

## CHAPITRE VIII

**LE MIROIR SECONDAIRE CASSEGRAIN**

La principale difficulté de construction d'une combinaison Cassegrain est due au miroir secondaire qui est convexe et ne peut, par conséquent, être étudié par la méthode de Foucault sans recours à des pièces optiques auxiliaires <sup>(1)</sup>. Comme le choix de la méthode de contrôle influe grandement sur toute la conduite du travail nous allons examiner les quatre procédés pratiquement valables :

**74. Contrôle de l'ensemble de la combinaison sur une étoile** (fig. 82 A). - Cette méthode s'applique dans les conditions d'emploi normales du télescope en utilisant une étoile brillante. On suppose que l'instrument complet est disponible et monté en équatorial avec entraînement horaire soigné. Le grand miroir, qui a été séparément étudié et terminé, est aluminé ; le secondaire à l'étude n'est pas encore métallisé. Il faut beaucoup d'expérience pour interpréter correctement un faible défaut par la méthode de Foucault pratiquée visuellement avec une véritable étoile ; les remous turbulents de l'atmosphère rendent illusoire l'égalisation photométrique des fenêtres de l'écran à échancrure. On pourrait intégrer ces remous en prenant des Foucaultgrammes posés quelques minutes mais le dépouillement numérique des clichés serait laborieux puisqu'il exigerait toutes les servitudes de la photométrie photographique. Pour ces raisons il est préférable d'avoir recours à la méthode de Hartmann <sup>(2)</sup>. On opère photographiquement avec une étoile brillante telle que Véga, deux clichés extrafocaux séparés par une distance connue permettent l'enregistrement des traces de pinceaux lumineux isolés par un écran placé à la bouche du télescope, un temps de pose de l'ordre de une minute suffit avec des plaques de sensibilité moyenne même si un seul des miroirs est aluminé. Une petite machine à mesurer permettant de lire le micron est nécessaire pour prendre la distance des pinceaux d'une même zone sur les deux plaques ; puisque l'on connaît en outre la distance axiale qui sépare les deux clichés on en déduit facilement les distances d'intersection pour chaque zone, d'ailleurs avec plus de précision et de sûreté que par égalisation visuelle de fenêtres au Foucaultage. Des détails d'application sont donnés dans l'ouvrage cité.

Reportons-nous à la réduction des mesures (§ 46 et 47), pour prévenir quelques étourderies possibles. Il est clair que l'on met ici directement en

<sup>(1)</sup> Excepté par une méthode proposée par J. H. KING, *Scientific American*, fév. 1945, p. 100 et A.T.M. 2 p. 269, qui consiste à immerger le dos poli du miroir dans une cuve remplie d'un liquide de même indice que le verre. Pratiquement une homogénéité suffisante de l'indice du liquide serait difficile à conserver pendant les mesures.

<sup>(2)</sup> Une description très complète de cette technique est donnée dans *Lunettes et Télescopes*.

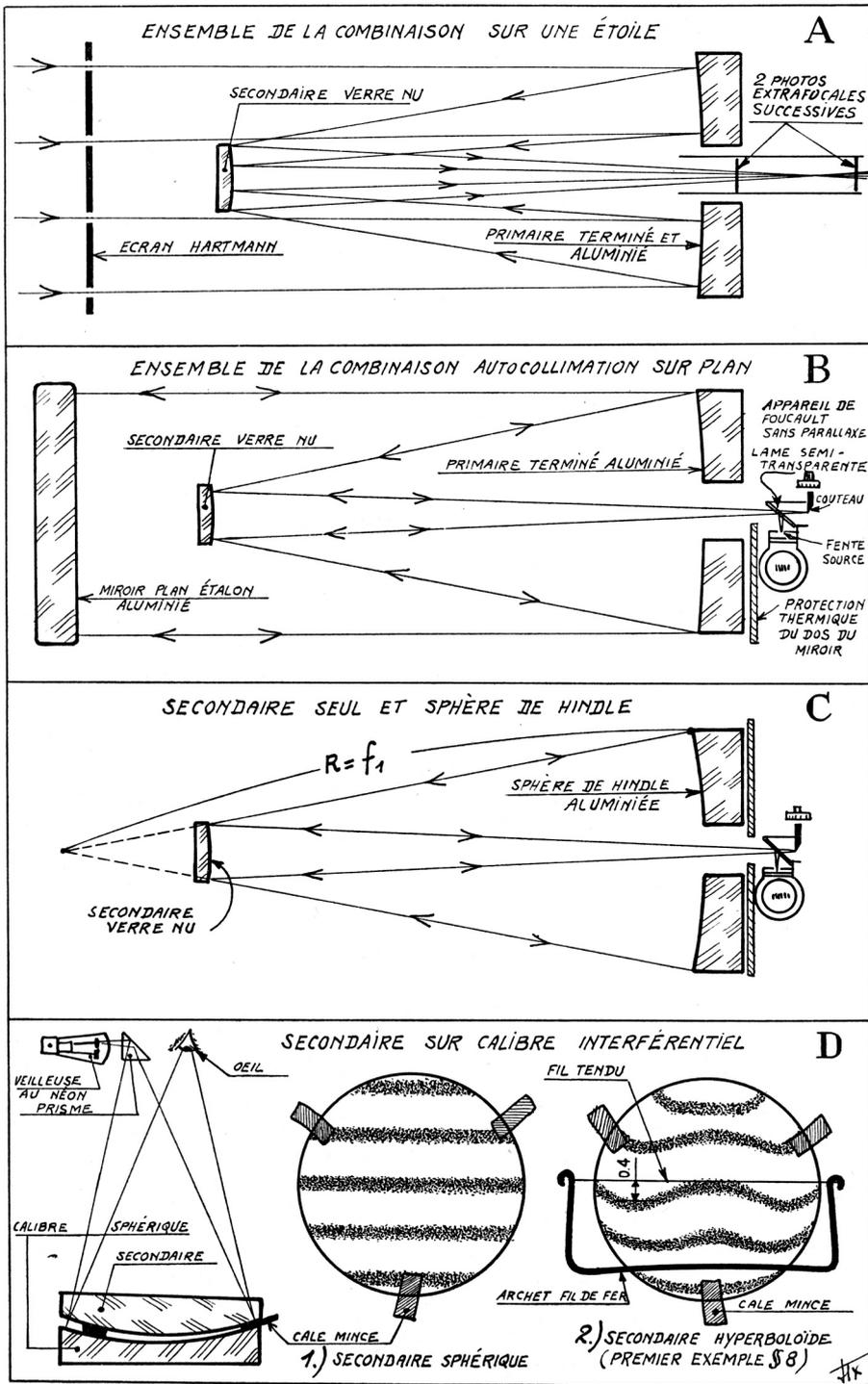


Fig. 82. – Méthodes de contrôle des Cassegrain.

évidence, avec une source à l'infini, les aberrations au foyer ; donc il n'y a pas lieu de retrancher les valeurs de  $hm^2 / R$  ligne 4 (fig. 52) qui n'interviennent que dans les réductions au centre de courbure. De même pour l'ajustage rapide du plan du cercle de moindre aberration puisque l'on met en évidence les aberrations longitudinales  $\Delta F$  au foyer la ligne 5 (fig. 52) comportera les valeurs de  $hm/F$  et non celles de  $hm/4f$ . Enfin les aberrations transversales seront données en utilisant ces valeurs :

$$I F = \Delta F \times \frac{h}{F} \quad (16)$$

Les autres calculs demeurent inchangés.

L'avantage d'une étude directe de la combinaison dans les conditions d'emploi c'est l'incorporation automatique des aberrations thermiques qui interviennent réellement et qui sont parfois importantes dans un grand instrument. Malheureusement le cycle de contrôles et retouches est subordonné au beau temps. L'achèvement d'un secondaire d'un Cassegrain de 60 centimètres pour l'observatoire de Meudon nous a demandé près de six mois en appliquant uniquement ce procédé, tandis qu'à l'Observatoire de Haute-Provence un mois suffit pour le secondaire Cassegrain du télescope de 193 centimètres qui atteint pourtant le diamètre de 52 centimètres.

Dans le cas d'un modeste instrument il est possible d'éviter cette difficulté si l'on dispose d'un local bien clos assez long pour pouvoir placer une étoile artificielle à une trentaine de mètres au moins. Le Foucaultage visuel reprend alors l'avantage dans la mesure où l'air de la pièce peut être maintenu optiquement homogène, ce qui n'est généralement pas facile. Un petit écran à échancrures, homothétique de l'écran normal peut être placé contre le secondaire pour la localisation directe des retouches à faire. La source n'étant plus infiniment éloignée il réapparaît une légère surcorrection sphérique, l'aberration longitudinale est très inférieure à  $hm^2/R$  mais elle n'est pas forcément négligeable.

**75. Contrôle de l'ensemble de la combinaison avec un miroir plan** (fig. 82 B).- « Le miroir plan est pour l'optique expérimentale un ciel artificiel » <sup>(1)</sup>. Si l'on possède un miroir plan sans défaut au moins aussi grand que le grand miroir Cassegrain on peut l'utiliser pour réaliser l'autocollimation. Cette méthode a été suivie notamment par G. W. Ritchey pour le contrôle de la combinaison Cassegrain du télescope de 152 centimètres du Mont Wilson. On emploiera un appareil de Foucault où la source et le couteau sont aussi rapprochés que possible, ou mieux totalement exempt de parallaxe grâce à une lame semi-transparente (fig. 82. B). En effet si la source est extra-axiale le faisceau aller étant réfléchi symétriquement par le miroir plan, nécessairement assez loin, il en résulte que le faisceau réfléchi atteint nos miroirs sur des points d'incidence notablement différents. On voit qu'il y a en tout cinq réflexions, une première fois le télescope, avec la source au foyer, sert de collimateur pour donner des rayons parallèles réfléchis par le plan vers la combinaison qui devient télescope. Les défauts sont donc doublés. Il est nécessaire d'aluminer le plan et le grand miroir pour conserver assez de lumière. A défaut d'une partie mécanique complètement achevée le montage doit comporter des réglages fins par vis des trois miroirs et malgré cela la collimation constitue un bon exercice pour un débutant. Cette méthode ne permet, comme la précédente, que le contrôle du faisceau axial, la fraction du secondaire, qui excède ce faisceau dans le cas où l'on désire étendre le champ, ne peut être contrôlée en une fois. Peu d'amateurs disposent d'un plan assez bon, remarquons que si les défauts zonaux du plan sont gênants par contre une faible courbure est sans importance pour une autocollimation, elle revient à viser la source à une distance finie mais toujours assez grande pour que l'application des formules (17) et (18) soit superflue.

**76. Méthode de Hindle** (fig. 82 C) (2). - Associons le miroir secondaire convexe à contrôler, à un grand miroir spécial *sphérique* dont *le rayon de courbure* est égal à la *longueur focale*  $f_1$  du grand miroir de l'instrument. La distance  $d$  des sommets est la même que dans l'instrument.

Il y a cette fois trois réflexions seulement, le faisceau passe deux fois sur le secondaire dont les défauts sont doublés. Le miroir sphérique employé dans ces conditions donne un faisceau stigmatique équivalent à celui du paraboloïde avec source à l'infini. Le Foucaultage révèle donc directement les défauts du secondaire doublés, comme par la méthode précédente. Les mesures se feront avec petit écran à échancrures et réduction des aberrations comme avec un faisceau incident parallèle. Si la sphère de Hindle est un peu plus grande que le miroir on pourra contrôler un secondaire surdimensionné pour des raisons de champ. L'inconvénient pratique évident de cette méthode est la nécessité de tailler un second grand miroir dont les caractéristiques, sans être imposées avec beaucoup de rigueur, n'en sont pas moins telles qu'il faudrait supposer la possession préalable d'une singulière collection de miroirs sphériques pour éviter ce travail spécial dans un cas donné. La sphère de Hindle se justifierait par contre pour la réalisation en série de Cassegrains standard.

<sup>(1)</sup> Léon FOUCAULT, *Œuvres de Foucault*, p. 287.

<sup>(2)</sup> J. H. HINDLE « A New test for Cassegrainian and Gregorian secondary mirrors » *Monthly notices of Royal Astronomical Society*, March 1911, reproduit dans A.T.M.I. p. 225.

77. **Contrôle du secondaire sur calibre concave** (fig. 82 D). - Cette méthode a été trouvée et enseignée par A. Couder en 1945-1946 au laboratoire d'optique de l'observatoire de Paris. Elle a été retrouvée indépendamment par J.P. Hamilton qui en a publié une bonne description en 1952 <sup>(1)</sup>. Les explications données § 51 et 52 à propos du contrôle interférentiel des miroirs plans nous permettront d'être bref. On commence par tailler *un petit miroir sphérique concave* au moins aussi grand que le convexe à réaliser et de même rayon  $r_2$ . La vérification de la sphéricité de ce miroir par la méthode de Foucault n'offre évidemment aucune difficulté, il faut seulement prendre garde avec un aussi petit miroir aux aberrations extra-axiales du

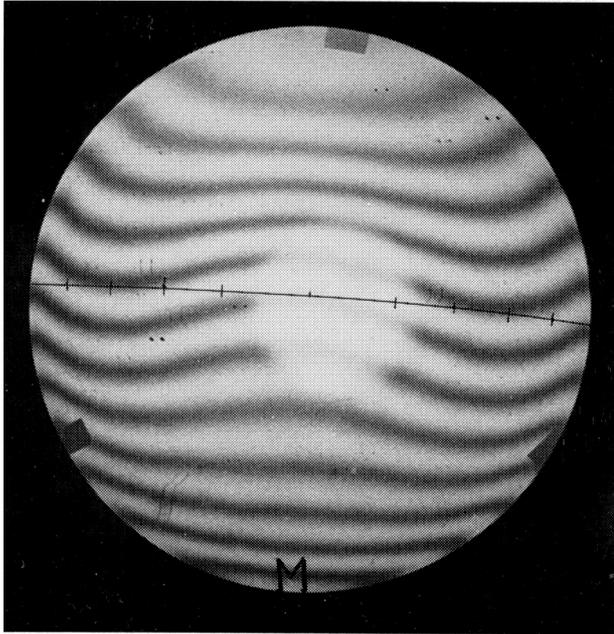


Fig. 83. - Franges d'un hyperboloïde.  $D = 97$  ;  $r_2 = 1312$  ;  $b_2 = 3,13$  ;  $z = 0,25\mu$

montage qui peuvent être gênantes si la source n'est pas très près ou confondue avec l'image de retour. Ce miroir sphérique va servir de *calibre interférentiel*. Si le miroir secondaire convexe a le dos poli (glace de Saint-Gobain), les franges d'interférence s'observent en plaçant la source de lumière et l'œil au voisinage du centre de courbure du calibre. Trois cales de papier séparent les deux verres et l'on oriente aussi vers soi, comme d'habitude, la cale mince du coin d'air. Supposons que notre miroir convexe soit également *sphérique et de même rayon que le calibre*, les franges de coin sont alors rectilignes comme avec des verres plans (fig. 82 D1). Nous savons que la frange, diamétrale peut être assimilée à la déformation de la section méridienne du verre contrôlé. A chaque fois que cette déformation par rapport à la ligne droite atteint

<sup>(1)</sup> J. P. HAMILTON. « A test for the Cassegrain Secondary ». *The journal of the Astronomical Society of Victoria*. Feb. 1952, p. 7.

un interfrange nous en déduisons un écart de  $\lambda / 2$ , soit  $0,3 \mu$  avec la longueur d'onde efficace du néon. En particulier si nous voulons vérifier que le secondaire est hyperbolique, il suffit de voir si la frange centrale dessine bien la figure 76 II quand la cale est placée comme l'indique la figure 82 D2 ; en outre l'écart maximum  $\epsilon$  pour la zone 0,7 peut être estimé en dixièmes d'interfranges et confronté à la déformation calculée par la formule (15). Par exemple les franges représentées figure 82 D2 se rapportent au miroir secondaire de la combinaison proposée comme premier exemple (p. 128) pour lequel  $\epsilon$  vaut  $0 \mu 12$ , soit  $0,12 \times 0,3 = 0,4$  interfrange.

Sous cette forme, on remarquera que la méthode exige la taille du miroir convexe à un rayon rigoureusement imposé : celui du calibre actuellement réalisé. Pour satisfaire cette concordance, qui correspond aux franges de la fig. 82 D, on est souvent amené à des retouches plus laborieuses de l'hyperbolisation proprement dite. En fait il est possible de vérifier l'hyperboloïde même si à la déformation s'ajoute une différence de courbure de quelques franges entre le miroir et son calibre. Il suffit de calculer le contour des nouvelles franges d'égale épaisseur <sup>(1)</sup>. Si l'on préfère opérer avec des cales d'égale épaisseur on calculera le changement de diamètre des anneaux de Newton correspondant à la déformation. Nous préférons cependant ajuster les rayons des surfaces à mieux de une frange près avant d'hyperboliser, cela permet un contrôle plus direct et plus sûr de la déformation, d'ailleurs l'approximation du dixième d'interfrange suffit pour le secondaire d'un modeste instrument.

Dans le cas d'une déformation importante on peut préférer figurer le calibre concave facile à contrôler exactement par foucaultage en utilisant un écran à échancrures comme pour un paraboloïde mais en utilisant les valeurs de  $\Delta p'$  calculées par la formule (13) p.127 et la valeur de  $b_2$  du secondaire. Le secondaire sera terminé quand on observera des franges droites sur le calibre déformé.

Cette méthode est la plus facile à mettre en œuvre pour un amateur dépourvu de pièces de contrôle.

Nous allons maintenant donner les détails pratiques du travail dans le cas où l'on a choisi ce procédé de vérification.

**78. Méthode générale de travail des petits miroirs.** - Les secondaires de télescopes d'amateurs de 200 à 300 mm ont généralement un diamètre compris entre 30 et 80 mm. Tailler très exactement un tel miroir est plus difficile qu'on ne pourrait le supposer avant d'avoir l'expérience de ce travail. Le procédé « à poste fixe » si simple et si efficace quand il s'agit d'un disque de 200 x 35 devient de plus en plus délicat et incertain si l'on descend en dessous de 150 et surtout de 100 mm. Avec des miroirs aussi légers les pressions involontaires des mains donnent lieu à des surprises désagréables. Le travail assis devant le verre où l'outil tournant lentement sur un axe vertical facilite beaucoup les choses. Le tour à pédales classique des opticiens <sup>(2)</sup> est considéré comme la machine la mieux adaptée aux petits travaux d'optique de précision (fig. 84). Si l'on peut disposer d'un tel tour il faudra choisir la vitesse la plus lente et actionner les pédales aussi lentement et régulièrement que possible au moins pendant le polissage de précision. Il est possible d'improviser, pour un travail occasionnel, un tour utilisant directement l'axe lent du moteur à réducteur à vis tangente pourvu que sa rotation n'excède pas 15 t/mn (fig. 85). L'outillage industriel - balles et bassins à ébaucher, à doucir, à bloquer,

<sup>(1)</sup> Cette famille de courbes est donnée jusqu'à  $\pm 2$  franges dans l'article de J. P. HAMILTON cité plus haut.

<sup>(2)</sup> Constructeurs CLAVE, 9, rue Olivier Métra, Paris 20<sup>e</sup>

polissoirs - comporte une queue filetée au diamètre standard de 25 / 250 reçue par les adaptateurs des broches des tours. Les verres sont glantés au ciment d'opticien ou à l'arcanson sur des outils à bloquer <sup>(1)</sup>. Nous préférons porter les verres sans contraintes au moyen d'adaptateurs spéciaux qui reçoivent les verres sur un disque de drap sans serrage latéral. Cette

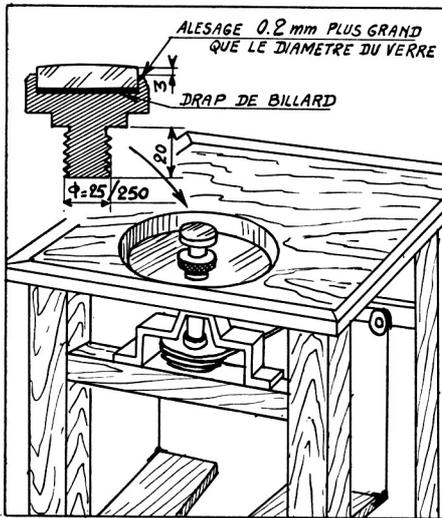


Fig. 84. - Tour à pédales.

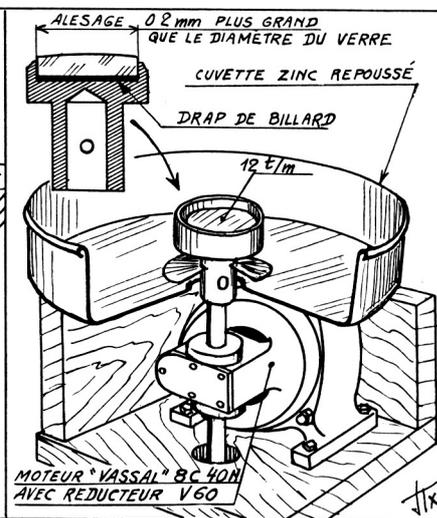


Fig. 85. - Tour à moteur.

disposition permet en outre de contrôler ou d'intervertir les verres sans avoir à les déglanter et les recoller à chaque fois. Les boîtes d'adaptation sont tournées dans un alliage léger, voire simplement en bois dur, elles peuvent se monter directement sur l'axe du tour ou simplement être collées sur un plan faisant déjà partie de l'outillage de la machine.

**79. Débordage.** - Une chute de glace de Saint-Gobain de 10 à 15 mm d'épaisseur peut servir de matière première pour le miroir et l'outil. Après un découpage sommaire à la roulette (fig. 60) ou au « biscuit-cutter » (fig. 61) le verre est collé à l'arcanson sur une molette vissant sur le nez du tour (fig. 86). Avant refroidissement complet de l'arcanson il faut corriger la position du verre de manière à centrer au mieux le contour irrégulier et à assurer la normalité des faces polies avec l'axe de la machine. Un moyen classique pour vérifier que cette dernière condition est remplie consiste à s'assurer de l'immobilité du reflet, d'une lampe ou d'une fenêtre, donné par la face supérieure du verre. Ce centrage dit « à la lumière » se fait avec beaucoup de soin pour une lentille à insérer dans un système de forte convergence, qui doit être centré par construction, mais ici une vérification approximative suffit amplement. Il faut attendre le refroidissement complet de l'arcanson avant d'entreprendre le rodage du bord. Si ce dernier est irrégulier on commencera par une égalisation sommaire « à la gouttière » (fig. 17 A, p. 29) utilisée avec de l'émeri 1 m, le tour à pédale étant actionné à une vitesse de l'ordre de 100 t/mn. Pour rendre

<sup>(1)</sup> Pour détails sur ces travaux classiques, consulter le *Guide de l'ouvrier en verre d'optique de précision*, Colonel DEVE (Ed. Revue d'Optique).

le verre exactement cylindrique on approche tangentiellement un fer articulé sur un point fixe et poussé par une vis d'avance (fig. 86). L'émeri 1 ou 2 m est employé tant que le bruit d'abrasion indique une discontinuité au simple contact, sans pression, du fer enduit d'émeri humide. Le changement d'émeri sera accompagné d'un déplacement du fer marqué par l'usure tangentielle, ou de son remplacement par une lame de laiton qui permettra d'obtenir un beau grain avec de l'émeri 10 m et pourra servir également pour biseauter légèrement les arêtes fragiles. Les défauts d'équerrage de la tranche avec les faces du miroir se corrigent par inclinaison du fer.

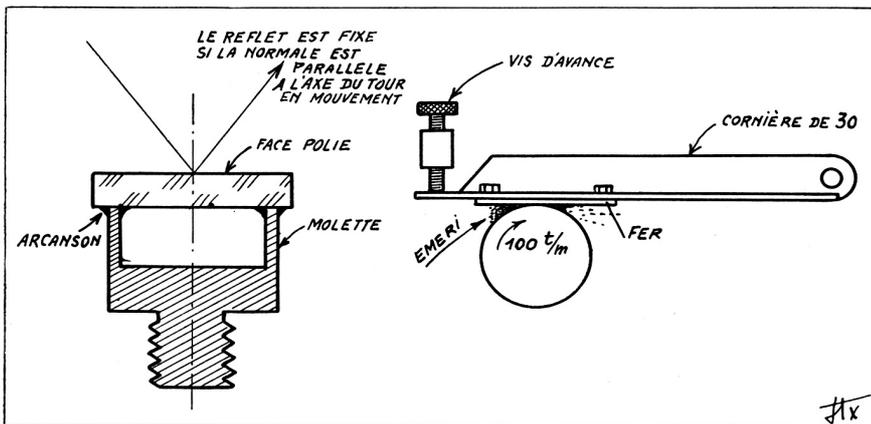


Fig. 86. - Débordage « à la lumière » d'un petit miroir.

80. **Ébauchage.** - Le travail verre sur verre donne ici simultanément deux pièces intéressantes qui seront polies toutes deux par application du contrôle interférentiel (§ 77). Le verre convexe est le miroir, dont le dos, qui doit rester poli, sera protégé par un vernis gomme laque. L'outil concave sera ultérieurement poli pour devenir calibre, il est avantageux de le découper environ 10% plus grand que le miroir, ce qui ne perturbe pas l'abrasion de manière gênante et permettra de négliger éventuellement un bord rabattu inopportun. L'ébauchage se conduit comme au poste fixe, le verre à convexer étant en dessous bien entendu, c'est-à-dire porté dans la boîte d'adaptation au nez du tour. Vu la faible quantité de verre à enlever, l'émeri 1 ou 2 m et les grandes courses  $\frac{4}{5} D$  peu décentrées suffisent pour obtenir rapidement la courbure. Un gabarit de zinc tranché directement au rayon de courbure calculé  $r_2$  suffit pour vérifier l'ébauchage. On ne manquera pas de régulariser la courbure en réduisant l'amplitude des courses à  $\frac{1}{3} D$  à la fin de l'ébauchage et au besoin en intervertissant les verres qui nécessitent deux adaptateurs différents. Après le nettoyage et les précautions habituelles, on peut passer aux émeris 5 et 10 m et à employer avec des courses normales plutôt courtes puisque l'outil concave, trop grand, a plutôt tendance à rabattre le bord du miroir. L'intervention des disques est à utiliser non seulement pour corriger un rayon de courbure trop long ou trop court mais systématiquement à chaque séchée pour que les verres s'ajustent aussi exactement que possible à la même courbe.

81. **Sphérométrie.** - La précision du contrôle possible avec un simple gabarit en zinc (fig. 20 A, p. 33) laisse un peu désirer pour la vérification du rayon de courbure d'un secondaire Cassegrain. La longueur focale résultante et les points conjugués sont très sensibles à ce paramètre.

Pour mesurer la flèche avec précision on peut utiliser un sphéromètre à bague dont la figure 87 donne la disposition. La bague, tournée dans de l'acier dur, a un diamètre un peu inférieur à celui du verre à contrôler ; sa face de contact est rectifiée, après trempe ou cémentation, par rodage à l'émeri 5 et 10 m, sur un plan en fonte par exemple. L'arête qui définit le rayon du petit

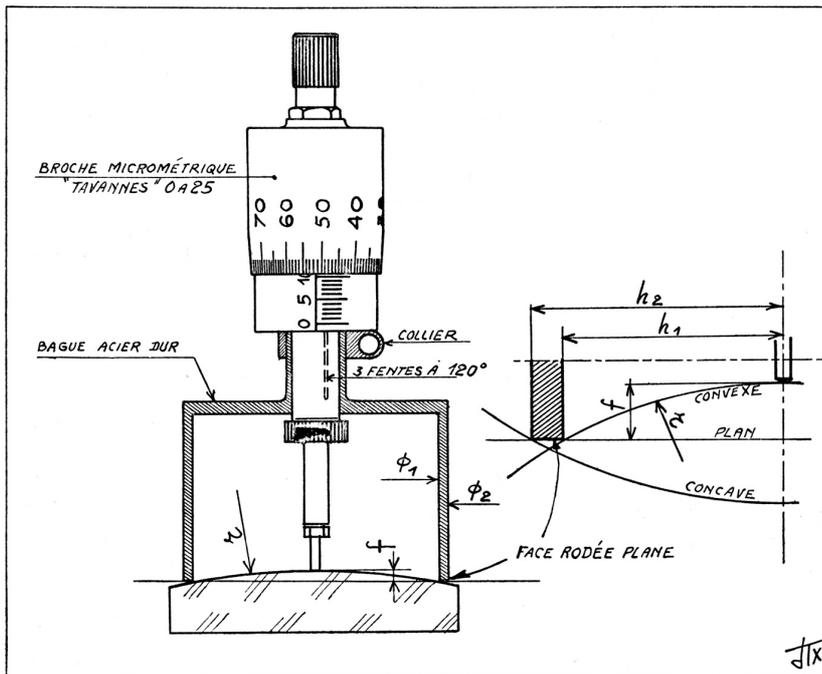


Fig. 87. - Sphéromètre à bague.

cercle de contact de la sphère doit être bien vive. Un pied à coulisse permet de mesurer cette constante avec précision dans le cas des verres convexes :  $\Phi_1/2 = h_1$  et des verres concaves  $\Phi_2/2 = h_2$ . La bague est munie d'un forage axial à fentes d'élasticité et collier de blocage qui reçoit le canon rectifié ( $\Phi = 10,00$ ) d'une butée micrométrique de palmer moderne d'horloger <sup>(1)</sup>. Cet organe de mesure s'adaptant facilement à des montages très variés, par exemple pour des contrôles d'épaisseurs ou de parallélisme de lames de quartz pour filtres biréfringents, pour fermeture de télescopes, de lames de Schmidt, de lentilles d'objectifs, etc..., nous n'hésitons pas à conseiller de choisir la meilleure vis possible à ceux qui envisagent d'autres travaux. Le pas de 1 mm est à préférer à celui de 0,5, le tambour chromé divisé doit être de grand diamètre pour permettre

<sup>(1)</sup> Fabriqué par les Ets TAVANNES, 55 rue de Rivoli, Paris 1<sup>er</sup>

l'interpolation facile du micron. La touche de contact doit être réduite à 2 mm de diamètre maximum ou même rectifiée par rodage et polie comme une petite surface convexe si l'on craint une erreur de constante en mesurant un verre concave de court rayon. Par contre la complication de la touche non tournante avec la vis est inutile pour ce genre de mesures. Le fini d'exécution doit permettre une rotation extrêmement douce de la vis. Si l'on se garde d'utiliser le limiteur de couple de l'appareil, toujours réglé trop dur, il est possible, quoi qu'en puissent dire les traités de mécanique de licence, de définir un contact avec une fidélité de un micron par la simple appréciation de la dureté du tambour délicatement manipulé. Une première lecture du contact de la vis se fait le sphéromètre étant posé sur un plan de référence. Le plan peut être une pièce d'optique sacrifiée pour cet usage mais il est préférable de préparer une fois pour toutes un verre finement douci éclairci seulement un quart d'heure sur un polissoir à la poix pour permettre une vérification interférentielle de la planéité. La seconde lecture s'opère sphéromètre posé sur le verre. Pour assurer une bonne reproductibilité de la pression de contact aux deux expériences, il faut manœuvrer la vis micrométrique très lentement et bien enregistrer la sensation du contact franc correspondant à une décharge de 1/3 ou de la moitié du poids de l'appareil sur la bague. On peut aussi essayer successivement les différents microns croissants en appréciant la décharge de la bague qui rend de plus en plus facile une petite rotation sur le douci. La soustraction des deux lectures donne la flèche  $f$  du verre sur la portée du sphéromètre. Le rayon de courbure  $r$  correspondant se calcule par :

$$r = \frac{h^2}{2f} + \frac{f}{2} \quad (19)$$

Il est pratique d'inscrire sur l'appareil les constantes  $h_1^2/2$  et  $h_2^2/2$  pour les verres convexes et concaves. Comme le terme  $f/2$  est souvent négligeable, pour les miroirs astronomiques, où  $f$  est petit devant  $r$ , une seule division donnera  $r$ ; *exemple toutes cotes en millimètres* :

On utilise un sphéromètre à bague de diamètre intérieur  $\Phi_1 = 52$ , donc  $h_1 = 26$ ;  $h_1^2 = 676$ ;  $h_1^2/2 = 338$ , c'est la constante à retenir pour les verres convexes.

La lecture sur plan a donné le chiffre 10,334 ; la lecture sur le miroir convexe 10,993 ; on en déduit  $f = 10,993 - 10,334 = 0,659$ , le rayon cherché est donc  $r = 338 / 0,659 = 513$ .

Si l'on veut éviter toute approximation nuisible de calcul, on poussera la division à une décimale de plus, ici on écrira 512,9 et l'on ajoutera  $f/2$ , c'est-à-dire 0,3, ce qui donne le rayon plus exact 513,2. Mais n'oublions jamais la signification physique de la mesure limitée au micron sensiblement, ce qui ici représente une approximation de  $\pm 0,8$  mm sur le rayon <sup>(1)</sup>.

**82. Doucissage.** - Il y a intérêt à respecter d'assez près le rayon de courbure final dès le début du doucissage. Ceci permet d'invertir souvent la position outil et miroir et conduit plus facilement à des surfaces parfaitement réunies, c'est-à-dire ayant exactement le même rayon de courbure. Pour de

<sup>(1)</sup> Le sphéromètre à flexion de A. Couder permet seul d'atteindre l'approximation du dixième de micron tandis que les comparateurs à montre ne sont, en général, pas fidèles à mieux de plusieurs microns près, sauf quand les potences support sont très rigides.

si petits miroirs, 2 ou 3 séchés de chaque émeri 20 m et 40 m ou de BM 303 et BM 303 1/2 suffisent à rattraper le grain. Le contrôle final du rayon de courbure doit porter sur le miroir *et sur l'outil*. On doit s'assurer que les flèches trouvées sont exactement concordantes (compte tenu de la constante différente du sphéromètre bien entendu). En effet, une différence de  $2 \mu$ , Soit environ 7 franges, serait déjà très difficile à rattraper au polissage. Une réunion plus parfaite des deux disques pourra s'obtenir éventuellement avec un émeri plus fin : 60 m ou BM 304 ou même du BM 305, la dernière séchée du raffinage étant conduite partiellement outil dessus et partiellement dessous.

**83. Polissage et retouche.** – Les deux polissoirs peuvent être découpés dans du bois contreplaqué ou non de 15 mm d'épaisseur. Ils sont tournés au diamètre des verres correspondants pour permettre l'intervention immédiate verre-outil et au rayon de courbure, vérifié avec assez d'exactitude par le

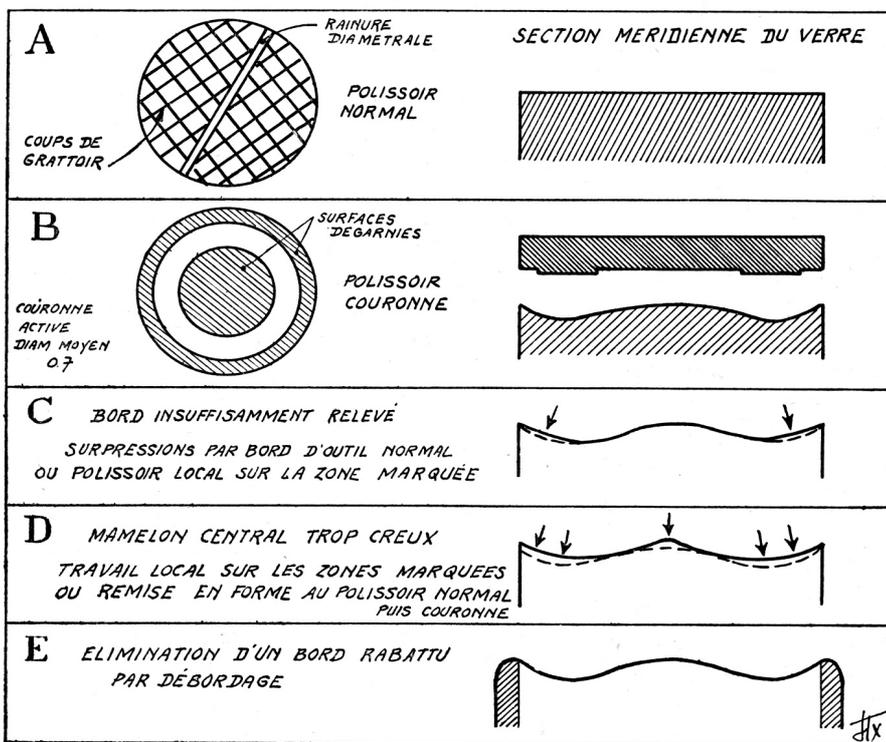


Fig. 88. Mise en forme de l'hyperboloïde.

gabarit en zinc. Ces deux disques-outils sont paraffinés par immersion totale. Un polissoir plein non carrelé suffit pour de si petits miroirs. Il suffit de verser un peu de poix chaude au centre de l'outil, un papier serré au bord permet d'atteindre une épaisseur de poix d'environ 6 mm. Dès que le refroidissement est suffisant pour que l'on puisse arracher le papier du bord, d'un mouvement un peu brusque, on procède au pressage du verre, d'abord avec une forte

pression et interposition de papier de soie et finalement au rouge. Une rainure diamétrale peut être grattée sur la poix ainsi qu'un carrelage (fig.88 A) ou une spirale de dégarnis réalisés au grattoir bien tranchant. Ces dégarnis sont refaits régulièrement tout au long du travail pour améliorer l'adhérence.

Comme le premier souci est de savoir si les verres ont des rayons suffisamment voisins, on commence par éclaircir sommairement, mais uniformément sur toute la surface, le calibre puis le miroir (1 /4 d'heure chacun) pour procéder à un premier contrôle interférentiel sommaire. S'il indique une différence de courbure notable, supérieure à 8 ou 10 franges, il vaut mieux reprendre le douci pour tâcher de «réunir» les verres avec plus d'exactitude. Une différence de courbure concave - verres se touchant au bord - est plus difficile à rattraper qu'une convexité relative ; il est même souhaitable de partir avec une convexité de 3 ou 4 franges, ce qui permettra de conduire le polissage plus facilement. Les corrections de courbure étant beaucoup plus aisées tant que les verres ne sont pas complètement polis, il vaut mieux ne pas achever tout de suite le calibre mais pousser le polissage du miroir à 75% environ en s'approchant de la courbure du calibre par le simple choix de la position miroir outil. S'il faut convexer, le miroir est dessous bien entendu et vice versa pour concaver. Cependant il faut veiller à ce que le gris ne soit pas trop inégalement réparti entre le centre et le bord. Le polissage du calibre est repris avec la disposition convenable pour réduire la différence de courbure résiduelle avec le miroir ; des courses plus longues que la normale (2/3 à 3/4 D) pourront aider si besoin est, cette correction, mais attention à la déformation ! Naturellement il est superflu de polir complètement le calibre ; dès que les verres ne diffèrent plus que de un ou deux anneaux, il faut procéder à la mise en forme sphérique du calibre, ce qui, à l'approximation qui nous intéresse (0,1 frange), n'est pas si facile que le croient les ignorants.

Le contrôle du calibre se fait aisément par la méthode de Foucault (§ 29 et fig. 33, p. 55 et suivantes). Si besoin est, l'appareil sera légèrement modifié par adjonction à la lanterne d'un petit prisme à réflexion totale permettant d'approcher la fente source très près du couteau (fig. 34, p. 59). Il ne faut pas s'écarter de plus de 10 mm de l'axe d'un miroir de 500 mm de rayon environ si l'on veut ignorer les aberrations extra-axiales du montage. De même que pour le grand miroir, on doit rechercher à obtenir d'emblée la meilleure forme possible. N'hésitons pas à quelques redites vu l'importance de ce résultat. Travailler dans un local dont la température est de 20 à 24° C. Utiliser un polissoir en bonne poix pure plutôt un peu dure pour un petit verre (l'ongle marque faiblement sous une forte pression) mais surtout pas desséchée par un chauffage brutal (§ 12, p. 24). Travailler longtemps par petites séchées efficaces poussées assez loin avec des courses 1/3 D. Limiter la rotation du tour à une vitesse lente, c'est le mouvement de va-et-vient exercé à la main qui doit l'emporter de beaucoup. Après 3 ou 4 séchées, la poix doit avoir une surface uniformément rouge et mate et dégager son odeur caractéristique beaucoup plus nettement qu'à froid. Renouveler les dégarnis (fig. 88 A) qui entretiennent l'adhérence. Le régime se règle par la quantité de rouge ou d'oxyde de zirconium et d'eau, ainsi que par la proportion des deux, que l'on apporte à chaque séchée. Il faut une sérieuse expérience pour entretenir des séchées efficaces et un polissoir impeccable. Les débutants

mettent souvent trop de rouge à la fois ou trop d'eau ; en cours de travail, une seule trace de pinceau à rouge ou de blanc sur le verre ou l'outil doit suffire pour faire une séchée. Tout en croyant appliquer ces conseils à la lettre, beaucoup sont étonnés des défauts zonaux paraissant irréductibles qu'ils engendrent régulièrement. Un régime thermique insuffisant (travail trop bref, séchées insuffisantes) se traduit souvent par une surface à bord rabattu et bosse centrale (fig. 33 D, p. 57). La retouche de la bosse centrale n'est pas bien difficile, verre dessus en surplomb sur l'outil. Quant au bord rabattu, dont nous déconseillons la retouche sur un petit verre, on pourra le négliger si l'excédent de diamètre du calibre prévu au début est suffisant, sinon reprendre le travail en améliorant sa technique.

Une fois que le Foucaultage montre que le calibre est bien sphérique (fig. 33 C, p.57) dans la portion utile, il ne reste plus qu'à terminer le surfaçage du miroir convexe. Les franges d'interférence observées entre le calibre sphérique et le miroir actuel révèlent en général à la fois une différence de courbure et une déformation parfois directement exploitable pour amorcer l'hyperbole. Mais la méthode normale la plus sûre consiste à corriger d'abord la courbure et à mettre le miroir sphérique de manière à obtenir les franges rectilignes de la figure 82 D. Il ne reste plus qu'à réaliser l'hyperboloïde, ce qui est bien peu de chose comparé au travail précédent. Quand la déformation n'excède pas 0,1 à 0,2 frange, une retouche locale effectuée avec le pouce, l'index au besoin, peut suffire (§ 43). Mais en général il est préférable de dégarnir le polissoir normal en forme de couronne de rayon moyen 0,7 (fig. 88 B) employée avec des courses un peu courtes à 1/4 à 1/3 D. Outre la vérification de la différence de cote maximum  $\varepsilon$  sur la zone 0,7 (fig. 82 D), on doit vérifier que la courbe présente bien l'allure voulue. Ceux qui ne sont pas assez familiers avec cette déformation peuvent découper un gabarit en papier donnant le contour de la frange centrale, pour un interfrange donné, calculé par l'équation (14). La figure 88 donne quelques exemples d'hyperboloïdes et leur retouche. En figure 88 C le bord relevé est insuffisant, un polissoir local agissant sur la zone à déprimer pourra compléter l'action de l'outil couronne. Parfois c'est le mamelon central qui ne vient pas avec le profil exact (fig. 88 D), on peut essayer un travail local mais il est souvent avantageux de reprendre la mise en forme après retour vers la sphère. Certains opérateurs ne parviennent pas, quoi qu'ils fassent, à éviter le bord rabattu. Quand ce défaut n'est pas entièrement caché par la monture, il leur reste la possibilité de tailler un miroir surdimensionné, comme le calibre, pris dans un verre d'optique recuit fin, qui pourra être débordé après achèvement complet de l'hyperboloïde sur le diamètre utilisé (fig. 88 E).

