

simple manipulation qui consiste à prendre le miroir froid pour le poser sur le support nécessite ensuite une attente d'une demi-heure ; si le miroir vient d'être travaillé, au bout d'une demi-heure on pourra reconnaître sa forme générale grâce à un échange thermique stable superficiel, mais le rayon de courbure et la forme exacte bougeront encore pendant plusieurs heures.

Pour centrer rapidement l'appareil, on le dispose à peu près en face du miroir à une distance volontairement un peu plus grande que le rayon de courbure. La lampe étant allumée et la fente enlevée on cherche en hochant la tête, l'image de retour du trou de la lanterne qui, grâce à ses dimensions (10 millimètres par exemple) est facile à trouver : cette image est plus petite que l'objet. On déplace l'appareil de Foucault tout entier et le pied au besoin de façon à se rapprocher du miroir et à amener l'image de retour, que l'on ne perd pas des yeux, au voisinage immédiat du couteau. Le diamètre de l'image du trou augmente. Quand il atteint la dimension de l'objet on est près du centre de courbure, on peut mettre la fente et tenter une première coupe avec le couteau. L'image de la fente doit être exactement parallèle à l'arête du couteau, l'oculaire de Ramsden et le couteau tournant (fig. 34) permettent de faire ce réglage avec précision. A défaut d'oculaire permettant de voir simultanément nets le couteau et l'image, on peut se contenter d'écarter l'œil à 30 centimètres environ derrière le couteau et de vérifier que l'image s'éteint bien simultanément sur toute la hauteur, la netteté des franges de diffraction dont nous parlons au paragraphe suivant fournit un critère plus sensible. L'intersection une fois trouvée (cf. § 29) le couteau n'est pas le plus souvent dans le même plan de front que la source, la différence peut être, sans inconvénient pour le contrôle, de plusieurs centimètres mais il faut en tenir compte si l'on veut mesurer le rayon de courbure du miroir, on se sert pour cela d'une longue règle légère s'appuyant sur le milieu du verre et l'on trace au crayon sur la règle un repère en face de la fente et un en face du couteau, le rayon de courbure est la moyenne des distances de ces deux repères au centre du miroir.

Le débutant s'entraînera le plus possible à trouver les positions remarquables du couteau qui montrent le miroir défectueux qu'il a sous les yeux avec les zones principales en teinte plate, pour apprécier s'il a affaire à un défaut en creux ou en relief, il n'oubliera jamais de faire mentalement le raisonnement sur la direction de l'éclairage fictif (§ 29 et fig. 33).

**32. Diffraction dans l'essai de Foucault.** – L'intérêt immense que les opticiens astronomes portent à la méthode de Foucault devait les inciter à chercher la limite de validité de l'explication purement géométrique (§ 29) en tenant compte de la nature ondulatoire des rayons lumineux. Il est très remarquable que les phénomènes de diffraction ne jouent ici qu'un rôle très secondaire (ce qui n'est pas le cas avec les tests « améliorés » que l'on a proposé) au point que nous les aurions complètement passés sous silence dans ces notes destinées aux amateurs s'il ne fallait mettre en garde contre certaines erreurs d'interprétation possibles et signaler leur possibilité d'exploitation. C'est RAYLEGH qui a considéré <sup>(1)</sup> d'abord le brillant anneau de diffraction visible autour du miroir même quand le couteau arrive à recouvrir entièrement

<sup>(1)</sup> RAYLEGH, *Phil. Mag.* 33 (1917), p. 161.

encore il faut avoir recours à une conception cinématique, nous emprunterons à des montages de M. A. COUDER quelques-unes des dispositions suivantes aussi efficaces que peu dispendieuses à établir : sur le support de la figure 36, le miroir bute par 2 points de sa tranche, distants de 60 à 90° contre les flasques du support ayant les arêtes intéressées, légèrement dégagée vers le dos, ce qui

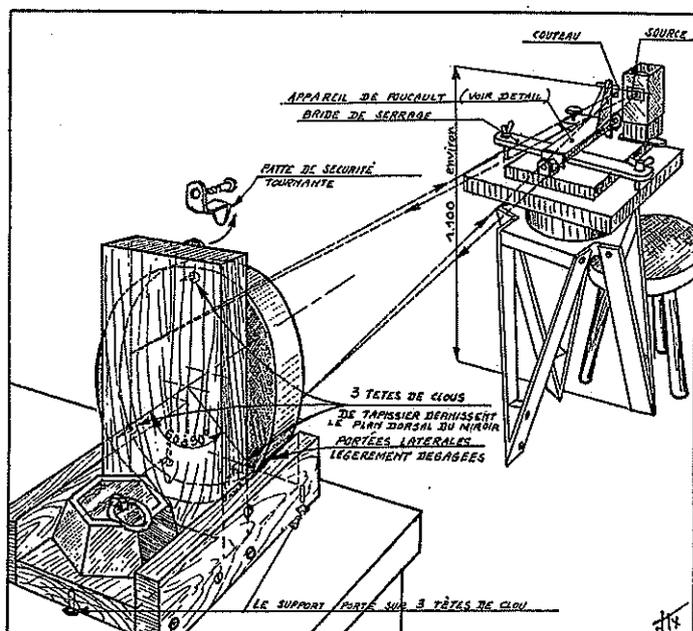


Fig. 36. — Disposition générale du contrôle d'un miroir.

incite au basculement contre l'appui dorsal, dont le plan est défini par les têtes de 3 clous incomplètement enfoncés. Le support lui-même doit porter en 3 points sur un bâti stable reposant directement sur le sol, si l'on opère à la cave à la campagne ; ou accroché dans un angle de mur si le local est à l'étage en ville. L'appareil de Foucault est placé sur un large trépied stable, de préférence réglable en hauteur, ce qui permet de faire tous les réglages très rapidement sans perdre des yeux l'image ni avoir à toucher au support du miroir.

**31. Pratique de l'essai de Foucault.** - La pièce où l'on opère doit être fermée et suffisamment isolée thermiquement pour éviter le plus possible les hétérogénéités optiques de l'air. Les caves sont souvent les meilleurs endroits sauf en hiver quand la chaleur dégagée par l'observateur et sa source produit des courants chauds refroidis au contact des murs. Cet endroit est un peu gênant aussi à cause de la différence importante de température avec la salle de polissage qui existe le plus souvent et nécessite un équilibrage thermique du miroir de plusieurs heures avant chaque essai. Si l'on opère à l'étage on choisira une pièce dont les murs ne sont pas directement exposés au soleil. Une obscurité relative est utile mais il est commode de laisser subsister un jour suffisant pour se diriger et voir le miroir, son support, etc. Aucun essai utile n'est possible si le miroir n'est pas en état d'équilibre thermique parfait avec l'air ambiant, la

On commence par dresser à peu près d'équerre le champ qui fournira l'arête, puis l'on fait un chanfrein à 30 ou 45° simplement à la lime, la pièce étant tenue dans un petit étau, en s'attachant le mieux possible à atteindre l'arête vive simultanément sur toute la longueur, bien entendu avec un métal aussi tendre et les maladresses inévitables, cette arête est dentelée ; pour la niveler exactement on présente la pièce perpendiculairement à un verre dépoli plan <sup>(1)</sup> (fig. 35) *sec et propre*, avec une pression de quelques centaines de grammes, on fait ainsi une dizaine de courses de va-et-vient transversalement à la longueur de la pièce. En quelques secondes on obtient une petite facette brillante qui ne doit pas présenter d'interruptions décelant des anfractuosités non atteintes (il suffit dans ce cas de faire quelques courses de plus).

Pour l'éclairage uniforme d'une telle source dans un angle suffisant une flamme bien stable de quelques millimètres de large, placée assez près de la fente convient bien ; les anciens opticiens employaient souvent une petite lampe à essence ou à pétrole, l'acétylène donne des résultats excellents grâce à sa température de flamme supérieure à 2200° mais il est infiniment plus pratique d'utiliser une ampoule électrique munie d'un diffuseur ; le verre opale est parfait mais diminue beaucoup la brillance ; il est suffisant en pratique de dépolir le côté de l'ampoule tourné vers la fente avec un peu d'émeri 5 minutes, et un petit morceau de plomb sommairement battu en forme de bassin du rayon de

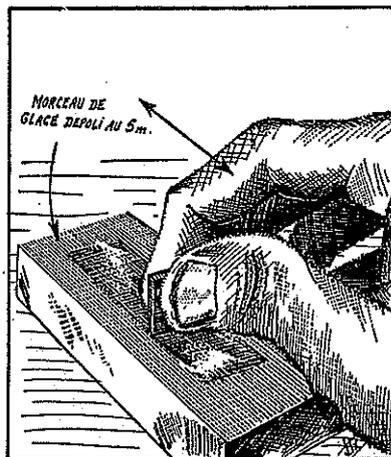


Fig. 35. – Dressage des lèvres de la fente et du couteau.

l'ampoule. Les lampes à bas voltage pour phare d'auto ou cinéma sont avantageuses à cause de l'encombrement réduit et de la meilleure utilisation possible du filament. Il est préférable de ne pas chercher à projeter l'image du filament directement sur la fente au moyen d'un système optique, l'expérience montre qu'il est très difficile d'obtenir de cette façon un éclairage bien uniforme dans un angle solide suffisant. Cette méthode donne cependant de bons résultats avec une source sans structure comme un arc à vapeur de mercure à haute pression dont la brillance élevée est précieuse pour les contrôles sévères d'accidents très petits mais qui n'intéresse pas directement l'amateur au premier degré. Notons enfin la possibilité de faire tourner la lanterne porte-source sur elle-même afin d'égaliser l'éclairage le mieux possible dans le faisceau utile.

*Stabilité des supports.* – Elle joue heureusement un rôle beaucoup moins grave qu'avec les méthodes de Michelson et de Zernike, cependant les observations sont beaucoup plus faciles et rigoureuses avec du matériel stable. Les supports de miroirs construits par les amateurs sont souvent défectueux et risquent d'infliger des déformations mécaniques aux pièces contrôlées, ici

<sup>(1)</sup> Un morceau de glace de Saint-Gobain frotté contre un autre avec interposition d'émeri 5 ou 10 m.

Un ressort tire le chariot longitudinalement sur le sixième et dernier point de contact qui est l'extrémité arrondie d'une vis « micrométrique » (un simple morceau de tige filetée ordinaire de 6/100) dont le tambour divisé en 100 (récupération sur un goniomètre d'artillerie) ou en 20 ou même en 10 (bande de papier collée autour) permet de mesurer les déplacements du chariot à 1/100 de millimètre près.

*La distance transversale du couteau à la source* doit être petite afin d'éviter le plus possible l'astigmatisme de montage (et diminuer la parallaxe si l'on destine plus tard l'appareil pour des contrôles par autocollimation). L'encombrement des ampoules usuelles ne permet pas ordinairement de descendre en dessous de 30 millimètres sans employer un petit prisme à réflexion totale, cet expédient n'est vraiment utile que si l'on a affaire à un miroir à très court rayon ( $R < 1$  m) ou très ouvert ( $f/D < 4$ ).

*Source, étoile artificielle* – La sensibilité optimum de la méthode de Foucault est obtenue avec des sources assez intenses dont la largeur est de l'ordre du diamètre de la tache de diffraction (cf. § 3) soit 8 à 10  $\mu$  avec les miroirs qui nous intéressent (au centre de courbure), il est assez remarquable qu'une source dix fois plus large soit encore très suffisante pour les contrôles courants. Très souvent on se contente d'un simple trou rond percé dans une feuille mince d'étain ou d'aluminium ~~au moyen d'une fine aiguille (on limite la pénétration de la pointe en plaçant la~~ feuille à percer contre une surface plane assez dure), on obtient couramment des trous d'une centaine de microns de diamètre, il n'est pas facile de percer un trou bien rond de moins de 50  $\mu$  et on risque de manquer de lumière avec une telle source, en outre en vision sténopéique, les défauts des milieux réfringents de l'œil sont gênants par les ombres mobiles qu'ils produisent. M. A. COUDER <sup>(1)</sup> a signalé l'intérêt d'employer une fente dont la largeur peut être réduite à la valeur optimum et la hauteur utile de 4 millimètres environ, ce qui permet de conserver assez de lumière et d'éliminer les inconvénients de la vision sténopéique. Nous donnons ici (fig. 34) un modèle de fente à largeur fixe que l'on peut régler si l'on veut à 5 ou 10  $\mu$  d'écartement avec un parallélisme meilleur que le micron simplement en appréciant le jour devant un diffuseur blanc bien éclairé. Une telle fente est trop fine pour les essais courants, des phénomènes de diffraction sur lesquels nous reviendrons risqueraient de gêner les débutants, à défaut d'une mesure directe au microscope on opérera le réglage devant un diffuseur blanc très peu éclairé de façon à obtenir une fente de 30 à 50  $\mu$  environ de largeur.

Tout ceci suppose que les lèvres de la fente sont rectilignes à une haute approximation, les idées les plus fausses régnant dans les esprits sur l'obtention de pièces mécaniques rectilignes à petite fraction de micron près, nous ne croyons pas inutile de décrire l'opération enfantine qui consiste à dresser les lèvres de la fente et l'arête du couteau. L'erreur la plus fréquente consiste à vouloir un dièdre très aigu, une véritable arête tranchante de rasoir ; au contraire c'est une petite facette qui peut avoir sans inconvénient 1/10 de millimètre de largeur que l'on peut obtenir facilement bien rectiligne. Malgré sa faible dureté, le laiton est préférable à l'acier ordinaire à cause de l'oxydation.

<sup>(1)</sup> A. COUDER, construction d'un miroir de 1m,20, B. A., t. VII (1931), p. 423 et *Lunettes et Télescopes*, p. 528.

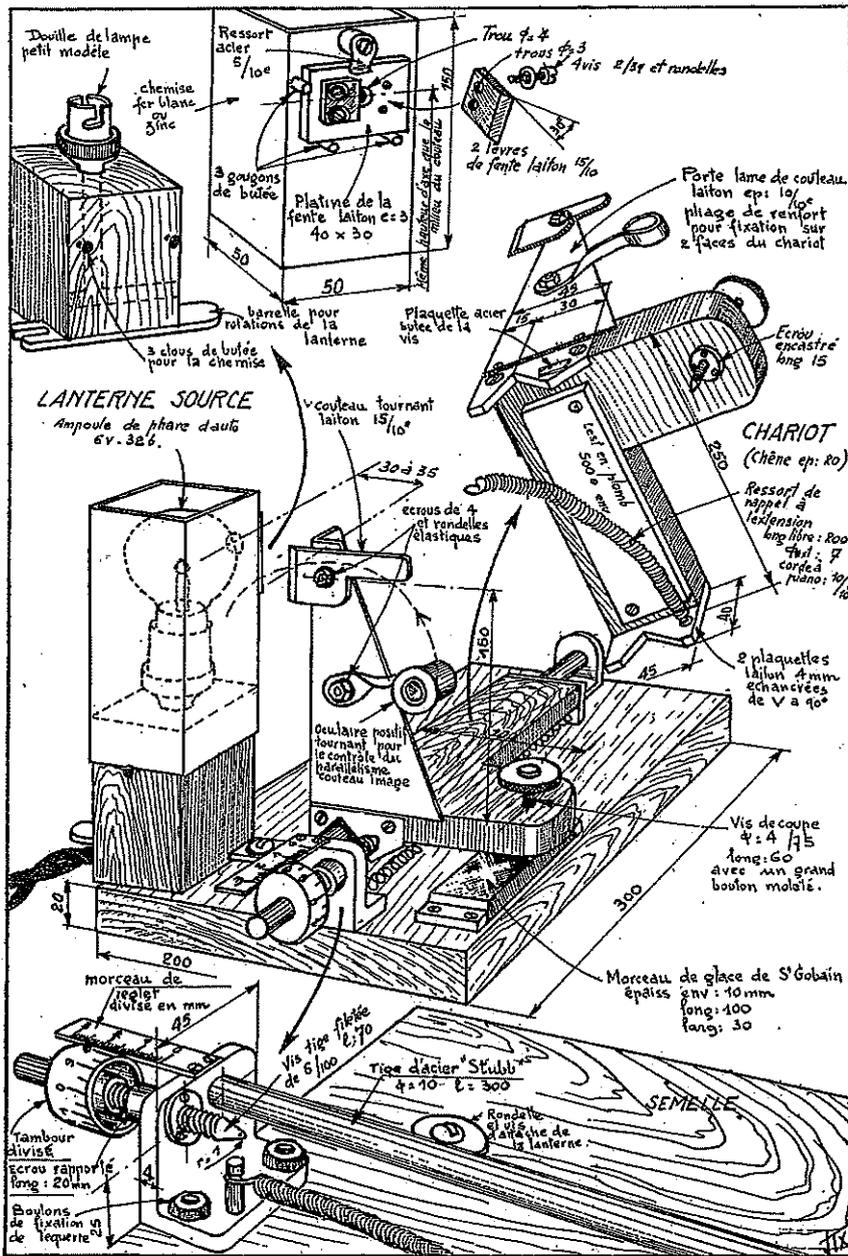


Fig. 34.- Détails de construction d'un appareil de Foucault.

plate. Il faut seulement faire une convention d'éclairage pour savoir si l'on a affaire à une bosse ou à un creux ; quand on examine un miroir on doit assimiler l'aspect observé à un modèle diffusant la lumière et éclairé très obliquement par une source située du côté opposé au couteau (c'est le contraire dans le cas d'un objectif). Avec notre convention les versants tournés vers la gauche sont éclairés ; ceux inclinés vers la droite sont dans l'ombre. Sur la figure 33 D c'est une bosse centrale et un bord rabattu qu'il faut voir ; sur la figure 32 A il y a un trou central, une petite zone saillante intermédiaire (partiellement masquée par un autre défaut plus grave) et un bord rabattu.

Il est clair que l'aspect des ombres change complètement avec la position longitudinale de coupe. Par exemple avec le miroir donnant les ombres de la figure 33 D, si l'on éloignait un peu le couteau du miroir de façon à se placer dans le plan de l'image fournie par les rayons centraux, c'est le milieu du miroir que l'on aurait vu en teinte plate et la couronne comme les versants intérieurs d'un cratère ou d'un entonnoir. Quand on retouche un miroir, il importe peu que l'on produise une surface ayant un rayon de courbure légèrement plus long ou plus court. On choisira évidemment l'aspect du défaut en grandeur et position dont la retouche est la plus facile. Ce n'est pas forcément pour ce tirage du couteau que le relief est le plus faible. Nous aurons l'occasion d'en donner des exemples.

**30. Détails de construction d'un appareil de Foucault.** – Bien qu'un montage rudimentaire improvisé avec des moyens de fortune soit susceptible de rendre d'importants services <sup>(1)</sup>, il est beaucoup plus commode pour le contrôle sérieux des paraboloides, de disposer d'un appareil possédant un couteau muni de mouvements lents dans le sens transversal et longitudinal.

La figure 34 représente un modèle qui dérive de celui que nous avons construit en 1946 pour l'atelier de la Commission des Instruments. Attirons spécialement l'attention sur les points suivants :

*Degrés de liberté du rouleau.* - Pour réaliser simplement, de façon très douce et sans jeu les 2 degrés de liberté du couteau, il faut recourir à une conception cinématique : le nombre de points de contact qui définit la position d'un corps par rapport à un autre étant de 6 (Maxwell), nous devons avoir dans le cas qui nous intéresse 4 points non réglables : ce sont (fig. 34) les contacts des 2 plaquettes en V du chariot portant sous l'effet du poids de la pièce contre la tige cylindrique en acier de la semelle. Le poids du chariot l'applique en outre contre un cinquième contact qui est la pointe d'une vis butant sur la glace plane disposée parallèlement à la tige d'acier sur la semelle. En manœuvrant cette vis on bascule tout le chariot légèrement et l'on fait pénétrer le couteau dans l'image de façon très douce, sans aucun jeu ni temps perdu, même avec une vis de décolletage absolument quelconque. En fait, le mouvement du couteau n'étant pas exactement rectiligne, l'intersection de l'image d'une fente ne se fait pas rigoureusement en même temps sur toute la hauteur ; mais le rayon choisi et les largeurs de sources usuelles cet effet est insensible.

<sup>(1)</sup> On trouvera un tel montage simplifié dans le Bulletin de la Société, *L'Astronomie*, t. 53 (1939), juillet, p. 315.

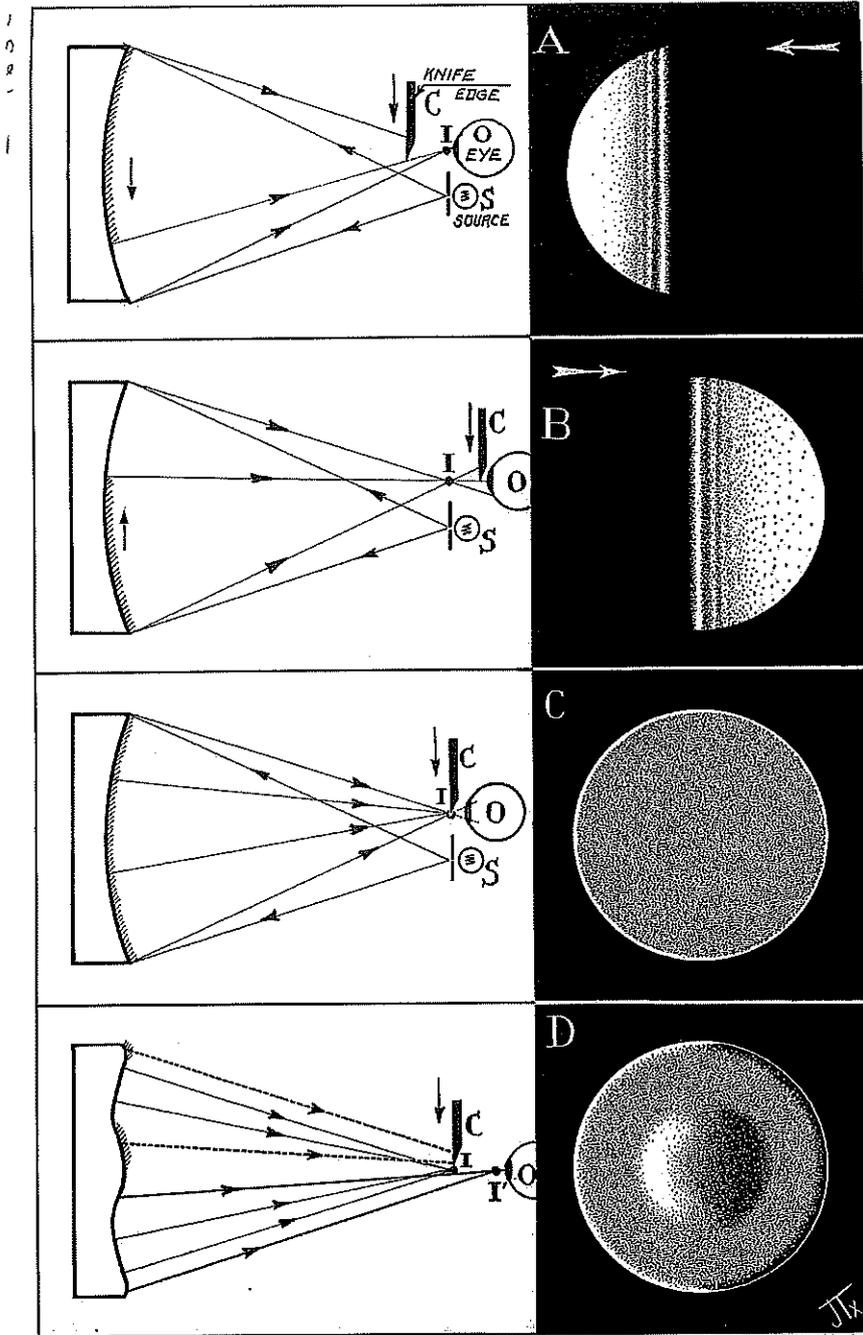


Fig. 33. - Explication géométrique de la méthode de Foucault

(fig.33), c'est-à-dire une source de lumière dont la dimension transversale soit très petite. Le miroir poli, mais non encore métallisé, réfléchit assez de lumière pour donner de S une image I suffisante pour faire le contrôle. Si la source coïncidait exactement avec le centre de courbure, l'image de retour serait confondue avec elle et inaccessible. Ecartons la un peu sur le côté : en vertu des lois fondamentales de la réflexion, l'image s'éloigne symétriquement par rapport à l'axe. Plaçons l'œil immédiatement derrière l'image : si le faisceau n'est pas trop ouvert comme c'est le cas avec les miroirs qui nous intéressent, on voit la surface du miroir entièrement et uniformément lumineuse. Maintenant faisons pénétrer dans le faisceau réfléchi et juste devant l'œil, un écran opaque rectiligne, à bord net ou couteau. Nous prendrons comme *convention générale* que la source a été écartée vers la gauche et que le couteau vient de la droite quand on fait face au miroir. Supposons d'abord que nous avons affaire à un miroir parfaitement sphérique : puisque la source au voisinage immédiat du centre de courbure, tous les rayons se croisent au même point I. Quand le couteau pénètre en avant de cette intersection (fig. 33A) on voit une ombre qui progresse devant la surface du miroir dans le *même sens* que lui ; au contraire, lorsque le couteau est en arrière (fig. 33 B) l'ombre subit des déplacements *inverses* et le bord gauche s'obscurcit le premier. Mais si le couteau arrive à l'intersection exacte I (fig. 33 C) comme tous les points de la surface du miroir contribuent également à la formation de cette image, on verra tout le miroir s'obscurcir uniformément en bloc et progressivement parce qu'en réalité la source a une largeur finie et que l'optique géométrique n'est qu'une approximation. On a ainsi un moyen très sensible pour placer le couteau longitudinalement dans le plan exact de l'image ; il suffit de comparer au cours d'une coupe la brillance du côté gauche et du côté droit du miroir. Si le bord droit est un peu plus sombre il faut éloigner légèrement le couteau ; il faut le rapprocher si c'est le bord gauche qui est le plus noir. On arrive rapidement à trouver une position d'extinction uniforme en «teinte plate» : le couteau est à l'intersection de tous les rayons.

Mais le plus souvent le miroir n'est pas parfaitement sphérique. Remarquons tout de suite qu'étant donné la façon dont le verre a été travaillé, les défauts engendrés sont toujours de *révolution* à une haute approximation (sauf les accidents élémentaires de mamelonnage dus à la structure de l'outil, ou anomalies très rares), c'est-à-dire qu'ils se présentent comme des zones en creux ou en relief concentriques au contour du verre. Sur la figure 33 D nous avons supposé que le couteau est dans le plan de l'image formée par une large couronne sphérique d'un miroir défectueux. Cette couronne apparaît donc en «teinte plate» ; mais par rapport à elle, il existe au bord et au centre du miroir des régions dont le rayon de courbure est un peu plus long, les rayons réfléchis en ces endroits ne convergent pas exactement au même point et ne peuvent donc pas être interceptés en même temps que les autres par le couteau ; ceux qui proviennent des «versants» tournés du côté du couteau sont évidemment arrêtés les premiers et corrélativement on voit les régions en question s'assombrir plus vite ; au contraire les versants inclinés dans la direction opposée restent éclairés les derniers. Bref l'aspect que l'on observe pour une pénétration moyenne du couteau est celui de la figure 33 D dont les ombres suggèrent le relief des défauts par rapport à la sphère de référence qui apparaît en teinte

interprétation claire et sûre. Il ne faut donc pas s'étonner que, malgré les volumes de théories publiés, la méthode n'ait pas enthousiasmé les praticiens ; elle rend cependant d'assez grands services pour le contrôle rapide du stigmatisme d'objectifs photographiques ou autres petites pièces courantes que l'on peut contrôler avec des réseaux très peu serrés et des sources larges.

Une dérivée étonnante et magnifique de la méthode de Foucault a été imaginée par F. Zernike <sup>(1)</sup> en refaisant la théorie de la méthode des ombres en tenant compte de la nature ondulatoire des rayons lumineux. Cette fois, au lieu d'un couteau opaque, on superpose à l'image de diffraction *une lame de phase* assez petite et d'épaisseur voulue pour produire un déphasage de  $90^\circ$  dans l'image centrale seule. Si le miroir possède des défauts capables de rejeter de la lumière hors de cette image et de former des spectres latéraux, il se produit alors une interférence partielle entre ces spectres et l'image centrale déphasée, qui traduit les variations de phase de l'onde par des variations d'intensité et de teintes très vives (fig. 32 C). Cette figure ne peut donner qu'une idée très incomplète de la méthode ; nous avons obtenu des photographies directes en couleurs que nous regrettons de ne pouvoir donner ici. La méthode est susceptible d'applications extrêmement importantes en microscopie. Pour le contrôle de l'optique astronomique son intérêt est plus limité. Son interprétation complète et sûre exigerait une connaissance très précise de la façon dont se produit le déphasage de  $\lambda / 2$  des rayons passant par un foyer.

Mentionnons enfin, bien qu'elle n'intéresse plus qu'indirectement l'amateur tailleur de miroirs, l'application du contraste de phase donnée par B. Lyot <sup>(2)</sup> pour l'étude des petits défauts de forme très peu élevés qui constituent le micromamelonnage (voir § 41 et fig. 32 D, 47, et 139).

La méthode comporte le déphasage et l'absorption simultanée de l'image centrale, mais cette fois la source est beaucoup plus large. Il n'est plus question d'étudier les défauts à longue période. La méthode est sélective, elle ne montre plus que les défauts qui peuvent envoyer de la lumière assez loin pour tomber hors de la lame de phase (fig. 32 D).

Toutes les méthodes qui comportent l'introduction dans le faisceau et près de l'image d'un obstacle complètement opaque ou non, sont réalisables avec des montages très voisins. Ainsi le réseau photographique à cinq traits au millimètre qui a servi à prendre la photo 32 B aurait permis l'application (dans des conditions d'ailleurs non optima) des quatre méthodes : Foucault normale avec un seul trait au foyer ; Ronchi (photo 32 B) ; Zernike en exploitant le déphasage produit dans un seul trait par la variation d'épaisseur et probablement d'indice de la gélatine dans la plage exposée ; enfin Lyot en élargissant la source. L'effet déphaseur des traits se reconnaît d'ailleurs sur la photo 32 B dans les ombres incomplètement opaques.

**29. Explication géométrique de la méthode de Foucault.** - Plaçons le miroir sur un support de manière que son axe optique soit horizontal et disposons au voisinage de son centre de courbure une « étoile artificielle » S

<sup>(1)</sup> F. ZERNIKE, *M. N. R. A. S.* (1934) ; *Physica*, 1 (1934), n°8, p. 689.

<sup>(2)</sup> B. LYOT, *C. R. Ac. S.*, t. 222 (1<sup>er</sup> avril 1946) p. 765-768 : Procédés permettant d'étudier les irrégularités d'une surface optique bien polie.

a été reprise et développée ultérieurement par V. Ronchi <sup>(1)</sup> et L. Lenouvel <sup>(2)</sup>. On interpose un réseau à traits opaques égaux aux vides, dans le faisceau et près de l'image. Si le faisceau est homocentrique, les ombres créées par ce

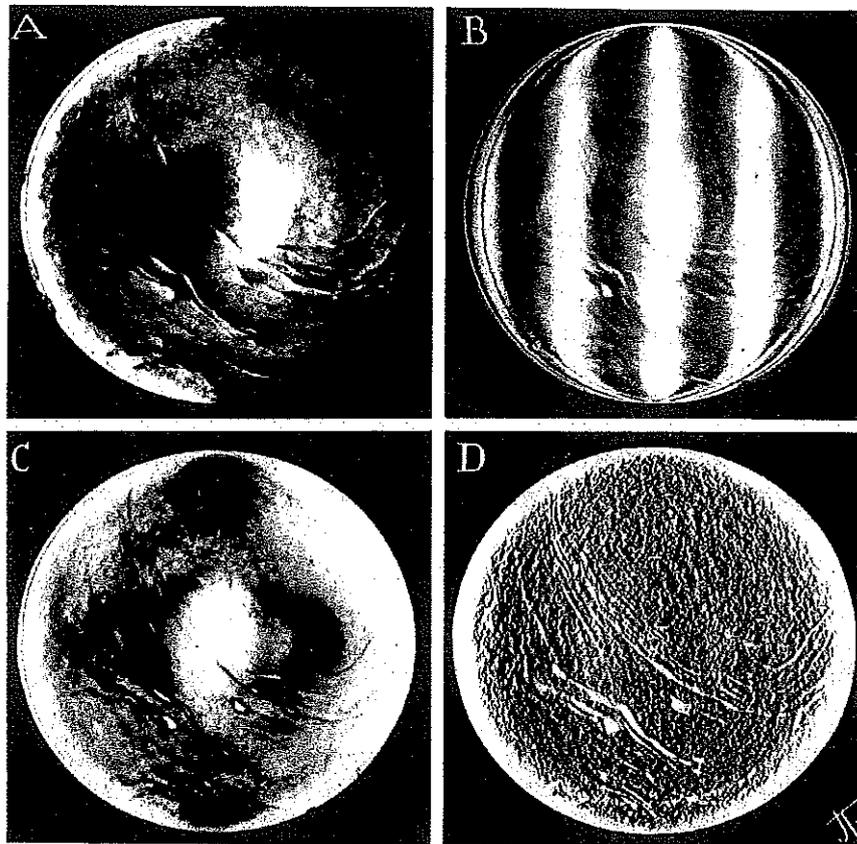


Fig. 32. – Application de quatre méthodes différentes au contrôle d'un petit miroir de 125 millimètres ( $R = 2\ 000$ ) présentant toutes sortes de défauts (polissage au H. C. F.).

*Défauts de grande amplitude* : Bord rabattu, astigmatisme, trou central de  $\lambda / 8$  ( $0\ \mu\ 035$  sur le verre).

*Défauts d'amplitude moyenne* : Mamelonnage de H. C. F. (profondeur moyenne sur le verre : 10 Angströms ou  $0\ \mu\ 01$ ) et veines de dureté inégale du verre.

*Défauts élémentaires* : Micromamelonnage (profondeur moyenne 40 Angströms).

A. *Méthode de Foucault*, fente  $10\ \mu$  couteau à droite.

B. *Méthode de Ronchi*, fente  $10\ \mu$ . Réseau 5 traits au millimètre (14 millimètres intrafocal).

C. *Méthode de Zernike*, fente  $10\ \mu$ , lame de phase : 166 m $\mu$  (0mm,4 intrafocal).

D. *Méthode de Lyot*, fente  $450\ \mu$ , lame de phase : semi aluminure densité 1,7.

Tous ces défauts réunis ne portent pas d'atteinte grave à la figure de diffraction normale et passeraient complètement inaperçus en observant une étoile au foyer.

couteau multiple sont rectilignes ; dans le cas contraire, les régions aberrantes sont visibles par des anomalies correspondantes (fig. 32 B). Malheureusement, à partir d'un petit nombre de traits au millimètre pour le réseau, les phénomènes d'interférence parasites sont inextricables et non susceptibles d'une

<sup>(1)</sup> VASCO RONCHI, *Annales de l'Ecole Normale Sup.de Pise*, vol. 15 ; *R. O.*, t. 5 (1926), p. 441 ; t. 7, 1928, p. 49 ; *La Prova dei Sistemi ottici* (Bologne).

<sup>(2)</sup> L. LENOUVEL, *R. O.*, t. 3 (1924), p. 211-243, 315-333 ; t. 7 (1928), p. 395.

pas songer à un comparateur à contact mécanique ou optique, si parfait soit il. Les calibres interférentiels, très employés dans l'industrie et sur lesquels nous reviendrons à propos du petit miroir plan, ne sont pas sérieusement utilisables non plus pour le contrôle d'un verre astronomique d'une vingtaine de centimètres ou plus de diamètre. Cette méthode constitue d'ailleurs un cercle vicieux.

Les méthodes optiques s'attaquant à la mesure des défauts sur l'onde sont déjà plus sérieuses. Un interféromètre de Michelson Twyman <sup>(1)</sup> assez grand pourrait rendre des services, mais il n'est évidemment pas question d'en envisager l'emploi ici (il coûterait plusieurs milliers de fois plus cher que notre miroir). La méthode de Michelson <sup>(2)</sup> au contraire ne comporte aucune pièce de référence coûteuse. On vérifie directement la sphéricité de l'onde au moyen

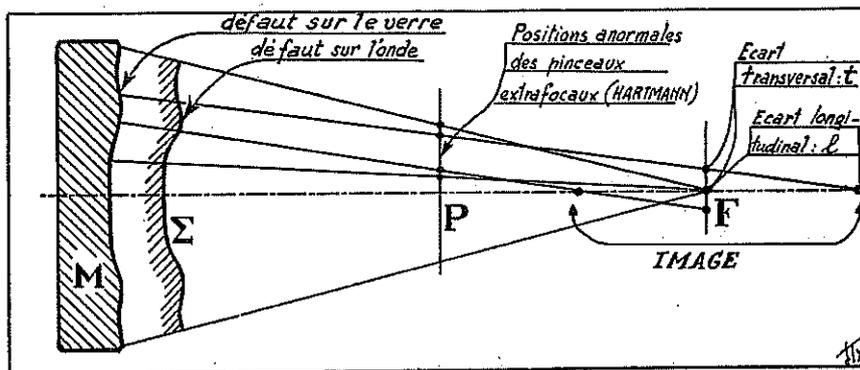


Fig. 31. – Principaux moyens d'accès à la mesure d'un défaut.

d'un écran percé de deux ouvertures dont l'une est fixe (au centre en principe) et l'autre explore la surface du miroir. Ces deux ouvertures relativement petites donnent une grosse tache de diffraction sillonnée de franges d'interférence (trous d'Young). Si le trajet optique ne change pas quand le trou mobile explore le miroir, la frange centrale de ce système reste fixe ; dans le cas contraire ses déplacements donnent immédiatement les déphasages. Mais les quantités à mesurer avec les défauts qui nous intéressent sont trop petites (de l'ordre du micron au plus) pour que l'on puisse espérer les atteindre avec une approximation suffisante (stabilité des supports et précision des pointés au microscope insuffisantes).

Léon et François Lenouvel ont indiqué <sup>(3)</sup> une méthode qui possède les avantages des mesures interférentielles directes sans en avoir les principaux inconvénients. Les interférences sont produites grâce à un duplicateur de Michelson ou un biréfringent de Wollaston associé à des nicols ; le duplicateur placé au voisinage immédiat de l'image est de petites dimensions, mais malgré tout reste une pièce coûteuse et peu courante pour un amateur.

Ce sont donc les méthodes de contrôle sur les images qui sont les plus

<sup>(1)</sup> TWYMAN, *Phil. Mag.*, 6<sup>e</sup> série, t. 35, janv. 1918, p. 49.

<sup>(2)</sup> MICHELSON, *Astroph. J.*, t. 47, p. 283. Correction of optical surfaces.

<sup>(3)</sup> LEON et FRANCOIS LENOUEVEL, Etude des faisceaux convergents. *R. O.*, t. 17, 1938.

importantes en pratique. L'observation directe des figures de diffraction focale et extrafocales est connue sans doute depuis que l'on utilise des instruments. Développée et décrite en détails dans une brochure éditée par la Maison Cooke <sup>(1)</sup>, elle rend les plus grands services à l'observateur, mais son intérêt reste limité pour l'opticien parce qu'elle ne donne pas d'indication facile à interpréter sur l'emplacement et la grandeur des défauts.

La méthode de Hartmann <sup>(2)</sup> permet de déterminer les positions longitudinales d'intersection de pinceaux lumineux, isolés par un écran placé devant le miroir, et disposés symétriquement par rapport à l'axe, grâce à deux photographies extrafocales que l'on peut mesurer ensuite avec une grande précision. La méthode fournit des indications très sûres et impersonnelles, mais on n'y a recours que pour le contrôle final d'une grosse pièce. Les amateurs avancés qui abordent le contrôle d'un miroir de 50 centimètres auront avantage à étudier un magnifique exemple d'application de cette méthode au contrôle du miroir de 81 centimètres de l'Observatoire de Haute-Provence, donné dans *Lunettes et Télescopes* <sup>(3)</sup>. C'est à Léon Foucault <sup>(4)</sup> que l'on doit les méthodes de contrôle les plus utiles pour l'opticien et dont dérivent presque toutes les autres méthodes sur les images. La méthode de la lame de couteau ou des ombres est la plus merveilleuse de toutes par sa sensibilité et sa simplicité. Nous allons nous en occuper en détail. Disons seulement pour l'instant qu'un simple écran opaque à bord net interceptant le faisceau au voisinage immédiat de l'image, traduit les écarts transversaux (pour un œil placé derrière) des rayons aberrants par des ombres sur le miroir qui suggèrent à l'observateur une saisissante vision en relief du défaut tel qu'on pourrait le voir sous un éclairage rasant si sa hauteur était amplifiée environ un million de fois ! (fig. 32 A). La densité de l'ombre est liée à la pente que fait la surface d'onde réelle avec la surface d'onde sphérique idéale qui aurait son centre dans le plan de coupe du couteau. Si l'on veut coter la hauteur des défauts il faut donc relever toutes les pentes et les mettre bout à bout, autrement dit, procéder à une intégration ; mais avec un petit miroir, cette opération n'est utile que tout à fait à la fin pour s'assurer que les défauts résiduels sont bien inférieurs à la limite nuisible. En réalité, au cours du travail, avec un peu d'habitude, un simple coup d'œil sur les ombres fournit à l'opticien *précisément* les renseignements dont il a le plus besoin pour faire une bonne retouche, tandis que l'énoncé brutal du nombre de millimicrons à enlever à tel endroit n'aurait qu'une valeur pratique à peu près nulle. Il ne permettrait en effet ni de choisir l'outil convenable, ni de déterminer le temps d'action et les courses à adopter. Il n'est pas inutile d'insister sur ce point, car la plupart des jugements que l'on peut lire sur les méthodes de contrôle sont portés par des théoriciens qui n'ont jamais taillé un seul miroir de leurs propres mains.

La méthode du réseau extrafocal due également à L. Foucault (*loc. cit.*)

<sup>(1)</sup> « On the adjustment and testing of telescopic objectives », reproduite dans *L'Astronomie*, 1905, pp. 408, 500 à 510, 542 à 556, 1906, p. 44.

<sup>(2)</sup> HARTMANN, *Objektivuntersuchungen. Zeitf. Inst.*, t. 24 (1904), pp. 1-21, 32-47, 97-117.

<sup>(3)</sup> *Lunettes et Télescopes*, par A. DANJON et A. COUDER. § 115.

<sup>(4)</sup> L. FOUCAULT, Description et procédés employés pour reconnaître la configuration des surfaces optiques. *C. R. Ac. S.*, t. XLVII, p. 958 et *Ann. Obs. Imp. De Paris*, t. V, 1859. Une réédition plus accessible est contenue dans le tome II des *Classiques de la Science* (Armand Colin).

que la parabolisation soit inutile (cf. § 8). Si les principes énoncés plus haut ont été bien compris et effectivement suivis, il pourra, *à la rigueur*, se passer de tout contrôle dans l'espoir d'obtenir d'emblée un miroir sphérique utilisable. Il ne faut cependant pas se faire d'illusion, une bonne sphère ne peut résulter que de contrôles et de soins équivalents à ceux demandés pour un paraboloïde. Un miroir non contrôlé ni retouché n'est donc presque jamais dans les limites de la tolérance de Rayleigh, même si ses caractéristiques sont celles du tableau de la page 16. Tout ce que l'on peut espérer c'est quelques observations d'initiation astronomique, suffisantes peut-être pour confirmer une vocation.

Le cas de l'amateur désireux d'obtenir un miroir irréprochable est beaucoup plus intéressant. Il ne faut pas compter obtenir automatiquement avec une certitude suffisante un paraboloïde de 20 centimètres à  $f/D = 6$ , les contrôles optiques et les retouches sont indispensables. Nous n'en avons pas encore parlé parce qu'il n'est pas désirable pour un novice de «foucaulter» son miroir avant que le polissage ne soit à peu près terminé. En effet, s'il constate que la forme obtenue est bonne, il n'ose pas continuer le travail et se contente d'un miroir très gris, ou bien s'il observe un défaut, il tente une retouche prématurée généralement malheureuse, suivie d'autres encore plus désastreuses. A partir de ce moment-là, il est perdu ; son miroir ne sera jamais bien poli, ni de forme réellement satisfaisante, tandis qu'un travail régulier, assez prolongé pour rendre l'outil impeccable, aurait *tout nivelé automatiquement* en une forme facile à paraboliser avec une grande sûreté. Nous gardons personnellement un souvenir cuisant de notre tout premier miroir, un 250 millimètres à  $f/D = 7$  que nous n'obtinmes au quart d'onde sur 220 millimètres qu'au prix de quatre-vingts retouches portant sur vingt jours de travail au total ; on trouve dans la correspondance du secrétariat de la Commission des exemples de collègues parlant de deux cents heures de mise en forme pour un 16 centimètres ! Nous voudrions éviter à nos collègues une telle épreuve d'endurance ; en réalité, si l'on exploite correctement les principes donnés plus haut, *un miroir poli est à peu près terminé*. On ne saurait attacher trop de prix à l'obtention d'emblée d'une forme très régulière.

**27. Généralités sur les moyens de contrôle.** - Un défaut matériel sur le verre, les anomalies correspondantes sur l'onde et sur l'image, sont des aspects différents de la même réalité physique et la mesure de l'un d'eux permet de calculer tous les autres ; mais il s'en faut de beaucoup que leurs dimensions soient du même ordre. Alors que les défauts matériels du verre ou de l'onde s'expriment couramment en *centièmes de micron* ou en millimicrons, les écarts résultants sur l'image se chiffrent en *microns entiers* dans le sens transversal et en *millimètres* dans le sens longitudinal (fig. 31).

Il est clair que l'on aura beaucoup plus de facilités pour déterminer le défaut avec une bonne précision relative si l'on s'attaque à la mesure de son aspect le plus accessible. Cette remarque va nous permettre de choisir facilement la méthode la plus sûre (particulièrement pour l'amateur dépourvu de pièces de référence).

**28. Revue rapide des principales méthodes de contrôle.** - Les méthodes par mesures directes sur le verre seront rapidement éliminées il ne faut évidemment

s'il faut continuer le travail miroir en dessus ou en dessous. Il est *normal* pour une surface astronomique de 20 centimètres de passer une quinzaine d'heures pour obtenir un poli apparemment complet de cette façon ; ceci représente au moins trois jours entiers de travail <sup>(1)</sup> à cause des pertes de temps en pressages rognages, etc. A défaut de journées entières ou de demi-journée, éviter de se mettre en route pour polir moins d'une heure à la fois.

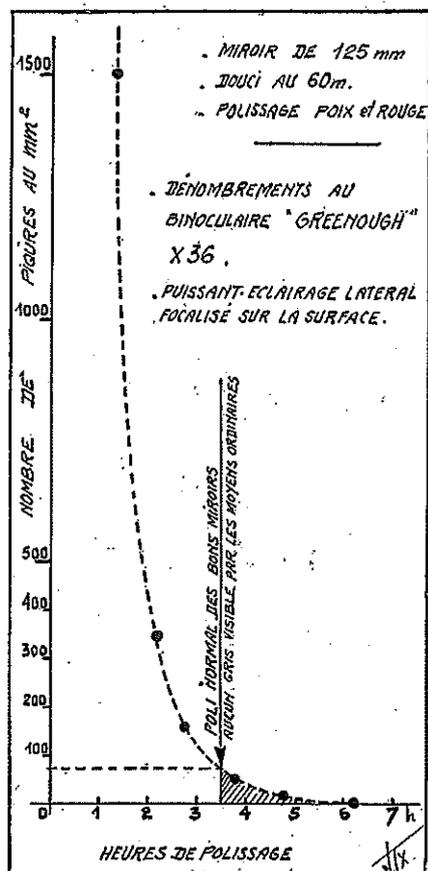


Fig. 30. — Progrès du polissage en fonction du temps.

le monde s'en accomode fort bien ; d'un autre côté ceux qui parlent du gris avec sévérité feraient bien de commencer par enlever soigneusement la poussière sur leurs objectifs.

## 26. Fin du polissage. - Nous devons maintenant distinguer deux cas :

D'abord celui de l'amateur modeste voulant simplifier l'entreprise le plus possible et se contenter d'un miroir de 150 millimètres à foyer assez long pour

<sup>(1)</sup> A la suite de certains « exploits » d'opérateurs capables de tailler un miroir de 160 en six heures, beaucoup d'amateurs mettent un point d'honneur à polir comme des fous ; signalons aux plus enragés que les machines américaines modernes (utilisant la Barnésite) polissent un bloc de 180 millimètres de diamètre en une à trois minutes, l'optique astronomique c'est autre chose.

Quand le douci du miroir n'a pas été bien réussi pour une raison ou pour une autre, un travail de trente heures ou même bien davantage ne suffit pas pour éliminer totalement le « gris » un peu particulier qui subsiste alors et qui est constitué par des piqûres assez grosses, mais très clairsemées, que l'on peut considérer comme impolissables. Le débutant, à qui cette mésaventure arrivera probablement, ne doit pas se désoler pour cela : un peu de gris, des filandres ou même de véritables rayures si elles ne sont pas trop grosses ou trop nombreuses, ne portent pratiquement pas atteinte à la figure de diffraction ; il faut en effet considérer la quantité de lumière que ces défauts diffractent et qui est négligeable devant l'énergie totale, sauf dans les cas très particuliers (couronne solaire, occultation d'étoiles très faibles par un astre brillant, compagnon de Sirius). Nous rappellerons aux étourdis que les quatre lames d'acier qui supportent le miroir secondaire jouent exactement le même rôle que quatre énormes rayures sur le miroir, cependant tout