

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 μ 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 μ 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 ⁽¹⁾ 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 μ 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 μ 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.

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

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 ⁽¹⁾ (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

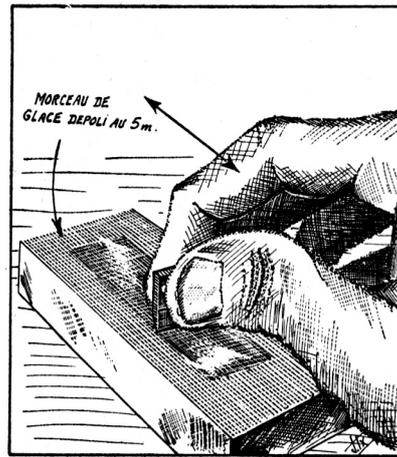


Fig. 35. – Dressage des lèvres de la fente et du couteau.

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

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

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

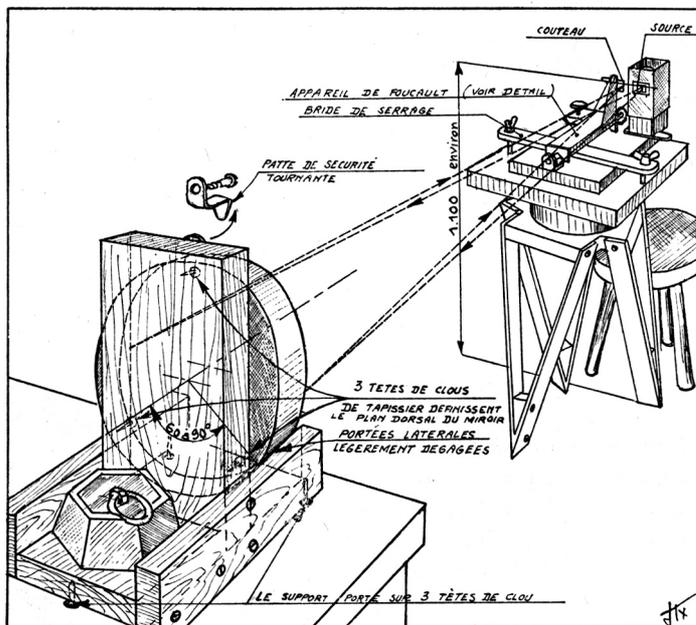


Fig. 36. – Disposition générale du contrôle d'un miroir.

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

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 ⁽¹⁾ d'abord le brillant anneau de diffraction visible autour du miroir même quand le couteau arrive à recouvrir entièrement

⁽¹⁾ RAYLEGH, *Phil. Mag.* 33 (1917), p. 161.

l'image, cet anneau gêne l'appréciation exacte des défauts du bord extrême. BANERJI ⁽¹⁾ a tenté d'exploiter ce phénomène. Plus récemment une théorie complète de l'essai de FOUCAULT a été travaillée par GASCOIGNE ⁽²⁾ et par LINFOOT ⁽³⁾ ; la conclusion pratique de ces travaux ne comporte de correctif sérieux à l'interprétation géométrique que si l'on a affaire à des grosses aberrations de l'ordre d'une frange, qu'il est d'ailleurs facile d'étudier avec des sources assez larges pour que la diffraction ne soit pas gênante. Nous avons déjà vu le parti que F. ZERNIKE (§ 28) avait su tirer de sa théorie ondulatoire de l'essai de FOUCAULT, sa nouvelle méthode s'applique surtout aux petits défauts élémentaires plus ou moins périodiques dus à la structure de l'outil.

En 1931, A. COUDER ⁽⁴⁾ a signalé les sortes de franges d'ombre de

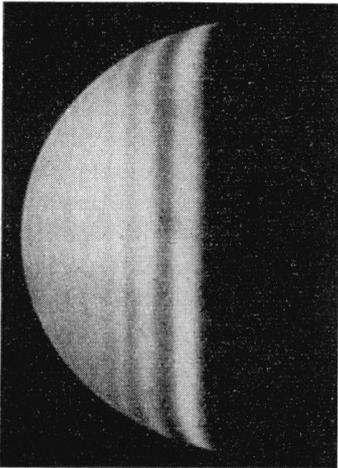


Fig. 37. — Franges d'ombre intrafocales d'un miroir sphérique ayant un bord rabattu de $1/3$ d'onde (fente 5μ).

FRESNEL, dont l'ombre du couteau est bordée en position nettement extrafocale et qui subsistent même à l'intersection si le faisceau n'est pas stigmatique. Ce phénomène ne s'observe qu'avec une fente assez fine et son intérêt pratique est assez grand : tout d'abord il permet de régler la largeur de la fente à une valeur correcte et de mettre le couteau exactement parallèle à l'image ; avec les faisceaux qui nous intéressent d'ouverture $f/12$ à $f/16$ on voit deux ou trois franges d'ombre (fig. 37) bordant l'ombre géométrique pour une position extrafocale du couteau de 20 millimètres environ quand la fente a la largeur recommandée de 30 à 50 μ . Avec une source monochromatique et une fente de 3 μ on peut observer et photographier des franges sur toute la moitié de la surface non recouverte par l'ombre.

A. COUDER a montré aussi la possibilité d'exploiter ce phénomène pour l'appréciation immédiate des écarts de tautochronisme sans aucun calcul, en effet quand le faisceau est stigmatique, les franges sont rectilignes, si le couteau en position intrafocale recouvre plus de la moitié du faisceau ; dans le cas contraire, leur forme permet d'apprécier la grandeur de l'écart : on utilise pour cela la première frange, qui est la plus visible et dont la distance à l'ombre (environ trois quarts d'onde) sert d'échelle.

A titre d'exemple nous donnons la photographie des franges obtenues avec un miroir ayant un bord rabattu que l'on n'aurait pas apprécié aussi exactement au centre de courbure à cause de l'anneau de RAYLEIGH signalé plus haut.

Quand on étudie une surface ayant un défaut notable dans les conditions de l'examen, par exemple un paraboloïde assez ouvert au centre de courbure, les franges d'ombre persistent plus ou moins nettement pour toutes les positions

⁽¹⁾ BANERJI SUDHANSUKUMAR. *Asph. J.*, t. 48 (1918), p. 50.

⁽²⁾ GASCOIGNE, *M. N. R. A. S.*, 104 (1944), p. 326.

⁽³⁾ LINFOOT. *Proc. R. A. S.*, t. 186 (1946), p. 72 ; t. 193 (1948), p. 248.

⁽⁴⁾ A. COUDER, *Bull. Ast.*, t. VIII (1931), p. 423. Construction d'un miroir de 1m,20 et aussi *Lunettes et Télescopes*, p. 529.

du couteau mais si l'on s'en tient à une source de 30 à 50 μ on ne sera jamais sérieusement gêné et la mobilité des franges empêchera de les confondre avec les changements de teinte d'un versant au cours d'une coupe.

33. Sensibilité limite de l'essai de Foucault. - Si l'on a affaire à une surface dont les défauts dans les conditions de l'examen sont très faibles, les phénomènes de diffraction ne sont pas gênants sauf au bord extrême et l'appréciation des accidents est limitée par la valeur du plus petit contraste perceptible. Si la source ne mesure que 10 μ de large un écart transversal de 0,5 est traduit par une variation de teinte très visible, il correspond sur l'onde avec un miroir de 3 mètres de rayon de courbure à une pente de $\frac{1}{6 \cdot 10^6}$, pour parler de la hauteur il est donc nécessaire

de fixer la dimension transversale de région aberrante, s'il s'agit d'un défaut de grande amplitude, par exemple une large zone de 60 millimètres de largeur de pente, la hauteur atteindra $\frac{1}{10^5}$ millimètre soit 1/60 d'onde ; mais si le défaut est

peu étendu, la hauteur de l'accident sera extraordinairement petite, nous avons pu photographier des accidents de moins de 1 millimètre de largeur sur le verre dont la pente (déduite de considérations seulement géométriques) était de $1 \cdot 10^{-6}$ la hauteur correspondante de 10 Å (soit 1/600 d'onde) était confirmée par une mesure des mêmes accidents au moyen d'une méthode par contraste de phase (méthode de Lyot).

34. Principe du contrôle des miroirs paraboliques. - Le contrôle des paraboloides dans les conditions mêmes de l'emploi comporterait de sérieuses difficultés puisqu'il faudrait éloigner considérablement la source (§ 8) à moins d'avoir recours à un plan étalon à auto collimations ou à un collimateur parfait de même diamètre que le miroir, solutions auxquelles les professionnels eux-mêmes ont rarement recours. On opère donc au centre de courbure, comme nous savons le faire, et nous savons aussi que dans ces conditions seul un miroir sphérique donnera une image parfaite ; avec le paraboloides il apparaît un défaut marqué, inverse de celui présenté par le sphérique au foyer et qui est une forme de *l'aberration de sphéricité*. On peut prévoir à l'avance la grandeur de ce défaut que l'on chiffrera par exemple dans le sens longitudinal où sa mesure est la plus facile (§ 27), il suffira dès lors de retrancher cette valeur de l'aberration réelle, observée avec le miroir étudié pour obtenir des résidus qui sont les défauts propres au miroir et qu'un calcul simple réduira au plan focal, afin de pouvoir apprécier directement leur degré de gravité par rapport à la figure de diffraction parfaite (§ 3).

35. Définitions relatives à l'aberration de sphéricité. - Considérons par exemple un miroir parabolique (fig. 38) donnant une image d'un point lumineux fixe placé en son centre de courbure. Cette image n'est pas un point parce que les intersections des rayons émergents de zones de plus en plus hautes sur le miroir se font à des distances de plus en plus grandes du miroir.

L'énergie lumineuse est répartie principalement selon les intersections des rayons voisins qui dessinent de proche en proche une enveloppe que l'on appelle *surface caustique*, de révolution autour de l'axe optique et dont la forme est

un peu celle d'un pavillon de trompette, sa section est visible figure 38 où les hauteurs d'incidence sont très exagérées pour la clarté. La surface caustique comporte en outre un petit segment de droite lumineuse confondu avec l'axe optique qui résulte en quelque sorte, si l'on peut s'exprimer ainsi, de l'empilage des images données sur l'axe par les zones de rayons croissants.

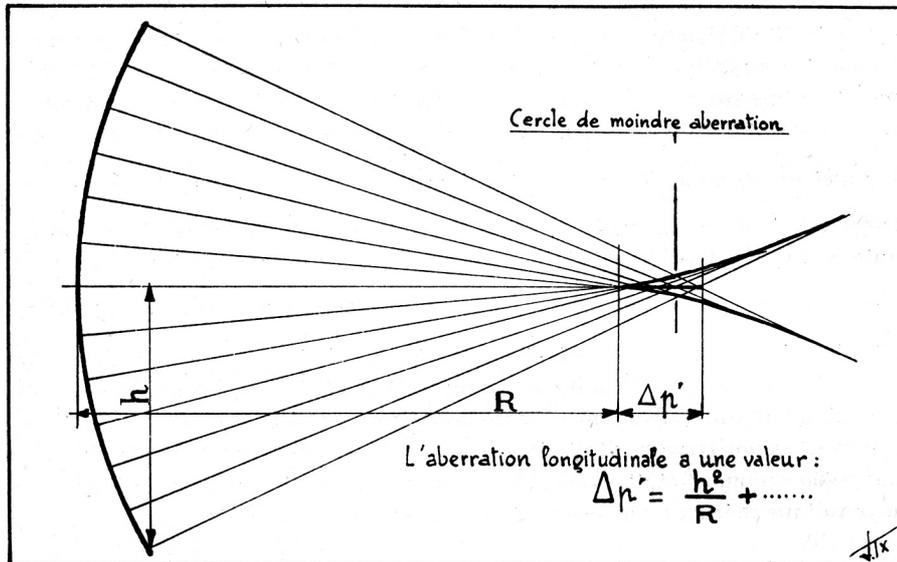


Fig. 38. – Aberration d'un miroir parabolique à son centre de courbure.

Ce segment est particulièrement intéressant à considérer, sa longueur $\Delta p'$ ⁽¹⁾ mesure l'aberration longitudinale et se calcule aisément par la relation suivante :

$$\Delta p' = \frac{h^2}{R}$$

L'aberration longitudinale d'une zone de rayon h est égale au carré de cette hauteur d'incidence par le rayon de courbure R du miroir.

Mais le parabolôïde n'est qu'un cas particulier parmi les surfaces déformées que l'on rencontre (involontairement), quand on taille un miroir ; on introduit souvent un coefficient de déformation b dans la formule qui se généralise en :

$$\Delta p' = b \frac{h^2}{R} + \frac{h^4}{2R^3} ,$$

b vaut -1 dans le cas de la parabole (le signe moins indique seulement que l'intersection des rayons marginaux se fait plus loin du miroir que celle des rayons centraux) ; il est plus petit que -1 si la surface est hyperbolique ; compris entre -1 et 0 si sa méridienne est une ellipse tournant sur son grand

⁽¹⁾ Nous adoptons pour tout ce qui concerne les mesures, les notations de *Lunettes et Télescopes* de MM. A. DANJON et A. COUDER. Ceci afin de faciliter le passage aux chapitres de ce livre où cette question est exposée de façon plus mathématique.

axe et compris entre 0 et +1 si elle est de révolution par rapport au petit axe de l'ellipse (fig. 39) ; dans ce dernier cas, le rayon de courbure des rayons marginaux est plus petit cette fois que celui des rayons centraux, on dit que l'aberration est du genre *sous correction*, la trompette a sa partie pointue tournée à l'extérieur, tandis que pour toutes les surfaces à coefficient de déformation négatif (fig. 38) elle est tournée vers le miroir : il y a *surcorrection*.

Notons aussi que parmi les sections transversales de la caustique il en est une dont le diamètre est minimum : *c'est le cercle de moindre aberration* (fig. 38) qui se trouve à une distance égale aux trois quarts du segment d'aberration longitudinale à partir de l'intersection des rayons centraux.

36. Description de l'aberration de sphéricité.

- Pour l'ingénieur opticien l'aberration de sphéricité représente surtout un développement en série des puissances impaires de h , l'observateur et le tailleur de miroirs doivent être familiers avec des aspects plus concrets de la réalité physique qui est en fait une composition de la géométrie et de la diffraction. L'observateur a fréquemment affaire à l'aberration de sphéricité sur le ciel, par exemple, s'il y a de la surcorrection régulière et qu'il observe une étoile assez brillante avec un oculaire assez fort, il voit les apparences suivantes : au

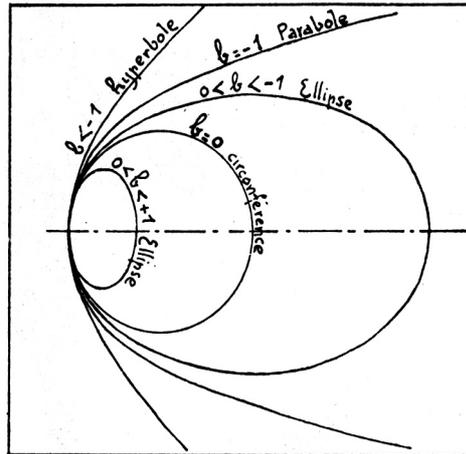


Fig. 39. – Signification du coefficient de déformation b

foyer des rayons centraux (fig. 40 A, dans le petit carré), la figure de diffraction presque normale au centre est entourée d'anneaux anormalement brillants et nombreux, ceux du bord se fondant le plus souvent en une large et pâle auréole si l'image est agitée ou la source non ponctuelle ; en éloignant l'oculaire, l'auréole diminue de diamètre, l'énergie se concentre sur l'anneau extérieur (fig. 40 B) qui continue de décroître jusqu'au moment où l'on est au cercle de moindre aberration, dans ce plan l'image est d'ailleurs très mauvaise, presque toute la lumière est dans l'anneau section de la caustique, le segment axial n'en représente qu'une faible fraction ; en éloignant encore un peu l'oculaire de façon à viser l'intersection des rayons marginaux (fig. 40 C) il subsiste encore grâce à eux un peu de lumière sur l'axe, mais les anneaux extérieurs sont prépondérants et bien nets, ce sont les franges de caustique. Cette succession d'aspects est bien entendu inverse si l'aberration est du genre sous correction.

Voyons maintenant le plus intéressant pour le tailleur de miroirs : l'aspect des ombres par la méthode de Foucault. Notre couteau vient toujours de la droite et coupe d'abord la pointe de la caustique : le centre du miroir apparaît en teinte plate (fig. 40 A), les rayons venant du côté droit du miroir sont interceptés par le couteau et les régions correspondantes sont vues assombries, par contre le côté gauche est éclairé, l'ensemble donne l'impression d'une bosse puissante (n'oublions pas que la lumière vient du côté opposé au couteau),

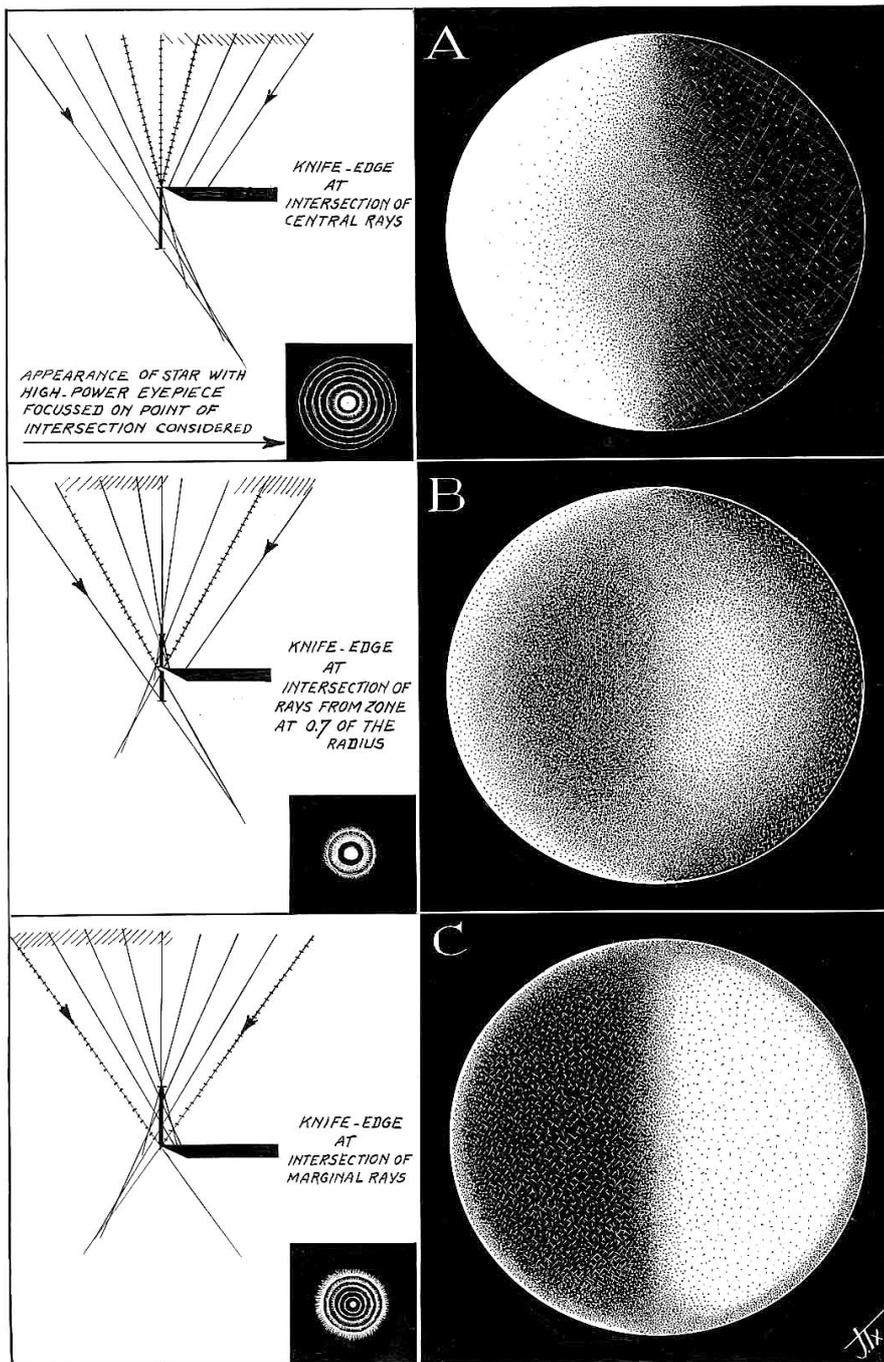


Fig. 40. – Surcorrection sphérique.

légèrement aplatie au centre. Eloignons un peu le couteau : quand il coupe le segment d'aberration longitudinale à la moitié de sa longueur (fig. 40 B) on se trouve à l'intersection des rayons émanant de la zone de rayon $\frac{\sqrt{2}}{2}=0,707$ (le rayon du miroir étant 1), cette zone est donc vue en teinte plate et par rapport à elle les régions centrales de rayons plus courts ont donc leurs versants tournés vers l'intérieur, donnant l'impression d'un creux, au contraire les zones marginales ont un rayon plus long, leurs versants sont tournés de l'autre côté, l'ensemble suggère un anneau torique en relief avec raccordements en pente douce, il doit être familier à l'opticien. Eloignons-nous toujours, la zone « neutre » arrive à atteindre le bord même du miroir (fig. 40 C), toutes les autres zones ont un rayon de courbure plus court et apparaissent comme les parois d'une profonde cuvette.

Toutes les surfaces déformées suivant une loi de cette nature donnent des aspects semblables mais plus ou moins accusés quelle que soit la valeur négative du coefficient de déformation (ellipses, parabole, hyperboles) et positive aussi à condition de retourner la figure en conservant la convention d'éclairage (l'aspect moyen est une bosse avec les bord relevés). La sensibilité de l'appareil de Foucault employé, l'ouverture relative du miroir, la grandeur de son rayon de courbure sont autant de facteurs qui influent également sur le contraste des ombres. Pour fixer les idées disons que les aspects de la figure 40 s'observent avec un miroir parabolique standard de 200 millimètres à $f/D = 6$ et l'appareil décrit § 30 muni d'une fente normale d'une trentaine de microns de largeur.

La figure 41 est un foucaultgramme sensible du premier miroir de 200 à $f/6$ taillé à l'atelier de la Commission S.A.F. Le couteau est dans le plan du centre de courbure de la zone 0,707 ; l'on distingue une faible zone de quelques centièmes de frange dans la moitié centrale éclairée ainsi qu'un faible mamelonnage primaire de l'ordre de $\lambda/50$.

Si le miroir a une ouverture relative plus grande (ou s'il est hyperbolique) les ombres sont plus accusées, la limite de demi-teinte entre les noirs et les blancs se rétrécit ; au contraire avec un miroir à $f/D = 10$ (ou un miroir normal elliptique) les ombres sont très faibles et le relief très adouci. Il est clair que pour être fixé sur la correction du miroir des mesures quantitatives sont *indispensables*, nous devons mettre spécialement en garde les amateurs contre les nombreux charlatans ⁽¹⁾ qui n'ont rien compris aux ombres et proposent des méthodes « simplifiées » n'ayant aucune valeur.

37. Mesure de l'aberration de sphéricité. - C'est Léon FOUCAULT lui-même qui a décrit le premier, les « solides différentiels » dessinés figure 40 et qui s'en est servi pour mesurer l'aberration longitudinale ⁽²⁾ : On cherche expérimentalement

⁽¹⁾ L'un d'eux qui qualifie modestement « sa » méthode (mal recopiée sur celle d'Everest de « simple, élémentaire, scientifique, élégante et suffisante en première approximation », propose de vérifier seulement que la différence de tirage qui permet de passer de l'aspect A à l'aspect B est égale à celle qui peut passer de B à C, mais cette particularité est vraie pour toutes les surfaces déformées en $\Delta p' = b \frac{h^2}{R}$ quelle que soit la valeur du coefficient b (ellipses, parabole, hyperboles), la « méthode » est donc complètement insuffisante.

⁽²⁾ *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 70, 1870, 21 février, pp. 389-392.

la position longitudinale du couteau qui donne l'aspect A et l'on note le tirage à partir d'un zéro arbitraire de la coulisse (si l'appareil n'est pas divisé on trace un trait repère sur un bristol), on recherche de même la position plus éloignée du miroir où s'observe l'aspect C, la différence des lectures (ou la distance des 2 repères sur le bristol) donne la longueur du segment $\Delta p'$ qu'il suffit de comparer à la valeur théorique pour savoir si le miroir est plus ou moins déformé que la parabole ; par exemple avec un miroir de 20 centimètres à $f/D = 8$ on a $h = 100$ et $R = 3200$, par conséquent $\Delta p' = \frac{10\,000}{3\,200} = 3\text{ mm},12$.

Par ailleurs on vérifie qu'au milieu de ce segment le couteau donne l'aspect B, c'est-à-dire que la zone neutre est sensiblement aux 0,7 du rayon du miroir et que les zones se raccordent normalement sans anomalie. Cet essai sommaire peut suffire à la rigueur pour vérifier un miroir peu déformé (par ex. un 20 centimètres à $f/D = 8$) mais il exige de l'opérateur une sérieuse habitude des ombres, en effet le pointé des rayons centraux est peu précis avec des rayons qui se coupent aussi obliquement et celui des rayons du bord extrême est gêné par le brillant anneau de Rayleigh (§ 32), en outre une anomalie locale très fréquente soit sur le centre, soit sur le bord, suffit pour porter un jugement inexact sur un miroir si le simple examen des ombres n'a pas permis de la dépister.

G. W. RITCHEV ⁽¹⁾ a eu l'idée de faire une comparaison photométrique grâce à deux fenêtres découpées dans un écran, découvrant deux portions d'une même zone, symétriques par rapport à l'axe. Les fenêtres des écrans Ritchey étaient si étroites que les liserés de diffraction gênaient considérablement les mesures. A. Couder ⁽²⁾ a décrit un écran beaucoup plus pratique dont nous allons nous occuper.

38. L'écran à échancrures A. Couder.- Les fenêtres démasquent des zones successives dont les rayons ont leurs carrés croissant en progression arithmétique, elles sont donc plus étroites au bord du miroir où la déformation plus rapide ne permet pas d'observer une large zone en teinte plate. L'écran est découpé dans du papier à dessin fort ou du carton mince, le tracé est facile, une première circonférence extérieure correspond au diamètre du verre, une seconde circonférence légèrement plus petite est le diamètre au biseau, son rayon est le rayon extérieur de la zone marginale, la largeur de cette zone est à déterminer d'après des considérations pratiques dictées d'une part, par la difficulté de faire de bonnes mesures si la zone est trop étroite, et d'autre part, par l'obligation d'observer une teinte à peu près plate. Si le miroir est très déformé il faut des zones nombreuses (une pour chaque millimètre d'aberration par exemple), mais avec un miroir standard, nous conseillons aux débutants surtout de ne pas descendre en dessous d'une quinzaine de millimètres pour une fenêtre vue à 3 mètres (il vaut mieux 4 bons pointés que 10 mauvais).

Les fenêtres extérieures déterminées, la loi des carrés des rayons décroissants en progression arithmétique (dont la raison est déduite de la largeur de

⁽¹⁾ G. W. RITCHEV, *Sur le télescope moderne à réflexion*, p. 95 (1904).

⁽²⁾ *Lunettes et Télescopes*, p. 534.

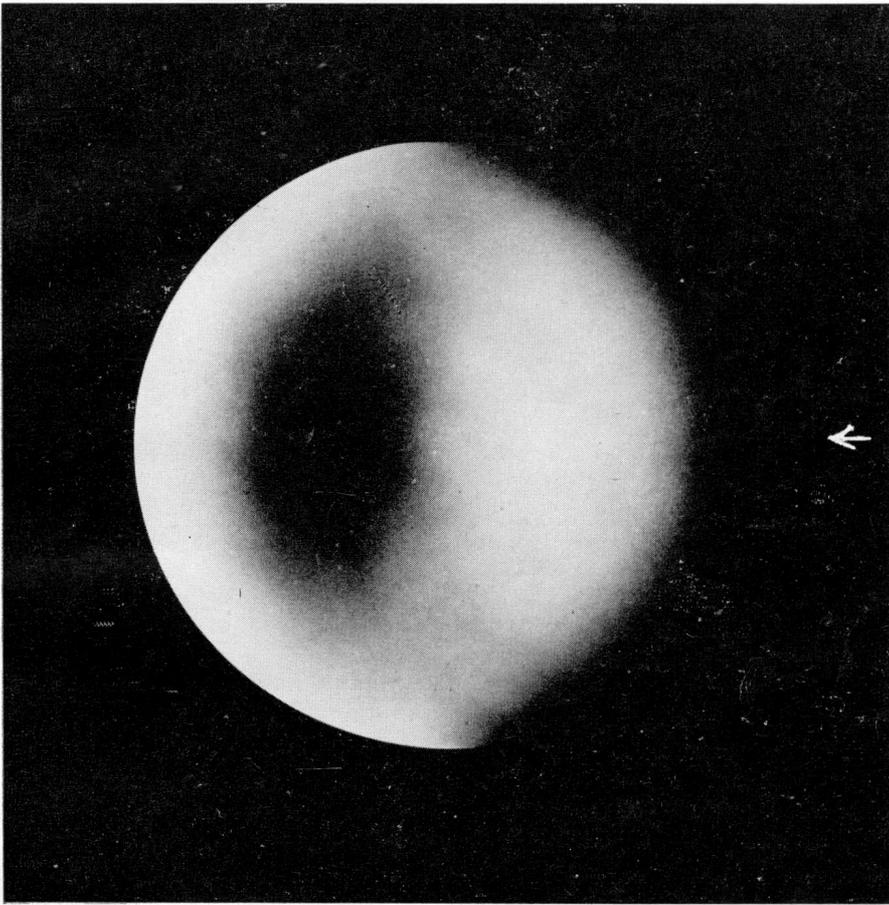


Fig. 41. – Foucaultgramme du premier miroir taillé à l'atelier de la Commission S. A. F.

la zone externe) permettra de choisir le nombre de fenêtres et leurs rayons extérieurs. Il est tout à fait inutile de buter sur la petite difficulté de respecter rigoureusement la progression arithmétique qui conduit d'ailleurs parfois à des proportions peu heureuses des zones centrales. L'intérêt de la réduction progressive de la largeur des zones extérieures une fois compris, il est plus simple et aussi efficace de choisir les rayons arbitrairement.

Précisons par un exemple : la figure 42 donne les caractéristiques de l'écran standard employé à la Commission pour le contrôle des miroirs de 20 centimètres.

Une fois l'écran découpé, on mesure les diamètres réels intérieurs et extérieurs de chaque zone (au 1 / 10 de millimètre). On calcule la hauteur moyenne h_m ⁽¹⁾ pour chacune (en divisant par 4 la somme des 2 diamètres) et l'aberration longitudinale $\frac{h_m^2}{R}$ qui sera à comparer

aux nombres trouvés.

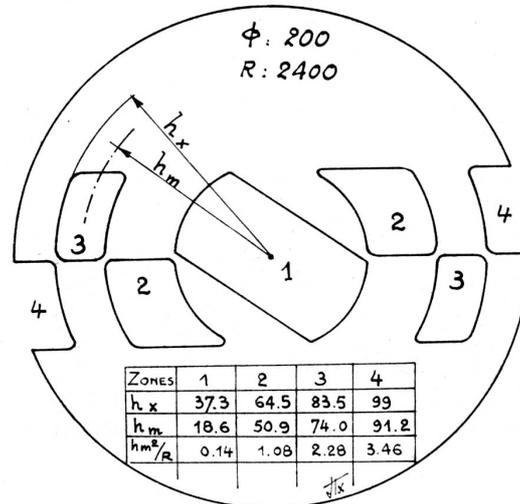


Fig. 42. - Ecran A. COUDER, standard de la Commission S. A. F.

39. Pratique et causes d'erreurs des mesures visuelles à l'écran. - Les précautions habituelles d'homogénéité thermique dans le verre et dans l'air de la pièce doivent être particulièrement soignées, le miroir correctement placé sur son support à contacts géométriques depuis plusieurs heures.

L'appareil de Foucault est muni de sa fente serrée entre 10 et 20 μ , et bien parallèle à l'arête du couteau (on voit quatre ou cinq franges d'ombres à 20 millimètres de l'intersection). La coulisse du chariot porte-couteau est disposée bien parallèle à l'axe optique (la pénétration du couteau dans le faisceau n'est pas modifiée quand on déplace le chariot longitudinalement et le couteau assez bien perpendiculaire à cet axe). On vérifie d'abord, miroir découvert, l'uniformité de l'éclairage (rotation de la lanterne sur elle-même) et la succession des aspects de la figure 40 qui doit se produire naturellement pour des tirages du

⁽¹⁾ Cette moyenne arithmétique h_m n'est pas identique au h_n de A. COUDER (*Lunettes et télescopes* ; p. 533) qui est défini comme le rayon dont le carré est égal à la moyenne des carrés des rayons intérieur et extérieur de la zone et qui permet une réduction théoriquement plus correcte ; cependant la signification physique du pointé photométrique de la zone nous semble mieux correspondre au milieu de la fenêtre (les liserés de diffraction affectent symétriquement les deux bords et l'observateur égalise surtout les parties centrales des plages). Les différences qui résultent de cette divergence d'interprétation sont d'ailleurs faibles, elles se traduisent pour l'écran standard par des écarts transversaux inférieurs au micron. Chacun choisira suivant sa conscience.

couteau compris dans la graduation. On peut bloquer le valet qui immobilise l'appareil de Foucault et mettre l'écran à échancrures devant le miroir en orientant l'axe des échancrures horizontalement et en soignant le centrage par rapport au biseau du verre, un petit ressort en fil de fer peut éventuellement assurer sa position. (Eviter de toucher au miroir.) Une vérification plus sérieuse de l'uniformité de l'éclairage avec les fenêtres extérieures surtout (couteau nettement en dehors du faisceau) est nécessaire. Pour les comparaisons photométriques, l'œil travaille dans des conditions meilleures si la pièce n'est pas complètement noire et il est même avantageux d'éclairer l'écran et l'appareil avec une lumière diffuse bien uniforme. Tous ces préparatifs ne doivent pas affoler les débutants, qu'ils essayent ! Après un petit nombre d'expériences, ils comprendront mieux ces précautions et sauront mettre rapidement leur dispositif de contrôle en bon ordre.

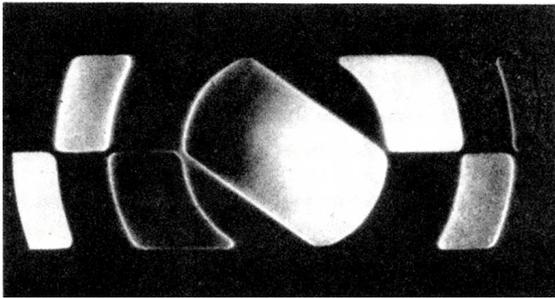


Fig. 43. – Foucaultgramme d'un miroir standard, le couteau est à l'intersection des rayons de la zone 3. Noter les liserés de diffraction et la diffusion parasite. (fente de $20\ \mu$)

Il ne reste plus qu'à faire les mesures, commençons par exemple par la zone centrale, si elle semble plus noire du côté gauche il faut rapprocher le couteau du miroir ; on tient la vis des déplacements longitudinaux de la main gauche pendant que la droite manœuvre en même temps la vis de coupe pour essayer les différents tirages et inversement l'éloigner si c'est le côté droit le plus sombre.

Quand on arrive au centre de courbure de la zone, elle s'éteint uniformément sur toute sa surface. La position du couteau est notée grâce à l'échelle divisée par rapport à une origine quelconque (seules les différences nous intéressent) et l'on peut passer à la zone n° 2 dont les fenêtres sont faciles à identifier avec la disposition de l'écran Couder, la fenêtre de droite est naturellement plus sombre s'il y a bien de la surcorrection sphérique ce qui veut dire qu'il faut éloigner un peu le couteau pour trouver le centre de courbure de la zone et ainsi de suite pour tous les couples de fenêtres qui donnent des tirages longitudinaux correspondants. Il n'est pas inutile d'insister : seule la comparaison de l'assombrissement de la fenêtre de droite et celle de gauche doit servir pour trouver la position du couteau même si le déplacement à réaliser n'a pas le sens ou la grandeur que l'on espérait ! Mettre le couteau à l'avance à la position théorique c'est tricher, cela ne paraît pas évident pour tout le monde. En arrivant à la dernière fenêtre, il est bon de recommencer immédiatement une autre série de pointés en remontant vers le miroir. Pour comparer l'éclairement de deux fenêtres fort distantes l'une de l'autre, il faut procéder comme pour comparer deux étoiles écartées sur le ciel, en fixant alternativement l'une et l'autre et non en cherchant à les fusionner, cette photométrie est plus facile et moins affectée de causes d'erreurs dues principalement à la diffusion latérale de diffraction si l'on surveille les fenêtres au début de l'extinction, sans poursuivre la comparaison au delà de la demi-coupe.

La figure 43 donne une idée des causes d'erreurs dont nous voulons parler nous ne pouvons pas insister, la méthode malgré ses défauts est quand même celle qui rend le plus de services.

Quand la surface du miroir est très douce, l'air de la pièce calme et l'éclairage convenable, l'opérateur exercé par quelques dizaines de milliers de pointés trouve le centre de courbure d'une zone intermédiaire d'un faisceau à $f/12$ avec une erreur moyenne de $2/100$ de millimètre. Le débutant ne doit évidemment pas s'attendre à une telle précision, ses premières séries pourront différer de 3 ou 4 / 10 entre elles mais un peu de persévérance donnera vite des écarts de 1 à 2 / 10 au plus; on aura une approximation suffisante en faisant alors la moyenne de 4 pointés sur chaque zone qui donnera sûrement des valeurs à 1 / 10 près, permettant de remonter à la forme du miroir avec une approximation meilleure que le dixième de la tolérance de Rayleigh ; pour les miroirs qui nous intéressent, nous reviendrons sur cette réduction des mesures au moment de l'établissement du bulletin de contrôle.

40. Défauts de non révolution. - Bien qu'ils soient très graves, nous n'en dirons que quelques mots parce que celui qui travaille convenablement un miroir à poste fixe n'a pratiquement jamais l'occasion d'en noter.

Pour dépister ce genre d'anomalie, la méthode des ombres de Foucault n'est pas à recommander aux personnes peu familiarisées avec les aspects d'interprétation difficile que les ombres peuvent présenter pour certaines orientations du couteau. Un essai à l'oculaire sur des plages légèrement extrafocales peut suffire pour nous tranquilliser. Nous l'avons déjà dit, il n'est pas facile de réaliser une étoile artificielle assez petite et bien ronde au moyen d'un trou, avec le montage précédemment décrit § 30 ; le mieux c'est d'utiliser la lanterne porte-fente (sans la fente provisoirement remplacée par un trou rond de 3 ou 4 millimètres) pour éclairer une bille d'acier de roulement de 6 millimètres environ de diamètre collée au *Scotch* contre l'oculaire d'observation (fig. 44).

Si la bille est neuve et bien polie (on l'améliore beaucoup au moyen d'un petit polissoir à la poix monté sur un tour et du rouge), elle donne du filament ramassé de la lampe une image « stellaire » reprise par le miroir, qui en donne lui-même une image observée avec un oculaire assez fort ($f = 10$ millimètres par exemple pour des faisceaux à $f/12$). Quand le miroir est à peu près sphérique, on peut utiliser des plages très peu extrafocales : 2 à 3 millimètres seulement qui restent bien rondes si le miroir est exactement de révolution, mais dont l'ovalisation est déjà visible pour un astigmatisme de 1 / 10 d'onde. Avec un astigmatisme plus marqué, on trouve des positions longitudinales de l'oculaire, distantes de plusieurs millimètres, qui correspondent à des ellipses dont les axes sont orthogonaux (fig. 44). Quand il existe en outre de l'aberration de sphéricité, on doit prendre des plages un peu plus extrafocales, mais l'essai garde généralement un caractère critique suffisant. Exceptionnellement dans le cas de contraintes ou de tensions extraordinaires (disques collés contre une « molette » ou un verre de « renfort » ; très forte trempe), on peut observer d'étonnantes et désastreuses figures irrégulières dans le genre de celle de la figure 44, à droite, qui sont fréquentes avec les objectifs de l'industrie. Avant de conclure que les défauts sont propres au miroir, il convient d'une

part de faire tourner la bille sur elle-même ou de l'éclairer dans une direction un peu différente pour éliminer éventuellement ses propres défauts ; d'autre part on doit tenir compte de l'astigmatisme de montage non nécessairement négligeable quand la bille est à une distance notable de l'axe ou éclairée trop obliquement. Le mieux est de faire tourner le miroir sur lui-même et de voir si l'angle de position de l'axe d'une ellipse extrafocale tourne en même temps (attention de ne pas chauffer avec les mains un diamètre privilégié du miroir, pour éviter un refroidissement laborieux on ne touche le verre qu'avec interposition de flanelle ou de gants épais).

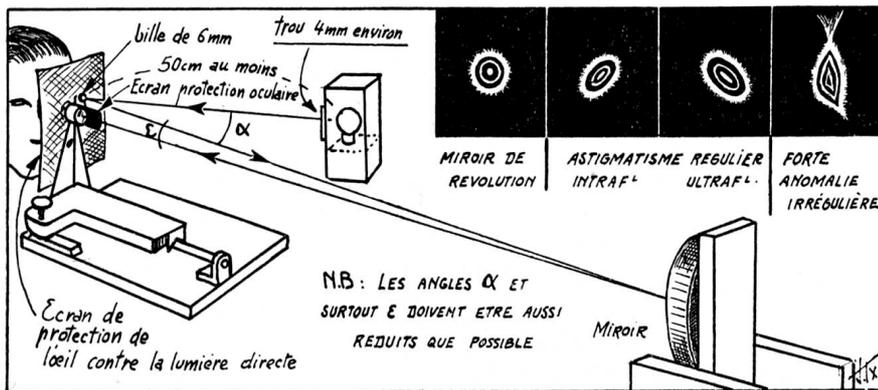


Fig. 44. – Etude des défauts de non révolution.

Nous ne traiterons pas la retouche des défauts de non révolution ; ils ne se rencontrent qu'en cas de fausse manœuvre systématique impardonnable (oubli de tourner le verre miroir dessous, collage d'une poignée trop grande, ou d'un disque « renfort ») ou encore si le disque possède une hétérogénéité vraiment rare. Dans tous les cas le meilleur remède, même pour un opticien exercé, c'est de chercher l'élimination automatique du défaut tout simplement en continuant le travail normal pendant une heure au moins, en favorisant l'élimination des erreurs systématiques par intervention des disques changement des courses ou mieux d'opérateur. Ce n'est qu'après plusieurs tentatives de ce genre qu'il faudrait se résigner à tailler un autre miroir ; nous n'avons jamais rencontré un tel cas à la Commission des Instruments.

41. Mamelonnage et micromamelonnage. - L'efficacité du polissage croit beaucoup en fin de séchée en même temps que les efforts déployés pour déplacer l'outil ; ce dernier stoppé en bout de course séjourne quelques instants et peut amorcer une faible attaque chimique du verre par le contact des carrés chargés de produits usés et notamment de silicates. A cette attaque correspond un point faible, plus facile à user pendant quelques temps, d'où création d'un système de petit monticules et creux qui correspondent souvent plus ou moins à la structure en carrés de l'outil. Ce bosselage est le *mamelonnage*.

Le foucaultgramme, figure 45, d'un miroir de 400 en donne un exemple où l'on voit les mamelons partiellement effacés sur une large zone travaillée ultérieurement au polissoir local. L'amplitude de ces défauts est de $\lambda / 20$ environ mais la diffraction correspondante sur l'image n'est pas forcément négligeable à cause de la pseudo-périodicité du système, capable de renforcer

certains anneaux de diffraction d'ordre élevé. Le foucaultgramme de la figure 46 montre un mamelonnage, beaucoup plus important mais irrégulier, obtenu

par un débutant athlétique en poussant trop loin ses sèches à l'oxyde de zirconium. L'on voit nettement les régions du verre où l'attaque chimique et l'action mécanique sont devenues

catastrophiques. Bien que ces défauts soient inférieurs au quart d'onde l'altération de l'image est ici inadmissible et l'effacement de tels dégâts nécessite plusieurs heures de travail doux mais il est facile d'éviter d'en arriver là : la fin du polissage se fera avec

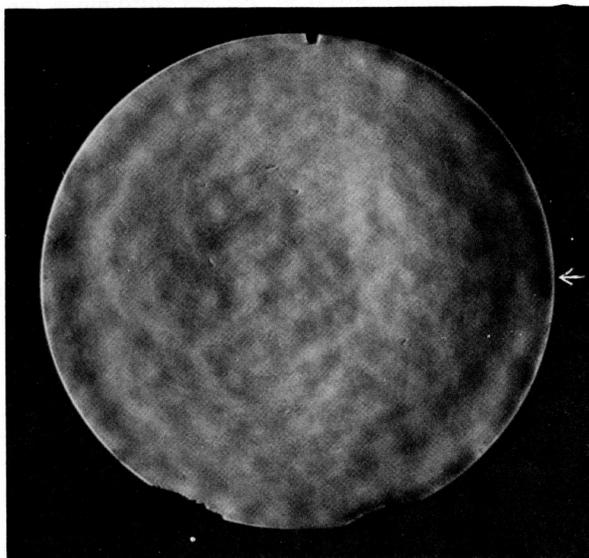


Fig. 45. – Mamelonnage d'un miroir de 400.

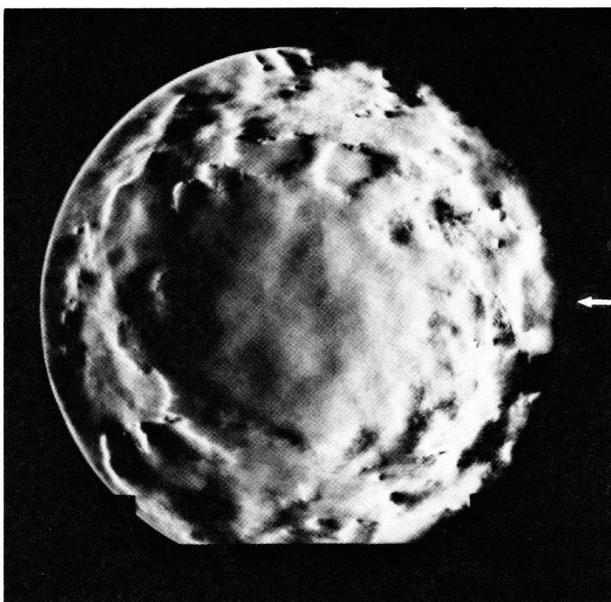


Fig. 46. – Mamelonnage d'un miroir de 180 travaillé trop brutalement au blanc.

des courses variées sans sécher complètement en blanc ni abandonner l'outil en place en fin de séchée.

La méthode de Lyot par contraste de phase nous a permis de découvrir des accidents de polissage beaucoup plus fins qui constituent le *micromamelonnage*⁽¹⁾. Ces accidents ont une largeur de l'ordre du millimètre et une amplitude de l'ordre du millième d'onde seulement (quelques Angströms) mais il y en a des millions sur

⁽¹⁾ Jean TEXEREAU, Les principaux défauts réels des surfaces optiques engendrés par différentes technologies de polissage. *Ciel et Terre*, LXVI, n^{os} 3-4, mars-avril 1950, p. 57.

un verre et dans les cas graves la lumière diffractée correspondante est un voile parasite perceptible dans tout le champ. Le micromamelonnage est surtout à prendre en considération pour les cas difficiles d'objets faibles à étudier près de sources brillantes (couronne solaire, compagnon de Sirius) comme les accidents produits dépendent presque uniquement de la technique de polissage choisie nature et structure de l'outil ; *pression et nature de l'agent à polir* il est facile d'obtenir un miroir de surface très douce. Nous avons rassemblé figure 17 quelques structures caractéristiques. L'on trouve en 47 A les gros défauts des mailles d'un outil à alvéoles de cire (H.C.F.) et ceux d'un outil en papier en 47 B les pentes de ces accidents atteignent 1×10^{-5} tandis que les outils plus souples, à la poix, laissent des accidents 30 fois moins élevés dont les pentes sont d'environ 1×10^{-6} . La lumière parasite diffractée par la surface figure 47 F est environ 100 fois plus faible que pour la surface figure 47 A.

42. Les défauts zonaux. - Ce sont de beaucoup les plus importants et les plus fréquents. Passons en revue les formes les plus couramment engendrées (fig. 48). La sphère (fig. 48-1) n'est que le cas particulier de l'écart nul qu'un régime de travail non perturbé est susceptible d'engendrer. Il est aussi fréquent de rencontrer une surface déformée soit du côté de la sous-corrrection sphérique (fig. 48-2) soit du côté de la surcorrection (fig. 48-3,4,5). Une mesure sommaire de l'aberration longitudinale sans écran (§ 37) fixera tout de suite l'attitude à prendre pour améliorer le miroir. Si la déformation est de sens contraire ou moindre que la parabole, on pourra paraboliser d'emblée comme si l'on avait affaire à une sphère. C'est le cas le plus favorable et on pourra l'appliquer même en présence d'une anomalie à pente assez douce. Dans le cas d'une hyperbole ne dépassant pas deux ou trois fois la parabole, on pourra revenir directement à la parabole par exemple avec un régime de surpressions sur la zone 0,7 qui rentre dans la catégorie des interventions décrites plus loin.

Mais très souvent aussi un défaut zonal anormal dû à un outil défectueux ou à une habitude vicieuse de l'opérateur, subsiste à la fin du polissage. Comme il ne faut pas compter sur les quelques minutes de parabolisation pour l'éliminer, il est nécessaire de le faire disparaître, ou du moins, de l'adoucir suffisamment.

Avant de tenter une retouche à proprement parler, il faut essayer l'élimination automatique en poursuivant le travail normal pendant une bonne heure après vérification sérieuse de l'outil et des courses. Une anomalie de bord (fig. 48-6,7) est souvent due à une pression incorrecte des mains au bord de l'outil, à des courses trop longues, à de la poix trop molle. Une surface irrégulièrement zonée est inadmissible (fig. 48-8) ; il faut poursuivre le travail assez longtemps, avec un polissoir qui se presse ; souvent il sera plus économique de refaire l'outil avec de la poix de meilleure qualité ou, à la rigueur, de cirer l'ancien. D'autres irrégularités zonales (fig. 48-9,10,11,12,13) peuvent provenir d'une défectuosité visible de l'outil (carrés écaillés, absents, mal taillés). Il faut d'abord arranger le polissoir et poursuivre assez longtemps le travail normal. Très souvent une anomalie difficile à retoucher (zone creuse, trou central) pourra se trouver éliminée, ou du moins remplacée, par un défaut plus facile à attaquer (mamelon central, par exemple).

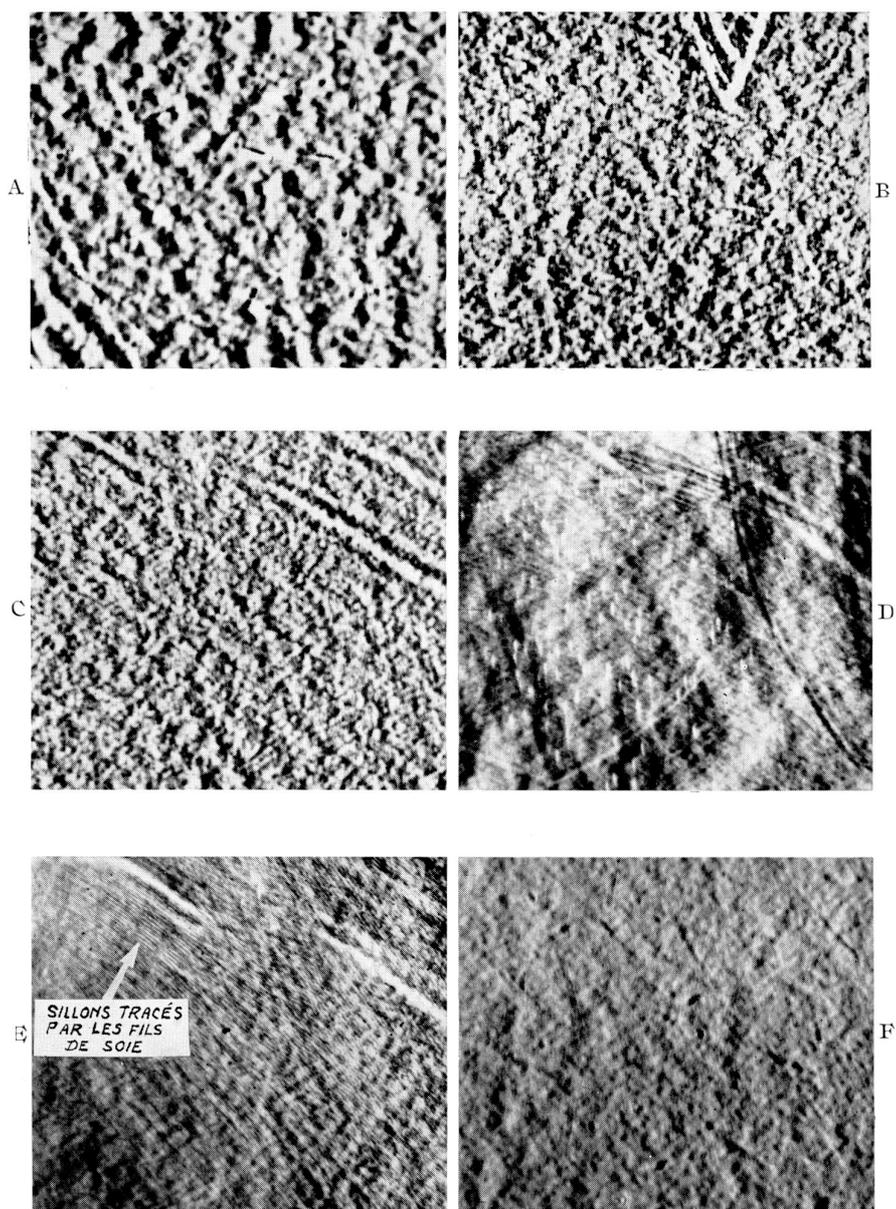


Fig. 47. – “Lyotgrammes” de surfaces polies par différents procédés et montrant le *micromamelonnage*.
Echelle 2/1. Lamme de phase 1,69 pour A, B, D et E; et 2,81 pour C et F.

- A) Polissoir H. C. F. et rouge.
- C) Polissoir poix cirée et rouge.
- E) Polissoir local, gomme recouverte de taffetas de soie.

- B) Polissoir papier et rouge à sec.
- D) Polissoir poix pure et oxyde de cérium.
- F) Polissoir poix pure et rouge.

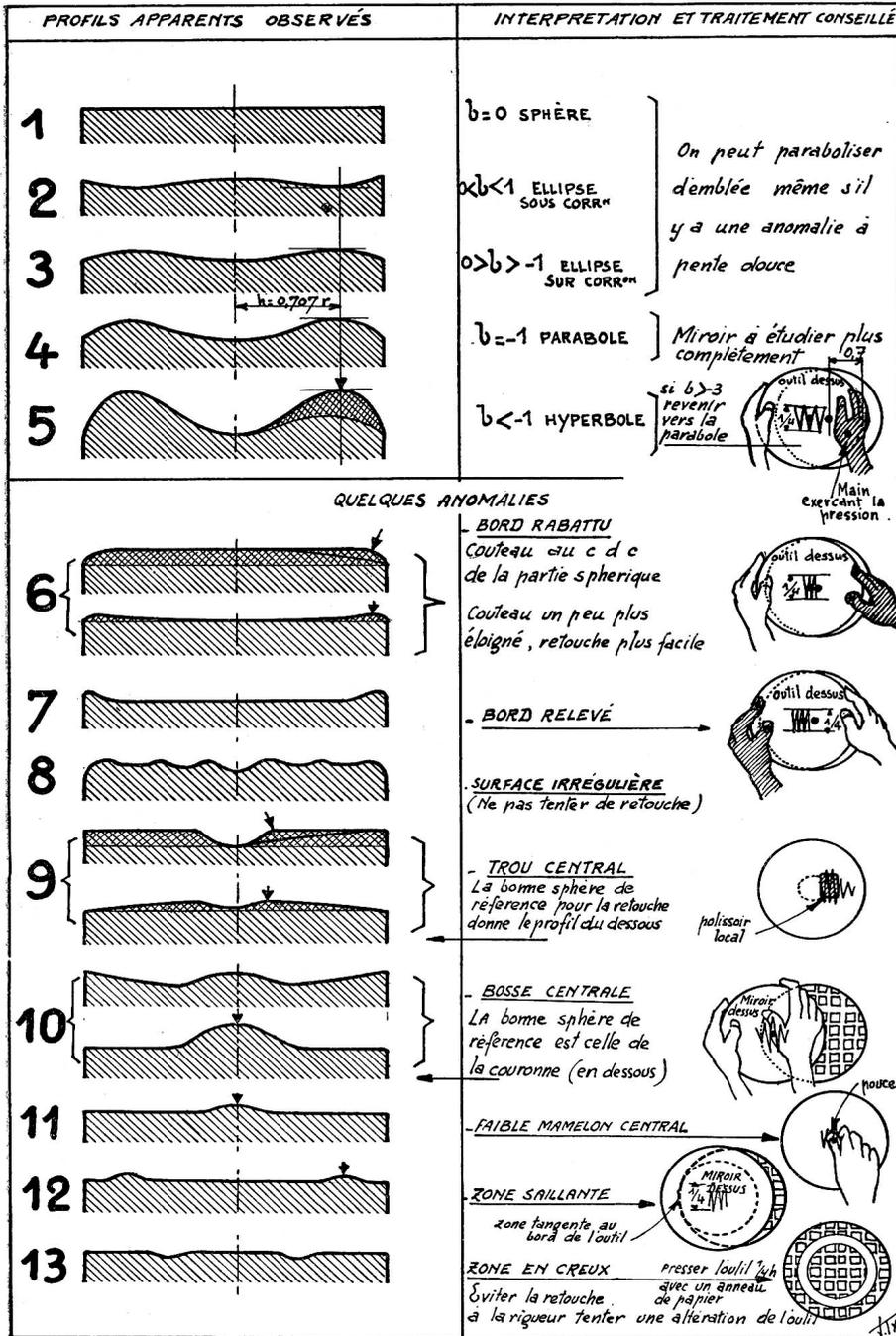


Fig. 48. – Exemples de retouches d'anomalies zonales.

43. **Les retouches locales.** - Il faut tenir un cahier de retouches comportant pour chaque intervention une ou plusieurs sections apparentes remarquables du solide différentiel observé par la méthode de Foucault (la figure 48 donne des exemples de profils à choisir), l'indication du temps d'action, des courses, des pressions exercées sur l'outil, etc. Un tel registre devrait constituer pour un opérateur donné, le meilleur document de référence pour le travail futur ; malheureusement il n'est pas possible d'appliquer un strict déterminisme à un problème de retouches locales, non que le principe sacré de causalité soit mis en doute, mais parce qu'il faut avouer que l'ensemble de causes qui détermine l'action de l'outil n'est jamais parfaitement connu et reproductible. Avec un grand outil *on ne sait pas ce que l'on fait* si l'on ne travaille que quelques minutes sans forte perturbation et avec un polissoir local il est très difficile de raccorder le sillon produit avec le restant de la surface. Il y a tout de même quelques principes d'application assez générale et sûre dans la mesure où l'on sait éviter leur composition avec d'autres causes de perturbation :

1° *L'usure est une fonction croissante de la pression.* - Pour nous c'est le principe le plus important et le plus sûr pour l'opérateur ayant acquis par une bonne notion des limites entre le début de l'efficacité et le début des ravages en fonction de la pression. Les méthodes de parabolisation, comme nous le verrons, en constituent souvent des corollaires. Un opérateur entraîné peut aborder de cette façon n'importe quelle retouche avec un grand outil, ce qui est un gros avantage par rapport à l'emploi de polissoirs locaux. La surpression peut être produite, dans la position miroir dessus en excentrant le verre de façon à faire les courses avec la zone à déprimer tangente au bord de l'outil (fig. 48-10,12), ou mieux dans la position miroir en dessous en appuyant sur un des bords de l'outil (sur la figure 48, les mains exerçant cette pression sont hachurées). Le bord de l'outil constitue en effet un endroit critique où l'on peut localiser dans une certaine mesure une usure anormale, par exemple on peut corriger à volonté avec les mêmes courses : un bord rabattu (fig. 48-6) ou relevé (fig. 48-7), en appuyant simplement sur le bord intérieur ou extérieur de l'outil convenablement excentré ⁽¹⁾. Un poids mobile déplacé à la main sur le dos de l'outil permet d'obtenir une pression régulière sans fatigue, mais la manœuvre n'est pas commode. Il ne faut pas oublier de varier continuellement le déport de la course pour éviter un ravage étroitement localisé.

2° *L'usure est fonction du temps d'action du polissoir.* - Proposition évidente, mais dont l'application donne lieu à des surprises, car la fonction n'est pas simple, ni même reproductible et en tous cas n'a aucune chance d'être linéaire tant que l'on n'a pas atteint un régime thermique permanent, ce qui ne peut avoir lieu en si peu de temps que dure une retouche. Avec un outil à action perturbée, sauf dans le cas d'un gros défaut (hyperbole profonde) ou mal placé (bord rabattu) un temps d'action de 5 ou 10 minutes est généralement suffisant. Quand le défaut est étroit et la perturbation forte (piton central corrigé avec miroir dessus très excentré), une seule minute peut produire un trou très ennuyeux à retoucher. Il est prudent dans le doute d'adopter des temps d'action nettement faibles quitte à revenir sur un défaut insuffisamment atténué.

⁽¹⁾ D'où un moyen amusant pour mystifier un pronostiqueur déterministe sans qu'il puisse s'en douter.

3° *L'usure est fonction de la vitesse du mouvement relatif par rapport à l'outil.*

- Pour les petites pièces travaillées avec une machine à révolutions rapides ce principe a quelques applications, mais pour nous son intérêt est faible. Il faut seulement se rappeler que pour la régularité du travail et la douceur de la forme, les courses rapides ou saccadées sont défavorables.

4° *Perturbations de l'usure de dégarnis sur l'outil.* - Si l'on met volontairement hors de cause une portion de l'outil, soit par pressage avec interposition de papier sur la zone, grattage léger de la surface de certains carrés ou même enlèvement total, on perturbe l'usure sur la zone correspondante du verre. Cette façon de faire est souvent appliquée aux polissoirs pleins utilisés pour les petits objectifs, mais elle donne des résultats plus incertains avec un miroir plus grand. Il est fort difficile d'être maître de la perturbation produite et de la faire cesser à coup sûr quand le défaut est assez adouci ; or l'intégrité d'un beau polissoir n'est pas une chose à sacrifier à la légèreté. Cependant pour traiter un bord rabattu le rognage des coins des carrés marginaux (G. W. Ritchey) est reconnu efficace ; les outils à carrés en fuseaux de Ellison sont utiles pour paraboliser. Enfin, surtout pour les miroirs un peu grands, une couronne de carrés bien proportionnée à une zone haute, par exemple la zone 0,7 d'un hyperboloïde, peut se montrer efficace quitte à quelques retouches ultérieures avec des couronnes de rayon un peu différents.

5° *Usure au moyen de polissoir locaux.* - Ce procédé appliqué par L. Foucault dès 1857 est évidemment le plus sûr pour l'esprit déterministe. Il n'est donc pas inutile de mettre un garde les débutants disposés à lui attribuer toutes les vertus ⁽¹⁾. Le polissoir local est généralement constitué par un outil en bois d'une vingtaine de millimètres d'épaisseur, carré, rectangulaire ou circulaire suivant le cas à traiter et ayant une largeur de 10 à 100 millimètres. Il est muni de carrés de poix comme un grand outil, mais pour éviter les filandres le cirage des carrés est nécessaire, ou mieux l'interposition d'un taffetas de soie (A. Couder) fixé au dos avec des punaises et sans aucun pli du côté utile, qui permet aussi une action plus énergique et plus sûre [avec augmentation de la lumière diffractée par le micromamelonnage (fig. 47 E)]

Pour obtenir de bons résultats *il ne faut pas s'attaquer avec un polissoir local à un gros défaut* (moins de 1 / 4 d'onde, estimation par la courbure des franges d'ombre). Des marques à l'encre faites au moment du contrôle indiquent le point le plus haut de la zone, au bord de l'ombre (il ne faut pas creuser une tranchée à côté d'une colline). On doit mettre du rouge en couche plus épaisse que pour le travail normal. Si l'on utilise l'oxyde de zirconium prendre garde à l'énorme accroissement de l'usure dès que le polissoir ressuie le blanc quand l'eau devient rare. Quand le défaut est plus étendu (fig. 48-11) le doigt du pouce ou même l'index (bord rabattu fin) peuvent constituer, bien enduits de rouge, de bons polissoirs locaux. La pression à exercer peut être assez grande, facilement de l'ordre du kilogramme, sur un polissoir d'une dizaine de centimètres carrés et les courses, bien que statistiquement distribuées sur le point saillant, suffisamment variées et déportées pour obtenir un raccordement doux. Le temps d'action sera compté en tours complets effectués autour du verre avec

⁽¹⁾ On ne doit pas oublier que Foucault polissait au papier, technique qui ne se prête pas à l'application d'autres procédés meilleurs.

le polissoir local manœuvré par petites courses rapides. Un seul tour de une minute peut suffire dans le cas d'un faible défaut zonal ; c'est le meilleur cas d'application de cette technique merveilleuse qu'il faut employer le plus modérément possible.

La maîtrise de ce procédé ne peut s'apprendre que par l'expérience ; un volume d'explications ne ferait ici qu'embrouiller les timorés. Il vaut mieux déconseiller la méthode à ceux qui ne se sentent pas assez sûrs d'eux-mêmes. En effet dans le cas d'un large défaut à pente douce le maladroit peut le remplacer par un terrain beaucoup plus accidenté et nuisible. Etant donné la petitesse des accidents retouchables dans de bonnes conditions avec des polissoirs locaux, la méthode ne saurait intéresser que le dilettante qui veut notablement dépasser l'approximation du vingtième d'onde et n'a pas peur de courir un risque.

41. **La parabolisation.** - Cette fameuse parabolisation n'est qu'un cas particulièrement simple de régime perturbé qui n'offre aucune difficulté dans le cas d'un petit miroir pas trop ouvert.

A) *Méthode classique* (fig. 49 A.) - On se contente de travailler miroir en dessus avec des courses et des déports plus grands pouvant atteindre $4/5 D$. Il est recommandable de rogner les angles des carrés marginaux, mais il ne faut pas trop compter là-dessus pour éviter le bord rabattu quand la poix est molle. Si l'ouverture du miroir atteint $f/D = 6$, on pourra diminuer progressivement vers le bord la surface des carrés dont les rangées auront la forme de fuseaux (Ellison). L'outil devra être soigneusement pressé sur le miroir, pas trop froid, car il ne faut malheureusement pas compter sur l'égalisation thermique d'un travail prolongé. Une première intervention sur un miroir de 20 centimètres à $f/D = 8$ pourra durer huit à dix minutes ; ce temps d'action conviendra aussi pour un miroir à $f/D = 6$ qu'il est préférable de ne pas chercher à paraboliser d'un seul coup. On doit mettre une couche de rouge ou de blanc et d'eau plus épaisse que pour un travail normal et éviter les séchées irrégulières. Quand on peut définir un bon opérateur moyen, il est possible d'obtenir d'emblée des paraboles pas trop déformées à une bonne approximation ; dans ce cas les courses ne sont pas trop allongées, $2/3 D$ au plus, mais le travail doit durer une heure environ avec changement d'opérateur toutes les dix minutes, nous avons pu obtenir de la sorte plusieurs miroirs automatiquement à l'atelier de la Commission grâce à quatre à cinq opérateurs se relayant et faisant les « mêmes » courses ; le foucaultgramme reproduit figure 41 concerne un de ces miroirs.

B) *Méthode du petit outil* (fig. 49 B). - Avec un miroir un peu grand et fort déformé par rapport à la sphère, l'emploi d'un polissoir demi-taille peut donner de bons résultats. La méthode est surtout intéressante pour perfectionner une forme obtenue avec un grand outil, si le temps d'action du petit outil doit être trop prolongé il faut craindre le mamelonnage et les filandres et cirer le polissoir.

C) *Méthode par suppressions* (fig. 49 C). - Nous avons trouvé ce procédé en taillant un miroir de 26 centimètres à $f/D = 4$ pour lequel la première méthode ne permettait pas de dépasser avec sûreté une ellipse moitié moins déformée que la parabole : on creuse la partie centrale avec des suppressions sur le bord

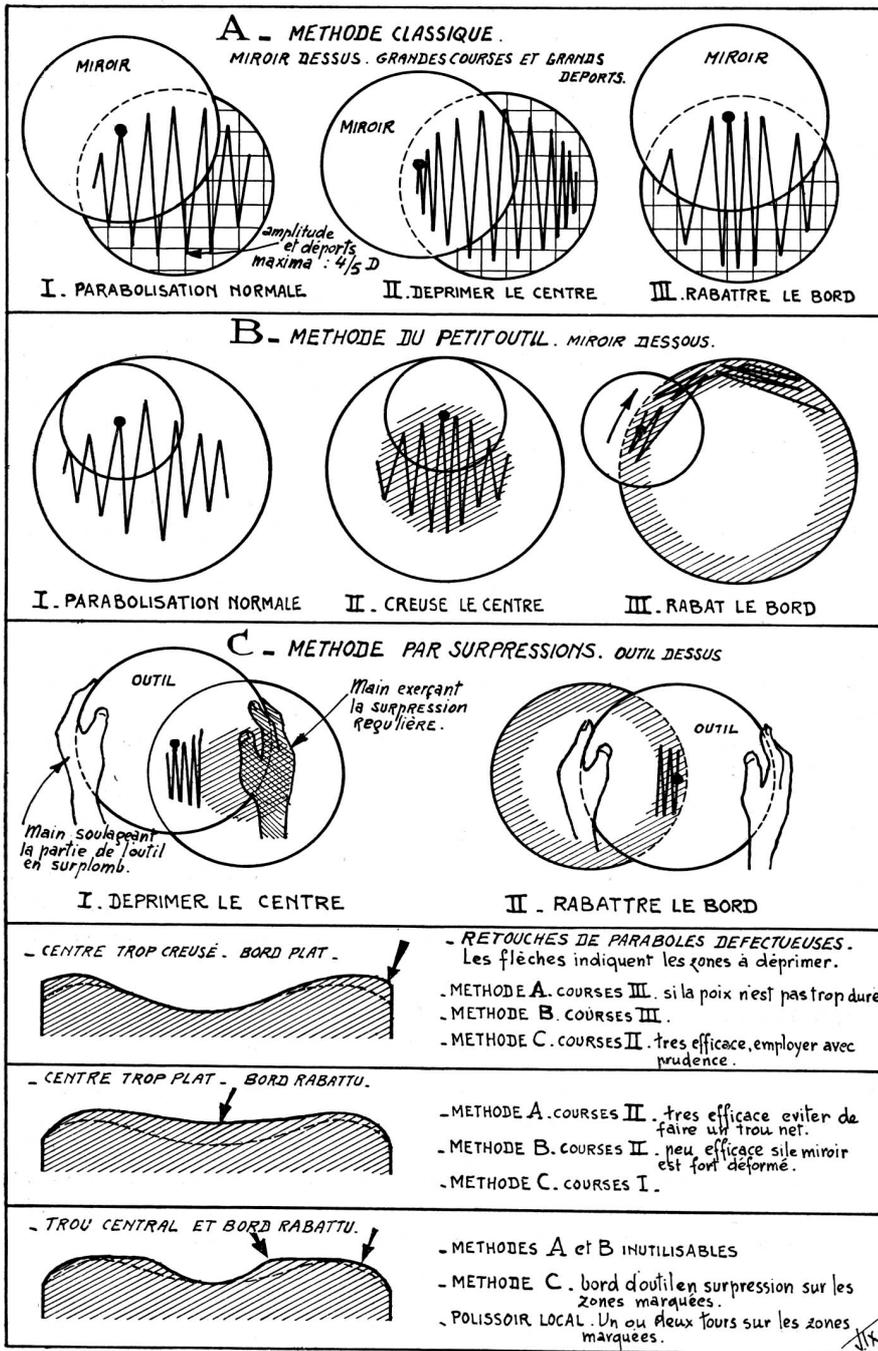


Fig. 49. – Méthodes de parabolisation.

intérieur de l'outil, le miroir étant en dessous. Le bord du miroir se rabat avec l'outil largement excentré; attention cependant au rabattu possible du fin bord qui serait de retouche difficile. De même toute zone saillante d'une parabole imparfaite peut se traiter par surpression sur le bord intérieur de l'outil passant sur cette zone, on doit naturellement varier suffisamment les déports pour éviter un ravage local et raccorder le point attaqué. La pression exercée doit être régulière sur tout le pourtour de la zone et l'on travaille bien entendu par tours entiers. Il faut une certaine habitude pour bien réussir, mais on évite l'emploi d'un polissoir local.

45. Retouche des paraboles imparfaites. - Une bonne expérience des ombres est nécessaire pour interpréter les anomalies par rapport aux solides différentiels dessinés figure 40. Si la forme d'ensemble paraît à peu près réussie, ce que l'on juge surtout grâce à l'aspect moyen (figure 40 B et 41), on fera une mesure de l'aberration longitudinale sans écran (§ 37) pour savoir s'il faut continuer le travail de la même façon ou revenir au contraire vers la sphère comme on l'a vu § 42. Maintenant, indépendamment de la correction d'ensemble il y a la régularité de la forme ; nous donnons, dans le bas de la figure 49, trois exemples de retouches de formes défectueuses prises parmi les plus fréquentes.

Nous approchons de la forme exacte ⁽¹⁾ ; il est plus sur, pour le débutant surtout, de faire au moins sommairement une paire de pointés sur chaque zone avec l'écran Couder (§§ 38 et 39). Pour éviter de faire un calcul complet à chaque retouche, nous avons l'habitude d'opérer de la façon expéditive suivante, suffisante pour terminer un miroir standard :

On a trouvé par exemple les tirages suivants pour les zones 1, 2, 3, 4 respectivement :

Valeurs trouvées	28,03	29,64	31,15	31,81
hm^2/R théoriques	0,14	1,08	2,28	3,46

La seconde ligne est recopiée à partir de l'écran. Pour fixer nos idées nous prendrons arbitrairement une aberration zéro sur la zone 3 où l'on obtient les meilleurs pointés ; il faut donc retrancher à tous nos nombres la constante :

$$31,15 - 2,28 = 28,87$$

ce qui donne :

$$- 0,84 \quad 0,77 \quad 2,28 \quad 2,94.$$

Comparons ces nombres aux valeurs théoriques ; ce n'est pas de chance ! Nous voyons que tous nos pointés autres que sur la zone 3, prise comme zéro, présentent des écarts négatifs ; c'est donc la zone 3 surtout qui est défectueuse et notre constante arbitraire peu heureuse ; pour répartir à peu près les écarts, ajoutons une autre constante donnant une seconde approximation. Prenons par exemple 0,4 en plus, ce qui donne maintenant :

$$- 0,44 \quad 1,07 \quad 2,68 \quad 3,34.$$

⁽¹⁾ Ellison a lancé la mode des miroirs partiellement parabolisés (90% de h^2/R par exemple) pour tenir compte d'un éventuel effet thermique qui ne saurait qu'exceptionnellement compenser ce défaut volontaire permanent, en tous cas c'est bien commode pour justifier les maladroites qui ont l'air d'être faites exprès.

Pour retoucher le miroir, un croquis qualitatif du demi-méridien est suffisant. On le trace à main levée et non à l'échelle sur le cahier de retouches (fig. 50) en faisant le petit raisonnement suivant : les abscisses représentent les hauteurs des zones 4 parallèles aux ordonnées figurent grossièrement les limites des 4 fenêtres, les ordonnées donneront l'allure du relief. Nous voyons que notre zone 1, avec sa valeur du tirage $-0,44$, a un rayon de courbure trop court de $0,44 + 0,14 = 0,58$ par rapport à la surface de référence choisie. Cela veut dire que la zone 1 est trop creuse et que le demi-côté droit que nous griffonnons monte ; pour la zone 2 l'écart négatif n'est que de $0,01$ et notre

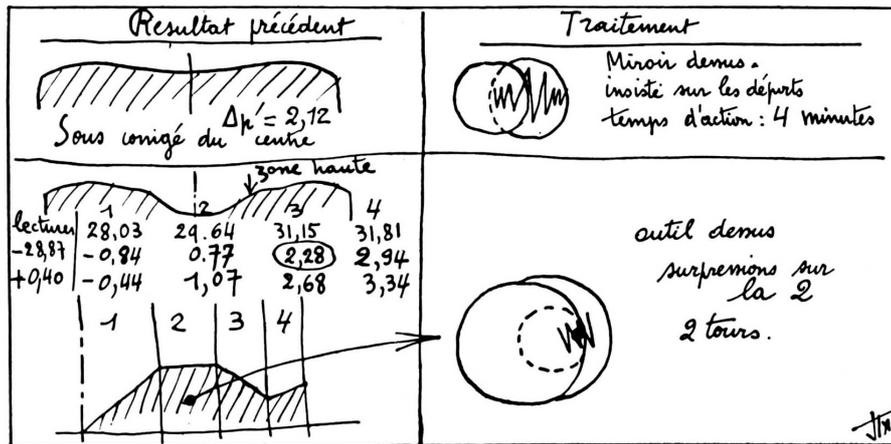


Fig. 50. – Fragment d'un cahier de retouches.

zone tracée est donc pratiquement parallèle à l'axe des abscisses ; pour la zone 3, le résidu est fortement positif : $0,40$; notre surface d'onde descend sensiblement ; enfin pour la zone 4 nous avons un résidu de $-0,11$, la courbe remonte un peu.

La ligne brisée obtenue schématise qualitativement la forme du demi-diamètre droit du miroir par rapport à une ligne horizontale figurant la surface de référence. On voit immédiatement (fig. 50) qu'il y a une zone haute que nous corrigerons en agissant principalement sur la zone 2, avec des suppressions de bord d'outil, par exemple. Quand les écarts ne seront plus longitudinalement que de un ou deux dixièmes de millimètre, il sera temps de faire des mesures soignées et un calcul complet.

46. Réduction des aberrations au plan focal. - Pour savoir si le miroir est bon, nous devons chiffrer ses aberrations dans le plan focal et déterminer l'onde émergente quand il vise une source lumineuse très éloignée (§§ 2 et 3). Les résidus qui nous restent en retranchant des tirages longitudinaux trouvés expérimentalement, une certaine constante bien choisie et l'aberration théorique hm^2/R d'une parabole parfaite, sont les défauts propres au miroir et qui mesurent son aberration longitudinale au centre de courbure : Λ_c ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Nous rappelons que nous empruntons les notations principales de Lunettes et Télescopes et invitons les lecteurs qui ont le minimum de connaissances mathématiques à suivre sur l'original § 115 le principe de la méthode.

Les aberrations longitudinales correspondantes Λf que le miroir présentera au foyer seront quatre fois plus petites. On voit figure 51 le rayon réel HMI émergent au point H, couper l'axe à une distance longitudinale du rayon idéal H'P égale à PI et qui est justement cette aberration longitudinale Λf .

Le segment PM est l'aberration transversale correspondante : λf comme en réalité PI et surtout HH', sont minuscules devant la longueur focale f , on obtiendra les λf avec toute la rigueur utile (ici nous ne faisons pas de mathématiques,

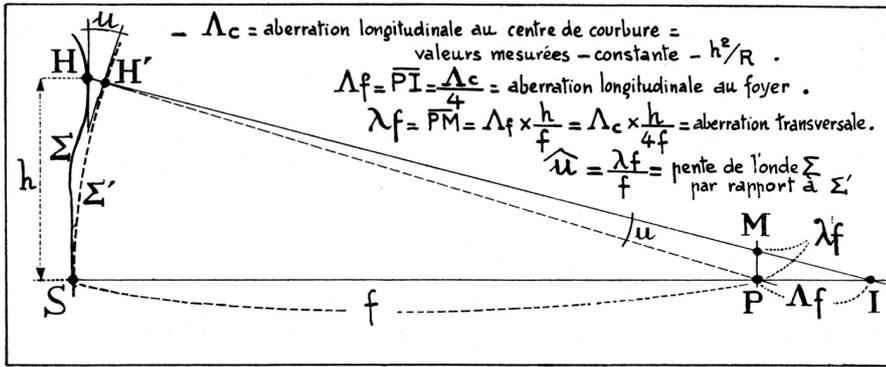


Fig. 51. – Relations entre les aberrations.

mais un miroir) en multipliant les résidus longitudinaux au centre Λ_c par les hauteurs d'incidence h et en divisant par $4f$ les résultats.

La tangente au point H à l'onde réelle Σ fait avec la tangente au point H' à l'onde idéale Σ' le même angle u que les rayons émergents correspondants HM et H'P, cet angle u qui mesure la *pente* de l'onde Σ au point H, s'obtient évidemment (toujours à l'approximation utile) en divisant l'aberration transversale λf par la longueur focale f . En mettant bout à bout ces pentes nous dessinerons schématiquement le profil de la surface d'onde et pourrons chiffrer ses défauts. Pour faire tout cela, il suffit de connaître les quatre règles.

47. **Le bulletin de contrôle.** - La figure 52 donne un exemple de bulletin de contrôle d'un miroir taillé à l'atelier de la Commission, dont nous allons expliquer l'établissement :

Passons sur les différentes constantes mécaniques et optiques du miroir qui sont d'interprétation immédiate.

Les quatre premières lignes du tableau sont recopiées à partir de l'écran à échancrures ; nous savons ce qu'elles veulent dire (§ 38). Il est commode de calculer à l'avance (le miroir ne sera peut-être pas bon du premier coup) ligne 5, les facteurs de hauteur d'incidence : $hm / 4f$ qui donneront les λf au prix d'une seule multiplication par Λ_c .

On inscrit sur la ligne 6 les moyennes d'au moins quatre bons pointés (§ 39) effectués sur un diamètre Φ_1 du miroir, même chose pour la ligne 7 relative à un diamètre Φ_2 perpendiculaire à Φ_1 , (entre les deux séries on a fait tourner avec les précautions d'usage le miroir d'un quart de tour dans son plan), les différences systématiques entre les deux séries ne peuvent servir pour juger l'astigmatisme d'ensemble du miroir parce que la distance miroir

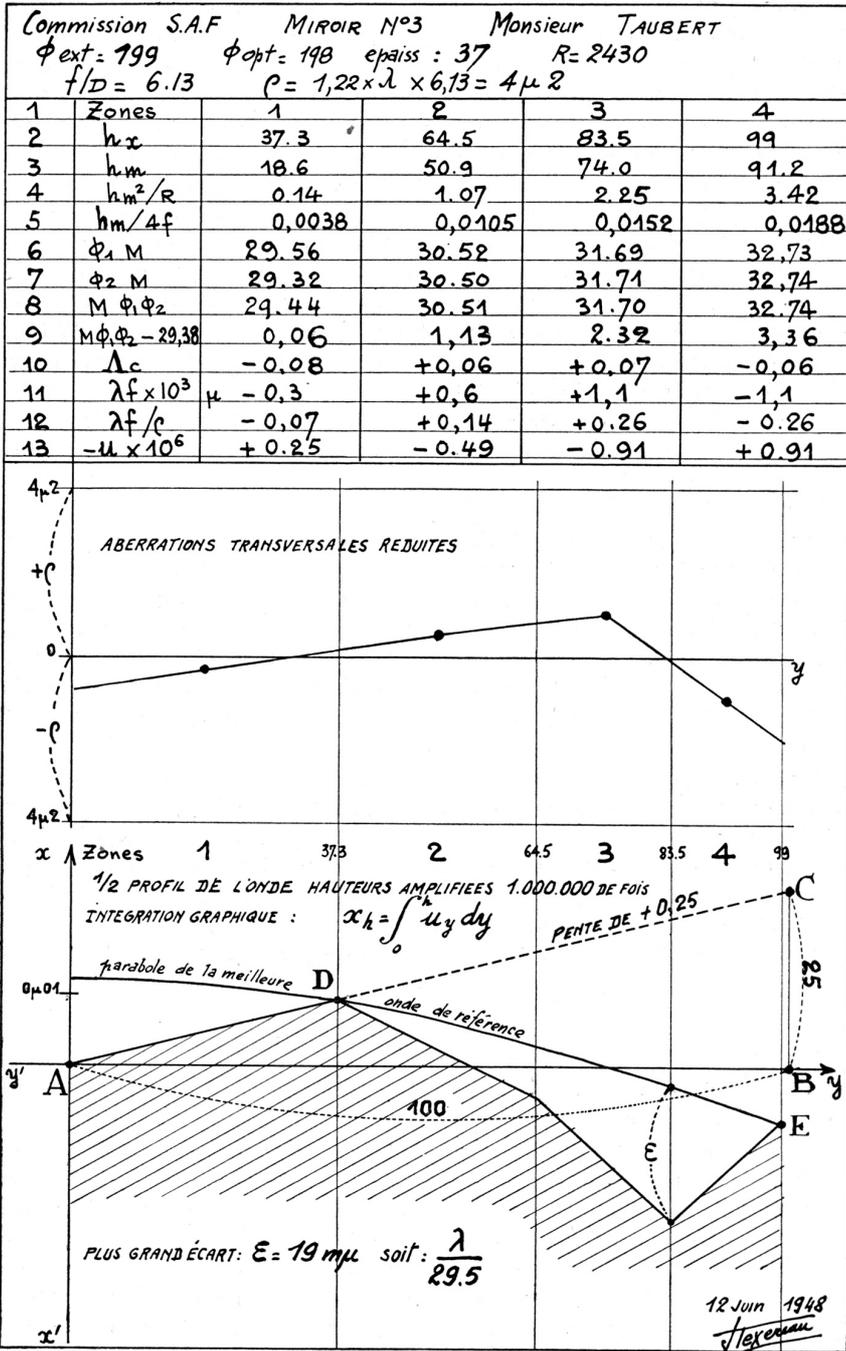


Fig. 52. - Fac-similé d'un bulletin de contrôle d'un miroir.

couteau a probablement changé entre les deux réglages, mais l'astigmatisme zonal pourra être mis en évidence. Si les anomalies longitudinales transformées en λf n'atteignent pas le rayon de la tache de diffraction (voir plus loin), on calculera : ligne 8, la moyenne des lignes 6 et 7 qui sera considérée comme représentant le miroir moyen. Pour la ligne 9, une petite difficulté : il faut trouver par tâtonnements la constante à retrancher aux nombres de la ligne 8 pour encadrer le mieux possible les écarts par rapport à la parabole théorique. Quand le tirage est bien choisi, on doit obtenir ligne 10 des résidus longitudinaux (ligne 9 moins ligne 4) qui, après multiplication par les facteurs de hauteur d'incidence (ligne 5) donneront ligne 11 des aberrations transversales λf maxima égales et de signes contraires. On est alors ajusté pour le plan du cercle de moindre aberration, un coup d'œil sur la ligne 5 nous montre qu'il faut laisser des écarts longitudinaux environ cinq fois plus faibles sur la zone 4 que sur la zone 1 pour obtenir ce résultat.

La ligne 12 est celle des *aberrations transversales réduites* ; c'est-à-dire prises avec le rayon ρ de la tache de diffraction comme unité qui vaut. nous le savons (§ 3) :

$$r = 1,22 I \times \frac{f}{D}$$

Enfin sur la ligne 13 figurent les angles u qui seront à prendre avec le signe moins et un facteur de multiplication suffisant pour dessiner l'épure, ici on a pris le facteur un million (10^6), attention aux erreurs de virgule, l'exemple donné suffire pour fixer l'ordre de grandeur des diverses quantités.

Sur les deux graphiques, nous porterons en abscisses les hauteurs d'incidence h à l'échelle grandeur, dans un sens plus général cet axe sera (une fois n'est pas coutume) celui des y . Quatre parallèles aux ordonnées marqueront les limites extérieures (ligne 2) des quatre zones.

Le premier graphique n'est que la traduction de la ligne 12, en ordonnées on a marqué $+\rho$ et $-\rho$ qui figurent les limites de la tache de diffraction théorique.

Les ordonnées x de l'épure du dessous donnent l'écart HH' (fig. 51) entre la surface d'onde sphérique idéale Σ' de sommet S et centre P et la surface d'onde réelle Σ ayant même sommet S.

Au point H la distance $HH' = x_h$ est donné par :

$$x_h = \int_0^h u_y dy.$$

Pas d'affolement, l'opération se fait graphiquement, il n'y a pas même besoin d'un double décimètre si l'on prend du papier à quadrillage millimétrique. Insistons lourdement au risque de faire sourire les « malins » :

Entre les limites de la zone 1 nous avons à porter une pente $-u \times 10^6$ (figure 13) égale à $+0,25$ (la « courbe » monte quand le coefficient est positif, elle descend quand il est négatif), à partir d'une origine arbitraire A de l'axe des ordonnées x (qui est en même temps l'axe du miroir) prenons une longueur AB en abscisse égale par exemple à 100 millimètres, de B montons d'une quantité BC égale à 25 millimètres, joignons AC ; c'est notre première pente qu'il faut arrêter bien entendu au point D où elle traverse la limite des zones 1 et 2, point qui sert d'origine pour porter la seconde pente $-0,49$

dans les limites de la zone 2, et ainsi de suite jusqu'à la zone 4 et au bord du miroir.

Cette ligne brisée n'a évidemment (comme la peinture moderne) qu'un rapport lointain avec l'être physique infiniment complexe qui est la surface d'onde et que nous ne pouvons prétendre analyser avec quatre pentes, mais on représente bien des continents sur un atlas d'écolier !

D'ailleurs ce profil anguleux donne la limite supérieure des écarts, l'erreur commise est donc dans le sens d'une rigueur plus grande. Il reste à comparer cette surface d'onde conventionnelle à la sphère qui s'en écarte le moins possible ; ce n'est pas généralement celle de méridienne Σ' prise comme référence et qui est sur notre épure une droite parallèle à l'axe des abscisses $y'y$ (comme quoi le plan du cercle de moindre aberration n'a pas une vertu particulière). Nous avons bien entendu le droit de chercher le centre d'une onde meilleure, autrement dit de mettre au point ; cette onde de rayon un peu différent doit toucher notre profil accidenté aux deux points les plus saillants qui sont ici D et E. Sur l'épure, le profil de cette sphère, dont les écarts par rapport à Σ sont fonction du carré de la hauteur d'incidence, sera un arc de parabole d'axe $x'x$ assujéti à passer par les points connus D et E. Les coordonnées de ces points permettent le calcul facile du coefficient a de l'équation de la parabole que l'on peut d'ailleurs tracer de « chic » sans grand inconvénient. Nous arrivons au bout ; il ne reste plus qu'à mesurer le plus grand écart de tautochronisme ε entre la ligne brisée et la parabole. N'oublions pas qu'il est ici amplifié un million de fois avant de le comparer à la longueur d'onde : $560 \text{ m}\mu$ de la lumière la plus active sur l'œil, sur notre échelle des ordonnées 1 centimètre représente $0 \text{ }\mu \text{ } 01$, soit $\frac{1}{56}$ d'onde. Ici il est bon de

reprendre contact avec les réalités physiques et d'apprécier la précision réelle du bulletin. Il faut un miroir à surface très douce, mesuré par un excellent opérateur tout à fait intègre pour que la moyenne des 8 pointés, sur des faisceaux à $f / 12$, donne des écarts longitudinaux sûrs à $0^{\text{mm}},01$ près. Les erreurs correspondantes sur l'aberration transverse atteignent donc au minimum plusieurs dixièmes de micron tandis que les erreurs de pente dépassent $2 \cdot 10^{-7}$. Pour éviter le cumul d'erreurs de réduction les calculs du bulletin précédent sont poussés avec une approximation à laquelle il serait ridicule d'attribuer une signification réelle. On retiendra en pratique que dans les meilleures conditions la méthode permet d'approcher la précision de $\lambda / 50$ et même en fait le plus souvent $\lambda / 20$ seulement, ce qui suffit parfaitement. Si par un concours *heureux* de circonstances vous trouvez que votre miroir est à $\lambda / 147,2$ il est préférable de refaire le bulletin en utilisant des pointés faits par un ami exercé et objectif. L'éducation scientifique gagnera ce que l'amour-propre perdra à la confrontation des résultats.

48. Interprétation du bulletin de contrôle. - Ceci intéresse non seulement l'amateur opticien, mais celui qui commande un objectif dont il doit exiger et comprendre le bulletin.

Il y a un double critérium auquel un bon objectif doit satisfaire et qui a été énoncé dans Lunettes et Télescopes, par A. DANJON et A. COUDER, p. 522 :

« 1° Le rayon du cercle de moindre aberration est comparable à celui de

la tache de diffraction théorique, et, en moyenne, les aberrations transversales réduites sont inférieures à l'unité. »

« 2° Le plus grand écart de tautochronisme est au plus égal à un quart d'onde et la majeure partie de la surface du miroir présente des défauts notablement moindres. »

Les deux graphiques du bulletin de contrôle permettent de juger immédiatement si le miroir répond bien à ce double critérium. En général, c'est la première condition qui est la plus difficile à satisfaire, un bulletin sommaire ne comportant que les λf de calcul immédiat peut donc rendre des services importants. Très souvent, on s'impose pour le second critérium une limite plus sévère ; nous avons signalé pourquoi § 4. A l'atelier de la Commission aucun miroir ne sort si son bulletin ne conclut pas à des $\lambda f / \rho \leq 1$ et à des écarts de tautochronisme inférieurs à $\lambda / 10$; encore cette limite est généralement bien loin d'être atteinte. Avec de telles tolérances, il est inutile de chercher un défaut quelconque sur le ciel en regardant des étoiles ; si l'on peut en déceler c'est que le miroir est mal monté ou mal centré. Ajoutons pour ceux qui ne sont que des clients, qu'il ne faut pas se fier à un simple Foucaultgramme, produit par l'opticien et dont les contrastes peuvent être truqués à l'infini. S'il y a un bulletin de contrôle complet, il faut s'assurer de l'échelle d'amplification des ordonnées que l'on prend parfois égale à 10^5 seulement pour montrer des pentes moins effrayantes, parfois encore dans le but évident d'écrire des défauts deux fois plus petits, l'opticien donne le profil des accidents sur le verre et non sur l'onde ; il faut savoir dépister ces petits abus de confiance et demander au besoin des précisions. Si le bulletin est incomplet et ne comporte, par exemple, que les écarts longitudinaux Δc il faut prendre la peine de calculer rapidement à la règle les λf correspondantes, à comparer au rayon de la tache de diffraction. Le grand miroir symbolise notre espérance astronomique, il ne faut pas l'accepter les yeux fermés. Par contre, à moins qu'ils ne soient formidables, les défauts d'abrasion visibles : gris, filandres, rayures, éclats, ne sont guère que des défauts de beauté généralement bénins sur l'image.

La partie la plus délicate de notre entreprise est terminée ; nous serions désolés d'avoir pu rebuter par des descriptions très complètes, les débutants attirés par le travail du verre. Tous les renseignements donnés ne sont pas indispensables pour faire un miroir passable, sinon parfait, mais nous n'avons pas cru devoir limiter le champ d'action de l'amateur soigneux et persévérant qui a la possibilité, donc le devoir, de produire un travail impeccable et de s'assurer qu'il en est ainsi. Cette discipline contribuera à le rendre *digne* de posséder un puissant télescope et l'aidera à dominer la situation, infiniment plus délicate, de l'observation d'une image sur le ciel, perturbée par les abominables remous atmosphériques.