

RÉALISATION DU GRAND MIROIR

8. La forme du grand miroir du télescope Newton. – Les lois élémentaires de la réflexion permettent de prévoir facilement qu'un miroir sphérique concave donnera une image parfaite d'un objet placé près de son centre de courbure ; l'observation d'astres que l'on peut considérer comme infiniment éloignés exige au contraire que tous les rayons incidents parallèles à l'axe (fig. 11) soient réfléchis par notre miroir, de façon à se rassembler au même point F ⁽¹⁾, cette condition associée aux lois de la réflexion permet de prévoir par la géométrie

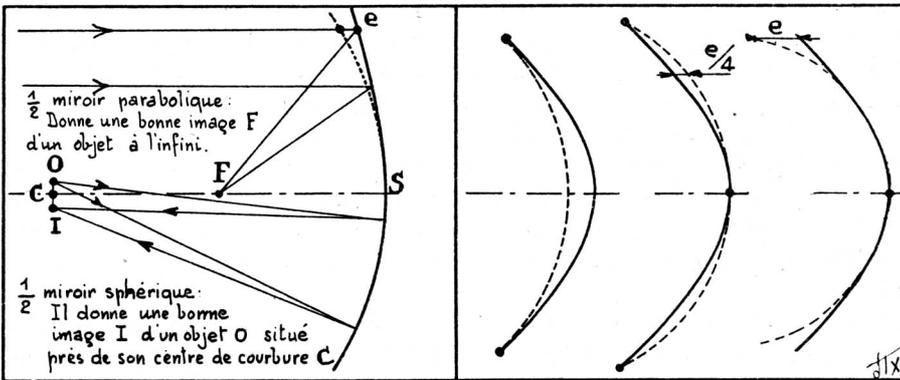


Fig. 11. – Nécessité d'un miroir parabolique

Fig. 12. – Comparaison d'une parabole à 3 sphères de rayons décroissants

sans ambiguïté la forme de la *méridienne* du miroir⁽²⁾ qui donnera une image focale parfaite F, sur l'axe CS, d'un objet à l'infini, c'est une parabole d'axe CS, la calotte concave engendrée par cette courbe tournant sur son axe est un paraboloidé, mais par une incorrection de langage courante, on dit presque toujours un miroir parabolique.

Une telle définition ne doit pas effaroucher les non-mathématiciens ni leur laisser croire qu'il s'agit là d'une forme difficile à obtenir. Nous verrons un peu plus loin que la forme générale qui tend à s'engendrer automatiquement au polissage, si l'on travaille convenablement, est la forme sphérique ; pour apprécier la difficulté du travail il est donc naturel de comparer le paraboloidé à la sphère. Cette comparaison peut se faire de bien des façons différentes

⁽¹⁾ Aux phénomènes de diffraction près que nous avons vus § 3, bien entendu.

⁽²⁾ La démonstration se trouve dans *Lunettes et Télescopes*, § 43, p. 135.

suivant le rayon de la sphère choisie (fig. 12), si l'on considère la sphère tangente au sommet du miroir, comme la parabole a une courbure qui diminue légèrement en allant vers le bord (on dit à l'atelier qu'elle se « rajeunit ») elle s'évase un peu plus que cette sphère et l'écart maximum au bord, de grandeur e mesure

$$e = \frac{1}{64} \frac{h^4}{f^3}$$

h est la hauteur d'incidence ou rayon du miroir au point considéré ;
 f la longueur focale.

Avec le miroir de notre télescope standard à $f/D = 6$ cela donne :

$$h = 10 \quad f = 120$$

$$e = \frac{1}{64} \cdot \frac{10^4}{120^3} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Neuf dixièmes de micron seulement.

Mais il y a une sphère de rayon légèrement différent tangente au centre du paraboloïde et qui le coupe au bord (fig. 12) par rapport à laquelle l'écart est quatre fois moindre ; dans le cas qui nous intéresse cela fait $0 \mu 22$.

Une telle différence est de l'ordre de grandeur de celles que le polissage soigné introduit habituellement par rapport à la sphère pour des verres de ce diamètre ; contrairement à ce que l'on croit d'ordinaire, il est donc aussi facile d'engendrer d'emblée une telle parabole qu'une sphère, Il faut être bien naïf pour écouter les opticiens de l'industrie s'étendre complaisamment sur les difficultés de la parabolisation alors que la surface qu'ils croient sphérique possède déjà des défauts de l'ordre de grandeur des déformations qui nous intéressent (une frange), mais qui sont malheureusement quelconques ; nous voulons au minimum une précision dix fois meilleure. C'est uniquement cette condition qui rend le travail difficile qu'il s'agisse d'une sphère ou d'un paraboloïde.

Si f/D est un nombre assez grand, autrement dit si l'ouverture relative est assez petite, on comprend que la parabole ne s'écartera pas beaucoup de la sphère à un tel point qu'un miroir sphérique satisfera à la règle de Rayleigh (§4) et donnera des images stellaires *pratiquement parfaites*.

Nous empruntons à *Lunettes et Télescopes* la formule qui donne la longueur focale f qu'il faut donner à un miroir sphérique de diamètre D pour qu'il satisfasse à cette condition :

$$f^3 \geq 34,9 D^4$$

Donnons quelques exemples pour des miroirs d'amateurs :

D cm	f minimum en cm	f/D
8	52	6,5
10	70	7
12	90	7,5
15	120	8
18	153	8,5
20	177	8,9
25	240	9,6
30	303	10,1

Mais attention ! il faut que le miroir soit effectivement sphérique ; il serait parfaitement ridicule de tailler le dernier miroir de cette série avec 3 mètres de longueur locale, si l'on n'a pas besoin d'un tel rapport d'ouverture, dans l'espoir d'obtenir automatiquement une sphère utilisable. Par contre, un modeste débutant voulant simplifier au maximum son entreprise et se passer de contrôles comportant des mesures aura quelques chances de réussir avec un miroir de 15 centimètres répondant à ces caractéristiques. Nous reviendrons en détail là-dessus.

9. Généralités sur le travail du verre et théories du polissage. - C'est toujours un objet de surprise pour un profane d'apprendre que les surfaces les plus précises que l'homme sache réaliser, sont faites à la main sans le secours de la moindre machine et grâce à des procédés apparemment enfantins. Nous sommes victime de notre « bon sens », lentement façonné par ce siècle mécanique

à admirer les belles machines compliquées. il nous faut faire un effort réel pour avoir une vue un peu saine de la question. Le travail des surfaces de haute précision est dominé par deux faits essentiels connus ou inconsciemment appliqués depuis l'âge de pierre : l'exploitation des procédés de rodage et celle de la loi des grands nombres.

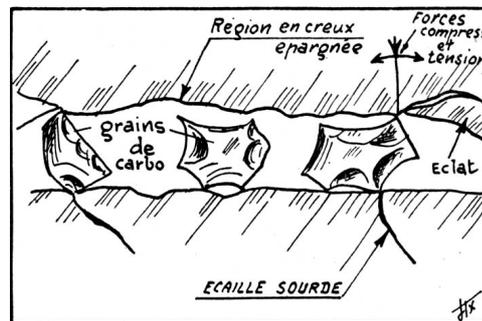


Fig. 13. – Mécanisme de l'abrasion (J. Strong)

Roder une surface, c'est la frotter contre une autre d'étendue comparable, qui prend alors le nom d'*outil*, avec interposition d'un abrasif, c'est-à-dire une poudre composée de petits grains coupants plus durs que le corps à travailler. La combinaison du mouvement de translation et de la pression que l'on fait subir aux pièces, pression répartie sur les dures arêtes aiguës des grains d'abrasif (fig 13) provoque avec une substance cassante comme le verre une multitude de fractures et de petits éclats principalement sur les régions saillantes qui ont donc tendance à disparaître.

Si la loi du mouvement relatif des pièces est telle qu'un régime de pressions égales puisse exister partout, en obtiendra automatiquement le nivellement des surfaces avec une précision meilleure que le diamètre des grains interposés. Si ce mouvement est dirigé en tous sens les surfaces prendront nécessairement une forme sphérique (ou plane comme cas particulier) car c'est la seule qui leur permet de s'épouser dans toutes les positions. Les accidents élémentaires sont aussi comparables en grandeur à la grosseur des grains interposés. Mais une petite inégalité de pression par exemple reproduite à chaque fois au même point de la course ne manquerait pas de créer une déformation notable ; pour l'éviter, il faut rendre cette répétition exacte *improbable* et exploiter la loi des grands nombres. Comme le travail exige au total plusieurs centaines de milliers de courses, on conçoit que si le mouvement est donné à la main par une personne qui sait à *peu près* l'amplitude qu'il faut donner au mouvement, il se produira à la longue une compensation étonnamment exacte

des erreurs individuelles; on peut dire que plus l'opérateur fera de maladresses différentes, mieux il réussira.

Quand on taille un grand miroir de plus de 1 mètre, la manœuvre de l'outil peut dépasser les forces d'un homme ou de plusieurs ; on est bien forcé de prendre une machine ; la difficulté consiste alors à savoir rompre de façon aussi incohérente que possible la « personnalité » de cette machine; on termine toujours d'ailleurs par un travail local à la main.

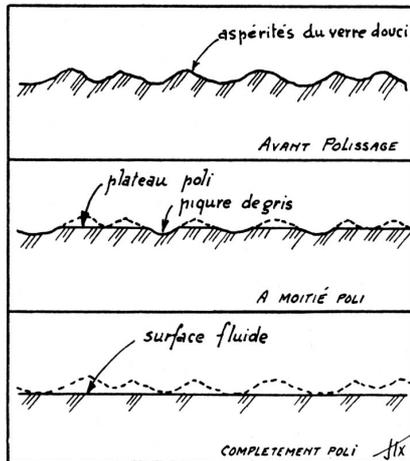


Fig. 14. – Illustration de la théorie de Lord Rayleigh.

L'exécution de la surface optique d'un miroir comporte trois phases principales :

L'ébauchage : Partant d'un disque brut en verre, dont les faces sont approximativement planes, on creuse l'une d'elles en la rodant sur une contrepartie qui est un autre disque en verre de même diamètre, en interposant un abrasif très dur relativement grossier [carbo de 2/10 de millimètre de grosseur (fig. 15 A)] et en faisant des courses très anormales qui ont pour effet de localiser la pression presque uniquement au centre du disque miroir, ce qui lui donne rapidement et *grosso modo* la concavité désirée

L'apprêt et le douci ont le double but d'améliorer la forme générale

précédente et de diminuer le plus possible l'importance des accidents élémentaires de façon à rendre le polissage praticable. A l'inverse de l'ébauchage on emploie maintenant des abrasifs de grosseur décroissante dont les plus fins sont composés de grains de quelques microns (fig. 15B) de diamètre et des courses normales tendant à produire une action uniforme sur toute la surface. Quand les accidents n'ont plus que quelques microns de profondeur, il devient difficile de les réduire de façon très régulière simultanément partout, l'idée pourtant logique de passer insensiblement du douci au poli est contredite par l'expérience, il y a discontinuité entre les deux: il semble que la petitesse des accidents que l'on peut détacher du verre soit limitée ; notre bon sens est ici en défaut.

Le polissage est en effet une opération bien différente, le rouge à polir composé de grains réguliers de $0,5 \mu$ de diamètre (fig. 15 C) produirait une sorte de douci si l'on continuait d'utiliser tel quel « l'outil » dur précédent. On le recouvre d'une substance comme la poix capable de se mouler à la longue à la forme exacte du verre à travailler, mais rigide pendant le faible temps que dure une course ⁽¹⁾ ; c'est dans cette substance que les grains de rouge vont se loger pour constituer le polissoir.

⁽¹⁾ A. COUDER, *Lunettes et Télescopes*, § 45, p. 145.

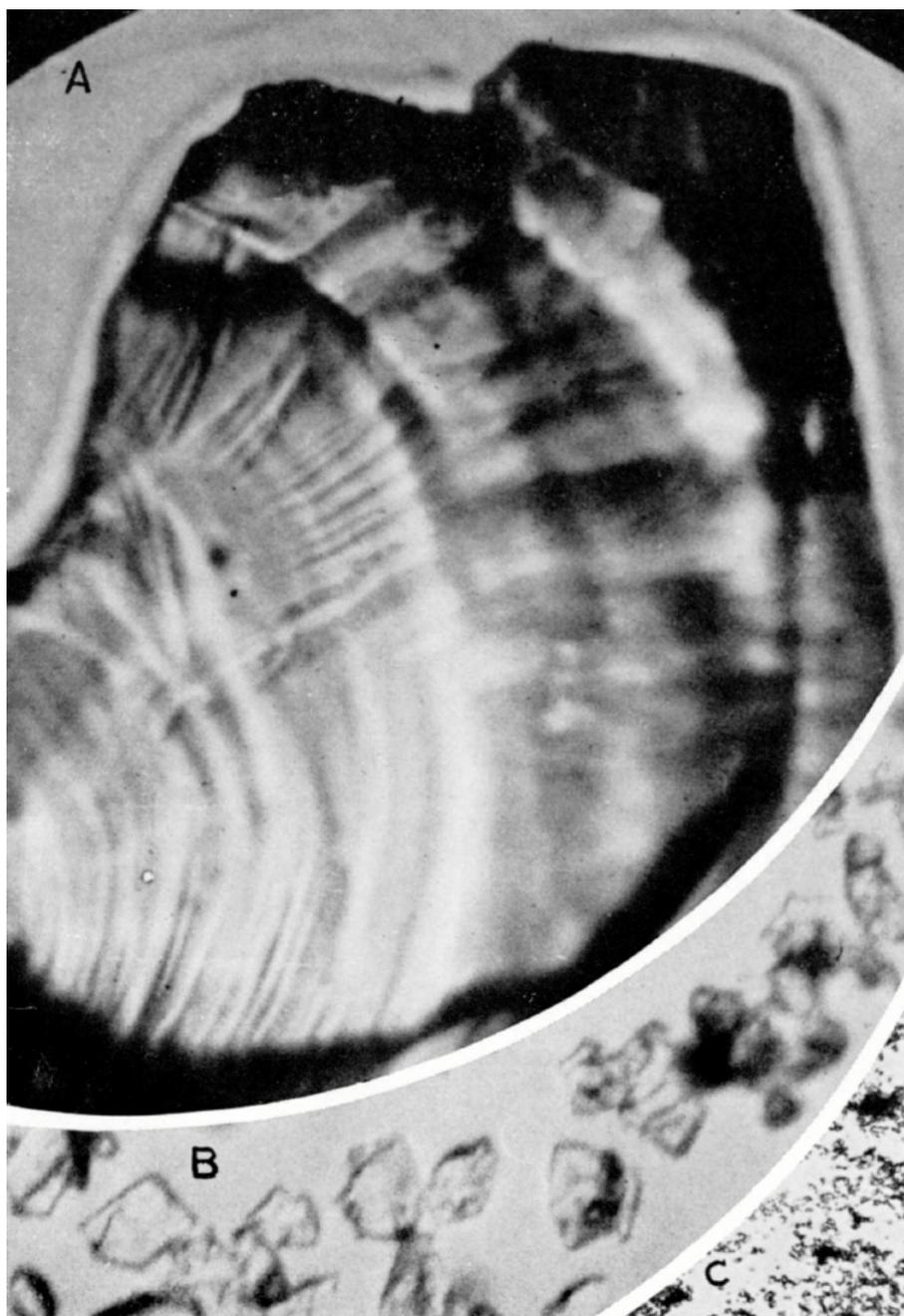


Fig. 15. – A la même échelle (Gros. 1 100) :

- A) Fragment d'un grain de carbo 120.
- B) Quelques grains d'émeris à doucir BM 303.
- C) Grains de rouge à polir.

Mais il est difficile d'avoir une idée claire de ce qui se passe pendant le travail. Les plus célèbres amateurs tailleurs de miroirs, Newton et Herschel, croyaient que le polissage n'était qu'une sorte de rodage fin dont les accidents devenaient assez petits pour constituer une surface unie au degré voulu. Elihu Thompson ⁽¹⁾ ; poursuivant cette idée, décrit l'action du polissoir à la poix garni de particules de rouge s'ajustant automatiquement à un niveau commun au cours du pressage et du travail et produisant un réseau de rayures ultra microscopiques ; de même J. Strong⁽²⁾ dit que les particules d'abrasif ont leurs faces cristallines orientées identiquement par le mouvement et parallèlement à la surface, le polissoir devenant un « grattoir complexe » dont les éléments automatiquement ajustés au même niveau, produisent une coupe très douce. B. Lyot, qui a considéré la question du polissage avec une rigueur particulière pour ses lentilles de coronographe, déclare effectivement avoir observé en projetant l'image d'un cratère d'un arc électrique puissant sur une surface pourtant polie avec un soin particulier, d'innombrables petites rayures croisées en tous sens. Pourtant l'explication jugée généralement la plus satisfaisante est celle de Lord Rayleigh ⁽³⁾ qui remarque que, dès le début du polissage les sommets des accidents sont nivelés avec un fini parfait, l'ultra-microscope ne montre rien, les petits plateaux ainsi formés augmentent en surface jusqu'à ce que l'on ait atteint le fond des piqûres les plus profondes, mais la qualité des aires polies ne change pas, les accidents sont à l'échelle moléculaire comme ceux de la surface libre d'un *fluide*.

Le verre est donc arraché à une échelle moléculaire (on pèse la pièce avant et après) processus radicalement différent de l'action de l'abrasif sur un outil dur qui détache toujours des éclats énormes par rapport aux molécules.

Cependant il n'est pas sûr qu'il n'y ait que du verre enlevé au polissage d'ingénieuses expériences de Motz ⁽⁴⁾, Selby ⁽⁵⁾ tendent à montrer l'existence au cours du polissage d'une couche de Beilby ⁽⁶⁾ bien mise en évidence dans le polissage des métaux. La force importante transformée en chaleur au cours du travail suffirait, étant donné la mauvaise conductibilité du verre et de la poix. pour ramollir une couche de verre très mince aussitôt étalée par fluage, comme du beurre sur du pain, disent certains auteurs : cette explication surprenante ferait mieux comprendre l'apparition de piqûres en quelque sorte débouchées quand on reprend, avec une méthode moins violente, le polissage d'une surface travaillée brutalement par l'industrie. Sans contester la valeur des idées de Lord Rayleigh on peut très bien admettre une part d'épanchement vraisemblablement très faible d'ailleurs dans le travail de l'optique astronomique.

On voit que, malgré la simplicité des moyens employés, une explication réellement satisfaisante de ce qui se passe, comporte de grosses difficultés.

Le microscope optique montre encore facilement les grains de rouge dont la grosseur ($0 \mu 5$) ne semble guère modifiée même après un polissage brutal

⁽¹⁾ « The mechanics of optical polishing. » *J.O.S.A.*, t. 6, 8 oct. 1922. p. 843-847.

⁽²⁾ *Procedures in experimental physics*, p. 32 (New York Prentice-Hall, inc.).

⁽³⁾ *Nature*, t. 64, 1901. p. 385 ; *Scientific Papers*, vol. IV, p. 542.

⁽⁴⁾ « On the nature of a polished surface. » *J.O.S.A.*, t. 32, 3 mars 1942, p. 147

⁽⁵⁾ *Scientific American*, déc. 1938, p. 378.

⁽⁶⁾ *Aggregation and flow in solids*, 1921..

(fig. 15 C), mais il est déjà difficile de dire comment ils se fixent dans la poix et il nous paraît impossible de parler de leur mode d'action sans tenir compte des tensions superficielles et des attractions moléculaires énormes qui existent au niveau de la couche de verre fraîchement mise à nu, quand l'eau devient rare en fin de séchée. Si le mode d'action n'est pas clair à notre échelle, le résultat semble contrôlable de façon assez fidèle, sans parler du microscope électronique qui ne manquera pas de fournir de précieux renseignements sur les accidents élémentaires de surface polies ; mentionnons la belle méthode, récemment mise au point par B. Lyot ⁽¹⁾ qui met en évidence les défauts de quelques millimètres carrés de surface qui correspond en hauteur à des dénivellations à l'échelle moléculaire (quelques angströms !) présentés par des verres très bien polis (fig. 47). Mais il nous faut revenir aux défauts, encore plus étendus qui intéressent la forme générale de la pièce optique ; nous savons avec quelle précision cette forme doit être respectée (§4), les procédés que nous avons décrits permettent bien d'obtenir d'emblée des petites surfaces sphériques assez précises si *aucune cause* d'erreur n'a pu s'introduire, mais il serait imprudent de compter systématiquement là-dessus et, en tout cas, impossible avec un verre d'une vingtaine de centimètres un peu déformé ; heureusement Léon Foucault nous a laissé un moyen de contrôle merveilleux universellement employé et qui permet de *voir* les défauts de sphéricité comme s'ils étaient accessibles à nos sens ; dans les meilleures conditions on met en évidence avec des moyens très simples des défauts dix fois plus petits que ceux qui peuvent commencer à porter atteinte aux images. Le défaut une fois reconnu en grandeur et position, la retouche s'opère en perturbant convenablement l'action du polissoir à l'endroit voulu, mais il est difficile d'être vraiment maître de cette action parce qu'elle n'est pas clairement intelligible à nos sens ; il faut donc s'efforcer d'obtenir d'emblée la forme voulue avec la meilleure approximation possible afin de réduire le travail « local » au minimum, l'habileté de l'opticien se mesure autant à son aptitude à produire, par les méthodes générales, la surface désirée avec une bonne approximation qu'à effacer sans laisser de trace la dernière zone saillante.

Tout ce que nous avons dit dans ce paragraphe ne constitue qu'une mise en garde du lecteur contre son « bon sens », les raisonnements simplistes ne manqueront pas de lui venir à l'esprit quand il tournera autour de son miroir (condition très favorable au fonctionnement des cellules grises). Nous n'avons pas eu la prétention d'expliquer *le pourquoi*, alors que *le comment* nous suffira, pour arriver au *résultat* ; ceux qui s'en contenteront n'auront aucune peine à obtenir leur miroir, les autres feront bien, s'ils ne disposent pas d'un temps illimité, de terminer le leur également et de faire la cinématique *après*.

10. La matière première. - Le miroir principal, assez massif, doit cependant conserver le mieux possible sa forme rigoureuse pendant les variations de température inévitable. Les propriétés physiques des corps utilisables fournissent un premier argument pour le choix de la matière.

⁽¹⁾ Procédés permettant d'étudier les irrégularités d'une surface optique bien polie. *C. R. Ac. Sc.* Paris, t. 222, 1946, p. 765-768.

⁽²⁾ A. COUDER, *Recherches sur les déformations des grands miroirs employés aux observations astronomiques*, p. 108.

Prenons après A. Couder ⁽²⁾ la quantité $\frac{adc}{m}$, figurant à la dernière colonne du tableau ci-dessous, comme caractéristique des déformations thermiques prises dans des conditions données par des disques géométriquement identiques :

MATIERE	DENSITE δ	CHALEUR SPECIFIQUE c	CONDUCTIVITE CALORIFIQUE m	COEFFICIENT DE DILATATION $a \times 10^7$	$\frac{adc}{m} \times 10^7$
Glace à miroirs	2,5	0,20	0,0018	75	20833
Verre DURAN50 (Schott)	2,23	0,18	0,0028	32	4587
Silice fondue (Corning 7940)	2,202	0,177	0,0033	5	591
Silice ULE titanosilicate (Corning 7971)	2,213	0,183	0,00313	0,2	25,9
Céramiques microcristallines CER-VIT (Owens Illinois), ZERODUR (Schott)	2,50	0,217	0,004	0,2	27,1
Bronze à miroirs	8,6	0,079	0,20	186	631,8
Béryllium	1,84	0,425	0,34	120// 90 ⊥	276 207

Le bronze est à titre de curiosité ; aucun métal ne possède une stabilité structurale suffisante dans le temps ni une homogénéité superficielle acceptable pour la réalisation d'une surface optique de précision comme nous l'entendons de nos jours. Le remplacement du bronze par le verre en 1856 (L. Foucault et Steinheil) a marqué un progrès décisif dans l'histoire des réflecteurs.

Le tableau fait apparaître l'intérêt de la silice fondue dont les propriétés calorifiques exceptionnelles s'associent à une dureté, une stabilité, une inaltérabilité excellentes.

L'industrie sait produire actuellement des disques ⁽¹⁾ en silice fondue comportant un noyau obtenu par fusion de sable, ce qui le rend laiteux, pris en sandwich entre deux couches de silice obtenue à partir de canons de quartz seule susceptible d'un poli optique.

Le diamètre de ces disques peut atteindre 60 centimètres mais le prix en est très élevé et la dépense n'est justifiée que pour des miroirs plans de cœlostats directement exposés au soleil. En outre l'ébauchage serait extrêmement pénible pour un amateur mal outillé.

Le Pyrex, très employé par les amateurs américains est beaucoup plus difficile à obtenir en France en disques de dimensions suffisantes. Sa dureté et son inaltérabilité sont supérieures à celles de la glace mais la difficulté de sa fusion pâteuse crée souvent des sirops internes qui affleurés au polissage sont une cause de défauts non retouchables. En outre le recuit est négligé.

Malgré ses propriétés *à priori* défavorables la simple glace de Saint-Gobain est en fait très intéressante pour les petits miroirs d'amateurs. L'on pourrait se contenter, surtout pour les outils de disques simplement taillés dans des dallages à faces grossières ; il est cependant préférable de commander des disques spécialement choisis et recuits au moins en ce qui concerne le miroir. L'handicap apparent de la glace ne s'observe pas en fait, surtout avec les petits miroirs, parce que les déformations réelles des disques au cours des changements de température paraissent liées bien davantage à des défauts de recuit, qu'il faudrait chiffrer dans chaque cas particulier, qu'aux propriétés physiques générales qui expliquent mal ou pas du tout les phénomènes observés. En effet un verre comprend deux variétés allotropiques dont les propriétés physiques et

⁽¹⁾ Les adresses des fournisseurs principaux sont données § 13.

notamment le coefficient de dilatation, sont légèrement différentes. La variété α est stable à froid et le verre β stable à chaud. Le point de transformation est voisin de 650 °C. Refroidir trop vite un disque revient à emprisonner un noyau de verre β dans une cangue de verre α , durcie prématurément, et qui lui impose des tensions ; d'où biréfringence, ce qui ne gêne pas pour un miroir de télescope mais aussi instabilité structurale et grande sensibilité aux variations de température.

La solution luxueuse pour l'amateur consiste à commander un disque miroir *en verre d'optique recuit fin astronomique* ; le verre CALEX de Parra Mantois est particulièrement intéressant et pas trop onéreux si l'on se contente de la qualité *second choix* qui peut comporter des petits défauts internes sans aucune importance pour un miroir. Seul le recuit fin est vraiment essentiel et à ce point de vue les progrès récents en verrerie scientifique ont permis d'atteindre une perfection extraordinaire.

Pour le diamètre à commander, il faut majorer d'un centimètre l'ouverture nominale désirée pour tenir compte du biseau indispensable et des défauts optiques du bord externe que l'on ne peut toujours complètement éviter. L'épaisseur du miroir ne doit pas être choisie au hasard : le montage correct des petits miroirs se fait le plus simplement en les posant sur trois points saillants de la monture, disposés aux sommets d'un triangle équilatéral juste inscrit dans le contour du verre; la relation de A. Couder ⁽¹⁾ permet de calculer alors l'épaisseur minimum d'un disque qui ne présente pas de flexion de caractère optique nuisible dans ces conditions quand l'instrument vise au zénith :

$$\frac{R^4}{e^2} \leq 1000$$

R = rayon du miroir en centimètres

e = épaisseur du miroir en centimètres

D = 2R cm	e cm	Poids (g)
16	2,5	1 250
18	2,7	1 700
20	3,3	2 600
22	4,0	3 800
24	4,8	5 430

Voici quelques exemples avec des épaisseurs légèrement majorées pour tenir compte des pertes à l'ébauchage. Le poids du télescope croit très vite avec celui du miroir, une épaisseur inutilement grande est donc beaucoup plus onéreuse qu'on ne le pense *a priori* et présente en outre de sérieux inconvénients pour l'équilibrage thermique. Au delà du dernier diamètre du tableau, il devient préférable de compliquer le barillet plutôt que de continuer à respecter la relation qui conduirait rapidement à des épaisseurs prohibitives (on trouvera tous les renseignements voulus dans le mémoire cité et § 84).

L'épaisseur du disque outil peut être plus faible, d'où possibilité de polir avec l'outil dessus et des pressions plus faibles. On prendra donc des dalles de 25 millimètres environ d'épaisseur pour les outils jusqu'à 20 centimètres de diamètre et de 30 millimètres pour ceux qui ne dépassent pas 30 centimètres.

⁽¹⁾ A.COUDER, thèse, *Recherche sur des déformations des grands miroirs employés aux observations astronomiques*, p. 59. A défaut, voir *Lunettes et Télescopes*, § 120, p. 567.

11. **Abrasifs.** - Le carbure de silicium SiC ou *Carborundum*, obtenu industriellement au four électrique, est une poudre d'un bleu noir ou verdâtre suivant la qualité. Les grains sont triés au moyen de tamis dont le nombre de mailles au pouce carré définit commercialement le numéro. La très grande dureté de cet abrasif permet de gagner un temps sensible à l'ébauchage, le grain 80 (c'est-à-dire trié avec le tamis à 80 mailles) est souvent employé par les amateurs ; mais, si le miroir ne dépasse pas 20 centimètres de diamètre et une flèche de 1 mm,5, il est préférable de s'en tenir au grain n° 120 qui laisse des accidents plus faciles à rattraper. (Nous donnerons les quantités au § 13.) Certains fabricants étrangers ont des séries très riches qui s'étendent jusqu'au n° 3200 et qui peuvent servir à apprêter et doucir complètement les miroirs, surtout ceux en verres durs comme le Pyrex, mais il ne faut pas y songer chez nous, on se contentera d'ébaucher au carbo le travail étant poursuivi avec l'un des abrasifs moins durs suivant :

Le corindon industriel (corindite de certains fournisseurs) est numéroté dans le même système que le carbo, mais il faut noter qu'à numéro égal il produit des accidents plus petits et use moins vite que le carbo à cause de sa dureté moins grande ; quelques maisons du marché parisien sont assez bien assorties, les gains qui nous intéressent vont du 120 au 1200.

Le marché américain et anglais dispose d'excellents corindons blancs dont les grains très homogènes sont triés par centrifugation, ils sont vendus dans des boîtes métalliques de 5 livres anglaises. Ces produits de *l'American Optical C^{ie}* et de la *British American Optical C^{ie}* sont importés en France par *Goldring*. La maison Mercier vend également une série de corindons blancs légèrement rosés à peu près équivalents (voir tableau p.26).

L'émeri reste chez nous un abrasif important et qui donne d'excellents résultats pour le doucissage. C'est de l'alumine naturelle Al_2O_3 que l'on trouve sous forme de roches (île de Naxos) mélangée à des impuretés diverses (oxyde de fer) qui lui donnent une teinte brune ou rougeâtre ; après broyage, on obtient une poudre qui est encore souvent triée par le vieux procédé classique de la lévigation et dont il faut dire quelques mots, car il peut nous servir :

Les grains d'émeri tombent dans l'eau d'autant plus rapidement qu'ils sont plus gros ; si l'on brasse bien une certaine quantité de poudre dans un récipient plein d'eau assez haut, on conçoit qu'au bout d'un certain temps (compté en minutes, d'où le nom de minutage donné à l'opération), il ne restera en suspension que les grains trop fins pour pouvoir se déposer pendant ce temps ; en siphonnant cette eau et en laissant déposer l'émeri qu'elle contient, on recueillera donc de l'émeri à tant de minutes. Le minutage théorique se rapporte à une chute dans un mètre d'eau ; pratiquement les émeris de même numéro livrés par différents fournisseurs sont aussi peu comparables entre eux que les rapidités des émulsions photographiques données par les fabricants ; malheureusement ce n'est pas leur plus grave défaut. Sans parler du danger de contamination par les poudres plus grosses pour les émeris vendus en vrac, dans des sacs en papier et dont on ne saurait trop se méfier, il faut attirer l'attention sur une opération importante que les fournisseurs non opticiens ne font pas subir à leurs émeris minutés : c'est le "débouillage". Quand on recueille les émeris les plus fins utilisés pratiquement, c'est-à-dire ceux de 40 et de

60 minutes, on n'obtient pas seulement les grains qui franchissent un mètre d'eau en 40 ou 60 minutes, mais tous ceux qui sont encore plus petits, y compris une sorte de farine qui constitue une boue *très nuisible* à un travail d'abrasion correct. C'est un peu comme si l'on voulait utiliser de l'émeri qui vient de servir et qui est encombré des débris de verre ; pour tirer parti de tels émeris, il est utile de les laver de nombreuses fois en utilisant un seau d'une dizaine de litres pour 1 kilogramme d'émeri au plus ; on commence par bien brasser pendant plusieurs minutes pour bien séparer la boue des grains utiles et on laisse reposer un temps suffisant pour que l'émeri utile se dépose ; la boue qui surnage et la poussière qui reste en suspension doivent être *rejetées* avec l'eau du seau. On renouvelle l'eau et on recommence tant que l'émeri ne se dépose pas franchement en une masse brun foncé ou noirâtre laissant une eau de décantation claire. On pouvait obtenir avant guerre d'excellents émeris bien débourbés auprès des grosses maisons de lunetterie qui les récupéraient à partir d'émeris usés convenablement lavés et minutés. Avec les émeris ordinaires actuels du commerce, il faut s'estimer heureux si l'on peut récupérer 50 % du poids initial en émeri utilisable.

12. Produits à polir. – *Poix pour polissoirs.* - C'est une sorte de résine noire sécrétée par les sapins du Nord qui fond vers 60°, mais se moule très bien à la température ordinaire à la forme d'un objet, si elle est pressée longuement contre lui. Cette viscosité de la poix est peut-être sa qualité la plus précieuse ; il faut bien se garder de la réduire par addition de cire ou autres ingrédients. Les poix les plus réputées en optique proviennent de Suède, d'Arkhangelsk et de Norvège, et sont vendues en tonneaux ; celle que l'on achète en pains de 1 kilogramme a souvent été chauffée sans précaution par le détaillant et a perdu certaines de ses qualités : on peut juger de sa valeur en tenant un petit fragment dans la bouche pendant quelques minutes : si l'on peut la mâcher et l'étirer comme du "chewing-gum", elle est très bonne ; si elle se brise sous la dent, on pourra l'améliorer en ajoutant de l'essence de térébenthine, ce qui ne remplacera pas tous les solvants naturels qu'un chauffage maladroit lui a fait perdre. Comme il n'est pas facile d'obtenir toujours de la poix véritable, mentionnons comme produits de remplacement utilisables la résine, adoucie par de l'huile de lin et le brai de goudron convenablement choisi, épuré et filtré.

Le mélange mis au point en 1964 à l'atelier d'optique de l'observatoire de Kitt-Peak est excellent, il donne des outils qui prennent bien le blanc ou le rouge et s'ajuste au mieux aux températures non idéales : 2 parties de résine, 1 partie de brai, ajustage de la dureté avec Hercolyn (liquide visqueux produit par la firme Hercules Powder, Delaware USA) que l'on peut imiter en prenant par exemple : 1 kg de résine, 0,5 kg de brai ou de poix récupérée ayant déjà été durcie et 150 cc (plus ou moins suivant la température) d'huile de ricin .

Rouge à polir. -- Quoi qu'on puisse dire le bon rouge est probablement le meilleur de tous les agents de polissage, pour l'optique de précision. La calcination à l'air libre de l'oxalate ferreux donne cette poudre dont les grains très colorés ont 0,5 μ de diamètre (fig. 15 C).

Le meilleur moyen pour obtenir du bon rouge est encore de calciner soi-même son oxalate ferreux. C'est une poudre jaune que l'on trouve chez les grands marchands de produits chimiques ; on en étale un lit de 2 à 3 centimètres d'épaisseur dans une poêle à frire en tôle bien propre, que l'on porte sur un feu vif (un réchaud à gaz ouvert en grand suffit). Il est utile de ventiler la pièce largement, car il y a dégagement notable d'oxyde de carbone. Au bout d'un quart d'heure, on voit la poudre brunir localement au contact de la poêle ;

on commence, très doucement d'abord pour éviter les projections, à la mélanger avec une large spatule métallique ; le chauffage continuant, toute la masse bien remuée devient brune, puis s'embrase comme de l'amadou. Il faut poursuivre l'opération jusqu'à ce que ce feu cesse de lui-même, ce qui indique que la calcination est achevée. On laisse refroidir et on lave le rouge dans un grand récipient de propreté vérifiée ; on peut aussi le passer à travers plusieurs épaisseurs de bas de soie, ou mieux, le plus fin tamis à farine que l'on pourra trouver. Le rouge se conserve à l'état humide comme les émeris dans de petits pots en verre à couvercle étanche.

Outre l'ennui de cette préparation, l'on rencontre parfois des difficultés dans l'approvisionnement de l'oxalate ferreux de la qualité convenable.

Signalons un bon rouge tout préparé, le BM 309 de la *British American Optical C^{ie}*. Rejeter rigoureusement tous les rouges industriels souvent obtenus par calcination de sulfate de fer : colcothar, rouge anglais, rouge français, rouge pour l'or, etc., tous ces produits rayent ou polissent très mal.

Oxyde de zirconium ou zircone. - C'est une poudre blanche dont les grains très durs ont également un diamètre de $0 \mu 5$. Nous utilisons ce produit de préférence au rouge depuis le polissage du grand miroir de 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence pour lequel nous n'avions pu obtenir d'oxalate ferreux de qualité suivie. Ce produit est beaucoup moins salissant que le rouge et polit un peu plus rapidement mais il est d'emploi plus délicat pour le débutant ; une action brutale du polissoir en fin de séchée peut produire des dégâts (fig. 46) que l'on n'observe jamais avec le rouge. Cette poudre une fois mouillée sédimente à un tel point que l'agitation d'un pinceau ne suffit plus à mobiliser convenablement les grains après quelques heures de repos, en quelques jours elle constitue un mortier inutilisable ; l'on doit donc seulement mouiller la quantité de blanc qui sera utilisée dans la journée.

Autres produits à polir - Ils sont actuellement légion ; en général l'on invoque l'avantage du polissage plus rapide auquel correspond pour nous toujours un risque d'obtenir des surfaces moins régulières et affectées d'un micromamelonnage (fig. 47) plus grossier.

Citons l'oxyde de cérium ou rose à polir, très employé dans l'industrie ; l'oxyde de titane et des produits vendus principalement aux États-Unis sous les noms commerciaux de *Zerox* et *Bâlite* (Bausch et Lomb), *Velor*, *Barnésite*, cette dernière particulièrement brutale et désastreuse pour le surfaçage de précision.

13. Résumé pratique, fournitures nécessaires et adresses utiles. - *Disque miroir.* - Verre à glace choisi et recuit spécialement ; épaisseur limitée à 45 mm ; solution la plus courante pour l'amateur :

S.O.V.I.S, Société de Verrerie Industrielle et Scientifique, 17, rue Jean Mermoz, Paris (8^e)

Verre d'optique Calex ; avantage du faible coefficient de dilatation et surtout du recuit fin astronomique ; le second choix suffit pour un disque miroir :

E^{ts} PARRA MANTOIS, 11, chemin de Ronde, Le Vésinet (S.-et-O.) : une remise spéciale de 10% est accordée aux membres de la Société Astronomique de France.

Pyrex ; avantage du faible coefficient de dilatation, disques trop minces en France :

CORNING GLASS WORKS, Optical Sales department, Corning, N.Y., U.S.A.
Paiements en dollars.

Silice fondue ; emploi exceptionnel principalement pour miroirs plans de coelostats :
THE THERMAL SYNDICAT Ltd, Wallsend, Northumberland, Grande-Bretagne
HERAEUS. représentant en France : Electroquartz, 104, rue de Larchant, Nemours (S.-
et-M.).

Disque outil. - Verre à glace choix courant, s'adresser à S.O.V.I.S. comme pour le miroir
ou à un détaillant en glacerie pour la fourniture d'une dalle sommairement arrondie.

Carbure de silicium ou carborundum :
PELISSIER, 75. rue Beaubourg, Paris (3^e).
C.I.A. MERCIER et C^{ie}, 8 et 10, . rue Carnot, Le Kremlin-Bicêtre (Seine) ; pas le détail
de petites quantités.

Corindons et émeri :
PELISSIER, adresse ci-dessus.
MERCIER, adresse ci-dessus.
GOLDRING et C^{ie}, corindons blancs. British Optical C^{ie}, 10, rue Camille Desmoulins,
Levallois-Perret (Seine).

Rouge à polir :
BM 309, GOLDRING, adresse ci-dessus.

Oxalate ferreux, à calciner :
POULENC, 12, rue Pelée, Paris (11^e).

Oxyde de zirconium :
Référence RZ, MERCIER, adresse ci-dessus.
Référence 309 BZ, GOLDRING, adresse ci-dessus.

Poix pour l'optique :
PELISSIER, adresse ci-dessus.
LEMOINE, 9, rue de Thorigny, Paris (3^e).

Colis complets, abrasifs poix et rouge :
MÉVOLHON, chemin des Plantiers, Manosque (Basses-Alpes).

Equivalences approximatives des abrasifs et quantités utiles.

OPERATION	QUANTITES	GROSSEUR	CARBO	EMERIS	CORINDON	
					BLANC GOLDRING	BLANC MERCIER
Ebauchage	1 kg	200 µ	80			
Réunissage	500 g	100 µ		1 mn		100 ou 120
----	400 g	50 µ		2 mn	180	W 180
Apprêt	250 g	25 µ		5 mn	302	W 1
----	150 g	19 µ		10 mn	302 ½	W 2
Doucissage	100 g	12 µ		20 mn	303	W 3
----	50 g	10 µ		40 mn	303 ½	W 4
----	50 g	8 µ		60 mn	304	W 5
Polissage	1 kg	Poix pour l'optique				
----	500 g	Oxalate ferreux à calciner ou				
----	250 g	Rouge à polir BM 309 ou				
----	250 g	Oxyde de zirconium ; RZ Mercier ; 309 BZ Goldring				

PS (2002) - De nos jours cette liste est complètement à revoir tant par les nouvelles
possibilités, notamment en matière d'abrasifs, que par les facilités d'approvisionnement sur
le marché français par un amateur.

Les grosseurs de grains et les numéros ne peuvent avoir un caractère absolu d'autant plus qu'à des procédés de triage différents correspondent des équivalences assez aléatoires. On a plutôt tenu compte ici d'une similitude approchée des résultats. La manière d'utiliser l'émeri et le nombre de séchées influent également grandement sur les résultats à un tel point qu'un numéro d'émeri peut être entièrement supprimé au prix d'un travail prolongé avec les grains qui l'encadrent. Les quantités indiquées suffisent normalement pour réaliser un miroir de 200 mais les fournisseurs n'accepteront pas en général de détailler les produits surtout s'il faut faire une expédition en province.

14. Matériel utile pour tailler le miroir. - Il est extrêmement sommaire et peut être en grande partie emprunté à l'outillage ménager. Mentionnons spécialement :

LE POSTE : Le travail des miroirs à la main est dit : à poste fixe. Le poste peut être le plus simplement réalisé dans l'angle d'un établi ou d'une forte table de cuisine (fig. 16 A), trois cales vissées sur la table préviennent l'entraînement du disque inférieur tout en permettant de le faire tourner facilement ou d'invertir les deux disques (R. W. Porter). La figure 16 B montre un perfectionnement de ce montage, qui comporte un plateau tournant, ce qui permet de rester assis en face du travail ; ces dispositions ne valent pas cependant les véritables postes complètement isolés et permettant de circuler facilement autour. Bien des opticiens fameux ou classiques (Draper, Metcalf, Ellison, etc) ont travaillé sur un tonneau dressé verticalement (fig. 16 C) et suffisamment lesté pour que l'on ne puisse l'ébranler en travaillant. La figure 16 D représente un modèle de poste souvent adopté par les amateurs des clubs américains. Les deux derniers modèles (fig. 16 E et 16 F) sont employés à l'atelier de la Commission des Instruments depuis 1946 ; le premier, construit par notre collègue Luc Ott avec trois poteaux assemblés par des planches, possède un plateau juste suffisant pour un miroir de 20 centimètres, pour réduire son encombrement au minimum ; nous avons réalisé le second à l'atelier de la Commission en nous inspirant des pieds d'instruments bien conçus ; on notera l'écartement considérable des lattes de chaque branche du pied, ce qui permet de les faire travailler presque uniquement à la traction ou à la compression. Quelle que soit la direction de l'effort, on obtient ainsi une rigidité très grande avec des sections de bois minimales.

Quel que soit le modèle de poste adopté, on portera l'attention sur les points suivants ;

Rigidité générale et stabilité : Il faut prévoir des efforts importants au polissage et un lest suffisant ; *hauteur du plateau,* suivant la taille de l'opérateur elle pourra être de 90 centimètres à 1 mètre ; certains préfèrent des hauteurs de 1m,20 et même jusqu'à 1m,50 mais pour travailler sans fatigue, la hauteur du coude au-dessus du sol est un maximum. *Planéité du plateau* sur lequel on posera le verre : malgré l'interposition de ronds du molleton ou de flanelle, il faudra bien dégauchir cette face d'appui ; enfin il est *indispensable* de pouvoir

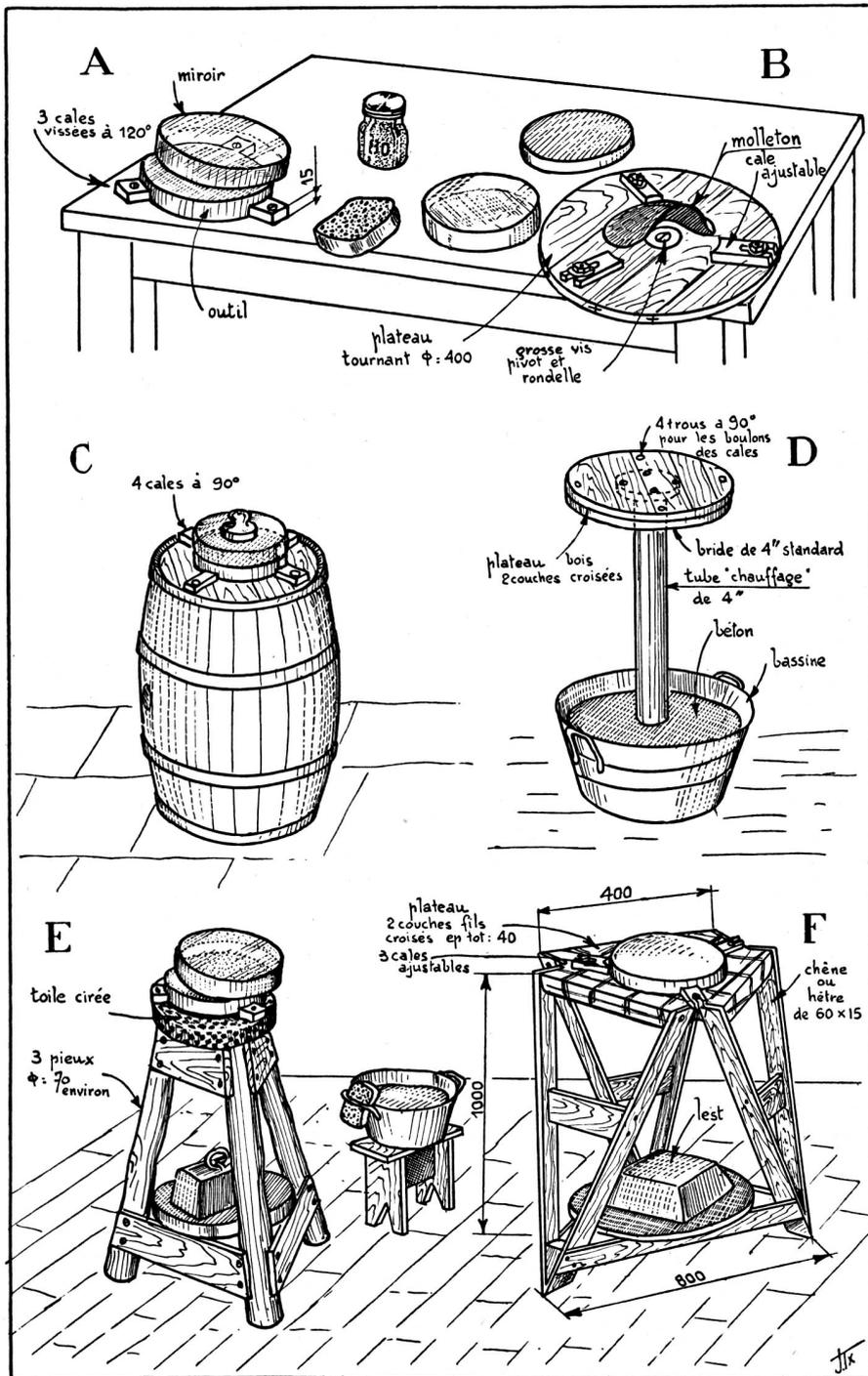


Fig. 16. - Différents modèles de postes fixes.

travailler indifféremment dans la position *miroir en dessus* ou en *dessous* ; il faut prévoir au moins une cale réglable pour les petites différences de diamètre inévitables et à cause des irrégularités du contour.

LE PETIT MATERIEL comprendra : une ou deux bassines un peu plus grandes en diamètre que le miroir, celles en matière plastique sont préférables pour les rinçages sans risque de casse ; quatre ou cinq éponges pas trop grandes (les éponges végétales « Spontex » à grain fin sont parfaitement suffisantes et économiques) ; des petits récipients en verre avec couvercle (pots à « Yaourt ») pour les abrasifs (avec une étiquette indispensable indiquant la grosseur et éventuellement la provenance et la qualité) et pour le rouge ; il est utile de pouvoir disposer d'un réchaud à gaz ou électrique muni d'une plaque en fer un peu plus grande que le miroir et ayant au moins 3 millimètres d'épaisseur, si possible un bec Bunsen à veilleuse ou, à défaut, une bougie ; enfin une quantité de chiffons blancs, le fer d'un outil à bois bien affûté, un grattoir, un petit pinceau pour le rouge, etc.

Pour le contrôle de l'ébauchage, une règle de mécanicien ou un bon pied à coulisse, un sphéromètre pourront rendre des services, mais ceci n'a rien d'obligatoire. Nous aurons l'occasion de décrire en détail l'appareil de contrôle par la méthode de Foucault. qu'il sera facile de construire soi-même.

15. Opérations annexes.- Le verrier nous livre les disques avec un débordage sommaire dont on se contente bien souvent. En effet un miroir bien monté ne doit porter que sur deux ou trois points au plus à 120° sur sa tranche qui n'a pas besoin, par conséquent, d'être parfaitement ronde et centrée

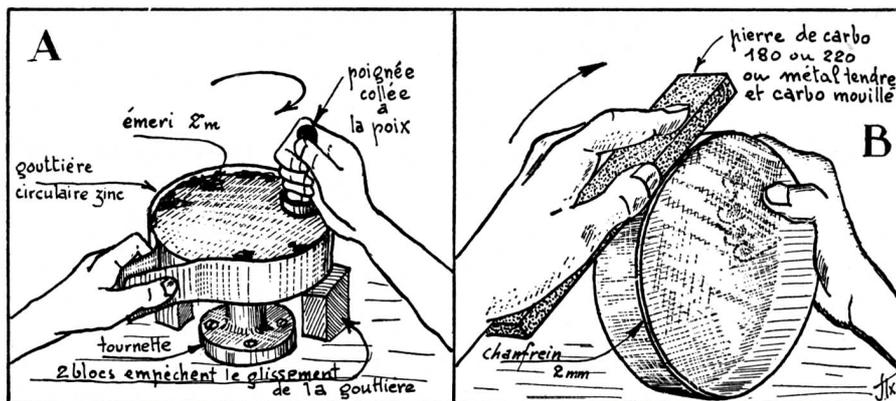


Fig. 17. – Egalisation sommaire des aspérités du bord.

comme celle d'une lentille d'objectif. Il n'est pas douteux cependant qu'un bord bien circulaire et rodé fin soit préférable ; ce n'est pas seulement pour une raison d'esthétique, mais il faut penser à la facilité du nettoyage au moment de l'aluminure; un bord rugueux retient toutes sortes d'impuretés (rouge à polir, etc.), très difficile à éliminer complètement. Nous ne décrivons pas l'opération du débordage proprement dit, car nous voulons systématiquement éviter de supposer que le lecteur possède une machine coûteuse (tour, perceuse), mais nous recommandons de régulariser les aspérités des disques bruts.

Si l'on possède une tournelette quelconque, qui peut être improvisée avec

une crapaudine, on peut coller le miroir à la poix sur le plateau supérieur en le centrant approximativement (voir § 16) ; on colle également près du bord une poignée qui sert de manivelle (fig. 17 A). Grâce au mouvement de rotation rendu ainsi possible, il est facile de régulariser rapidement les bosses locales et les aspérités au moyen d'une "gouttière" qui est une simple bande de zinc de 5/10 de millimètre d'épaisseur, un peu plus large que l'épaisseur du miroir et qui sert de support à l'abrasif interposé. Le procédé de la gouttière donne facilement des bords réguliers, mais ne peut évidemment pas corriger des erreurs à longue période comme une faible ovalisation, mais cela n'a pas une grande importance.

Si l'on renonce à l'emploi de la gouttière, il est tout de même bon d'égaliser les aspérités et de réduire le grain de la tranche avec une pierre de carbo plate (n° 220 par exemple), ou, à défaut, avec un morceau de fer plat ou de laiton que l'on frottera avec interposition d'abrasif (fig. 17 B).

Pendant que nous tenons la pierre de carbo, égalisons aussi les biseaux des deux faces et le cas échéant, augmentons leur importance ; un chanfrein de 2 millimètres à 45° ou un arrondi de ce rayon peuvent convenir pour un miroir d'environ 20 centimètres de diamètre ; au cours du travail de rodage, il tend à disparaître, ce qu'il faut *absolument éviter* ; si un des plateaux présente un bord tranchant de *sérieuses écailles se produisent au moindre choc* d'un corps dur, c'est surtout le biseau de l'outil qui s'use ; il est bon de lui donner tout de suite 3 ou 4 millimètres de large et encore il faudra peut-être le refaire avant la fin de l'ébauchage.

Vérifions enfin que les faces du disque miroir sont sensiblement parallèles, une erreur prismatique de 1 ou 2/10 de millimètre n'aurait pas grande importance et serait facile d'ailleurs à corriger, mais si elle atteignait 1 millimètre, pour éviter un surcroît inutile de travail d'ébauchage, il faudrait faire redresser le disque par la fabrique. La question du parallélisme ne se pose évidemment pas avec les disques hublots découpés dans de la glace polie de Saint Gobain dont les faces sont généralement parallèles à une dizaine de microns près.

16. Ebauchage du miroir. - Il faut d'abord choisir la face du disque miroir que l'on va creuser. Si le verre présente d'un côté des rugosités superficielles (dallage) n'ayant pas plus de 1 millimètre à 1mm,5 de profondeur, c'est cette face qu'il faut choisir ; mais, naturellement, s'il y a des fractures profondes qui risquent de ne pas partir complètement à l'ébauchage ou des bulles susceptibles de créer des «points crevés » sur la surface optique, on prendra l'autre face. Avec un disque ayant des faces rodées au grès, il est plus facile de repérer les défauts internes par transparence quand le verre est mouillé ou mieux huilé des deux côtés.

La manipulation des petits miroirs minces est facilitée en collant une poignée au dos, mais cela n'a rien d'indispensable et c'est même nuisible au moment du polissage. Rappelons à ceux qui colleront une poignée que la poix adhère mal sur un corps froid, surtout s'il est bon conducteur ; il est nécessaire de chauffer le miroir avant le collage ; un moyen rapide et sans danger ⁽¹⁾ consiste à le

⁽¹⁾ Le danger de chauffer un disque épais n'est jamais absolument nul, même des accessoires en Pyrex minces cassent parfois en laboratoire, on limite les risques au minimum en mettant le miroir dans l'eau froide sur des cales l'isolant du fond du récipient et en chauffant l'ensemble lentement (1 à 2° par minute).

plonger pendant quelques minutes dans de l'eau tiède (35 à 30°C, la main éprouve une sensation de chaleur non douloureuse) ; au sortir de l'eau, se méfier des refroidissements brusques (courants d'air) et sécher soigneusement le verre avant de verser un peu de poix fondue au milieu ; placer la poignée et centrer par rapport au contour, avant refroidissement.

La poix froide est cassante, elle cède d'un seul coup à un choc brusque, même assez léger ; pour détacher la poignée si le verre est bien froid, il suffit de la frapper d'un coup sec avec un petit maillet à manche un peu flexible.

Mise en route. - L'outil étant convenablement calé sur le poste (on peut laisser 1 millimètre de jeu pour pouvoir le tourner ou l'enlever sans difficulté). Etalons sur sa face 1 ou 2 centimètres cubes de carbo 80 ou 120 prélevés du récipient où on le conserve à l'état de boue humide, projetons avec les doigts

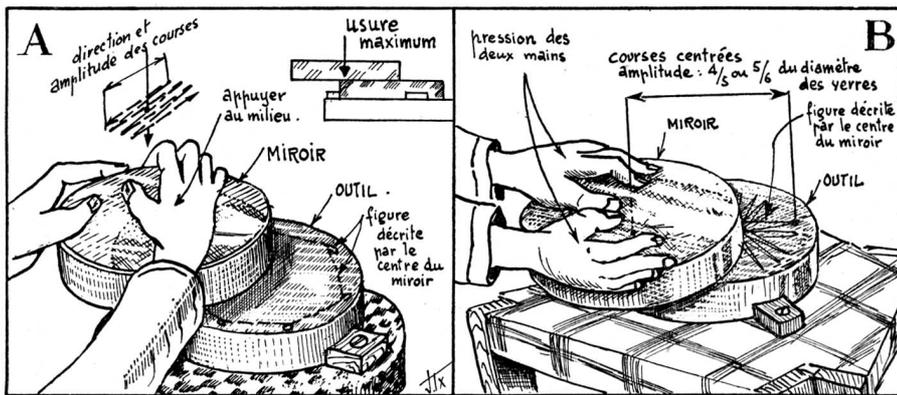


Fig. 18. – Courses d'ébauchage.

quelques gouttes d'eau supplémentaires, posons le miroir là-dessus et frottons ...

Pour obtenir un bon rendement et le creusement rapide de la concavité, on s'inspirera des principes suivants :

1° *Faire surplomber le miroir le plus possible* ; le centre du miroir peut aller avec sécurité jusqu'à 1 ou 2 centimètres du bord de l'outil et les courses rectilignes dirigées suivant des cordes (fig. 18 A et 19) pourront avoir une dizaine de centimètres avec des verres de 20 centimètres ; un tout petit peu d'expérience indiquera la limite non dangereuse pour le basculement du miroir au bord de l'outil. On peut faire cinq à dix courses rectilignes sur place, puis on tourne d'une fraction de tour le miroir entre les mains et l'on reprend le travail dans une direction un peu différente en se déplaçant autour du poste. Si le poste permet la rotation complète de l'opérateur, l'outil peut rester immobile ; autrement il faut le tourner en temps voulu de façon à user également toute sa périphérie. On voit, sur la figure 18 A, la figure décrite par le centre du miroir au cours de ce travail.

Il est bien inutile de tourner rapidement autour du poste, surtout à l'ébauchage ; tout le travail se fait par le mouvement de va-et-vient. A titre d'indication, disons que l'on peut faire 60 à 80 doubles courses pour un ou deux tours autour du poste ; pendant ce temps, on aura fait tourner le miroir de trois ou

quatre tours par exemple. Inutile de dire qu'il est puéril de s'attacher à respecter exactement ces valeurs.

Quand les disques ont des faces très rugueuses, il faut user un peu le bord du miroir également ; il est avantageux dans ce cas d'adopter des courses centrées (fig. 18 B) de très grande amplitude (Ellison) : $5/6$ du diamètre du miroir (16 centimètres avec un 20 centimètres)

2° *Exercer une grande pression sur le verre.* – Le carbo 80 ne donne toute son efficacité que si une pression suffisante lui est appliquée ; on ne doit pas craindre de peser de tout son poids au centre du verre (fig 18 A et 19). Si le



Fig. 19. – Ebauchage d'un miroir de 200 (atelier de la Commission S. A. F.).

miroir est mince et trop léger, il peut être avantageux de coller en guise de poignée, pour l'ébauchage seulement, un poids de plusieurs kilos.

3° *Mouiller correctement l'abrasif.* - S'il y a excès d'eau le carbo est rejeté sur les bords avant d'avoir pu produire tout l'effet utile ; s'il est trop sec, il se répartit mal, la poudre de verre produite par l'abrasion ne s'élimine pas et forme un mortier qui paralyse le mouvement aux dépens de l'efficacité. On est averti que le régime est correct par le bruit de l'abrasion très intense avec le carbo à l'ébauchage. Malgré sa grande dureté le carborundum ne résiste pas très longtemps à un tel travail ; au bout de peu de minutes (deux à quatre minutes suivant quantité initiale d'abrasif et énergie dépensée), le bruit de l'abrasion s'affaiblit, l'eau est fixée par la farine de verre. On pourrait prolonger un peu le travail en ajoutant juste assez d'eau pour débourber suffisamment le carbo sans perdre les grains utiles, mais il est plus avantageux pour le rendement d'interrompre le travail, *d'éponger complètement* les deux disques, de les *sécher* sommairement et de recommencer avec du carbo neuf. On vient de faire ce que l'on nomme en terme d'atelier : « une séchée » (les Anglais disent littéralement : « une mouillée », affaire de tempérament).

L'ébauchage d'un miroir de 20 centimètres à $\frac{f}{d} = 6$ demande environ trois heures de travail dans ces conditions, mais un débutant ne devra pas s'étonner s'il y passe un temps double.

17. **Contrôle du rayon de courbure.** - Le diamètre utile et le rapport $\frac{f}{D}$ choisis, fixent la longueur focale du miroir et par conséquent son rayon de courbure qui vaut le double de cette longueur focale. Par exemple le miroir standard de 20 centimètres à $\frac{f}{D} = 6$ a une longueur focale de $20 \times 6 = 120$ centimètres et un rayon de courbure de 240 centimètres. Il importe peu que la valeur choisie soit exactement respectée puisque nous ne

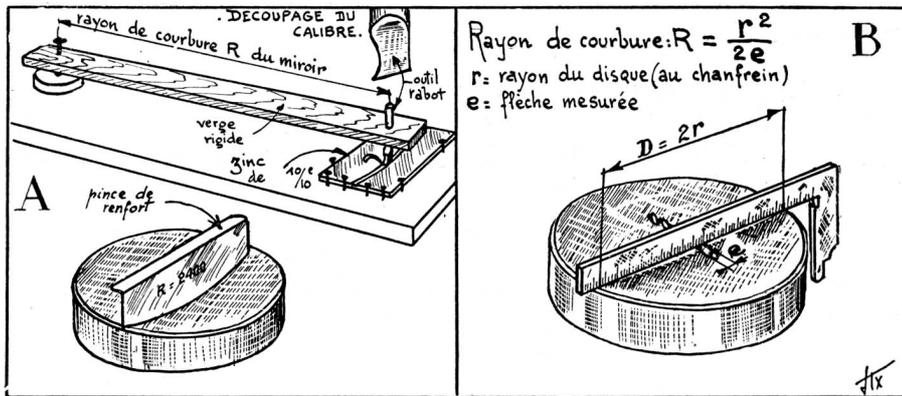


Fig. 20. – Contrôle sommaire du rayon d'ébauchage.

construirons le tube de l'instrument que quand nous posséderons l'optique ; aussi le rayon de courbure peut-il être contrôlé au cours de l'ébauchage par des moyens assez rudimentaires, même s'ils ne donnent qu'une approximation à quelques pour cent près.

Le plus commode, c'est de tailler un calibre que l'on peut tracer avec un compas à verge sur une feuille de métal facile à découper exactement à la cisaille (le zinc convient bien) ou mieux trancher directement avec la pointe traceuse du compas à verge taillée en rabot (fig. 20 A). L'appréciation des jours entre le calibre et le verre est un moyen sensible si l'éclairage est intense, mais il faut présenter le calibre dans des positions différentes pour mettre en évidence ses propres défauts.

Si l'on possède une bonne règle de mécanicien (celle d'un bon pied à coulisse peut en tenir lieu) on peut aussi mesurer la flèche de courbure, c'est-à-dire le creux que le verre présente au centre. Le rayon de courbure R s'obtient par la formule approchée qui suffit toujours en pratique :

$$R = \frac{r^2}{2e}$$

dans laquelle :

r est le rayon utile du disque, c'est-à-dire le demi-diamètre sur lequel repose la règle.

e est la flèche de courbure que l'on mesure en passant au centre des cales d'épaisseur connue (fig. 20 B).

Quand la cale est trop épaisse, la règle bascule dessus ; quand elle est trop mince, elle passe librement sans entraîner la règle. Par exemple, supposons que notre miroir mesure au biseau 197 millimètres ($r = 98,5$) et que nous ayons trouvé une flèche e de 1 mm,9, le rayon de courbure est de :

$$R = \frac{98,5^2}{1,9 \times 2} = 2\,552 \text{ millimètres}$$

Si nous désirons un rayon de 2 400 il faut continuer de creuser pour obtenir sensiblement 2 millimètres de flèche, mais ne cherchons pas à «figoler» ; les surfaces obtenues à l'ébauchage demandent à être améliorées en forme et en finesse et nous n'aurons aucune peine à obtenir un rayon plus exact au cours de ce travail.

18. Fin de l'ébauchage. - Sur la figure 21, où les courbures sont très exagérées pour la clarté du dessin, on voit que, dans la position très excentrée du disque miroir, adoptée pendant l'ébauchage, l'usure des plateaux n'est pas régulière : au bord du miroir subsiste un «cordon» plat et au centre de l'outil

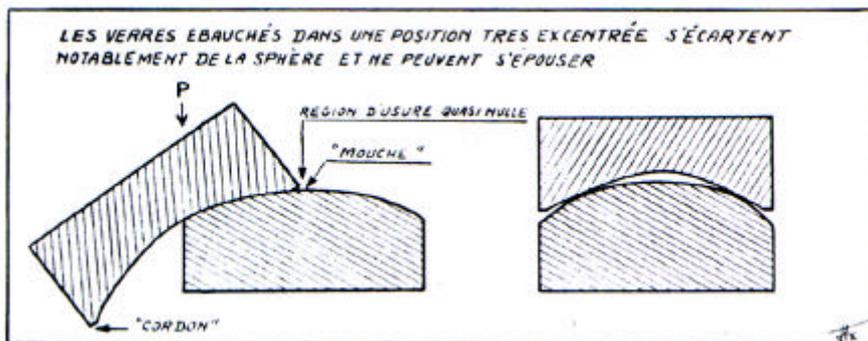


Fig. 21. - Déformation des verres ébauchés.

une «mouche». L'écart de sphéricité pouvant dépasser 2 /10 de millimètre sur un miroir de 20 centimètres, il faut songer à terminer l'ébauchage par une méthode moins rapide mais qui rattrapera ce défaut. Ce n'est pas difficile, il suffit de continuer le travail avec des courses à peu près centrées comme sur la figure 18 B, mais avec une amplitude totale du mouvement ne dépassant pas cette fois la moitié du diamètre des disques.

Au cours de ce travail le «cordon» et la «mouche» disparaissent ; il peut se faire aussi que l'on dépasse la flèche de courbure ; dans ce cas il suffit de continuer le travail avec le miroir en dessous en imprimant à l'outil exactement les mêmes courses. Pour cette fin d'ébauchage, afin de limiter la profondeur des fractures de carbo, toujours laborieuses à éliminer, il est clair qu'il faut cesser d'appliquer de grandes pressions ; le poids du miroir ou de l'outil additionné de celui des deux mains de l'opérateur posées normalement est bien suffisant. Le calibre promené suivant un diamètre montrera facilement si le

verre a à peu près le rayon de courbure et la forme voulus ; les opérations de l'apprêt et du douci qui vont suivre vont d'ailleurs améliorer automatiquement cette forme, mais il convient d'avoir bien présent à l'esprit qu'un travail patient et méthodique est nécessaire pour éliminer totalement l'hyperbole d'ébauchage. Un doucissage hâtif est souvent responsable d'hyperboles non retouchables au polissage.

19. **Apprêt et doucissage.** - Tout d'abord il faut nettoyer soigneusement et à grande eau, tous les objets qui ont touché au carborundum : miroir, outil, poste, table, etc. On portera surtout son attention sur les interstices susceptibles

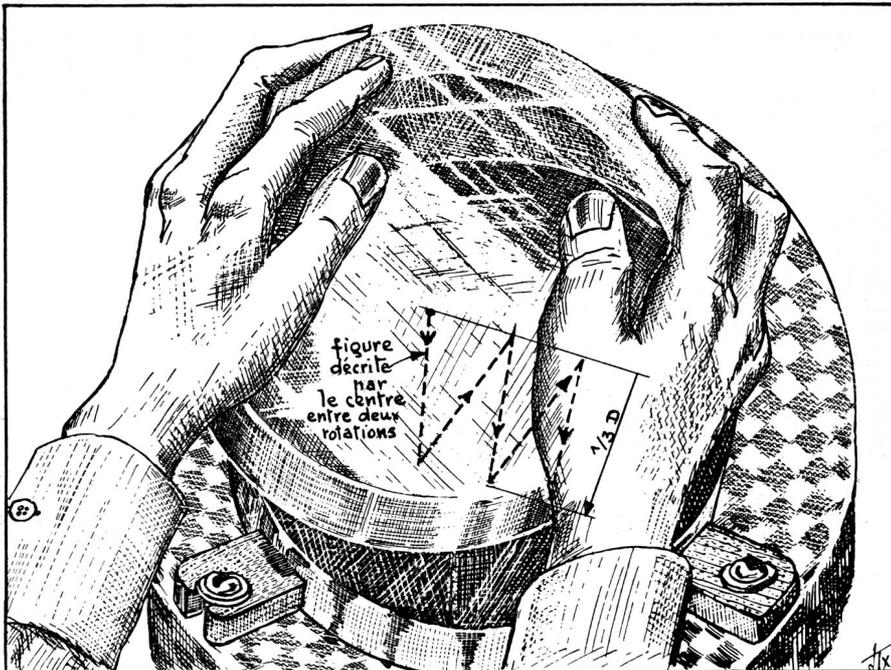


Fig. 22. – Coursées normales.

d'avoir retenu de l'abrasif grossier ; les cales latérales du poste seront démontées, brossées dans l'eau ou mieux, changées ; la poignée éventuelle peut être enlevée dès maintenant et le dos du miroir nettoyé. Si le poste n'est pas muni d'une toile cirée, avant de remonter les cales, on le recouvrira d'un papier blanc qui sera renouvelé à chaque changement d'émeri, la même précaution est utile pour la table de travail qui recevra uniquement les accessoires indispensables. Si l'on ne peut disposer que d'un seul récipient pour l'eau, il faudra le rincer plusieurs fois et s'assurer qu'il ne montre pas intérieurement ou extérieurement des petits points brillants de carbo. Le récipient et l'éponge à carbo seront rangés en dehors de l'atelier.

Ces précautions n'ont rien de puéril : un seul grain de carbo en fin de douci peut ruiner le fruit d'une journée de travail et les négligents apprendront vite la prudence à leurs dépens.

Le travail se poursuit avec de l'émeri 1 m dont les grains sont comparables à ceux du carbo 100 ou 120, mais qui laisse des fractures moins profondes à cause de sa dureté plus faible.

Nous adopterons maintenant de façon générale pour *tout le reste du travail* des *courses normales* sur lesquelles il faut attirer spécialement l'attention : elles consistent en un mouvement de va-et-vient à peu près centré (fig. 22 et 23) dont l'amplitude totale est d'environ $1/3$ du diamètre des disques (par conséquent il faut dépasser d'un sixième de chaque côté, soit 3 à 4 centimètres avec un miroir de 20 centimètres), avec un déport latéral constamment variable limité à $1/8$ au plus de chaque côté.



Fig. 23. – Doucissage d'un miroir de 200, amplitude de la course normale
(atelier de la Commission S. A. F.)

La forme des courses peut ainsi affecter celle d'un V ou d'un W ou celle d'une boucle plus compliquée comme un ∞ par exemple (G. W. Ritchey). Toutes les cinq ou six courses on tourne un peu le disque supérieur entre ses mains et l'on tourne soi-même comme avec les courses d'ébauchage. Ce qui est essentiel dans tout cela, c'est seulement de respecter *à peu près en moyenne* l'amplitude $1/3$ et de *varier* les courses le plus possible de façon à ne pas passer toujours systématiquement de la même façon, la loi des grands nombres fera le reste et, à moins d'une maladresse exceptionnelle systématique (pression anormale des mains toujours au même point de la course), les surfaces ne s'écarteront en moyenne de la sphère que d'une quantité très inférieure au diamètre des grains d'émeri interposés.

Pour l'emploi correct de l'émeri on s'inspirera des indications données au § 16, mais cette fois, seul le poids du disque supérieur additionné à celui des mains de l'opérateur normalement posées (elles ne servent qu'à commander

le mouvement de va-et-vient) interviendra. Le doucissage s'effectuera uniformément et sans changement notable de la courbure si l'on fait *alternativement une séchée avec le miroir dessus et une avec le miroir dessous*. Sauf au début où le calibre pourra inciter à faire plusieurs séchées de suite dans la même position pour mieux respecter la courbure (dans la position miroir dessus on augmente la concavité, on la diminue si c'est l'outil qui surplombe).

Après deux ou trois séchées d'émeri 1 m, un examen superficiel par réflexion pourrait faire croire que les fractures de carbo sont éliminées ; mais examinons le verre par transparence devant une forte lampe, nous voyons des petits accidents brillants, clairsemés sur le fond plus uni où l'émeri a travaillé ; il y a aussi des écailles sourdes invisibles pour l'instant, mais qui vont partir en laissant de nouveaux trous. Il est donc nécessaire de poursuivre le travail avec le 1 m jusqu'à ce que *nous soyons sûrs d'avoir éliminé tous ces accidents* ce qui pourra demander quinze à vingt séchées, ou même plus. Toutefois l'émeri 1 m laisse lui-même des fractures inégales ; on s'arrêtera quand on verra que les accidents anormaux repérés lors de la séchée précédente par un cercle au crayon au dos du miroir ne se retrouvent plus au même endroit.

Le travail d'apprêt se poursuit de la même façon avec les émeris de 2, 5 et 10 m, sans oublier le nettoyage du matériel à chaque changement de numéro. Pour ceux qui éprouveraient quelques difficultés pour apprécier à quel moment on peut changer d'émeri, indiquons le nombre de séchées (de chacune cinq à dix minutes du travail effectif) normalement suffisant avec de l'émeri *correct bien employé* et un miroir de 20 centimètres.

NOMBRE DE SECHÉES Pour éliminer le grain précédent	EMERI
20.....	1 m
15.....	2 m
10.....	5 m
6.....	10 m
6.....	20 m
6.....	40 m

En cas de doute, il vaut mieux prolonger un peu le travail que de passer prématurément d'un émeri à un autre.

Avec le 2 m on ajustera le mieux possible le miroir au rayon de courbure du calibre et l'on pourra aussi doucir le dos rugueux du miroir si c'est un disque à miroir ébauché au grès. On se sert pour cela du dos de l'outil et l'on travaille avec des courses normales 1/3 dans la position miroir dessus pour obtenir un dos plutôt légèrement concave que convexe.

On peut utiliser la même éponge pour les émeris de 1 et 2 m, mais il en faut une autre pour le 5 et le 10 et une dernière toute neuve pour le 20 et le 40 m (si c'est une éponge naturelle, avant de la mouiller il faut la battre longuement avec un maillet pour éliminer les sédiments calcaires ou siliceux qu'elle renferme).

Le doucissage proprement dit commence avec le 20 m ; sa qualité dépend beaucoup de celle de l'émeri (§ 11) et encore plus de la façon de l'employer. Pour limiter au minimum les risques de rayures et assurer une bonne efficacité

au travail on veillera surtout à employer juste la quantité d'émeri et d'eau convenable à chaque séchée.

Essayons de donner une idée concrète d'une façon d'opérer (ce qui ne peut remplacer l'expérience directe) :

On part toujours de disques éponnés, séchés, et l'on s'assure en passant la paume de la main sur toute la surface qu'il ne reste rien.

On étale alors l'émeri humide avec le doigt de façon uniforme de façon à recouvrir entièrement un des plateaux ; la quantité utile pour un 20 centimètres représente à peu près le volume d'un gros pois. La quantité d'eau initiale a une grande importance ; il faut projeter avec les doigts mouillés assez d'eau pour obtenir un film d'émeri brillant, mais sans que l'on puisse recueillir des gouttes en excédent si l'on incline le verre. On *pose* le second disque avec précautions et l'on fait quelques courses de répartition en le soulageant d'une fraction importante de son poids, on doit *sentir* et *entendre* dès le début l'émeri mordre sur toute la surface.

S'il y a trop d'eau, dès le début du travail l'émeri est rejeté au bord ; si l'eau est trop rare, il se forme prématurément une purée sèche d'émeri usé et de verre qui paralyse le mouvement ; dans les deux cas l'épaisseur du film d'émeri n'est pas uniforme et par place une pression anormale, donc une rayure est probable. A la température de 20° on doit pouvoir faire durer une séchée d'émeri fin 8 ou 10 m sans renouvellement d'eau. On n'oubliera pas d'intervenir à chaque séchée la position des disques. Dans la position miroir dessous, il faut veiller à ne poser le verre que sur un poste bien plan avec interposition d'un rond de flanelle ou de molleton, les cales latérales devront laisser un petit jeu au disque. Ces précautions sont nécessaires si l'on veut éviter que des contraintes mécaniques maladroitement ne viennent à déformer le verre d'une quantité supérieure aux écarts à la sphère qu'un doucissage bien conduit permet d'obtenir automatiquement.

20. Qualités d'un bon douci. - On veillera surtout à obtenir un grain homogène ; il ne faut pas que des piqûres anormales subsistent. L'examen par transparence avec une bonne loupe (x 10) ne doit montrer qu'un fond de cassures très petites et uniformes sans petits accidents clairsemés brillants ou noirs. La grosseur des cassures élémentaires est relativement secondaire à partir du 40 m environ ; au delà on n'augmente guère que les risques de rayures sans bénéfice réel au polissage (pour des grandes surfaces travaillées verre sur verre). Même avec des émeris d'une finesse et d'une régularité exceptionnelles comme le BM 305 (grains de 2 à 5 μ) il subsiste des accidents très clairsemés qui demandent autant de temps si l'on veut les éliminer complètement que le polissage complet d'une surface obtenue au BM 303 1/2 (grains de 10 μ) seulement, mais plus homogènes.

Il faut aussi pour obtenir la meilleure homogénéité possible avec un émeri donné, faire un nombre de séchées largement utile, les données précédentes pourront être majorées en cas de doute.

La dernière séchée de 40 m (ou de 60 éventuellement) sera particulièrement soignée et faite dans la position *miroir en dessous*. Un praticien expérimenté arrive à raffiner l'émeri par un travail prolongé avec la même charge pendant douze à quinze minutes. Dans ce cas le renouvellement de l'eau est indispensable

au cours du travail, il est un peu délicat : il ne faut pas attendre que la séchée soit trop avancée pour le faire ; les gouttes d'eau abandonnées par les doigts sont souvent trop grosses, il faut chercher à déposer très peu d'eau de façon bien uniforme sans séparer les disques en position excentrée (avec un petit vaporisateur ou en passant un doigt sur les poils d'une petite brosse dure mouillée). On termine le travail avec l'émeri le plus sec possible, mais sans pression anormale des mains (attention au grippage quand le film d'émeri est très mince) et sans attendre que le mouvement ne soit rendu trop dur (risque de déformer les surfaces).

Le débutant fera aussi bien de ne pas chercher à raffiner; il se contentera de faire bien durer la dernière séchée, miroir en dessous, sans tenter de remettre de l'eau.

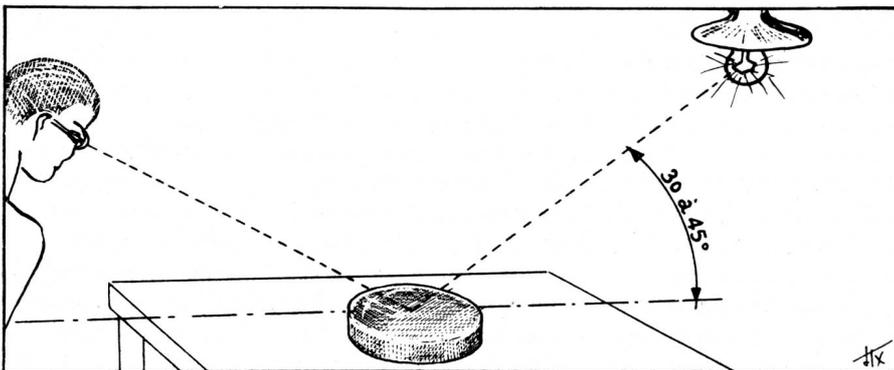


Fig. 24. – Pouvoir réflecteur d'une surface doucie.

Lord Rayleigh a fait remarquer que l'on pouvait obtenir avec une surface doucie une image réfléchie sous un angle d'autant plus voisin de la normale que la structure de la surface est plus fine. Un miroir bien douci doit montrer une pâle image rouge d'un filament de lampe électrique sur fond noir, faisant un angle de 30 à 45° avec le plan de sa surface (fig. 24). Cet essai ne constitue pas une preuve suffisante ; on peut rendre la surface réfléchissante, même sous l'incidence normale par une sorte d'écrouissage superficiel provoqué par un émeri très fin complètement écrasé ou fin travail émeri sur poix (prépolissage) ; cela ne veut pas dire qu'il ne subsiste pas entre les plateaux suffisamment nivelés pour donner l'image réfléchie, des accidents profonds impolissables. Il ne faut pas confondre surface qui brille avec surface polie.

21. **Insuccès au doucissage.** - *Rayures.* - Pour éliminer une rayure même assez faible, il est généralement nécessaire de reprendre le travail avec l'émeri 10 m ou même du 5 et du 2 m pour les cas extrêmes, causés par un grain d'abrasif grossier ou une grave maladresse. Il n'est malheureusement pas toujours possible d'améliorer l'émeri du commerce par lévignations et débourbages répétés. Les corindons blancs centrifugés très homogènes évitent bien des ennuis.

Grippage des plateaux. - Cet accident très rare avec de l'émeri (nous n'en avons jamais constaté à la Commission), peut survenir brutalement si l'on

cherche à raffiner à l'extrême un émeri fin. La séparation des disques peut offrir des difficultés, les moyens brutaux sont évidemment à proscrire. R. W. Porter a mentionné l'emploi d'une presse en bois pour agir sur les verres en position excentrée, généralement, bien que les avis soient partagés on estime que l'introduction de pétrole par la tranche peut faciliter les choses ⁽¹⁾.

Forme incorrecte des surfaces. - C'est le plus grave des insuccès, une hyperbole de douci par exemple est sans espoir, le lecteur qui appliquera suffisamment longtemps les courses normales mentionnées plus haut avec le miroir dessus et dessous n'engendrera sûrement pas un défaut de ce genre. Si l'on observe au début du polissage que le centre du miroir ou le bord seul s'éclaircit, il ne faut pas insister et recommencer le doucissage à partir de 20 m en surveillant l'amplitude des courses qui ne doit pas dépasser notablement un tiers du diamètre.

22. généralités sur les polissoirs. - Les polissoirs au drap, très employés en lunetterie et pour l'optique bon marché, sont inutilisables pour les surfaces de précision à cause de la « chair de poule » qu'ils produisent. Les anciens opticiens, notamment Foucault, les frères Henry, quelques amateurs comme Vincart et certains fabricants de longues vues ont obtenu de bonnes surfaces optiques avec des polissoirs en papier ; cette technique est cependant tombée en désuétude, tant par la difficulté d'obtenir de cette façon des surfaces complètement polies que par la grande expérience professionnelle nécessaire pour en tirer un bon parti. L'amateur A. W. Everest a imaginé ⁽²⁾ un outil souvent employé par les débutants et qui mérite quelque attention : on le réalise très facilement au moyen d'une feuille de cire gaufrée pour ruches à cadres (Honey Comb Foundation, d'où la désignation en abrégé : H.C.F.) que l'on colle sur l'outil ayant servi à doucir ou que l'on moule sur plâtre contre le miroir, les minces cloisons alvéolaires de cire défoncées par le passage d'une lame mince pour faciliter la répartition de la bouillie de rouge et augmenter l'adhérence, polissent rapidement et avec le minimum de risques de rayures ; malheureusement la contre-partie est lourde : cet outil produit un mamelonnage très grave lié à la dimension des cellules ; les accidents élémentaires de forme sont aussi très importants et capables de diffuser une quantité de lumière notable, bien que le poli physique soit très noir. De plus, la forme d'ensemble engendrée risque d'être catastrophique entre des mains inexpertes, car il ne se produit pas automatiquement un ajustage de la forme avec un corps rigide comme la cire, qui s'use, mais ne se presse pas ; malgré la facilité relative d'enlever de gros défauts au moyen de bandes de cire, rapportées, nous n'osons pas en recommander l'emploi, même aux débutants, peu difficiles sur la qualité de leur miroir. Ces critiques seront précisées au paragraphe 41.

Depuis une cinquantaine d'années, professionnels et amateurs utilisent à peu près exclusivement des polissoirs à la poix. Dans l'industrie, pour l'optique de précision moyenne travaillée à la machine on emploie des polissoirs pleins constitués par un mélange poix et cire noire ou autres ingrédients moins déformables que la poix. Les grandes surfaces de précision, au contraire, sont polies avec des outils susceptibles de s'adapter avec plus de facilité et constitués

(1) *Amateur Telescope Making advanced*, p. 507, Munn and C° Inc. (1945)

(2) *Amateur Telescope Making*, p. 149.

par des carrés de poix pure. Beaucoup d'amateurs se contentent de creuser des canaux orthogonaux dans un outil plein ; mais il est bien préférable de préparer à l'avance des carrés de poix qui seront collés individuellement sur l'outil suivant une technique déjà employée par Alvan Clark, Common, Ritchey, et qui est beaucoup plus propre à produire un polissoir parfait, facteur important de réussite. C'est uniquement de ce genre d'outil dont nous allons nous occuper.

23. Fabrication du polissoir à carrés de poix rapportés. – 1° *Fusion de la poix* (les numéros se rapportent à ceux de la figure 25). - La poix est brisée en morceaux pas trop gros et chauffée lentement sur un feu doux. Si la dureté est déjà trop grande (§ 12), on attendra sa fusion complète pour lui incorporer quelques centimètres cubes d'essence de térébenthine jusqu'à ce qu'une forte pression de l'ongle du pouce laisse une empreinte ; si l'ongle pénètre au contraire sans difficulté, il faudra prolonger le chauffage un temps suffisant (plusieurs heures au besoin) pour éliminer lentement une partie des solvants naturels. Il faut prélever tous les quarts d'heure avec une cuiller un échantillon qui doit refroidir pendant cinq minutes au moins dans de l'eau à la température de la salle de polissage (20°C) avant que l'on puisse faire l'essai de dureté.

2° *Préparation du moule.* - Pendant le chauffage de la poix, on prépare un moule pour les bandes de poix de 20 millimètres de largeur et de 7 ou 8 millimètres d'épaisseur. Il suffit de recouvrir une planche quelconque d'une feuille de papier d'emballage fort à surface lisse et de clouer dessus des baguettes de hêtre de section carrée 8 x 8. Il peut être avantageux de faire un moule assez grand pour pouvoir couler à la fois la poix suffisante pour deux outils.

3° *Coulée des bandes.* -- Il est recommandable de filtrer les plus grosses impuretés que la poix peut contenir au moyen d'une poche de tissus à mailles pas trop serrées (toile à beurre, bas de soie) tendue sur une armature en fil de fer : mais il faut alors s'assurer que la poix est assez chaude pour couler presque comme de l'eau. Si la poix provient de récupération d'outils antérieurs garnis de rouge, il faut attendre qu'elle s'épure des petites bulles qu'elle peut contenir. Le moule est placé exactement de niveau dans le sens de la longueur et rempli jusqu'à affleurement en évitant le plus possible de déborder sur les baguettes. Si l'on dispose d'un bec Bunsen, il est facile d'éliminer les petites bulles superficielles en passant la flamme devant les bandes avant refroidissement.

4° *Traçage de l'outil.* - On profite du refroidissement de la poix pour tracer l'emplacement des carrés sur la face convexe de l'outil en verre qui nous a servi à doucir. Quant cet outil est épais et lourd, il est recommandable de mouler sur le miroir (muni d'un entourage en papier fort) un gâteau de plâtre de 4 centimètres d'épaisseur (pour un 20 centimètres). Après un séchage de trois semaines au minimum cet outil peut être protégé de l'humidité par deux couches de gomme laque dans l'alcool. Le système de carrés ne doit pas être centré par rapport au contour de l'outil de façon à déphaser une cause possible d'erreur systématique.

5° *Démoulage des bandes.* - Après refroidissement complet (trois ou quatre heures au moins), on peut démouler les bandes de poix (c'est plus facile si la poix est très froide) avec précautions pour éviter de les briser. Il faut enlever

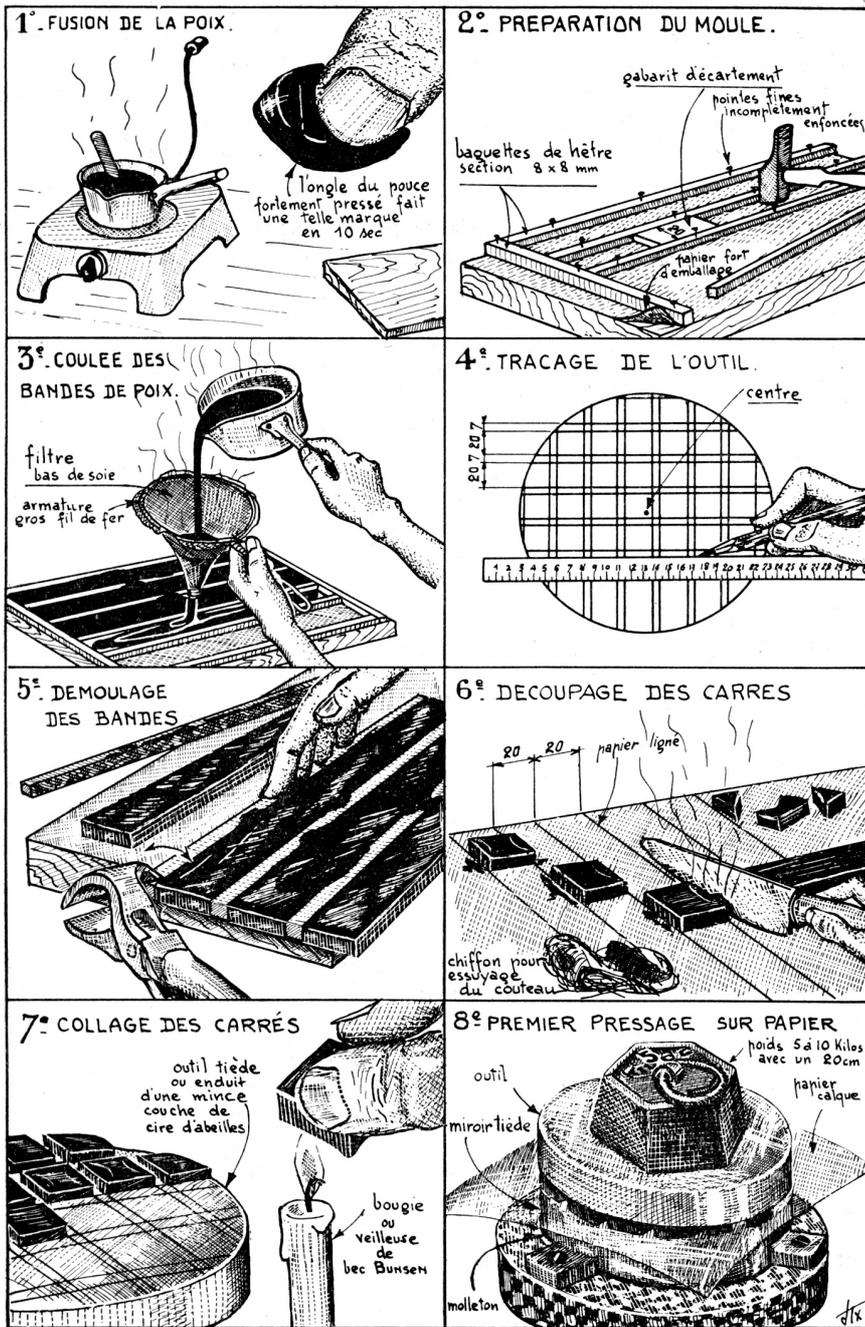


Fig. 25. – Réalisation d'un polissoir à la poix.

d'abord tous les clous et arracher un peu vivement le papier dorsal, puis décoller les baguettes d'un petit mouvement de rotation un peu sec grâce à une tenaille ou une pince qui en saisit l'extrémité.

6° *Découpage des carrés* - Très facile avec un couteau assez chaud pour ne pas coller au milieu de la coupe, mais pas trop chaud pour éviter la fusion en profondeur ; on peut couper quatre ou cinq carrés sans réchauffage ni essuyage.

7° *Collage des carrés*. - La poix n'adhère bien que sur un corps bien sec et un peu chaud ; on peut tiédir l'outil dans de l'eau chaude et bien l'essuyer ensuite. Le procédé suivant, employé à l'atelier de la Commission des Instruments, est préférable : étaler rapidement sur l'outil froid une mince couche de cire d'abeilles bien chaude, grâce à un pinceau plat obtenu est garnissant une petite latte de bois de trois ou quatre tours de toile. La cire adhère bien au verre froid et les carrés de poix adhèrent bien aussi sur la cire froide ; de plus, la couche de cire constitue un amortissement pour les chutes possibles contre le verre de l'arête tranchante très fragile qui servira à rogner les carrés. Pour coller les carrés il suffit de les présenter pendant trois ou quatre secondes devant la flamme d'une bougie (ou mieux d'une veilleuse de bec Bunsen) jusqu'à ce qu'une goutte de poix soit prête à tomber. On applique aussitôt le carré directement bien en place sur l'outil en le pressant doucement quelques instants.

8° *Pressages*. - L'épaisseur des carrés montés peut varier de plus d'un millimètre. Une égalisation sommaire avec un outil bien tranchant peut être utile, ainsi que le grattage des épanchements de poix venant du centre du carré si l'on a employé un couteau trop chaud pour le couper. Tailler sommairement les carrés des bords incomplets. Le premier pressage s'effectue à chaud ; il est plus efficace de chauffer le miroir dans de l'eau tiède ne dépassant pas 35°, sans jamais oublier de le sécher soigneusement avant de le recouvrir d'un papier calque ou de soie sans plis, puis de l'outil climatisé par un séjour prolongé à quelque distance d'une source de chaleur bien uniforme. Avec une charge de quelques kilos le pressage peut durer un quart d'heure environ. Deux ou trois pressages sont parfois utiles, mais prenons bien garde que dès le premier les carrés ne s'affaissent pas au point de se toucher, ce qui rendrait l'outil *inutilisable*. Cet accident peut arriver si la poix est plus molle qu'on ne l'avait prévu, si la température ambiante est déjà trop élevée (30°C) ou encore si l'on a chauffé étourdiment le miroir et l'outil. Parfois un ou deux carrés seulement s'approchent dangereusement ; avant de prolonger le pressage, on les retaillera d'un coup de ciseau à bois bien affûté frappé bien d'aplomb. Nous reviendrons sur cette opération qu'il faudra étendre à tous les carrés quand l'outil aura travaillé pendant un certain temps.

Dès que tous les carrés portent à peu près sur toute leur surface (le papier calque laisse une marque mate), on procède à un *pressage à froid* directement sur le miroir simplement enduit uniformément d'une couche de rouge à polir et d'eau assez épaisse pour le couvrir. Ce pressage au rouge doit être prolongé pendant une demi-heure au moins avant de commencer le travail de polissage.

24. Dispositions générales pour le polissage. - Mentionnons par ordre d'importance les qualités fondamentales du local idéal pour le polissage :

Température voisine de 20°C. - Il est difficile d'accommoder la poix pour obtenir un travail vraiment satisfaisant à moins de 15° ou plus de 30°.

Constance de la température. – Préférer l'exposition au Nord et les murs épais. Éviter les courants d'air et le voisinage immédiat d'une source de chaleur.

Etat hygrométrique convenable. - Une humidité trop grande gêne les séchées normales.

Propreté. - Éviter les locaux poussiéreux ou difficiles à nettoyer.

Eclairage naturel le meilleur possible

Bien entendu, pratiquement on ne réunira jamais simultanément toutes les conditions. N'attachons pas une rigueur absolue à des qualités seulement souhaitables. Par exemple, en choisissant une cave à cause de la température plus constante, on se trouvera souvent gêné bien davantage par le froid, l'humidité



Fig. 26. – Salle de polissage à quatre postes de l'atelier de la Commission S. A. F.

et les poussières. Au risque de provoquer des complications domestiques nous conseillons plutôt de prendre la cuisine comme laboratoire (après expulsion rigoureuse de sa locataire légitime) ; on y trouvera en général le maximum de commodités (eau, gaz, carrelage facile à laver). Signalons aux plus timorés qu'au début des travaux pratiques de la Commission des Instruments, on a taillé de bons miroirs dans des conditions très défavorables à tous points de vue, à l'Observatoire de la Société Astronomique de France, directement sous un toit en zinc.

Avant de commencer le polissage, attirons encore l'attention sur les points suivants :

La qualité du rouge à polir est une chose importante (§12) ;

Laisser presser l'outil un temps suffisant (une demi-heure au moins à 20°C) ;

Vérifier la propreté du poste et de la table accessoire (toiles cirées lavées).

C'est une bonne précaution que de limiter au minimum les objets à manipuler

(miroir, outil, pot à rouge et son pinceau). Pour nettoyer et réchauffer le miroir, il faut une bassine assez grande permettant son immersion complète et une éponge fine réservée pour le rouge. Le séchage et le nettoyage du miroir se font avec des chiffons blancs très usés par lavages répétés ; un tissu de coton très léger comme la toile à beurre est idéal. L'outil peut être lavé après chaque séance de travail au moyen de l'éponge à rouge, juste humide. On le laisse ensuite sécher de lui-même sans l'essuyer avec quoi que ce soit.

Si la température du local est un peu basse (14° à 16° par exemple), il est absolument nécessaire de tiédir les disques très légèrement, mais en profondeur ; pour le miroir, un séjour de cinq ou dix minutes dans de l'eau à 30°, suivi d'un séchage, constitue un bon moyen. Il est préférable de ne pas mouiller complètement l'outil qu'il serait malaisé de sécher convenablement. On se contentera de climatiser la poix par un séjour prolongé devant une source de chaleur assez douce. On fera ensuite un pressage supplémentaire de dix minutes ou quinze minutes seulement, ce qui permettra de commencer à travailler avant refroidissement complet des disques ; la chaleur dégagée ensuite par le travail pourra suffire pour entretenir un régime thermique suffisant.

De tels conseils pour l'exécution d'une surface de haute précision ne manqueront pas de choquer le « bon sens ». Nous nous excusons d'insister encore une fois sur ces facteurs purement psychologiques ; ce n'est pas de notre faute s'ils jouent un rôle prépondérant et nous avons le devoir de prendre en considération tous les aspects du réel si nous voulons rendre le lecteur vraiment apte à dominer la question. Nous connaissons de façon très précise par expérience directe et par le contact de nombreux collègues, le processus qui engendre l'acte faux quatre-vingt-dix-neuf fois sur cent. Les esprits timorés et les raisonneurs sont infiniment plus exposés aux fausses manœuvres que les « manuels » seulement désireux d'accepter la leçon des faits. Par exemple, la réaction instinctive de celui qui a peur de rayer est d'adopter un régime qui *favorise* les rayures ; le résultat d'un travail où l'on cherche à éviter toutes les sources d'échauffement en raisonnant sur des causes qui ne sont pas celles qui déterminent la forme du verre est à coup sûr un miroir catastrophique. Encore une fois, faire un bon miroir quand on sait comment s'y prendre, c'est facile, mais expliquer ce qui se passe ne peut avoir quelques chances d'exactitude que si l'on raisonne *a posteriori*.

Ceci dit, nous allons essayer de donner une idée objective d'une des meilleures techniques, fruit d'une expérience qui a mûri pendant bien des générations d'opticiens astronomes. Nous conservons quelque espoir que le lecteur voudra bien ne pas l'opposer à des spéculations personnelles plus séduisantes tant que son miroir ne sera pas complètement terminé.

25. Conduite du polissage. - Un miroir de moins de 30 centimètres de diamètre, peut se travailler indifféremment dans la position miroir dessus ou dessous. Les résultats dépendent beaucoup de facteurs difficiles à prévoir à l'avance (position, grandeur des mains par rapport au verre, pressions involontaires). Nous conseillons plutôt la position miroir en dessous ; contrairement aux croyances généralement admises, l'expérience montre que la moyenne des opérateurs évite mieux de cette façon les anomalies de bord. Dans la position miroir en dessous, le miroir ne doit reposer que sur un plateau de poste bien

plan, avec interposition de deux ronds de flanelle séparés par un papier fort, les cales latérales laisseront un jeu suffisant pour que l'on puisse tourner facilement le miroir tous les quarts d'heure de travail environ par rapport à ce coussin élastique, d'une quantité constante systématiquement un peu supérieure ou inférieure à un quart de tour. Ce procédé dû à A Couder ⁽¹⁾ permet d'éviter radicalement l'astigmatisme, même avec un miroir très flexible.

Adopter les courses normales d'amplitude $1/3 D$ décrites § 19.

Il est plus facile de faire correctement des courses rectilignes que des boucles, mais on veillera toujours bien à déphaser le plus possible toute tendance



Fig. 27. – Amplitude des courses de polissage sur miroir de 200
(atelier de la Commission S. A. F.)

périodique régulière en variant l'amplitude des dépassements (autour de la valeur $1/3$) les déports et le nombre de zigzags entre chaque rotation de façon à ne respecter qu'en *moyenne* les chiffres indiqués. Un opérateur isolé ne peut pas imiter parfaitement le hasard (E. Borel) ⁽²⁾ Nous avons obtenu des résultats beaucoup plus parfaits en faisant travailler avec les «mêmes» courses quatre ou cinq personnes différentes sur le même miroir. Malgré tout, le travail devient rapidement machinal et suffisamment incohérent si l'on ne contracte pas au début une habitude vicieuse. Mettons en garde spécialement contre la tendance fréquente à faire valser l'outil sur place en fin de chaque course, ou encore pire, marquer un temps d'arrêt à l'extrémité de la course

⁽¹⁾ Thèse. *Recherche sur les déformations des grands miroirs employés aux observations astronomiques*, p. 39.

⁽²⁾ EMILE BOREL, *C. R. Ac. Sc.*, t. 204, 1937, p. 203. Sur l'imitation du hasard.

avant de revenir. Il faut éviter *toute saccade* ; il est bon d'arrondir légèrement le mouvement rectiligne avant de revenir dans l'autre sens, la fréquence des courses ne doit pas non plus être trop grande : soixante doubles courses, par minute environ et encore moins vers la fin du travail pour limiter les causes de mamelonnage.

Le polissage est plus efficace si l'on ne met que peu de rouge et d'eau à la fois ; le petit pot à rouge rempli au tiers de rouge recouvert d'une hauteur d'eau de 1 ou 2 centimètres permet de tremper le pinceau à l'endroit voulu pour entretenir un bon régime. Le renouvellement du rouge ne doit prendre qu'un instant : on ne sépare même pas les disques, il suffit de peindre une bande rouge sur les carrés (en position excentrée) ou sur le miroir. La durée d'une séchée ne dépasse pas normalement cinq minutes ; si elle atteint dix ou quinze minutes, c'est que l'on met trop d'eau et de rouge à la fois ou encore que l'atelier est trop froid ou trop humide.

Le blanc ou oxyde de zirconium s'emploie de manière un peu différente. Une cuillerée de poudre sera mouillée sur une sous-tasse, seulement au moment de l'emploi. Au début pour garnir le polissoir la trace du pinceau doit être assez blanche pour couvrir sans excès ; une fois le travail bien parti et l'adhérence obtenue, après 3/4 d'heure par exemple, le pinceau pourra être trempé dans un pot d'eau de manière à laisser des traînées plus claires ou même des séchées à l'eau pure très efficaces. Les récipients de blanc crémeux et d'eau pure permettent ainsi de conduire le travail suivant le régime convenable ce qui est très important. Ne jamais chercher à employer un fond de pot durci par un long repos.

En fin de séchée l'efficacité du travail augmente considérablement, l'eau se raréfie, le rouge s'incruste dans la poix, l'outil « ressuie » partiellement le verre. Si l'on insiste, la résistance aux déplacements devient énorme, des cris aigus se produisent (dans certains ateliers industriels on ne s'entend pas), contrairement à notre réaction instinctive ce n'est pas une rayure qui se produit, c'est même de cette façon que l'on comble les petites filandres et que l'on obtient le plus beau poli. Mais le travail de l'optique astronomique demande quelques ménagements : il est utile, durant une bonne partie du polissage, d'entretenir un régime de petites séchées un peu dures au besoin si l'on craint les pertes d'adhérence (local trop froid), mais il faudra terminer le travail en mettant un peu plus de rouge et d'eau à la fois et sans sécher complètement chaque charge. Ceci est particulièrement utile avec le blanc dont l'action à sec peut prendre une importance catastrophique (fig. 46). Au début du travail, l'outil est généralement encore mal adapté au miroir malgré les pressages ; il se produit des accrochages irréguliers et des glissements qui doivent diminuer peu à peu. Dès la première heure de travail on doit éprouver une résistance régulière notable pour bouger l'outil (s'il n'en était pas ainsi on pourrait procéder à un pressage supplémentaire avec les disques pas trop froids). Au bout de ce temps, les carrés doivent présenter une surface de travail uniformément garnie de rouge ou de blanc et mate : s'ils restent noirâtres et se rayent, c'est un mauvais symptôme qui montre que l'on ne met pas assez de rouge ou que l'on met trop d'eau, ou que le local est trop froid, ou enfin que la poix est trop dure. Si l'on ne possède pas de bonne poix prenant bien le rouge, il est

préférable de recouvrir les carrés d'une couche mince de cire d'abeilles (G. W. Ritchey) étendue facilement avec un pinceau plat en toile (fig. 28).

L'opération doit être suivie immédiatement d'un bref pressage sur le miroir légèrement tiède bien sec et recouvert d'un papier de soie. Sur un miroir froid les risques de collage de la cire ne sont pas trop grands ; cela permet d'obtenir des carrés plus parfaits directement pressés contre le verre. Il ne faut pas réchauffer en profondeur un polissoir ciré sous peine de voir la cire glisser comme une peau sur la poix, de même pendant le travail il ne faut pas tenter de sécher complètement ; on entretiendra un régime de rouge ou de blanc et d'eau plus abondant. Un polissoir ciré polit plus rapidement qu'un en poix nue, il raye plus rarement également, mais les surfaces obtenues ont généralement une forme d'ensemble moins régulière et le mamelonnage est plus important.

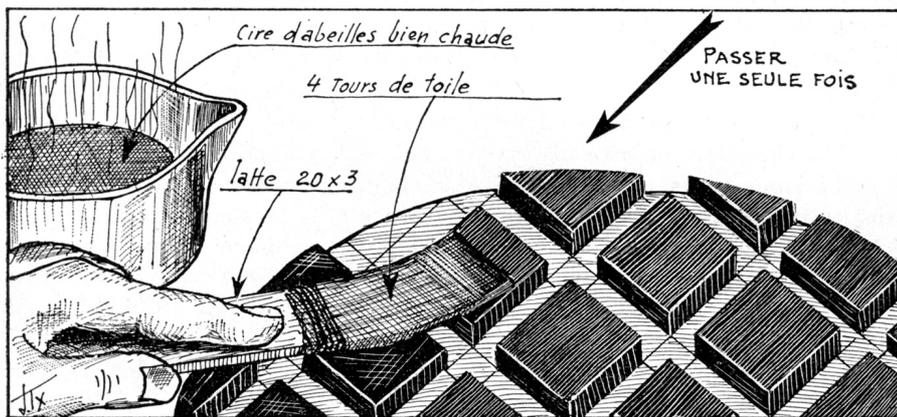


Fig. 28. – Cirage des carrés.

Dès les premières minutes de polissage, le miroir s'éclaircit ; dans la position miroir en dessous, il est normal que le bord « avance » ; avec le miroir dessus, au contraire, le centre se polit plus vite. On a donc un moyen facile pour conduire le travail de façon régulière sur toute la surface est renversant la position, toutes les deux heures par exemple.

Le travail est beaucoup plus efficace, et surtout la *forme meilleure*, si l'on travaille assez longtemps pour qu'un régime d'écoulement thermique régulier s'établisse dans toute la masse du miroir et de l'outil. Avec un miroir de 20 centimètres, de 35 millimètres d'épaisseur, il faut *travailler pendant une heure au moins* en ne s'arrêtant que quelques instants à chaque renouvellement de rouge. Si l'on est assez endurant pour polir pendant deux ou trois heures de suite, cela vaut encore mieux ; mais l'endurance de la poix, elle, est limitée ; les carrés s'affaissent de plus en plus leurs côtés devenant convexes et menacent de se toucher, *ce qu'il faut éviter à tout prix* si l'on ne veut pas perdre l'outil ou avoir recours aux méthodes médiocres de dégarnissage dans la masse.

On retaillera donc les carrés à temps au moyen d'une arête tranchante très aiguë et parfaitement affûtée (ciseau à bois d'au moins 20 millimètres de large, fer de rabot ou de varlope) que l'on frappe à l'aplomb par petits coups (fig. 29),

sur la poix qui dépasse l'alignement d'une règle assez épaisse placée bien en face du tracé primitif au crayon sur l'outil.

On tranche ainsi nettement et sans grave écaille les quatre côtés des carrés ; les petits fragments et la poussière de poix seront soigneusement brossés sur un papier blanc pour récupération éventuelle, et surtout pour éviter qu'ils ne collent partout notamment aux mains et aux bras (nettoyage à l'essence).

Après le rognage, un nouveau pressage à froid sur des disques climatisés est nécessaire. On peut utiliser à la rigueur de la poix un peu molle qui nécessite le retaillage des carrés toutes les heures, mais si un travail prolongé de trois heures ne produit pas de déformation notable, la poix est trop dure et doit être cirée, ou mieux l'outil refait avec de la poix adoucie.

Après un travail de trois ou quatre heures, le verre est à moitié poli et

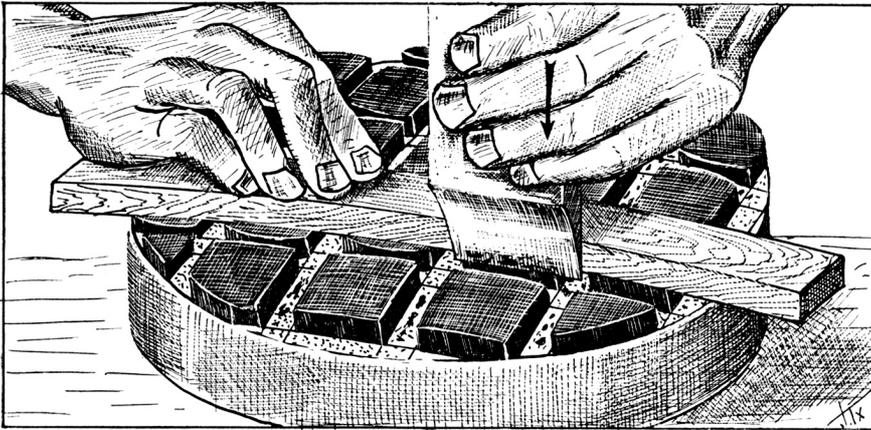


Fig. 29. – Rognage des carrés.

les carrés de l'outil ont été retaillés deux ou trois fois, ils sont moins épais, mais garnis de rouge ou de blanc très uniformément et sans défaut grave. Après un temps suffisant on éprouve, pour déplacer l'outil, une impression d'adhérence grasse très uniforme susceptible de donner des renseignements précieux sur la régularité du travail. On peut dire que tout l'être de l'opérateur participe à la connaissance sensorielle de ce qui se passe.

Si l'on caractérise les progrès du polissage en fonction du temps par une statistique portant sur le nombre de piqûres par unité de surface, on obtient une courbe (fig. 30) d'allure exponentielle dans la région intéressante, qui permet de prévoir aisément que les dernières piqûres d'émeri coûteront « cher ». Un tout petit miroir travaillé rationnellement ne demande guère que quatre heures de polissage pour donner toute satisfaction avec les moyens de contrôle courants, mais un temps double ne suffit pas d'ordinaire avec un de 20 centimètres.

On constatera au bout de ce temps, en accommodant soigneusement, sur la surface du miroir, près de l'image réfléchie d'un filament de lampe électrique sur fond noir, la présence d'un voile « gris » constitué par une multitude de petites piqûres d'émeri (ceux qui ne sont pas très myopes utiliseront une bonne loupe). Suivant que le « gris » est plus notable au centre ou au bord, on saura

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

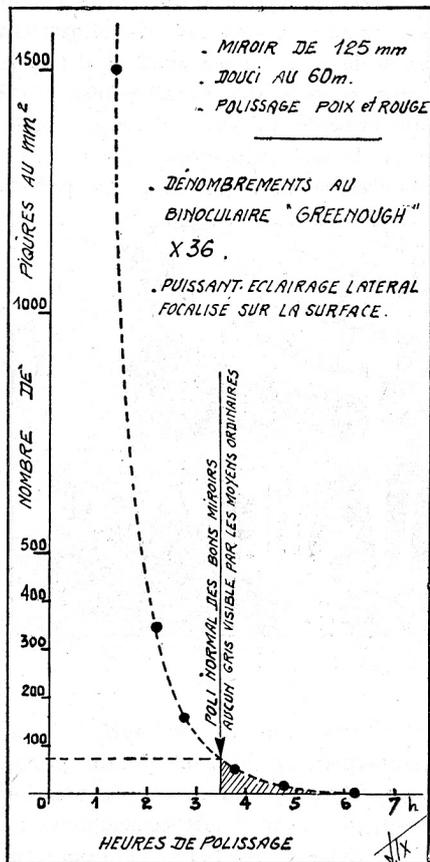


Fig. 30. – Progrès du polissage en fonction du temps.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

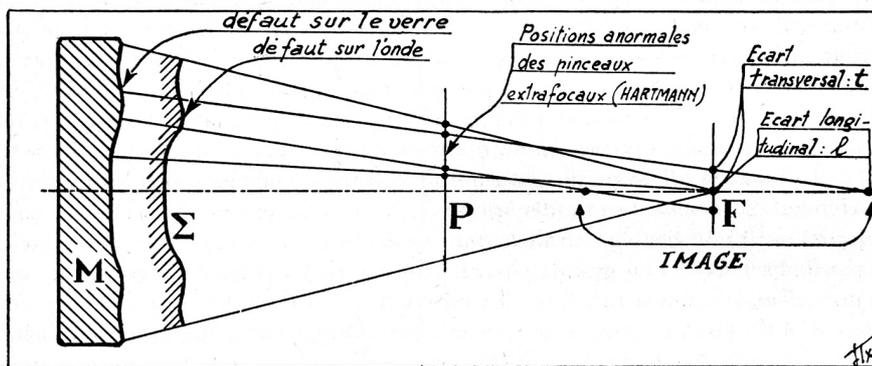


Fig. 31. – Principaux moyens d'accès à la mesure d'un défaut.

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

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

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

⁽¹⁾ TWYMAN, *Phil. Mag.*, 6^e série, t. 35, janv. 1918, p. 49.

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

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

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

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

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

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

⁽²⁾ HARTMANN, Objektivuntersuchungen. *Zeit f. Inst.*, t. 24 (1904), pp. 1-21, 32-47, 97-117.

⁽³⁾ *Lunettes et Télescopes*, par A. DANJON et A. COUDER. § 115.

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

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

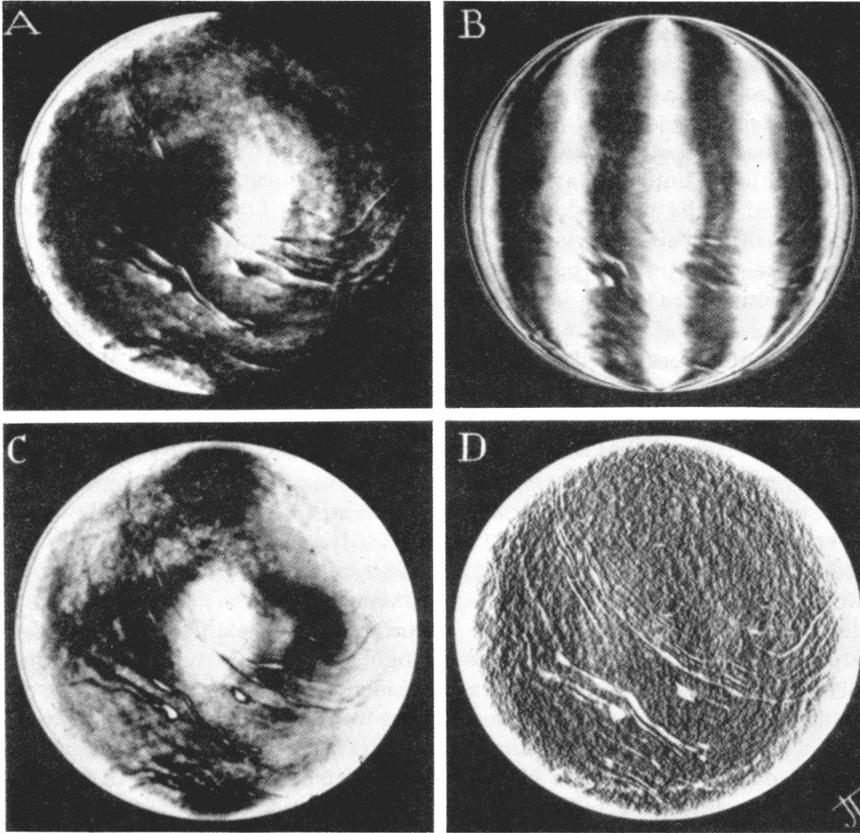


Fig. 32. – Application de quatre méthodes différentes au contrôle d'un petit miroir de 125 millimètres ($R = 2\,000$) présentant toutes sortes de défauts (polissage au H. C. F.).

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

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

Défauts élémentaires : Micromamelonnage (profondeur moyenne 40 Angströms).

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

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

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

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

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

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

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

⁽²⁾ L. LENOVEL, *R. O.*, t. 3 (1924), p. 211-243, 315-333 ; t. 7 (1928), p. 395.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

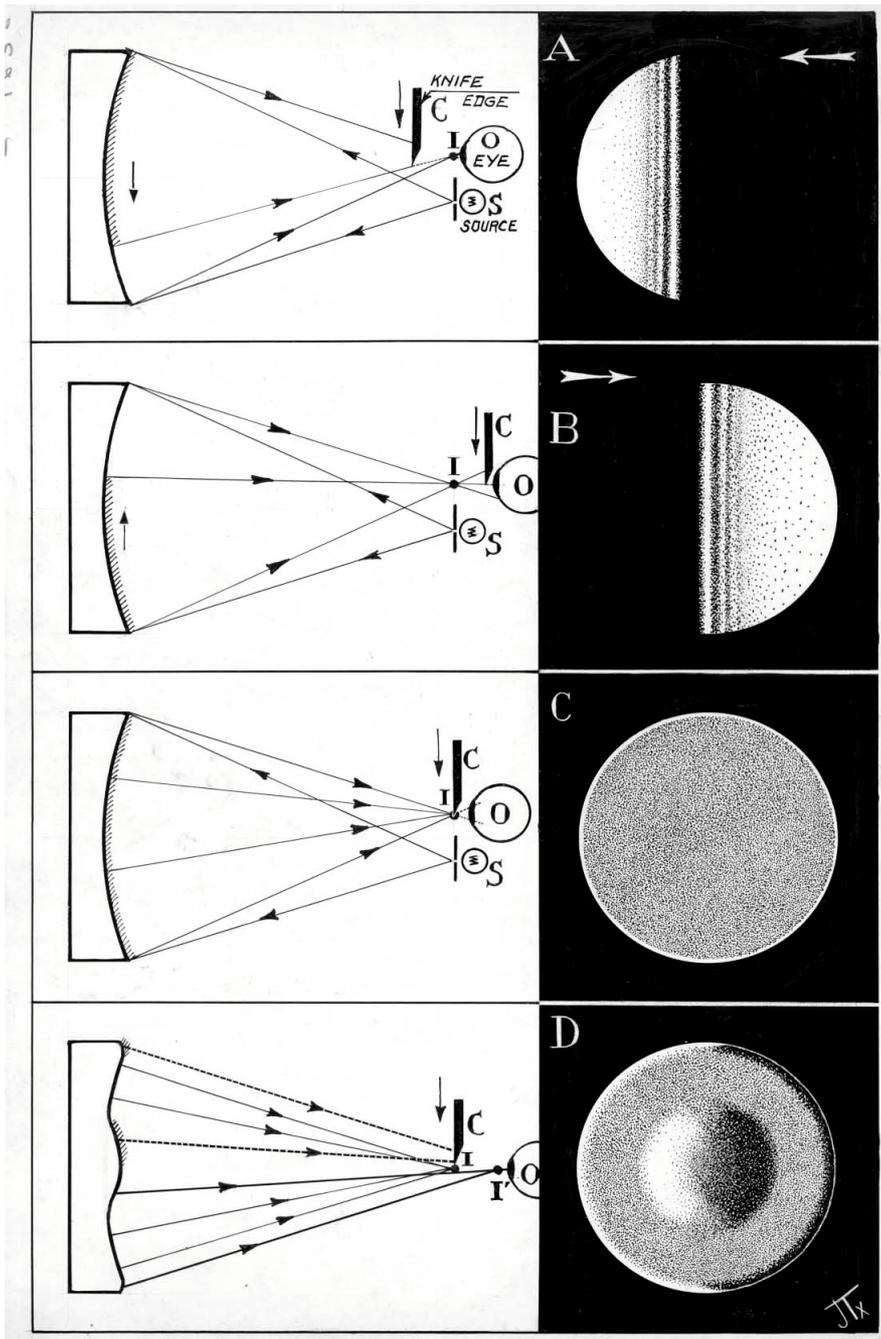


Fig. 33. – Explication géométrique de la méthode de Foucault

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

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

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

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

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

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

