STEUDEL (A.), *Z. Physik*, 1955, **142**, 21.
[2] BARR (W. L.) et JENKINS (F. A.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 1956, **46**, 141.
[3] BAUMEISTER (P. W.) et STONE (J. M.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 1956, **46**, 228.
[4] RIMBERT (G.), LENNUIER (R.) et COJAN (J. L.), *C. R. Acad. Sc.*, 1955, **241**, 1560.
[5] BAUMEISTER (P. W.) et JENKINS (F. A.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 1957, **47**, 57.
[6] RING (J.), Communication personnelle.
[7] BAUER (G.), *Ann. Physik* (5), 1934, **19**, 434.
[8] HALL (J. F.), Jr., *J. Opt. Soc. Amer.*, 1957, **47**, 662.
[9] GIACOMO (P.), *C. R. Acad. Sc.*, 1952, **235**, 1627.
[10] CHABBAL (R.), *J. Recherches C. N. R. S.*, 1953, **24**, 138.
[11] GIACOMO (P.), Voir communication suivante.
[12] VAISALA (Y.), *Helsingfors Inst. Géodésique*, 1923, **2**, 3 ; *ibid.*, 1930, **14**, 3.
[13] WHITE (J. U.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 1942, **32**, 285.
[14] BAUMEISTER (P. W.), A paraître dans *J. Opt. Soc. Amer.*

DISCUSSION

C. D. Reid. — Pour quelle longueur d'onde votre filtre à bande étroite était-t-il préparé ? L'étroitesse de la bande passante ne vient-elle pas de ce qu'on serait dans le violet ?

F. A. Jenkins. — Les bandes passantes dont il a été question sont dans le rouge ; la finesse n'est donc pas due à la petitesse des longueurs d'ondes. Au contraire, elle résulte de la dispersion du déphasage à la réflexion, qui permet d'obtenir une largeur de bande beaucoup plus faible (20 fois dans ce cas particulier) que celle que l'on calculerait simplement à partir du pouvoir réflecteur des miroirs.