

CHAPITRE X

LAMES DE FERMETURE

87. **Utilité d'une lame de fermeture.** – Reportons-nous à la discussion générale du § 6, p. 9, et à l'étude de la turbulence chapitre XV ; il apparaît que le principal inconvénient du télescope, comparé à une lunette, est une sensibilité plus grande aux effets thermiques instrumentaux due à l'ouverture supérieure du tube. Il faut distinguer deux effets nuisibles :

1° L'air extérieur brassé par le vent, qui pénètre librement dans le télescope, provoque des échanges thermiques rapides avec les parois du tube, surtout si elles sont métalliques, d'où création de veines d'air à températures donc indices de réfraction un peu différents et déphasage locaux variables et mobiles, Des volutes lents s'élèvent toujours des pièces massives du télescope, sans oublier le miroir principal. De véritables tourbillons turbulents résultent de l'attaque du vent à la bouche de l'instrument.

2° Supposons le milieu ambiant assez stable pour permettre une bonne égalisation thermique malgré la grande inertie du télescope. Les brutaux échanges par convection disparaissent mais il subsiste inévitablement le *rayonnement* des surfaces. En particulier le miroir lui-même rayonne vers le ciel, comme le tube, le miroir secondaire et ses lames support ; toutes ces pièces sont entourées de gaines d'air où le gradient d'indice peut correspondre, très localement heureusement, à des déphasages de $\lambda / 2$! Ces gaines d'air sont *parfaitement stables*, aucune turbulence n'est observable de ce fait mais le premier anneau de la tache de diffraction est très notablement renforcé, inconvénient d'autant plus sensible qu'il s'ajoute à celui de l'obstruction centrale que nous avons examiné § 62. De plus le miroir qui rayonne vers le ciel présente en général une aberration de sphéricité appréciable particulièrement dans le cas d'un disque important assez épais ayant souvent des résidus de trempe.

L'amélioration des tubes de télescopes a fait l'objet de nombreux travaux et les auteurs sont loin d'être d'accord sur les meilleures solutions ce qui souligne leur imperfection. Pendant longtemps les Américains donnèrent la préférence aux tubes en charpente métallique qui éliminent le tirage de la cheminée. Pour les amateurs il s'agissait plutôt d'une mode et de copier les télescopes géants aux effets thermiques d'ailleurs presque totalement ignorés. La charpente peut effectivement donner satisfaction dans une région semi-désertique chaude et sèche ; même dans nos climats elle est supérieure au tube métallique plein calculé trop juste dont tous les effets de parois affectent le faisceau. Cependant

il est clair que la charpente traversée par tous les courants d'air et en particulier par l'air chaud dégagé de l'observateur lui-même, ne peut constituer une solution idéale. Il faut savoir pondérer les avantages de chaque construction. L'égalisation thermique plus rapide du miroir, possible avec un barillet ajouré et une charpente est un avantage secondaire qu'il ne faut pas hésiter à sacrifier en pensant à l'impossibilité d'être le maître de l'homogénéité de l'air dans une telle enceinte. *L'égalisation thermique de l'instrument à l'approximation utile est un leurre.* Le tube carré en bois du télescope standard est une bonne solution pour un 200 ; il faut observer par vent froid pour observer des remous dans le tube et la gaine stable des obstacles du faisceau, est réellement peu importante. Le tube plein largement dimensionné et parois bien calorifugées n'est qu'un palliatif qui devient de plus en plus insuffisant si l'on dépasse 250 ou 300 d'ouverture.

D'un autre côté la ventilation des tubes, qui a fait également l'objet de bien des travaux, n'est pas prête de rallier tous les suffrages. Il semble impossible de déplacer l'air intérieur soit en soufflant soit en aspirant sans provoquer de nouveaux remous. La conductibilité de l'air est trop mauvaise pour qu'une veine créée par détente d'un courant ou compression adiabatique dans un choc contre un obstacle s'estompe par un brassage naturel ou non. Tous les dispositifs de ventilation que nous avons pu expérimenter, certains très élaborés, nous ont donnés des résultats négatifs ou nuls, sauf pour l'élimination de la gaine, de rayonnement, possible si la ventilation est bien étudiée sans qu'on puisse tirer de là un bénéfice réel puisque les remous turbulents abîment l'image bien davantage.

L'on peut enfin chercher à ralentir le plus possible les échanges thermiques dans l'enceinte des faisceaux lumineux en bouchant hermétiquement tous les trous du tube en particulier l'extrémité supérieure, par un hublot de verre : *une lame optique à faces planes et parallèles.* Si, de plus, les parois sont en matériaux mauvais conducteurs les échanges seront suffisamment ralentis pour qu'aucune veine optiquement hétérogène puisse se former malgré la mauvaise conductibilité de l'air ; en même temps les gaines stables de rayonnement deviennent inobservables. En effet la lame de verre laisse bien passer le rayonnement visible mais est presque totalement opaque pour l'infra-rouge lointain rayonné par les pièces dans l'enceinte. De même une serre vitrée laisse passer le rouge et le proche infra-rouge solaire qui chauffent la plante à l'intérieur mais celle-ci ne peut geler la nuit car son rayonnement ne traverse pas le verre. Cette fois l'expérience est concluante sans discussion possible ; d'une part le Foucaultage d'une étoile brillante ne montre plus que la turbulence extérieure à l'exclusion des volutes caractéristiques des tubes ouverts ; d'autre part le premier anneau de la figure de diffraction reprend son éclat normal, comme dans un réfracteur si l'obstruction centrale reste inférieure à 0,2 ; *en fait le télescope ainsi traité prend nettement l'avantage sur un réfracteur de même diamètre par l'absence totale de spectre secondaire.* Naturellement l'on profite de la possibilité de faire porter le miroir secondaire, Newton ou Cassegrain, par la lame pour supprimer les lames support d'araignée et les aigrettes de diffraction qu'elles produisent. Troisième avantage : les aluminures des deux miroirs sont bien protégées de toutes souillures, leur oxydation devient insensible et tout souci d'entretien du télescope disparaît.

Voyons maintenant les inconvénients. Le choix d'un borosilicate crown très transparent dans le visible permet de négliger les pertes par absorption dans une lame de télescope d'amateur de 250 à 300 dont l'épaisseur ne dépasse pas 20 millimètres. Par ailleurs chaque traversée de face bien polie correspond à une perte de 3 % environ ; la transmission totale de la lame sera donc voisine de $0,97^2 = 0,94$ soit une perte de 0,2 magnitude inconvénient de peu de poids devant l'amélioration de l'image. Toutefois cette lumière réfléchie par les faces peut être nuisible si la lame, parfaitement normale à l'axe optique, joue le rôle d'un plan d'autocollimation bien réglé ; dans ces conditions un reflet sur une lentille d'oculaire par exemple est une source dont l'image de retour symétrique est au point dans le champ. Le remède simple évident est d'incliner la lame sur l'axe d'un angle égal au demi-champ de l'oculaire le plus faible, par exemple une quinzaine de minutes, ce qui ne peut entraîner d'aberration perceptible. L'on sait actuellement atténuer sensiblement ou même supprimer totalement les reflets par l'évaporation dans le vide d'une épaisseur $\lambda / 4$ d'un corps d'indice $n_1 = \sqrt{n}$. Le borosilicate crown exigerait malheureusement une substance d'indice $n_1 = 1,23$ et en pratique on ne dispose que de corps d'indice 1,38 au moins. L'efficacité du traitement est donc incomplète et le dépôt très tendre devient rapidement diffusant. Pour rendre le dépôt assez dur, ou efficace par évaporation de deux couches $\lambda / 4$ bien choisies il faudrait chauffer la pièce à 250° C au moins ce qui est inacceptable pour une grande pièce de haute précision.

L'autre inconvénient est d'ordre pratique : le prix de la lame est comparable à celui d'une lentille d'un objectif, il faut un verre de premier choix recuit fin beaucoup plus cher qu'un disque miroir et le travail des deux faces représente un temps de surfacage double. L'avantage escompté justifie-t-il cet effort ? La réponse est non dans tous les cas si l'instrument à équiper n'est pas optiquement parfait dans le sens déjà expliqué ; non si l'observateur n'est pas habitué à juger la qualité de l'image de diffraction stellaire dans un 250 au moins. *En particulier les débutants ou les usagers d'un simple standard de 200 n'ont guère de raison de s'égarer dans cette entreprise laborieuse.* Faut-il souligner l'énorme bêtise qui consisterait à boucher un télescope par un morceau de verre quelconque, tel un hublot en glace de Saint-Gobain, dans l'espoir d'améliorer l'image ? Finalement l'entreprise n'est réellement bénéfique que pour une élite d'amateurs à la fois bons opticiens, bons observateurs et possesseurs de télescopes assez importants. Cette élite existe c'est l'essentiel.

Ce sont les frères Henry vers 1890 qui ont, peut-être les premiers, fermé un télescope par une lame optique. Cette lame de 204, épaisseur 17, existe encore dans les collections de l'Observatoire de Paris. Il n'est pas certain que les frères Henry cherchaient à supprimer les effets thermiques ; leur lame faiblement biconcave possède un chromatisme qui était peut-être voulu pour compenser un correcteur oculaire spécial ? De toutes manières cette pièce fortement trempée n'a pu permettre d'essais concluants.

André Couder a réalisé en 1940 un télescope de Newton fermé de 450 à $f/7$ qui n'a malheureusement pas été employé de manière suivie.

Bernard Lyot et André Couder avaient projeté la construction d'un télescope de un mètre cinquante d'ouverture à lame de fermeture pour l'Observatoire

du Pic du Midi. Ce projet fut mentionné dans *L'Astronomie* ⁽¹⁾. Lyot avait même envisagé une solution radicale : remplir d'hélium le tube hermétiquement clos. L'avantage de l'hélium sur l'air est double : la variation d'indice avec la température est plus faible et surtout l'hélium a une conductibilité thermique très supérieure ; une veine supposée formée s'estomperait immédiatement. Malheureusement il est très difficile sinon impossible d'empêcher un gaz monoatomique de s'échapper d'une enceinte aussi grande et complexe que le tube d'un grand télescope et l'on ne peut obtenir à volonté l'hélium, matériau stratégique détenu presque exclusivement par les Etats-Unis. La mort de Bernard Lyot arrêta l'exécution de ce projet.

Remarquons que les télescopes photographiques à lame correctrice de Schmidt ou ménisque de Maksutow sont, accessoirement, des télescopes fermés. La suppression de la turbulence instrumentale dans un télescope photographique ne peut apporter d'avantage sensible que pour un instrument de grandes dimensions comme le Schmidt de 48 pouces du Mont Palomar ; elle n'est peut-être pas étrangère aux très bons résultats obtenus par cet instrument.

Les amateurs américains se sont intéressés récemment à des télescopes Cassegrains Maksutow visuels à long foyer $f/15$ à $f/23$. Une standardisation à un diamètre de 6 pouces a rendu possible la livraison de moulages bruts des ménisques par la verrerie *Hayward Scientific Glass Corp.* Cette application n'apparaît pas très convaincante ; le champ de ces instruments n'est pas assez grand pour qu'on puisse invoquer la correction des aberrations extra-axiales ; l'absence de parabolisation du primaire est loin de compenser le travail supplémentaire du ménisque. Il se peut que la meilleure justification du Maksutow visuel soit l'élimination des effets thermiques du tube ; le seul faible avantage par rapport à un Cassegrain classique fermé par une lame plan parallèle serait la courbure du ménisque qui détruit la mise au point du reflet, le chromatisme par contre est rapidement sensible ; de toutes manières il est peu intéressant de fermer un télescope de 6" dont les effets thermiques sont faibles.

88. Choix de la matière. - Les borosilicates crown sont des verres courants très utilisés, notamment pour les prismes de jumelles ; les grandes verreries scientifiques comme Parra-Mantois en produisent des centaines de tonnes par an. Les pots utilisés, en forme de cornue, contiennent environ 1 200 kilogrammes de verre mais cette masse, une fois refroidie, est toute fissurée et il faut rechercher un bloc absolument sans défaut dans la partie centrale. Les pierres et les bulles sont faciles à voir mais il faut une grande expérience pour déceler les *fil*s, inadmissibles dans une pièce de premier choix. Les fil correspondent à une variation rapide mais très localisée de l'indice de réfraction ; dans une pièce, éclairée seulement par une source ponctuelle puissante placée à plusieurs mètres, il est possible de voir les gros fil d'un plateau par projection de l'ombre correspondante sur un papier blanc placé à 50 centimètres environ du plateau. Un gros fil rectiligne diffracte une aigrette perpendiculaire sur l'image comme une rayure ou une lame support de miroir secondaire. Une fois trouvé le bloc rarissime de *premier choix* et de poids convenable il faut le

mouler en forme de disque dans une cassette en terre réfractaire puis le recuire avec un soin extrême. Le disque est placé au milieu d'une grande enceinte remplie de poudre réfractaire et dont la température est contrôlée en tous points par des résistances alimentées par l'intermédiaire d'un dispositif d'asservissement. Pendant, plusieurs semaines la température variera suivant une courbe déterminée pour chaque sorte de verre, mais comportant toujours un large palier vers 650° C au point de transformation du verre β en α (voir p. 22). Le *recuit fin astronomique* est devenu tellement parfait depuis quelques années chez Parra-Mantois qu'il est superflu pour des disques d'amateurs de 20 millimètres d'épaisseur de procéder au contrôle de la trempe décrit § 69 p. 131, mais l'on comprend que de tels soins entraînent des délais de livraison assez grands. Voici quelques précisions pour faciliter la rédaction d'une commande :

Adresse. - PARRA-MANTOIS et Cie, 11, chemin de ronde, Le Vésinet (S.-et-O.), une remise de 10% est accordée aux membres de la Société Astronomique de France.

Nature du verre. - Les borosilicates crown les plus courants portent les numéros B 1664 et B 1864 sur le catalogue ; les indices de réfraction pour la raie D sont respectivement 1,516 50 et 1,518 00 ; pour l'usage projeté ils sont équivalents, ce qui peut faciliter éventuellement une fourniture rapide.

Diamètre. - Si le diamètre optique de la lame est juste égal à celui du miroir il y aura un léger vignettage au bord du champ d'ailleurs inobservable visuellement. Le repos sur le barillet peut être d'environ 5 millimètres, pour des lames de 250 à 300 ; le diamètre extérieur sera donc 10 millimètres plus grand que le diamètre optique ; ajouter encore 2 millimètres pour avoir le diamètre brut car le débordage de l'usine est, sauf entente spéciale, assez sommaire. Si l'on veut éviter tout silhouettage au bord du champ il faut encore ajouter ce dernier mesuré dans le plan de la lame. Exemple pour un miroir de diamètre optique 250 dont la lame est distante de 1 100 et le champ de pleine lumière demandé 30'. Diamètre du champ dans le plan de la lame :

$$1\ 100 \times 0,000\ 209\ 9 \times 30 = 9,6 \text{ millimètres.}$$

Diamètre optique de la lame :

$$250 + 9,6 = 259,6.$$

Diamètre extérieur fini : 270. Diamètre brut à commander : 272.

Epaisseur. - Le poids se répercute sur le prix du verre et sur la charge indésirable de l'extrémité du télescope. Les flexions mécaniques de la lame sont peu à craindre comme nous le verrons. Ce sont les difficultés d'exécution d'un verre de précision trop mince qui fixent ici la limite raisonnable. Il est possible de travailler une bonne lame de 250 n'ayant que 10 mm d'épaisseur mais il est préférable de ne pas trop rechercher la difficulté, l'on prendra plutôt 15 mm pour une 250 ; 18 pour une 300 ; 20 à 22 pour une 400. Compter en plus 0,5 à 1 millimètre par face pour l'ébauchage et le doucissage.

Premier choix, recuit fin astronomique. - Nous avons vu la signification de ces termes qui doivent obligatoirement figurer sur la commande d'un verre de précision travaillant par réfraction.

89. Perçage du trou central et débordage. - Ce travail peut parfois être demandé à la fabrique après entente spéciale. Le perçage de la lame permet

la fixation de la monture du miroir secondaire dont la figure 92 page 158 donne un exemple, le diamètre de perçage de cette lame de 265 est 34. On transposera ici les indications données § 70 page 132 pour le perçage des miroirs Cassegrain. La méthode de Ritchey comprenant le perçage de part en part dès le début et le scellement au plâtre de la carotte est préférable. Les éclats possibles au débouchage du biscuit-cutter seront évités en collant à l'arcanson au dos de la lame une large plaque de verre épais, de la glace de Saint-Gobain de 7 millimètres par exemple. Ne pas oublier de biseauter l'arête intérieure du trou, gratter en retrait le sillon de plâtre et le protéger par plusieurs couches de vernis gomme laque.

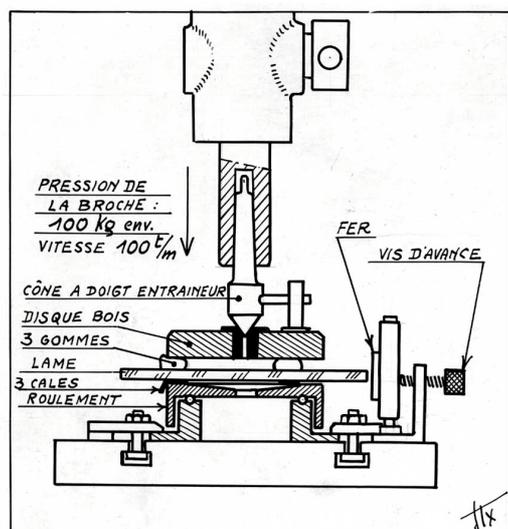


Fig. 95. – Débordage d'une lame de fermeture sur une perceuse.

interposition de 3 cales de carton, l'autre face porte dans le même aplomb 3 gommages à effacer qui transmettent la rotation de la broche grâce à un plateau entraîneur à doigt. Un poids accroché au levier d'avance de la perceuse permet d'écraser suffisamment les gommages pour transmettre la rotation sans risque de voir échapper le verre. Pour un 250 la vitesse peut être d'environ 100 tr/mn. Il ne reste plus qu'à approcher un levier portant le fer comme sur la figure 86, p. 141, l'émeri 2 m suffit si les bosses du débordage usine ne dépassent pas 1 millimètre. On termine avec de l'émeri 5 puis 10 m ou du 302. Pour la qualité de la présentation et la sécurité de la pièce l'habitude du laboratoire de l'observatoire de Paris est de réaliser pendant que la pièce tourne des biseaux arrondis en quart de cercle de 1 à 2 millimètres de rayon, ces biseaux sont polis ultérieurement sur la même machine juste avant le doucissage.

90. Tolérances de doucissage. - *Parallélisme* : Une lame à faces planes mais non parfaitement parallèles est un prisme objectif d'angle très petit ; l'image de l'étoile devient un petit spectre le violet étant du côté épais le

Le débordage de la lame, bien centré sur le trou initial, est recommandé mais pas absolument indispensable puisque la lame a une puissance nulle et qu'une translation dans son plan est sans effet. Décrivons rapidement un procédé, longuement employé au laboratoire d'optique de l'Observatoire de Paris, dont le principal avantage est d'éviter d'avoir recours à une machine spéciale. Sur le plateau d'une grosse perceuse ordinaire (fig. 95) l'on bride un roulement à billes spécial centré sur la broche de la machine. Le verre à déborder est posé sur le roulement avec

rouge du côté mince de la lame. Si le défaut est voisin de la limite tolérable l'image normale est seulement bordée d'un côté d'une frange rouge, le côté opposé bleu violet est moins frappant. Quel angle maximum du prisme pouvons-nous tolérer pour être sûrs qu'aucun chromatisme ne sera décelable sur l'image ? Nous pouvons poser arbitrairement des tolérances très rigoureuses car nous verrons qu'elles n'entraînent pas de difficultés spéciales de contrôle ni d'exécution. Posons que la longueur du spectre ΔD mesurée depuis le bleu : raie F ou H β de l'hydrogène (4 861 Å) jusqu'au rouge : raie C ou H α de l'hydrogène (6 563 Å) ne dépasse le dixième du rayon de la tache de diffraction. L'angle de la lame prismatique est A. La formule des petits prismes donne :

$$\Delta D = (n_F - n_C) A \quad (20)$$

Les indices n_F et n_C et leur différence, appelée dispersion moyenne, figurent dans le catalogue Parra-Mantois. Pour le borosilicate crown B 1664 l'on a $F - C = 0,008 07$.

La valeur limite acceptable pour A sera donc si $\Delta D \leq \frac{r}{10}$

$$A \leq 12,4 \rho \quad (21)$$

Exemple : pour un télescope de 300 le rayon ρ de la tache de diffraction vaut ($\rho = 5$) :

$$r = \frac{14,1}{30} = 0'' 47 ;$$

la lame de boro pourra présenter un angle

$$A = 0,47 \times 12,4 = 5'' 8.$$

Nous verrons qu'un bon palmer, permet à un opérateur exercé le contrôle différentiel de l'épaisseur de la lame à 1 ou 2 μ près ; disons 3 μ si le palmer et son propriétaire sont de second choix, ces 3 μ sur 300 mm correspondent à un angle de 1×10^{-5} soit sensiblement 2''. Il est donc facile de respecter la tolérance très sévère précédente qui correspond à une différence d'épaisseur choquante de 8,4 μ .

Courbure des faces : Il serait absurde de s'imposer une planéité parfaite des deux faces ; la seule chose qui compte est de transmettre une onde bien sphérique. Si les faces ont une faible courbure, la lame est une lentille à long foyer. Les aberrations d'un télescope qui vise à travers une lentille dont la longueur focale est de l'ordre du kilomètre ne sont évidemment pas changées de manière appréciable [formules (17) et (18), p. 139] ce sont les aberrations de cette lentille elle-même qui vont préciser la tolérance. Tout d'abord des courbures de même sens donneront un ménisque dont les aberrations géométriques sont indiscernables de la lame à faces planes. Prenons le cas de courbures de sens contraires donnant une lentille bi-convexe ou bi-concave. Il n'y a pas lieu de s'arrêter à l'aberration de sphéricité de telles lentilles qui est extrêmement petite et noyée dans tous les cas dans les défauts d'exécution. C'est le chromatisme qui apparaîtra le premier. Une lentille simple présente deux foyers pour C et F entre les deux le cercle de moindre aberration a un diamètre :

$$d = \frac{D}{2v} \quad (22)$$

D est le diamètre de la lame ; v est la *constringence* du verre et figure également dans le catalogue de Parra-Mantois,

$$v = \frac{nD - 1}{nF - nC}$$

Pour le borosilicate crown B 1664 nous trouvons $v = 64$, le diamètre du cercle de moindre aberration avec ce verre est donc $d = \frac{D}{128}$.

Posons comme tolérance très rigoureuse que d reste inférieur au diamètre 2ρ de la tache de diffraction. Il faut donc allonger suffisamment la longueur locale F de la lentille pour que la tache de diffraction soit aussi grande que d ; réductions faites on a en prenant D en millimètres :

$$F \geq 5,73 D^2 \quad (23)$$

Exemple : une lame de 260 millimètres en borosilicate crown B 1664 devra avoir une longueur focale de $5,73 \times 260^2 = 387\,348$ soit 387 mètres ; supposons-la biconvexe ou biconcave, le rayon des faces en première approximation est aussi de 387 mètres, un sphéromètre portant sur un petit cercle de 75 millimètres de rayon (voir p. 145 et 172) accusera une différence de $7,3 \mu$, par rapport au plan, confortable devant l'erreur possible qui est de l'ordre du micron.

Nous pouvons conclure que de simples contrôles mécaniques de la lame en cours de doucissage suffisent pour éliminer tout risque d'aberrations géométriques . En fin de polissage il suffira de vérifier et retoucher l'aberration zonale comme s'il s'agissait de réaliser un miroir sphérique pour obtenir une lame parfaite dans le sens utile.

91. Ebauchage, apprêt, doucissage. - Les platines à sable de la verrerie laissant aux disques des faces généralement légèrement convexes, le grain est grossier mais peu piqué en profondeur. On utilisera le dos, à peu près plan, de l'outil qui a servi pour tailler le miroir principal et du corindon 120 ou de l'émeri 1 m pour le réunissage de cet outil avec les deux faces de la lame. Chaque face de la lame reçoit un numéro arbitraire 1 et 2 gravé sur la tranche. Les séchées intéressent successivement la face 1 puis la face 2 de manière à conserver toujours une bonne adaptation de l'outil unique. En principe les positions outil dessus et outil dessous sont alternées régulièrement sauf au début du travail où les faces convexes indiquent naturellement un travail lame dessus et plus généralement à chaque fois que le sphéromètre désigne une position préférentielle pour tendre vers le plan. Dans la position lame dessus les mains trouvent une prise suffisante malgré l'épaisseur un peu faible de la lame, il ne faut pas coller de poignée. Si l'outil repose sur le poste par une face convexe provenant d'un ébauchage antérieur une large couronne découpée dans une couverture de laine épaisse permettra de conserver l'aplomb. Dans la position lame dessous il faut veiller dès le début à éviter toutes contraintes car la lame est très flexible. La planéité du poste doit être vérifiée et la lame ne doit reposer que par l'intermédiaire d'un disque découpé dans une couverture de laine épaisse. Les cales latérales sont assez minces pour permettre le passage de l'outil avec une bonne garde ; elles doivent laisser un jeu latéral de 0,5 à 1 millimètre permettant les rotations systématiques indispensables de 1/4 de tour à chaque séchée. Après une dizaine de séchées sur chaque face effectuées

avec des courses normales $1/3 D$ (fig. 22 et 23) le réunissage est généralement suffisant pour permettre utilement les premiers contrôles de parallélisme et planéité. Pour le parallélisme un palmer de mécanicien de bonne fabrication ⁽¹⁾ suffit nous l'avons vu. La vis ne sert pas ici d'instrument de mesure en valeur absolue mais l'approximation différentielle à 1μ près exige un palmer soigné, en bon état, correctement lubrifié (graisse à instruments spéciale) et manipulé. Vu le poids et l'encombrement de la lame il est commode de la poser à plat sur un disque de bois assez épais ou *fromage* (fig. 96). L'on trace grossièrement au crayon bleu deux diamètres rectangulaires aux extrémités desquels l'on écrira les 4 épaisseurs correspondantes trouvées. Naturellement la lame est sèche,



Fig. 96. – Vérification au parallélisme au palmer. (Atelier de la Commission S. A. F.)

bien débarrassée de tout grain d'abrasif, la propreté rigoureuse des touches du palmer bien vérifiée. D'une main l'on soulage légèrement le poids du palmer en porte-à-faux (fig. 96) et l'on donne un petit mouvement de rotation destiné à faciliter la prise d'aplomb des touches; l'autre main tourne la vis délicatement, sans utiliser le limiteur de couple trop dur. Si l'aplomb se fait mal et les pointés se dispersent sur plusieurs microns, soupçonner l'interposition d'un grain, nettoyer les touches et recommencer à côté. Les quatre valeurs obtenues il est bon, quand nous aurons besoin plus loin de la meilleure précision, de répéter la mesure du premier point, la nouvelle cote sera souvent un micron plus faible ce qui indiquera un laminage du lubrifiant sur les flancs de la vis et l'utilité de répéter toutes les mesures.

Le plus souvent le défaut de parallélisme initial du disque est de 0,1 ou 0,2 mm, les premières vérifications peuvent se faire seulement au centième et

⁽¹⁾ P. ROCH-ROLLE, Suisse ; Société « Christian Ludwig », 13, rue Sedaine, Paris 11^e. ROCHE-FRANCE, 68, avenue de la République, Paris 11^e. TESA, Renens, Suisse ; 17, boulevard Jules Ferry, Paris 11^e.

la partie épaisse de la lame sera marquée sur la tranche par un gros trait de crayon bleu. Le parallélisme se retouche en position lame dessus ou lame dessous. En position lame dessus l'on appuie fortement des deux paumes de main posées sur le côté épais, la rotation de la lame est supprimée mais l'on continue de tourner autour du poste (fig. 97 A). Si la retouche s'effectue lame dessous l'outil doit surplomber largement le côté épais toutes les courses étant excentrées de ce côté (fig. 97 B). Des perturbations aussi énergiques rattrapent plusieurs centièmes par séchée de corindon 120 mais entraînent la formation d'une facette indésirable. Chaque correction doit donc être suivie de plusieurs séchées alternées dessus et dessous ne comportant que des courses normales 1/3 D. Inutile de figoler le parallélisme à mieux du centième au corindon 120. En même temps le simple choix de la position dessus ou dessous

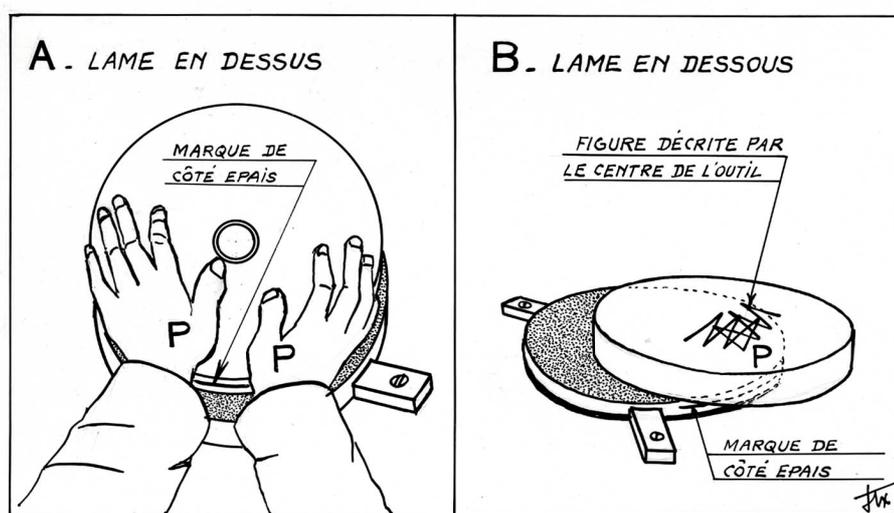


Fig. 97. – Retouche d'un défaut de parallélisme.

corrige la courbure éventuelle que l'on contrôle au sphéromètre toutes les 5 ou 6 séchées. Il est avantageux de disposer d'un sphéromètre portant sur un cercle de grand diamètre sans dépasser beaucoup toutefois la moitié du diamètre du verre, ce qui permet de mesurer la flèche au centre puis plus près du bord et dépister ainsi les déformations de doucissage telle l'hyperbole due aux courses trop longues. Le sphéromètre décrit § 81, p. 145 aurait une portée insuffisante mais l'on peut utiliser son organe de mesure : la butée micrométrique, montée sur un grand trépied découpé dans de la planche de Duralumin de 10 (fig. 98). Trois pointes en acier trempé sont aux sommets d'un triangle équilatéral, aux erreurs de perçage près. Mesurons les trois côtés de ce triangle au dixième près au moyen d'une bonne règle divisée en acier ; prenons la moyenne ; divisons par $\sqrt{3}$ soit 1,732 pour avoir le rayon h du cercle circonscrit. Ici les flèches f sont très petites devant le rayon R et les formules simplifiées suivantes :

$$R = \frac{h^2}{2f} \quad f = \frac{h^2}{2R} \quad (24) \quad (25)$$

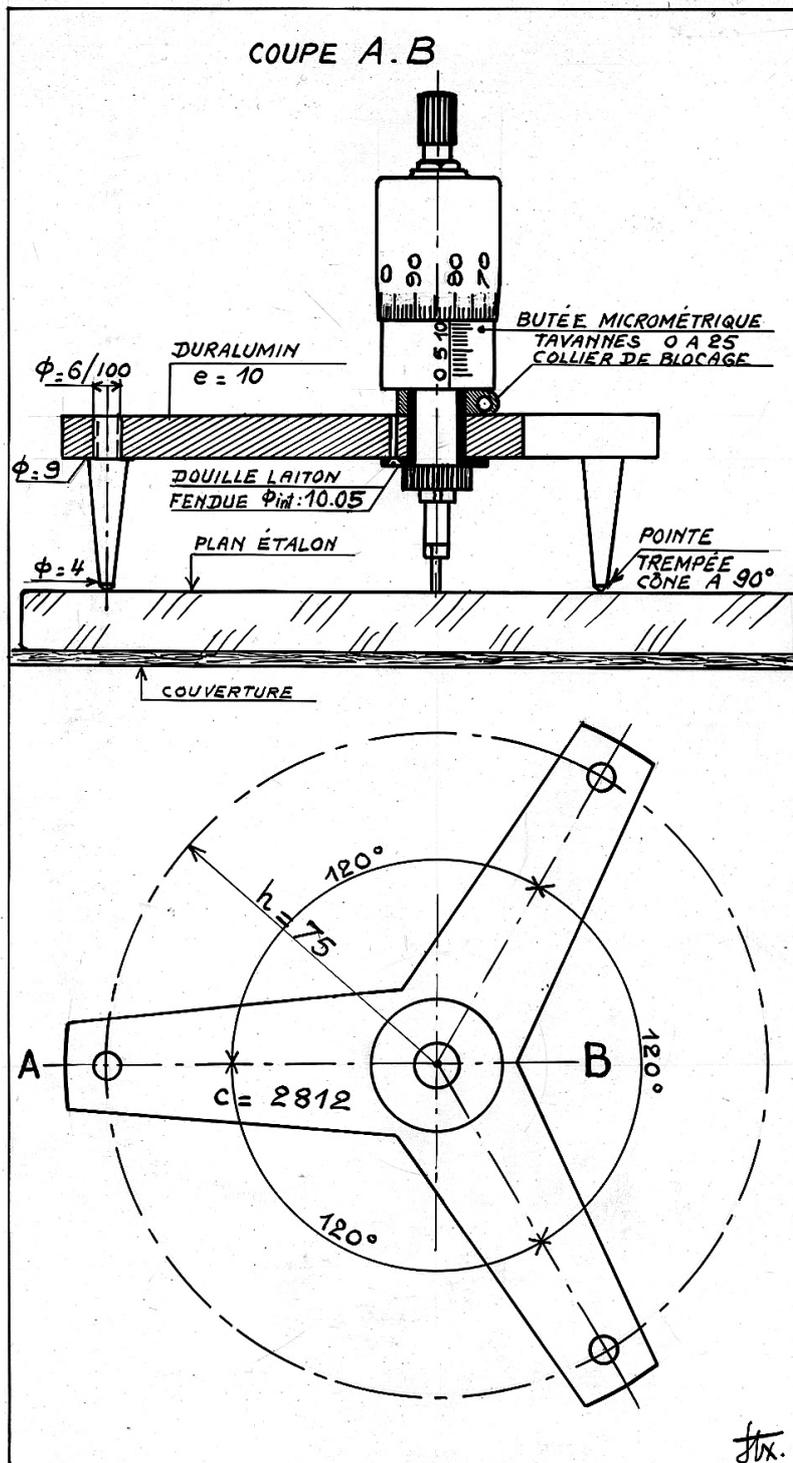


Fig. 98. – Sphéromètre triangulaire utilisant une butée micrométrique Tavannes.

On inscrit sur la monture du sphéromètre la constante pratique $h^2 / 2$ qu'il suffit de diviser par R ou par f pour obtenir f ou R .

La figure 99 montre l'emploi d'un sphéromètre de construction classique. Dans le cas présent il s'agit d'un instrument historique, ayant appartenu à Léon Foucault et construit par « l'artiste » Froment ; la vis est au pas de 0,5 le tambour divisé en 500 ; le trépied et le tambour sont en aluminium fondu par H. Sainte-Claire Deville (1857). De nos jours l'on ne construit plus guère ces instruments employés presque uniquement par les opticiens astronomes ⁽¹⁾.

La vérification d'un plan au sphéromètre muni de son plan de référence est une mesure différentielle, une bonne vis est nécessaire moins pour l'exactitude



Fig. 99. – Le sphéromètre qu'employait Léon Foucault posé sur une lame de 300.

de la cote que pour permettre un contact franc et fidèle de la touche. Pour avoir la meilleure précision l'on essaye successivement les lectures augmentées de micron en micron en appréciant la décharge de plus en plus grande du trépied (fig. 99). Un petit coup de doigt tangentiel provoque une rotation plus ou moins facile accompagnée sur fin verre douci d'un cri aigu dont la fréquence est critique en fonction de la charge . Une décharge moyenne étant obtenue sur le plan l'on reporte le sphéromètre sur la lame sans toucher à la vis ni chauffer le trépied par un contact direct des mains. La rotation doit être équivalente et sur fin douci le cri de même hauteur. Un écart de 1μ entre les flèches du plan et du verre contrôlé est traduit ainsi par des différences frappantes ; nous avons vu qu'il est loin d'atteindre la limite dangereuse.

Sur le grain de corindon il est inutile de rechercher la meilleure précision, il faut éviter au contraire le frottement donc l'usure des pointes du sphéromètre. Une planéité à 5μ près sur la portée du sphéromètre suffit largement pour permettre une amélioration facile au cours du doucissage. Les opérations

⁽¹⁾ Consulter éventuellement BOUTY, 47, boulevard Auguste Blanqui, Paris 13è.

correctives de parallélisme et courbure au corindon 120 ont probablement nécessité beaucoup de sèches mais il est bon de vérifier tout de même si le grain grossier initial est bien rattrapé et surtout s'il ne subsiste pas de plages à grosses piqûres près du bord par exemple. L'apprêt et le doucissage se conduisent comme pour un miroir, il ne faut pas être avare de sèches si l'on veut être sûr de la qualité du douci final. Après le 180 ou 2 m, puis le 5 m ou le BM 302 le parallélisme doit être exact à 1 ou 2 μ près et la courbure également ; en effet dès le 10 m ou BM 302 1/2 il est bon d'éviter le plus possible les opérations correctives de parallélisme à cause des déformations locales qu'un doucissage écourté ne rattraperait peut-être pas complètement. Dès le 20 m ou BM 303 l'idéal est de pouvoir faire les sèches normales alternées qui doivent conserver en principe la courbure quasi nulle et le parallélisme obtenu.

92. **Contrôle optique de la lame.** - Le moyen le plus commode au laboratoire est de placer la lame contre un miroir sphérique de rayon R étudié au centre de courbure. Pour la clarté de la figure 100 l'épaisseur e de la lame est très exagérée tandis que le rayon R du miroir est très réduit. Supposons d'abord l'appareil de Foucault habituel, dont la source ne bouge plus après la mise en place initiale, réglé sur le sphérique seul ; la source et l'image I sont dans le plan du centre de courbure. L'interposition de la lame traversée à l'aller,

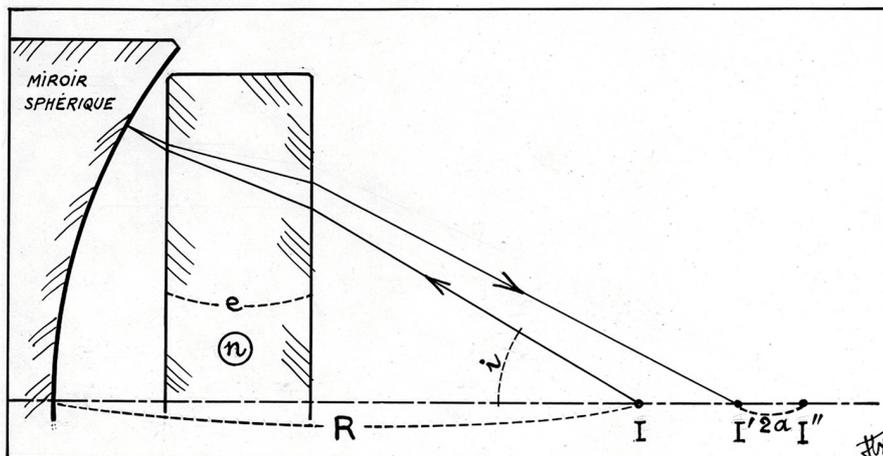


Fig. 100. - Contrôle d'une lame à faces parallèles devant un miroir sphérique.

comme au retour, donc deux fois, repousse l'image I en I'. En première approximation pour des rayons peu inclinés on a :

$$II' = 2e \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (26)$$

$n = 1,51650$ sur le boro B 1664 donc $II' = 0,681e$. En rétablissant expérimentalement la teinte plate l'on note en fait un déplacement longitudinal du couteau II'' . Si II'' est plus grand que II' cela veut dire que la lame est une lentille concave, naturellement convexe si II'' est plus petit. L'écart

$$II'' - II' = 2a$$

permet de calculer aisément la longueur focale F de la lentille :

$$F = \frac{R(R+a)}{a} \quad (27)$$

Par exemple si le sphérique a un rayon de 600 centimètres et l'écart $\Pi'' - \Pi' = 2$ centimètres la lame est une lentille concave de 3,6 kilomètres de longueur focale, chiffre à comparer à la tolérance de l'inégalité (23) p. 168 à titre de contrôle des approximations mécaniques obtenues au douci.

Les aberrations géométriques d'une lame à faces parallèles sont *a priori* très petites puisque la lame ne fait rien en principe. Il n'y a pas du tout d'aberration chromatique de grandeur mais une légère aberration chromatique longitudinale qui vaut pour une simple traversée :

$$dR = \frac{nF - nC}{n^2} e \quad (28)$$

toujours pour notre boro $\delta R = 0,00351e$, cet effet est inobservable en pratique pour les lames qui nous intéressent.

L'aberration de sphéricité mérite un calcul car notre montage de contrôle n'est pas rigoureusement correct. La lame du télescope en service n'est traversée que par un faisceau incident normal de rayons *parallèles* tandis qu'ici elle est traversée deux fois par un faisceau *notablement convergent*. La formule (26) n'est rigoureuse que pour des rayons d'inclinaison nulle, les rayons convergents d'incidence i subissent un supplément de translation Λ qui est l'aberration longitudinale dans les conditions du contrôle ; pour deux traversées l'on a au quatrième ordre près

$$\Lambda = 2e \frac{n^2 - 1}{2n^3} \sin^2 i \quad (29)$$

qui se ramène à $\Lambda = 0,3726e \sin^2 i$ pour le boro B 1664 d'indice 1,516 50.

Les sphériques d'atelier ont souvent un rayon assez long ce qui permet de réduire i ; par exemple l'on a $R = 600$ centimètres pour $D = 30$ centimètres ; $\sin i = 15/600$; $\sin^2 i = 0,000625$. Une lame de 2 centimètres d'épaisseur présentera donc une aberration longitudinale

$$\Lambda = 0,3726 \times 2 \times 0,000625 = 0,00046 \quad \text{ou} \quad 4,6 \mu$$

que l'on peut ignorer complètement. Même si l'on ne possède qu'un miroir de 300 centimètres de rayon cette aberration qui est quadruplée reste de l'ordre des erreurs de pointés les plus soignés au Foucaultage.

Les défauts observés avec interposition de la lame seront donc attribués uniquement à cette dernière, comme ils sont produits par *réfraction il faut penser à inverser la convention d'éclairage familière* si l'on veut voir le relief du verre à enlever. Le couteau venant de droite il faut imaginer le solide différentiel éclairé également par la droite : comme le tailleur de miroirs, qui a l'habitude de travailler couteau à droite, est conditionné pour apprécier un solide éclairé à gauche il est préférable qu'il munisse son appareil d'un couteau spécial dans une lucarne rapportée permettant de couper l'image par la gauche quand il vérifie une pièce réfractrice au lieu d'un miroir.

93. **Polissage et retouches.** - Les renseignements donnés §§ 23 à 26 sont applicables au polissage d'une lame à faces parallèles. Les polissoirs de plus de 250 pourront être montés avec des carrés de 25 au lieu de 20. Comme pour un Cassegrain, le petit bourrelet de poix produit au pressage contre le sillon du trou sera gratté. Les courses ont l'amplitude normale $1 / 3 D$. Dès le début il faut conduire parallèlement le polissage des deux faces pour libérer des deux

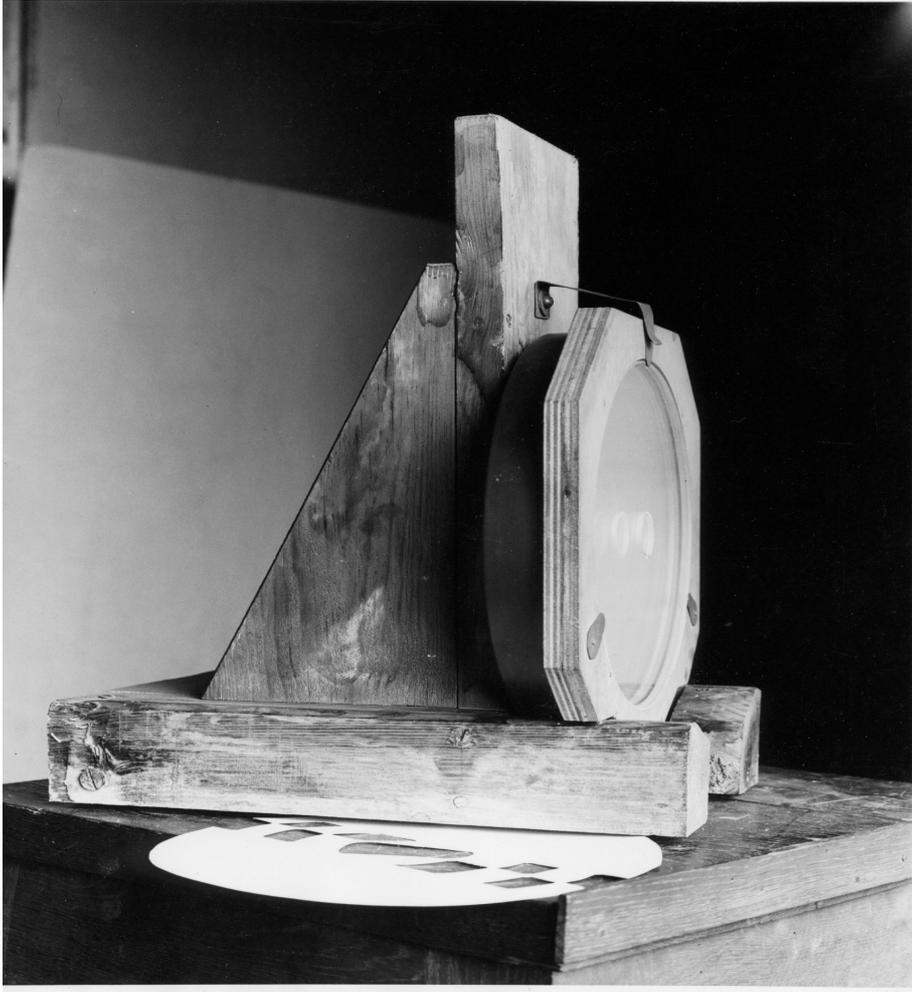


Fig. 101. - Montage d'une lame de fermeture de 260 devant un sphérique de 300.
(Atelier de la Commission S. A. F.)

côtés les forces de compression d'abrasion du verre douci génératrices de l'effet Twyman. Par exemple frotter une heure la face 1 puis une heure la face 2 en position lame en dessus puis continuer une heure face 1 et une heure face 2 lame en dessous pour la régularité de l'éclairci. En position verre dessus veiller à la propreté des mains qui ne doivent pas être chargées de blanc ou de rouge si l'on veut éviter qu'elles deviennent des polissoirs locaux indésirables pour la face supérieure. Eviter également de localiser des mains toujours sur la même zone la lame est très flexible, un trou central peut résulter d'une

main mal placée au centre., La disposition verre dessous nécessite les précautions connues pour empêcher l'astigmatisme : planéité du poste ; couverture neuve épaisse ; rotations systématiques de 1/4 de tous les quarts d'heure au moins.

Un éclaircissage de deux heures sur chaque face permet un premier contrôle devant le sphérique. Pour la sécurité des pièces il est bon de porter la lame centrée dans un cadre en contreplaqué alésé 1 millimètre plus grand en diamètre et muni de pattes tournantes en laiton (fig. 101). La lame est peu sensible aux flexions qui ne modifient pas son épaisseur optique mais il est toujours préférable d'éviter les contraintes d'un montage ajusté.

La variation de tirage, avec et sans lame, indique si la puissance est acceptable (§ 92) mais l'on constate presque toujours en même temps des défauts zonaux ou une notable aberration de sphéricité qui correspondent à des différences de l'épaisseur optique du verre. Pour interpréter ces défauts il faut se rappeler non seulement de la convention d'éclairage inversé mais qu'un défaut engendré par réfraction correspond à une épaisseur de verre à retoucher quatre fois plus grande que par réflexion (§ 4) ; pour une lame traversée deux fois cela fait encore deux fois plus de verre à enlever que sur le miroir qui donnerait le même défaut sur l'onde. Une forte aberration de sphéricité, un large trou central profond (plus de 50 millimètres d'aberration longitudinale en double passage et faisceaux à $f/20$) doivent faire penser à une faute de doucissage : courses trop longues ; pressions centrales systématiques des mains ; en effet la grande flexibilité de la lame la rend sensible à ce genre de maladresse. Cette supposition sera corroborée par l'examen du gris qui montre alors un retard net de la zone creuse sur la ou les faces responsables. Une reprise du verre au douci est cependant rarement nécessaire ; le plus souvent les défauts s'atténuent d'eux-mêmes simplement en poursuivant le travail des deux côtés sans aucune tentative de retouche mais il est bon de faire quelques mesures sommaires d'aberration dès le début. Si le défaut ne s'atténue pas sensiblement après 3 ou 4 heures de polissage sur chaque face, malgré les retournements à chaque heure des positions lame-outil et les retailages des carrés des polissoirs devenus impeccables, une action positive deviendra nécessaire. Préférer toujours au début une perturbation par la pression - amplitude des courses, surpression au bord de l'outil - à une méthode de dégarnissage de la poix ou de travail local qui ne sera jamais vraiment satisfaisante pour des grands défauts. Par exemple une large bosse centrale se traite d'abord simplement en allongeant les courses - $3/4 D$. Pour un large trou, atténuer la cassure de raccordement des deux zones par des surpressions au bord de l'outil passant sur ce point en position outil dessus ; songer à étaler largement cette action et égaliser le travail en position verre dessus et des courses ne dépassant pas $1/2 D$. Notre moyen de contrôle ne permet pas de décider quelle face de la lame est responsable du défaut global observé, la retouche d'un gros défaut pourra porter sur les deux côtés. Vers la fin du polissage les défauts sont petits en principe et la retouche ne portera que sur une face choisie arbitrairement, en somme le travail est sensiblement le même que pour rendre un miroir exactement sphérique. Les conseils du § 42 et toutes les figures données au sujet des retouches des miroirs sont valables aux seules réserves de l'inversion du couteau,

c'est-à-dire à gauche pour un éclairage fictif venant de gauche et de l'épaisseur de verre double de verre à enlever.

Par ailleurs l'on ne peut ignorer plus longtemps les défauts d'homogénéité éventuels internes que présentent souvent les verres d'optique les mieux choisis. Nous avons vu le triage du verre de premier choix à l'usine mais les anomalies lentes de l'indice comme les fils faibles ne peuvent malheureusement être reconnues

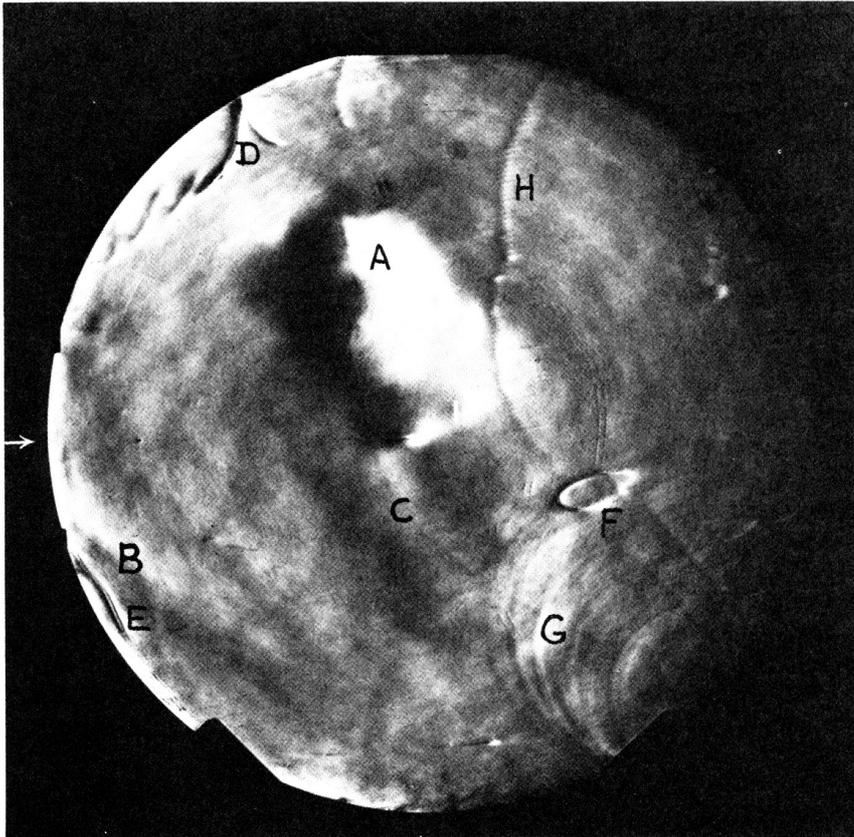


Fig. 102. – Foucaultgramme montrant différents défauts de matière dans un plateau de 400 ; couteau à gauche.

que sur des pièces dont le polissage de précision est assez avancé. A cet égard le contrôle soigné du recuit fin n'apporte pas non plus une garantie valable d'homogénéité parfaite de l'indice.

Le foucaultgramme de la figure 102 montre la plupart des défauts de matière qui peuvent se présenter. Quelques explications sont nécessaires. D'abord, comme tous les foucaultgrammes donnés dans cet ouvrage, la sensibilité du test est très supérieure à celle d'un essai visuel au moyen d'un simple foucaultoir d'amateur ; ensuite il s'agit d'une fonte expérimentale d'un grand prisme d'objectif ($D = 400 \text{ e} - 100$) en baryum crown. On ne risque pas de trouver des défauts aussi prononcés dans une banale lame de borosilicate crown de 20 millimètres

d'épaisseur. En A l'énorme trou sur l'onde (couteau et éclairage fictif à gauche) est produit par un noyau de verre d'indice plus élevé, il n'y a rien à faire, ce défaut ne peut être convenablement compensé par une déformation des faces optiques, un tel disque doit être remplacé par la fabrique ; en B une anomalie d'indice en creux partiellement retouchable par adoucissement au polissoir local passé sur les lignes de crêtes ; C est un autre exemple de marche lente d'indice assez facilement retouchable. Les gros fils D, E, F sont inadmissibles dans du verre de premier choix mais remarquons leur courbure, la lumière diffractée par ces défauts ne serait décelable et vraiment nuisible que pour des observations délicates d'objets faibles près d'une source brillante ; G est une large nappe de fils très faibles qui échapperont toujours à un contrôle par projection, ils ne seraient gênants que sur une lentille de coronographe ; enfin en H l'on voit un large fil faible à structure curieuse dont l'effet est également à peu près négligeable malgré la longue portion presque rectiligne. Souvent des marches lentes d'indice ne pourront se distinguer d'un défaut matériel de surface ; qu'importe en pratique puisque le travail de retouche est toujours clairement défini, le stigmatisme sera rétabli nécessairement par déformation sans s'inquiéter de la topographie individuelle des surfaces. Si l'on recherchait une planéité exacte, contrôlée au calibre interférentiel par exemple, pour chacune des deux faces non seulement l'on perdrait son temps mais les déphasages des défauts de matière subsisteraient pour gêner l'image.

La facilité de l'appréciation de la sphéricité de l'onde par foucaultage au centre de courbure permet de pousser très loin le travail de retouche sans aucune mesure d'aberration ni calcul ; toutefois une faible aberration régulière n'attirera pas l'attention de l'opticien sans pour cela être négligeable tandis qu'un défaut localisé très peu élevé pourra susciter des figulages inutiles ou même nuisibles. Pensons à la grande sensibilité du montage de contrôle à cause de la double traversée de la lame et du grand rayon du miroir. Pour ces raisons les mesures à l'écran et le calcul de l'onde réfractée sont aussi nécessaires que s'il s'agissait d'un miroir déformé ; elles permettent de diriger avec sûreté les dernières retouches et juger objectivement la valeur de la pièce finie.

91. Contrôle quantitatif et réduction. - Les écrans à échancrures pour miroirs (fig. 42 et 81) sont utilisables sans autre modification ; en additionnant algébriquement les écarts de tautochronisme, de chaque zone homologue, sur le miroir et la lame de fermeture l'on obtiendra commodément les défauts de la combinaison complète. Voyons sur un exemple concret comment établir le bulletin de contrôle de la lame (fig. 103).

En dessous des différentes constantes d'identification de la pièce l'on trouve lignes 1, 2 et 3 les numéros des zones, les rayons extérieurs h_x et les rayons moyens h_m habituels. La ligne 4 porte les facteurs spéciaux de hauteur d'incidence pour la réduction des aberrations au plan focal du télescope qui sera équipé de la lame. Dans le cas présent il s'agit d'un newtonien de longueur focale $F = 1\ 300$. Les mesures font apparaître des aberrations longitudinales ΛR au centre de courbure du sphérique d'atelier de rayon R . Les *aberrations longitudinales* correspondantes ΛF au plan focal du télescope de longueur focale F seront :

$$\Lambda F = \Lambda R \frac{F^2}{R^2} \quad (30)$$

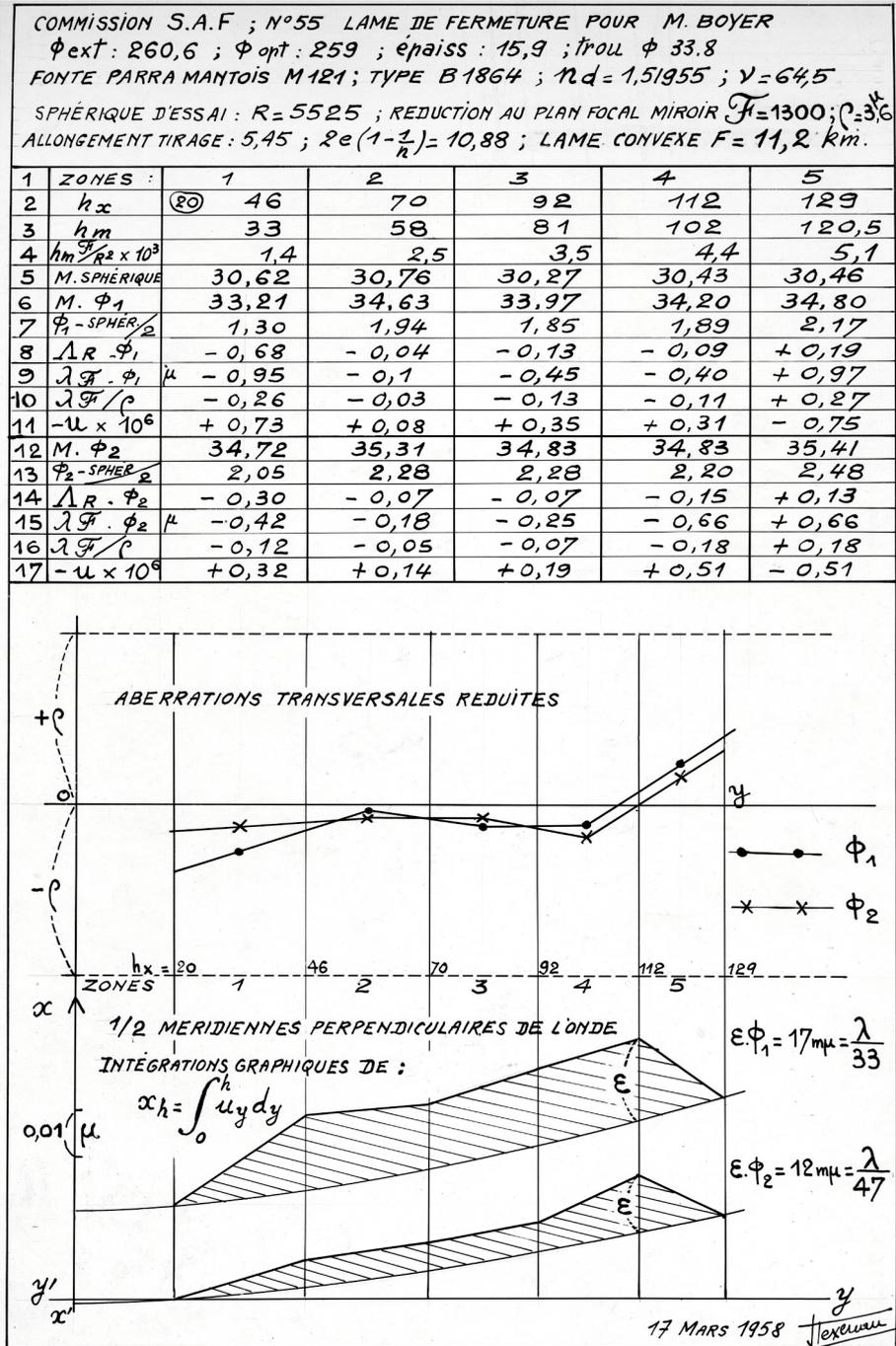


Fig. 103. - Bulletin de contrôle d'une lame de fermeture.

Et les *aberrations transversales* λF au plan focal du télescope seront :

$$I F = \Lambda R \cdot h \frac{F}{R^2} \quad (31)$$

Ce sont ces facteurs $h F / R^2$ multipliés par 10^3 que donne la ligne 4. Ces nombres multipliés par les ΛR obtenus, exprimés en millimètres, donneront les λF en micron à comparer au rayon ρ de la tache de diffraction.

La ligne 5 donne la moyenne des pointés longitudinaux effectués sur le sphérique seul. Malgré la qualité de ce miroir l'on voit que ces 5 tirages ne sont pas identiques comme dans le cas d'un miroir idéal, ces défauts de montage sont évidemment à retrancher. Remarquons que le miroir parabolique du télescope serait utilisable à défaut de sphérique, les aberrations de montage seraient plus grandes voilà tout ; la retouche de la lame consisterait à rétablir la même surcorrection sur l'onde, ce serait moins agréable que tendre vers la teinte quasi plate.

L'on trouve ligne 6 les moyennes brutes des tirages obtenus avec interposition de la lame, l'écran découvrant le premier diamètre horizontal Φ_1 . La ligne 7 donne les différences des lignes 6 et 5 *divisées par deux* ; donc à partir de maintenant ce sont les simples et non les doubles défauts de la lame qui interviennent. Le tirage longitudinal est choisi ligne 8 de manière à mesurer les aberrations dans le plan du cercle de moindre aberration, ici l'on a trouvé par tâtonnements la constante de 1,98 à retrancher aux nombres de la ligne 7 pour obtenir les *aberrations longitudinales* ΛR qui, multipliées par les facteurs de la ligne 4, donnent les *aberrations transversales*, ligne 9, maximum égales en valeur absolue et des signes contraires. Les centièmes de microns inscrits pour permettre une bonne approche du plan du cercle de moindre aberration n'ont évidemment aucune signification physique. Rien de spécial pour la ligne 10 des aberrations transversales réduites et la ligne 11 des pentes élémentaires u calculées comme s'il s'agissait d'un miroir (relire le § 47).

Les lignes 12, 13, 14, 15, 16, 17 reproduisent les mêmes calculs pour le diamètre perpendiculaire Φ_2 de la lame. Le miroir n'a pas bougé, ses défauts restent les mêmes, seule la lame a tourné d'un quart de tour. L'avantage des deux réductions indépendantes est de mieux préciser l'importance des défauts astigmatiques et des erreurs accidentelles de pointés.

Inutile de revenir sur l'intégration graphique des pentes u toujours amplifiées un million de fois, ceci est décrit au § 47. Les profils hachurés concernent l'onde, les défauts du verre sont inverses et d'amplitude sensiblement double.