Réalisation de grands miroirs amateurs (1)

Le désir de construire ou de posséder un grand instrument d'observation a toujours habité bon nombre d'observateurs. A la fin de la dernière guerre mondiale, le top niveau était de posséder une lunette de 100 mm de diamètre. Il était bien entendu très difficile de construire soi-même un tel instrument qui était toujours acheté chez un marchand.

C'est à cette période que Jean Texereau offrit aux amateurs français son fameux Construction d'un télescope d'amateur. Ce livre reste actuellement irremplaçable car il comprend une base théorique complète agrémentée d'une base pratique où Texereau montre son exceptionnel talent de pédagogue. Grâce à ce livre, les amateurs de l'époque purent multiplier la surface collectrice de leur instrument par quatre ou dix suivant la lunette qu'ils possédaient. Cet ouvrage leur permit également de construire leur propre télescope et de ne plus dépendre des fabricants. Ce fut alors l'âge d'or des amateurs constructeurs. Cette période dura jusque dans les années 70.



L'astronomie est un loisir peu connu pour sa faculté à développer la convivilaité. C'est bien dommage car je crois que c'est un des grands attraits de l'astronomie.

J'ai rencontré bien des astronomes amateurs depuis 1978. Sur ce cliché, pris par Jean Dragesco, on volt, de droite à gauche, Jean Dijon, Jean-Paul Beria, Régis Néel et moi-même. Quels bons souvenirs que ces échanges de vue sur notre passion commune...

A cette époque un phénomène majeur pour les amateurs se produisit: ce fut la naissance des Schmidt-Cassegrain fabriqués par la firme américaine Celestron. Ces télescopes bien qu'optiquement et surtout mécaniquement imparfaits offraient un rapport qualité-prix très avantageux. Leur combinaison optique totalement révolutionnaire permettait de raccourcir le tube optique dans des proportions inespérées. La firme ayant bien compris le désir profond des amateurs de pouvoir pratiquer l'astrophotographie dota ses appareils d'entraînement. Le succès commercial fut immense, car pour la première fois l'astronome amateur pouvait disposer d'un instrument vraiment adapté à ses besoins.

Nul doute que ces instruments portèrent un rude coup à l'ardeur des amateurs qui hésitaient encore entre la construction personnelle et le clef en main de l'industrie.

Le phénomène s'amplifia encore lorsque les Celestron et autres Meade commencèrent à envahir le marché de l'occasion. Il est vrai qu'en achetant un C8 d'occasion à 8000 F on ne dépassait pas de beaucoup le budget de réalisation d'un T 200, avec la peine en moins. Si l'on ajoute à cela l'apparition de centres d'astronomie bien équipés dans lesquels l'amateur peut se rendre pour passer quelques nuits, on se demande si la construction de télescope par l'amateur ne fait pas déjà partie de l'Histoire. Personnellement, je ne le crois pas. Il est vrai que la proportion de constructeurs a certainement diminuée. Mais les gens qui construisent encore aujourd'hui sont différents de leurs aînés. Ils sont obligés de voir grand pour éviter d'entrer en concurrence avec les C8 dont l'intérêt est évident. Notre génération d'amateurs va également bénéficier des apports de l'électronique. Dans ce domaine également, la construction personnelle est payante car elle évite à l'amateur d'attendre le bon vouloir des grandes firmes qui ne se décident à commercialiser que tardivement

> certains produits réservés à une clientèle trop rare et donc à un marché trop restreint

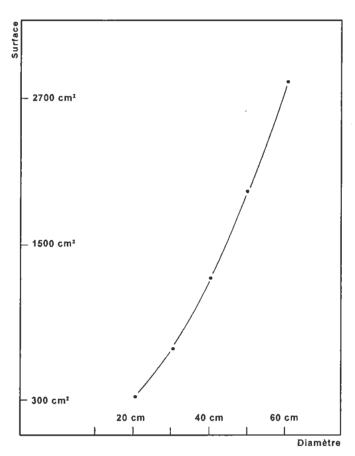
Il faut au passage rendre hommage à des gens comme Christian Buil qui en éditant des livres comme Astronomie CCD participent au rayonnement de la culture française et mettent à la portée des gens persévérants les techniques d'avantgarde.

La construction est également un enrichissement personnel extraordinaire. Celui qui veut s'en donner la peine s'apercevra une fois son télescope terminé qu'il a acquis des notions de mécanique, d'électricité, de soudure, et d'optique bien entendu. Quelquefois, il aura rafraîchi son anglais en allant chercher quelques références introuvables en langue française.

Le fait de posséder un instrument personnel de grand diamètre permet également de faire des travaux suivis. Cela est difficilement réalisable sur des instruments de stage. Tout d'abord parce qu'il est impensable d'accaparer le T 60 du Pic pendant des mois simplement pour fa ses petites mesures. L'observation touristique, ensuite, est également peu concevable sur les instruments de stage qui doivent tourner avec des programmes valables et adaptés.

Pour terminer ce petit plébiscite en faveur des amateurs constructeurs, je voudrais dire que l'observation du ciel n'est pas seulement une analyse mathématique de paramètres physiques de tel ou tel objet céleste. L'amateur d'astronomie est avant tout un homme qui vit dans le cosmos et l'observe avec attention et respect pendant ses loisirs.

L'astronome amateur client des magasins d'astronomie ne peut pas imaginer l'émotion que ressentira son collègue constructeur le jour où il regardera pour la première fois dans le télescope qu'il construit depuis des mois, voire des années. Cette émotion est d'ailleurs emprunte de crainte. Mais le miroir semble relié à l'oeil par la main qui l'a fait naître. La focalisation de ces précieux photons venus d'ailleurs, phénomène abstrait et magique pour le profane, est ici une nécessité absolue et un aboutissement extraordinaire.



Courbe 1 - Surface collectrice du miroir en fonction de son diamètre

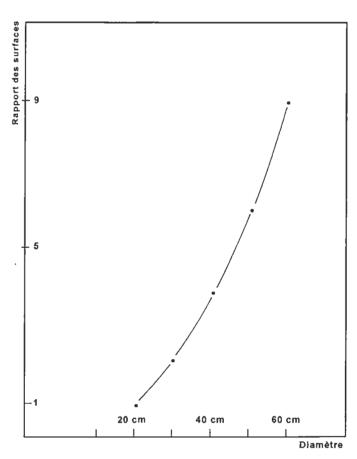
Naturellement, mon souhait serait que la plupart des amateurs puissent un jour ressentir ces émotions uniques. Au delà de ces moments privilégiés, ils auront le bonheur de disposer à tout moment d'un instrument bien construit où la nécessité commerciale n'aura pas commandé l'épaisseur de la fourche. Ils pourront modifier leur installation à leur guise et la faire évoluer en fonction des nouveaux domaines astronomiques qu'ils voudront aborder.

Et peut-être qu'un jour, après quelques années d'observations sur leur fidèle télescope, ils reprendront leur stylo pour calculer un nouvel instrument, rien que pour se prouver qu'ils peuvent encore faire mieux. Si vous faites partie de ces quelques originaux peut-être trouverez-vous dans les pages qui suivent un paragraphe ou deux qui retiendront votre attention. Si tel est le cas, j'aurai atteint mon but et cet article ne sera pas vain.

Avertissement et études préliminaires

Ce modeste article ne vise qu'à traiter des problèmes spécifiques à la réalisation des miroirs d'amateurs de grand diamètre. Il faut bien se garder de transposer les indications qui suivent pour tailler un miroir de 200 mm à f/D=6. Pour ces miroirs classiques, tout a été dit dans l'ouvrage de Jean Texereau qui doit rester la bible de référence en la matière. Les notions indispensables exposées dans ce livre doivent d'ailleurs être connues et bien assimilées. On considérera cet article uniquement comme un petit complément d'information.

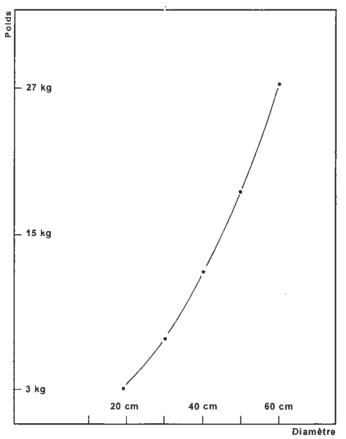
D'autre part avant de se lancer dans un travail de cette envergure, il est préférable d'avoir déjà à son actif au moins deux bons miroirs dont un pas trop petit. En effet rient ne peut remplacer l'expérience directe de chaque opérateur. Il est également de bon ton de réfléchir longtemps avant de s'embarquer dans cette aventure et savoir qu'elle durera plusieurs années.

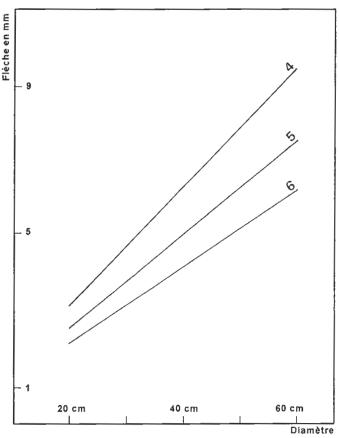


Courbe 2 - Rapport des surfaces en référence au miroir standard de 20 cm de diamètre

Le miroir est incontestablement la pièce du télescope la plus précieuse et la plus délicate à fabriquer en respectant les sévères tolérances. Mais il n'est qu'une petite partie de

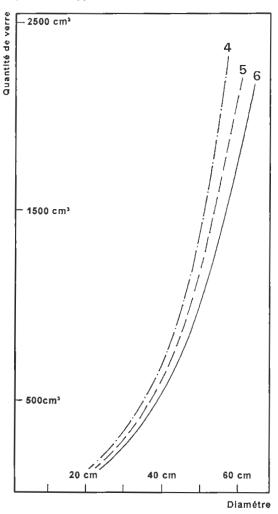
Courbe 3 - Evolution du poids du miroir en fonction du diamètre pour une épaisseur de 43 mm.

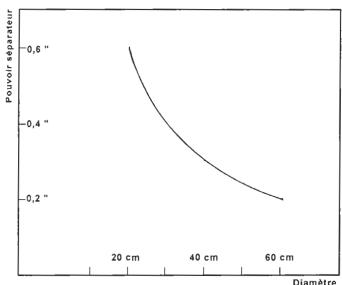




Courbe 4 - Evolution de la flèche en fonction du diamètre du miroir pour trois rapports d'ouverture donnés

Courbe 6 - Quantité de verre à enveler à l'ébauchage pour trois rapports d'ouverture donnés





Diamètre
Courbe 5 - Evolution du pouvoir séparateur en fonction du diamètre
du miroir

l'ensemble. On peut bien sûr simplifier la suite du travail en construisant un Dobson surtout si l'on veut se concaser surtout à l'observation visuelle. Par contre les photographes seront plus exigeants et mettront un point d'honneur à réaliser une monture soignée. Ce désir sera d'autant plus justifié que la la précision du grand miroir sera meilleure.

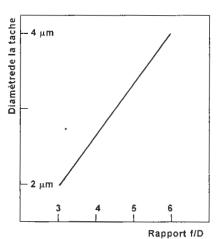
Ces petites considérations peuvent paraître superflues mais il est préférable de les méditer au préalable plutôt qu'a posteriori. L'estimation réaliste des difficultés d'exécution d'un projet conditionne en grande partie les chances de réussite. Le temps à consacrer est un élément à ne pas trop négliger également.

Une bonne méthode pour estimer les difficultés du projet consiste à comparer le travail envisagé à celui d'un 200 mm de diamètre dont l'opérateur aura toujours l'expérience. Le lecteur trouvera à cet effet quelques courbes qui permettront de se fixer les idées.

L'augmentation du diamètre du télescope permet d'une part d'améliorer le pouvoir séparateur mais surtout d'augmenter la surface du miroir (courbe n°1). Cela se traduit par une amélioration de la sensibilité du télescope. Cette caractéristique est souvent mesurée par la magnitude limite accessible dans de bonnes conditions.

On voit ainsi qu'un 200 mm permet d'accéder à des étoiles de magnitude 13,5 et qu'un 400 mm autorise des observations stellaires jusqu'à la magnitude 15. A priori le gain paraît faible mais il ne faut pas oublier que la différence de magnitude entre deux étoiles est logarithmique. Aussi la différence d'éclat entre une étoile de magnitude 13,5 et une étoile de magnitude 15 est environ de 4. Avec un miroir de 400 mm on atteint des astres 4 fois plus faibles qu'avec un miroir de 200 mm.

La courbe n°2 qui compare les surfaces collectrices par rapport au miroir de 200 mm permettra de voir rapidement le gain de sensibilité escompté. Il s'agit bien entendu d'observations stellaires.



Autre problème, le poids. Sur la courbe n°3 on voit que le poids devient vite un problème majeur pour les amateurs, qui n'utilisent généralement pas de machine pour tailler leur miroir. L'exemple choisi ici gomme d'ailleurs quelque peu les différences, car les miroirs comparés ici utilisent tous la dalle de pyrex de 43 mm d'épaisseur, pour des raisons de prix de revient. Cela implique naturellement une augmentation très rapide du rapport R⁴/e².

Courbe 7 - Evolution du diamètre de la tache de diffraction en fonction du rapport f/D



En toute rigueur, l'épaisseur des grands miroirs devrait être supérieure à celle des plus petits. Le miroir de 600 mm serait avantageusement taillé dans un disque de 60 à 100 mm d'épaisseur. On voit que son poids ne serait plus de 27 kilos mais de 37 pour une épaisseur de 60 mm et deviendrait 63 kilos pour 100 mm d'épaisseur. Il ne serait plus possible avec des disques aussi lourds de tailler à la main.

La courbe n°4 représente l'évolution de la flèche en fonction du diamètre pour trois rapports d'ouverture donnés.

Théoriquement le pouvoir séparateur double à chaque fois que l'on double le diamètre du miroir. Il semblerait

Deux réalisations personnelles: un T400 et un T 210 réunis pour comparaison. Les astronomes en herbe sont ici endoctrinés de bonne heure pour assurer la relève de la tradition familiale.

que l'amateur désireux de pratiquer surtout l'observation à haute résolution doive éviter de construire un instrument de plus de 400 mm de diamètre (courbe n°5). Le lecteur attentif aura relevé au passage qu'il n'est fait état ici que de considérations instrumentales. L'observateur averti sait combien la turbulence atmosphérique réduira encore les espérances en

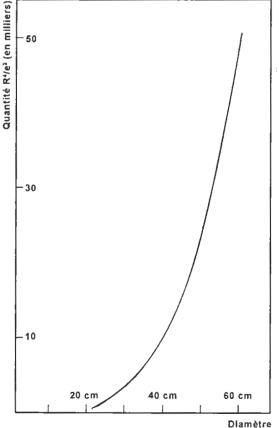
Diamètre

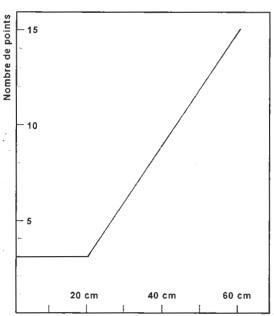
matière de pouvoir séparateur et surtout sa fréquence d'utilisation à plein rendement.

Les trois courbes représentées sur la figure n°6 expriment la quantité de verre à enlever sur le miroir et sur l'outil pour ébaucher le miroir. Cela se passe de tout commentaires. Quant à la courbe n°7 elle exprime l'évolution de la tache de diffraction en fonction du rapport f/D.

La courbe du R⁴/
e² est donnée sur la figure n°8 pour une épaisseur moyenne de 40 à 43 mm de pyrex. Il est évidemment très frappant de voir que l'on passe d'un coefficient de 625 pour un 200 mm de diamètre à 3160 pour un 300 et que l'on atteigne en haut de la courbe 50 600 pour le miroir de 600 mm.

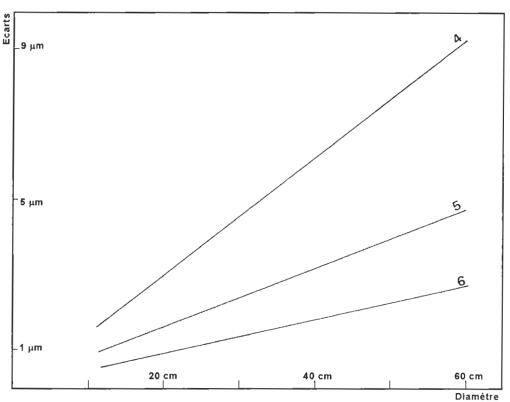






Courbe 9 (ci-dessous)- Nombre de points d'appui en fonction du diamètre pour des disques de 40 mm d'épaisseur

Pulsar n°706 - Janvier - Février 1995



Courbe 10 - Ecart entre la sphère osculatrice et la parabole en fonction du dlamètre du miroir.

parabole théorique. La courbe c est obtenue en retranchant p4f/Hm à cette même parabole théorique. Les deux courbes bet c sont dites courbes enveloppantes. Elles déterminent les valeurs admissibles de l'aberration longitudinale mesurée au rayon de courbure. Lorsque la parabole mesurée s'inscrit entre ces deux courbes, le miroir est généralement terminé.

Si l'on retranche la courbe c à la courbe b pour une valeur constante de Hx, par exemple à 1 cm du bord, pour des miroirs d'ouverture différente on obtient la courbe 11. Cette valeur indique la tolérance maximale admissible pour la zone considérée des différents miroirs. On notera que cette valeur est indépendante du diamètre mais varie avec le rapport f/D.

On voit sur cette courbe qu'un miroir ouvert à f/D=4 doit être taillé

à une précision deux fois meilleure qu'un miroir ouvert à f/ D=6 pour produire des images de qualité équivalente au voisinage de l'axe optique bien entendu. (A suivre)

Thierry BADERSPACH

La conséquence pratique est simple: le miroir de 600 mm est 80 fois plus flexible que le miroir de 200 mm. Autant dire que l'on a affaire à deux objets très différents. Si l'on se rappelle que le miroir de 200 mm est le seul à pouvoir être supporté par trois points fixes, on imagine les difficultés qui seront rencontrées pour garantir que le barillet conserve la forme du miroir à l'approximation voulue.

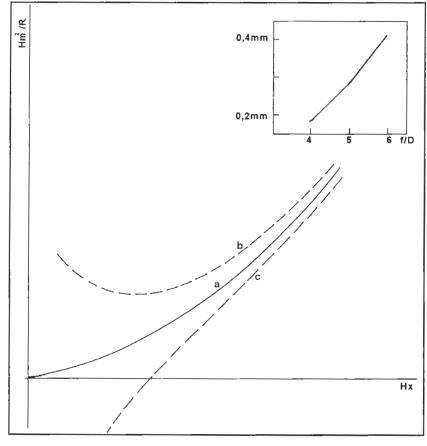
Des obstacles plus grands encore nous attendent pour parvenir à exécuter une surface exempte d'astigmatisme. Pour fixer les idées, si toutes les précautions ne sont pas prises, certains miroirs peuvent présenter au début du polissage des écarts astigmatiques si importants qu'ils ne sont retouchables qu'en reprenant le douci

La courbe n°10 indique le nombre de points d'appuis nécessaires en fonction du rapport R⁴/e². Il faut retrancher les trois points fixes pour connaître le nombre de leviers astatiques pour les barillets utilisant cette technique. Les puristes pourront noter au passage qu'en toute rigueur, la courbe devrait avoir la forme d'un histogramme dont les paliers seraient tous des multiples de trois. En effet, les barillets comportent généralement un nombre de touches multiples de trois.

Sur la figure 10, les courbes indiquent le niveau de déformation de la parabole. On notera au passage que cet écart augmente très vite pour les miroirs plus ouverts que f/D=5. Plus la parabole est déformée et plus les courses au polissage deviennent spécifiques pour éviter de revenir vers la sphère. Bien entendu plus l'écart à la sphère osculatrice est grand et plus la tolérance d'exécution devient faible. Cette remarque nous conduit à examiner la courbe n°11 relative à cette exigence.

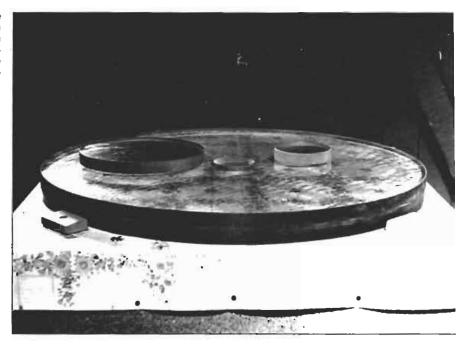
Lorsque l'on contrôle son miroir à l'aide de la méthode de Millies-Lacroix, on trace la parabole théorique Hm²/R (courbe 11bis n°a). La courbe b est obtenue en ajoutant p4f/Hm à la

Courbe 11bis - Courbes enveloppantes de la parabole théorique. Dans l'encadré courbe 11 donnant l'écart maximum de l'aberration longitudinale pour une fenêtre de l'écran située à 1 cm du bord du miroir.



Peu après la réception du disque on voit disposé le bloc de 610 mm de diamètre sur lequel sont posés un disque de 200 mm et un disque de 100 mm. Le 200 mm deviendra un sphérique d'atelier et le 100 mm se métamorphosera en secondaire hyperbolique. La réunion de ces disques si différents permet de visualiser l'échelle de ces projets.

Réalisation de grands miroirs amateurs (2)



La courbe 12 compare encore des miroirs de rapport d'ouverture différent, mais cette fois, la courbe montre les déformations de la tache de diffraction lorsqu'on s'écarte de l'axe optique. Il est d'ailleurs intéressant de noter à cette occasion que les miroirs les plus ouverts qui possèdent la tache de diffraction la plus fine voient cette finesse s'altérer d'autant plus vite lorsqu'on s'éloigne de l'axe optique qu'ils sont plus ouverts.

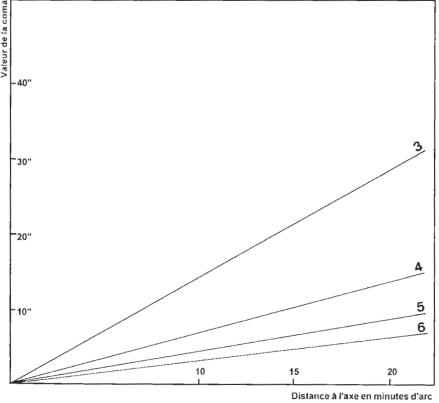
Après avoir longuement réfléchi sur l'influence du rapport f/D, penchons nous maintenant sur l'influence du diamètre sur les grossissement équipupillaire et résolvant (courbes 13 et 14)

Je laisse ici le lecteur prendre conscience du faible champ des grands instruments, surtout s'ils sont utilisés avec des oculaires à champ normal.

Le tableau n°1 est la suite logique des courbes 13 et 14 relatives aux aberrations visuelles. Ce tableau donne une

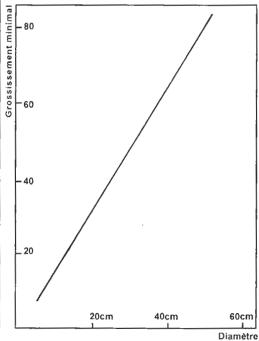
Diamètres	f/D=4	f/D=5	f/D=6	
20 cm	1°43'x2°35'	1°20'x2°04'	1°08'x1°43'	
	4,43	2,75	1,94	
30 cm	1°08'x1°43'	56'x1°23'	46'x1°09'	
	1,94	1,29	0,88	
40 cm	52'x1°18'	41'x1°02'	34'x51'	
	0,12	0,7	0,48	
50 cm	41'x1°02'	33'x49'	27'x41'	
50 Cm	0,7	0,45	0,3	
60 cm	34'x51'	27'x41'	23'x34'	
oo cm	0,48	0,3	0,21	

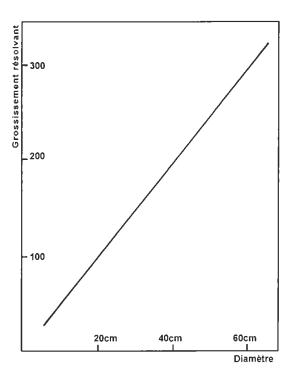
Tableau 1 - Dimensions du champ exploitable en photographie au foyer en fonction du diamètre du miroir et du rapport d'ouverture. Dans les cases grisées sont indiquées les surfaces en degrés carrés correspondantes.



Courbe 12 (ci-contre)- Valeur de la coma en fonction de la distance à l'axe

Courbe 13 (ci-dessous) - Grossissement minimal en fonction du diamètre du miroir.





Courbe 14 (ci-contre à gauche) - Grossissement résolvant en fonction du diamètre du miroir

Courbe 15 (ci-contre à droite)

- Volume des tubes optiques
pour des miroirs ouverts à f/
D=5.

Courbe 16 (cl-dessous à droite) - Rapport du volume des tubes par comparaison avec le standard de 20 cm.

idée du champ exploitable en photographie au foyer en fonction de la focale pour un format 24x36 mm. Il conviendra bien entendu de disposer d'un miroir secondaire suffisamment grand pour couvrir ce champ sans vignettage. A partir de deux mètres de focale, l'amateur désireux de se consacrer à la photographie au foyer

trouvera avantage à se doter d'un format 6x6 cm couplé à un correcteur de champ.

Le tube du télescope détermine bien entendu la taille du télescope dans son ensemble. Calculer le volume de ce tube (courbe 15) et le comparer au tube du télescope de 20 cm de diamètre (courbe 16) permet de bien apprécier l'envergure du projet. En guise de conclusion à ces remarques préliminaires, on pourra faire remarquer aux constructeurs enthousiastes qu'un télescope de 50 cm est quatorze fois plus volumineux qu'un standard de 20 cm...

Ebauchage

Le poste fixe

Il doit être très solide et le plateau de travail le plus plan possible. On le contrôlera soigneusement avec une règle et on éliminera les bosses avec une ponceuse vibrante. Les panneaux de bois stratifiés sont très agréables à utiliser, car ils ont une planéité parfaite et ne craignent pas l'humidité. Il faudra toutefois se méfier des trous livrant passage aux vis des cales. Un peu de silicone injecté au moment de la pose des vis permettra d'éviter les infiltrations d'eau et par là même le gonflement du bois. Le dessous du plateau doit comporter un renfort croisé dont les bords sont coupés sur une machine.

Il est intéressant de remplacer le lest du poste fixe par une planche sur laquelle l'opérateur se déplace. Le poste fixe étant solidement visé sur cette planche, l'opérateur devient le lest. Les montants du poste doivent être très solides, car le polissage exerce des contraintes très importantes sur le bâti.

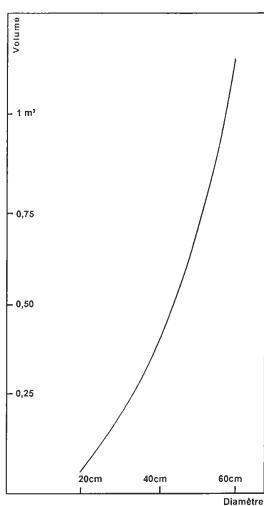
Les disques étant grands et lourds, les risques de chute et de choc ne sont pas négligeables. Aussi, on prendra la précaution de disposer à proximité d'un plan suffisamment grand pour poser le miroir et l'outil entre deux séchées.

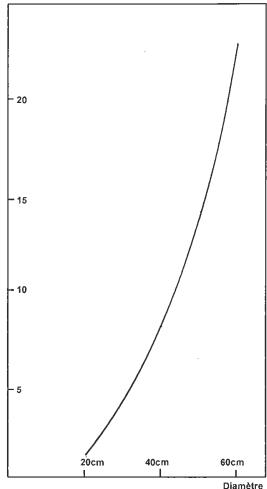
Le problème de l'outil

Le choix de la matière

A partir d'un diamètre de 400 mm, la glace de 19 mm de Saint-Gobain n'est plus assez épaisse pour réaliser un outil valable. Il se pose alors le problème du collage. En effet, il n'est pas raisonnable financièrement d'acheter un disque Pyrex de 33 ou 43 mm d'épaisseur simplement pour faire un outil. Parmi les différentes solutions pour réaliser son outil, on peut utiliser plusieurs disques en verre que l'on collera. Dans cette optique voici un protocole qui permettra de se fixer les idées.

On se procurera trois disques en verre chez un vitrier. Ces disques auront évidemment le même diamètre que le miroir. Le disque A (voir figure 1) sera la partie travaillante de l'outil. Il sera constitué par du verre de Saint-Gobain de 19 mm d'épaisseur. Le disque outil B pourra être plus mince que le disque A. Dix à douze millimètres d'épaisseur permettent déjà ajoutés aux 19 mm du disque A de totaliser 30 mm après collage.





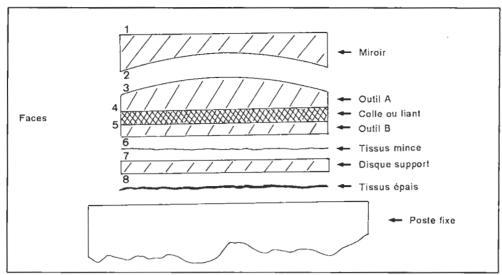
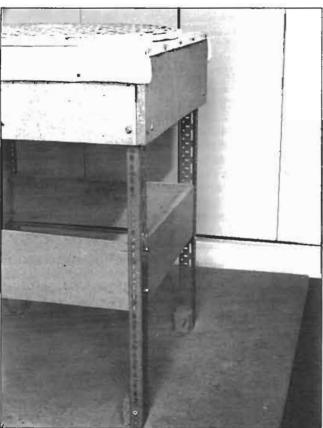
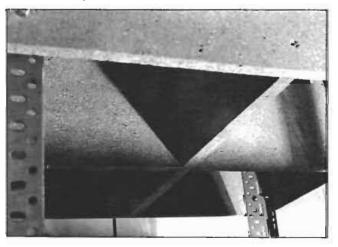


Figure 1 - Constitution de l'outil par collage de trols disques en verre

Un disque support peut avantageusement être utilisé. Il s'agira d'une glace de dix millimètres d'épaisseur simplement posée sur le poste fixe. Ce disque n'est pas collé aux disques A et B. L'intérêt de ce disque supplémentaire, est qu'il peut être contrôlé au sphéromètre une fois posé sur le poste fixe. Cela permet de vérifier d'une manière objective la planéité du poste de travail. Cela est très important avec les grands disques minces qui sont très flexibles.



Réalisé en cornières métalliques et plaques d'agglo, le poste de travail est fixé sur une planche reposant sur le sol. Le dessous du plateau (ci-dessous) sera cloisonné pour éviter toute déformation du plan de travail.



La préparation des disques

Il faut commencer par réunir les faces 1, 4, 5, 6, 7 et 8 (voir figure1). Ces faces doivent être dressées planes. Cela peut sembler long, mais en fait cela est très rapide, car ces disques en verre sont déjà presque plans. Seule la face 1 qui sera le dos du miroir est longue à préparer car la surface des disques en Pyrex est généralement assez irrégulière. Ce travail peut se faire avantageusement avec du carbo 60. Le dos du miroir seul sera fini au carbo 80 car il sera douci par la suite. Les autres surfaces seront laissées brutes au carbo 60 pour permettre un meilleur collage. Le contrôle de la planéité doit se faire au sphéromètre bien entendu. On se contentera d'une précision de 1 à 2 centièmes de millimètre. Les surfaces 2 et 3 ne seront pas préparées.

Le collage

Deux possibilités existent: le collage à froid ou le collage à chaud avec de la poix.

Le collage à chaud avec de la poix doit se faire en chaleur sèche. Il faut donc disposer d'un four assez grand pour contenir l'outil. Cette condition ne sera pas toujours facile à remplir pour les très grands disques. Naturellement on posera les deux outils A et B dans le four froid et on augmentera la température doucement. Lorsque la poix, que nous aurons disposée dans une casserole mise au four, sera bien liquide, on sortira le tout le plus rapidement possible et on procédera au collage. Il faut faire vite car la poix se refroidit assez rapidement. Le décollage de deux disques mal collés est une opération épouvantable qu'il faut éviter à tout prix.

Le collage à froid est plus facile à réaliser. On peut utiliser du plâtre comme liant. L'opération est simple, il faut simplement veiller à préparer du plâtre assez liquide pour permettre une bonne réunion au collage.

La résine polyester permet également de coller le verre. Elle est fréquemment utilisée pour fabriquer des vitres blindées genre bijouterie. L'avantage de cette méthode est que l'on peut utiliser des résines transparentes qui permettent de contrôler la bonne répartition des émeris. La qualité du douci n'en sera que meilleure. Les résines sont également des produits qui ne craignent pas l'eau. Cette propriété est appréciable pour nos activités dont l'essentiel se déroule en milieux aqueux. Il est à noter au passage que la prise de ces résines utilisées avec un catalyseur est une réaction chimique exothermique. La prudence s'impose donc pour éviter un choc thermique à nos disques. Une bassine d'eau pouvant contenir nos disques disposée à proximité fera l'affaire. Généralement on se contentera de les refroidir avec une grosse éponge.

Pour tous ces collages, il est prudent de faire un test préalable sur deux morceaux de verre provenant d'une quelconque glace. On pourra les dépolir rapidement au carbo 60 pour disposer de surfaces identiques à nos outils. Une fois le collage terminé, il faut vérifier la surface 6 au sphéromètre afin de s'assurer que les contraintes au collage n'ont pas créé de déformations de ce plan. Si c'est le cas, il faut le rectifier.

Le passage d'un enduit sur la tranche de nos disques est une bonne précaution surtout s'ils ont été collés au plâtre.

Remplacement du disque outil en verre par un outil en céramique

Je cite cette méthode utilisée avec succès par un des mes amis à l'Observatoire de Lyon pour ébaucher son Newton de 400. Le principe est très simple. On colle des carreaux de céramique sur un gâteau de plâtre. Il faut naturellement qu'il s'agisse de carrés en céramique plein et non pas de carreaux en terre cuite revêtue de céramique. On prévoira également des carreaux assez épais pour éviter d'avoir à refaire cet outil précocement usé avant que la flèche désirée ne soit obtenue.

Il est même possible de réaliser l'ébauchage avec un tel outil demi-taillé. Le creusement est beaucoup plus rapide. Il est toutefois à noter que la réalisation d'un outil pleine taille est préférable pour finir l'ébauchage et entreprendre le douci.

Il faut par contre signaler que si cette méthode présente des avantages incontestables sur l'ébauchage avec des disques pleine taille en verre, elle nécessite des soins particuliers pour le nettoyage au changement d'émeri.

Préparation des biseaux

Rien de bien particulier ici. Les biseaux externes pourront avantageusement être dressés avec un disque de ponçage monté sur une perceuse. On veillera par contre que le sens de rotation du disque aille du centre vers le bord du disque pour éviter les éclats. Les disques en fibre de verre garnis d'abrasifs sont parfaits pour cet usage. A la fin de l'ébauchage, on pourra repasser sur les biseaux avec des disques de ponçage à grain fin.

Pour les biseaux centraux des miroirs Cassegrain deux solutions sont possibles: soit les faire avant l'ébauchage, soit ébaucher son miroir tel quel et tailler le biseau central à la fin.

Dans le premier cas, on prévoira un biseau de 4 à 5 mm de plus que la flèche du miroir. Cela représente un biseau de plus d'un centimètre pour un 600 mm à f/D=6, à réaliser sur le miroir et sur la carotte. Ce travail fastidieux peut être mené à bien sur un touret pour la carotte. On prendra la précaution de bien refroidir la carotte régulièrement dans un récipient d'eau. Le miroir pourra être préparé avec une meule en carborandum. Les affûte-meule sont pratiques car assez fins et extrêmement durs.

Il est malgré tout plus rapide de ne rien faire du tout à ce stade. Quelques séchées avant le début du douci, on passe dans le sillon avec un affûte-meule tenu à 45°. Il est également possible d'adoucir la surface avec une chute de verre frottée sur le sillon avec interposition d'abrasifs.

Mise en place

On dispose sur le poste fixe un tissu genre flanelle. On pose le disque support dessus. Sur le disque support, on in-

tercale un deuxième tissu. Sur ce deuxième tissu, on pose l'outil face 3 tourné vers le haut et l'ébauchage peut commencer.

Les amateurs qui ont optés pour Sphère de référence

Ebauche de parabole

Figure 2

l'ébauchage avec un disque céramique demi-taille procéderont très différemment puisqu'ils ébaucheront miroir dessous.

Il faut citer ici une dernière méthode qui est à mon sens la meilleure. Plutôt que d'interposer des disques et des ronds de flanelle supplémentaires pour améliorer la planéité du poste de travail, il existe une autre solution. On réalise le barillet du miroir avec des touches de flottaison. On installe de façon très solide ce dispositif sur le poste fixe et l'ébauchage peut commencer. Il suffit simplement de munir ce barillet de touches un peu larges et revêtues de feutre identique à celui qu'on utilise pour poser sous les pieds de chaise. Le graissage de ce barillet ainsi que son nettoyage doivent être faits régulièrement. Ceci afin d'éviter le grippage d'une articulation qui aurait des conséquences catastrophiques sur la forme du miroir.

La conduite de l'ébauchage

Avec un outil en verre collé, le travail est similaire à celui du 200 mm ouvert à 6. Seule la quantité de verre à user diffère. On commencera par contre avec du carbo 36 beaucoup plus efficace que le 80. Lorsque le miroir aura presque atteint sa flèche (quelques jours ont passé...), on affinera le rayon de courbure avec du carbo 60. On corrigera l'hyperbole d'ébauchage inévitable compte tenu de la quantité de verre à enlever, ceci toujours avec du carbo 60. Le contrôle de la flèche ainsi que la qualité de la flèche se fait au sphéromètre. Lorsque toutes les imperfections sont disparues, on passe au carbo 80. A ce stade, le douci commence.

Avec un outil en céramique sur plâtre deux protocoles sont possibles. Ebauchage avec un outil pleine taille du début à la fin. Dans ce cas tout se passe comme si on utilisait un outil en verre. En fait, il est plus rapide de s'organiser différemment. L'ébauchage commence ici avec un outil demi-taille avec des courses centrées alternées avec des séchées centrées sur la zone 0,7. Lorsque la flèche est presqu'atteinte, on se sert du miroir ébauché comme matrice pour fabriquer l'outil pleine taille. Il suffit pour cela de couler un gâteau de plâtre comme d'habitude. Une fois le plâtre bien dur, on place dessus les carreaux de céramique que l'on colle à la Patex. Quelques séchées vont donner une courbure aux carreaux de céramique. Il ne reste plus qu'à affiner la forme de la sphère.

Le douci

Cas classique

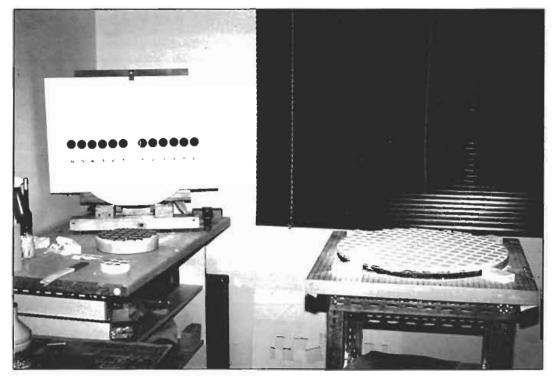
Tout se passe comme pour un 200 mm si le disque outil n'est pas trop mince. Dans le cas contraire, il faut se méfier car la tension superficielle est très forte entre les deux disques et l'outil se déforme par aspiration sur le miroir sans améliorer notablement la forme de ce dernier. De toute façon, le douci de ces grandes pièces optiques se contrôle au sphéromètre pour savoir exactement ce qui se passe.

Cas des grands miroirs ou des miroirs très ouverts

La courbe d'écart entre la sphère osculatrice et la parabole permet de voir que cet écart d'environ un micron pour le 200 mm à f/D=6 atteint des sommets pour des miroirs plus

grands et plus ouverts: exemple 9,15 microns pour un 600 à f/D=4.

Il n'est pas raisonnable de penser exécuter une telle déformation au polissage. D'autant qu'elle inté-



L'atelier d'optique du Docteur Béria. On y voit notamment un polissoir de 500 m, des polissoirs locaux et blen sûr l'essentiel, le miroir de 500 en d'égalisation attente thermique. L'écran est ici un écran de caustic test. A noter que ce support de miroir est équipé d'un dispositif de commande distance à permettant de l'orienter. Ce système est des plus précieux pour allgner son miroir lorsau'on est suel pour le contrôle.

resse une surface beaucoup plus grande. Pour fixer les idées, disons que pour des déformations inférieures à 3 microns, on a intérêt à commencer le polissage avec un miroir bien sphérique. Dans ce cas, le miroir portera bien régulièrement sur toute sa surface et la disparition du gris sera plus rapide et uniforme. Pour les plus grandes déformations, on amorcera la parabole au douci avec le "une minute" en sachant que le polissage sera plus irrégulier. Le centre et le bord s'éclairciront en effet plus difficilement.

Pour calculer la déformation à lire sur le sphéromètre, on peut réaliser une intégration graphique. En effet, lorsque l'on pose le sphéromètre sur le bord du miroir, la jambe externe repose sur la partie du miroir qui a le plus grand rayon de courbure. La jambe interne du sphéromètre repose par contre vers le centre qui a le plus petit rayon de courbure.

Comme on peut le comprendre, toute mesure est ici très relative. L'expérience montre que le miroir est près de la bonne parabole lorsqu'un sphéromètre d'un demi-diamètre

du miroir indique un tiers de la déformation calculée.

Exemple: soit un écart de 9 microns entre la parabole théorique et la sphère osculatrice. Le sphéromètre doit indiquer environ un écart de trois microns entre le centre et le bord du miroir. A l'intention des étourdis, le comparateur est plus enfoncé au bord qu'au centre. Cette méthode bien qu'approximative est très suffisante car il ne faut pas oublier que le polissage va durer quelques dizaines d'heures au cours desquelles le miroir va passer par toutes sortes de déformations plus ou moins bien contrôlées par l'opérateur. D'autre part, ce début de parabolisation ne vise qu'à gagner du temps au polissage et non à présenter un miroir fini en début de polissage. Pour s'assurer de

Début d'une séchée de douci. On voit clairement que l'abrasif n'est pas encore régulièrement réparti. la qualité de la parabole engendrée, il est souhaitable de contrôler de nombreuses positions de la surface optique pour vérifier que la déformation du miroir est bien progressive comme le montre la figure 2-A et non pas simplement un bord rabattu d'un à deux centimètres de large (fig 2-B) avec le reste de la surface encore sphérique. Il importe également de réaliser cette mesure sur plusieurs diamètres du miroir pour s'assurer que le miroir est bien de révolution. Pour le reste on se référera au Construction d'un télescope d'amateur II. On veillera également à bien respecter le nettoyage entre les changements de grain afin d'obtenir une surface bien doucie et sans rayure. Une fois ces objectifs de forme et d'état atteints, on pourra considérer que le douci est terminé.

(A suivre)

Thierry BADERSPACH



Pulsar n°707 - Mars - Avril 1995

Réalisation de grands miroirs amateurs (3)

Le polissage

Introduction

Nous arrivons ici incontestablement à la partie la plus intéressante du travail, mais également la plus difficile. Pour un 200 mm, l'opération se passe en deux temps. Tout d'abord polissage de la surface avec élimination du gris suivi par la parabolisation. Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, ces deux opérations bien distinctes dans le cas du 200 mm peuvent pour un grand disque se superposer plus ou moins.

Polissage de la surface

Début du polissage

A ce stade du travail, si l'on a bien contrôlé son miroir au sphéromètre, on connaît sa forme à peu de chose près, et l'on peut commencer le polissage avec le grand polissoir. Par contre, si l'on a fait l'impasse sur la sphéromètrie pour gagner du temps, il est possible que l'on ait quelques surprises au premier foucaultage (j'en ai malheureusement fait l'expérience) qui doit contrôler deux diamètres orthogonaux au minimum. Ces surprises peuvent être, par exemple, une hyperbole non retouchable au polissage. Tous ces problèmes surviennent d'autant plus facilement que le miroir et l'outil sont plus minces. C'est pourquoi je conseille dans ce cas d'impasse sur la sphéromètrie d'éclaircir le miroir un quart d'heure avec un polissoir demi-taille dont on pourra d'ailleurs se servir par la suite. Cela permet de foucaulter rapidement. En cas de dé-

fauts importants on pourra reprendre le douci avec l'outil qui n'est pas encore devenu le grand polissoir. Cela évite d'avoir à démolir le grand polissoir qui compte quand même 250 carrés de poix pour un 600 mm de diamètre et ce après seulement quelques minutes de travail. Ceux qui veulent polir avec une galette en plâtre n'ont pas à prendre cette précaution puisqu'ils n'utilisent pas leur outil pour fabriquer le polissoir.

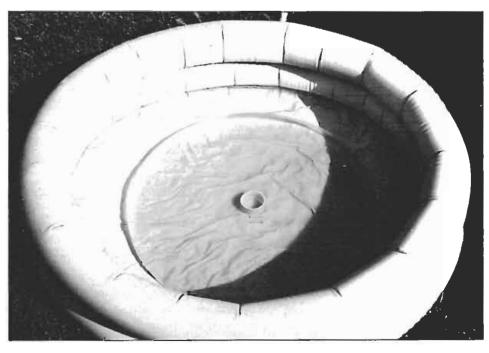
Suppression du gris et début de mise en forme Notions d'ordre général sur la qualité des polissoirs

Polir un grand miroir pour l'amateur peu outillé est souvent un problème de force. Le poids et la surface du miroir concourent à augmenter l'adhérence de l'outil et rendent le polissage très pénible physiquement. Ces problèmes liés à l'adhérence du polissoir sur le miroir peuvent être abordés de deux facons. Soit par la dureté de la poix soit par sa température. Il faut en effet bien comprendre qu'il n'existe qu'une seule consistance permettant à la poix de bien polir. Si la pièce servant de lieu de polissage est froide, on aura intérêt à rajouter de l'essence de térébenthine à la poix au moment de la coulée de l'outil. Cette adjonction rendra la poix moins dure à basse température et permettra de polir avec moins d'efforts. Si au contraire la pièce de polissage est chaude une poix normale sera préférable. La mise en forme convenable d'une grande pièce optique étant très longue surtout si l'on manque un peu d'expérience, les conditions de travail peuvent varier considérablement pendant le travail. Tel polissoir merveilleux pendant l'été est devenu très pénible à utiliser en automne, car la salle de travail s'est refroidie. On peut dans ce cas soit refaire le polissoir avec de la poix plus molle soit renoncer à le refaire et continuer à l'utiliser en le climatisant. Cette opération est simple à mettre en oeuvre. Pour les grands miroirs qui ne tiennent pas dans un récipient ordinaire, on peut utiliser une petite piscine gonflable.

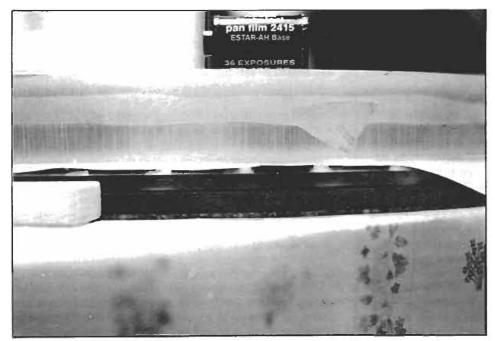
On pose le miroir au fond, face optique en haut, et on remplit avec de l'eau entre 35 et 45 degrés. Il faut laisser le miroir séjourner quelques minutes en le soulevant pour faire circuler l'eau sous le disque. En hiver, il fait plus froid, on recouvrira avantageusement la piscine d'une plaque de polystyrène pour ralentir le refroidissement du bain. Lorsque le miroir atteint la température de l'eau, on immerge l'outil, les carrés de poix tournés vers le bas en contact avec la surface optique. Une ou deux minutes suffisent. Plus la température

de la poix est proche de celle du miroir plus le polissage est facile. Malheureusement ces climatisations répétées rendent fréquent le retaillage des carrés de poix. A ce propos, on pourra préparer un carton de la taille de l'outil dans lequel on retaillera les carrés. Cela évite de faire des éclats de poix qui sautent et se collent rapidement partout. Pour terminer ce paragraphe, j'ajouterai que la qualité de la poix et la notion de température sont déterminantes pour la bonne marche du travail. Lorsque le polissoir est trop usé, il semble perdre beaucoup de ses qualités et la confection d'un polissoir neuf est certainement un gain de temps.

La taille des miroirs de grand diamètre pose évidemment des problèmes pour trouver des récipients adaptés à cette grande taille. En cherchant autour de sol on finit par trouver la solution à ces problèmes comme ici le recours à une petite piscine gonflable pour climatiser le miroir.



74 Pulsar n°708 - Mai - Juin 1995



Polissage des miroirs "parabolisés" au

Pressage au calque en début de polissage. La bobine de 2415 donne l'échelle.

douci

On doit ici au premier foucaultage constater une ébauche de parabole. Il ne faut pas croire que tout est terminé pour autant. En effet, si on se contentait de polir le miroir avec des courses d'un tiers du diamètre voici ce qui se passerait (figure 3).

Au début, on constate une parabole approximative. La zone 0,7 très saillante s'use davantage que la partie externe et le centre. Son rayon de courbure diminue. Par la suite, le rayon de courbure de cette zone 0,7 rejoint celui de la zone centrale. Il ne reste que la zone externe qui semble rabattue. Petit à petit, la largeur de cette zone diminue jusqu'à disparaître. Le miroir est redevenu sphérique. La tendance à l'altération de la forme de la parabole est d'autant plus rapide

que le rapport d'ouverture devient petit. Avec un miroir ouvert à f/D=4 il faut en permanence perturber les courses pour conserver la parabole. Des contrôles fréquents toutes les heures permettent de suivre l'évolution de la forme du miroir. Voilà pour les grandes lignes, on trouvera dans les paragraphes suivants sur la mise en forme les notions complémentaires.

Les repères à noter

Sur le dos du miroir on notera la limite des zones de l'écran de Foucault. Cela permet de visualiser exactement l'endroit où l'on fait la retouche.

Sur la tranche du miroir, on repérera quatre diamètres notés de 1 à 4 et distants de 45° entre eux.

Polissage des miroirs laissés sphériques en fin de douci

Dans ce cas, on cherchera d'abord à obtenir une bonne sphère bien polie. On fera donc comme pour un 300 mm. Tous les renseignements se trouvent donc dans le Construction d'un télescope amateur II. J'ajouterai simplement qu'il faut éviter de faire des courses dans l'axe des carrés de poix. Cela permet d'obtenir une surface plus fluide. On veillera également à ne pas allonger les courses surtout avec l'outil dessus. Le bord rabattu est en effet un des défauts les plus difficiles à effacer sur une grande pièce. On fera un contrôle sommaire au Foucault toutes les deux heures.

Mise en forme

On commencera véritablement la mise en forme précise lorsque le miroir sera complètement poli ou sur le point de l'être.

Mise en forme avec le grand polissoir Avantages

Elle donne au miroir une forme douce et un bon état de surface. Action très rapide sur la zone 0,7. Corrige l'astigmatisme surtout en position miroir dessus. Permet de relever le bord du miroir.

Disposition des repères sur la tranche du miroir: on repère quatre diamètre numérotés de 1 à 4 et distants entre eux de 45°.

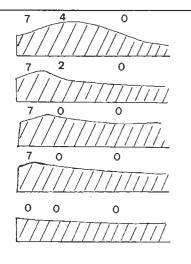
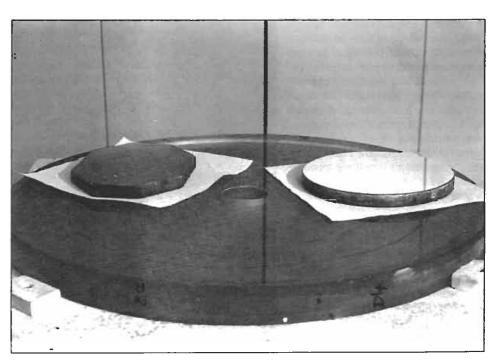


Figure 3 Les chiffres au-dessus des miroirs indiquent l'abérattion longitudinale de trois zones du miroir.



75 Pulsar n°708 - Mai - Juin 1995

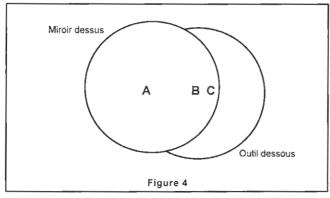
Inconvénients.

Méthode plus fatigante. La mise en forme est plus lente qu'avec un polissoir demi-taille. Le mamelonnage est fréquent surtout si l'on raccourcit les courses pour remonter le bord. Il existe bien entendu des effets parasites lorsque tout le miroir est retouché.

Rappel du principe

Pour illustrer ce rappel nous allons décrire une retouche. Par exemple miroir dessus avec des courses d'un quart du diamètre et un déport latéral également d'un quart du diamètre. Je rappelle au passage que notre miroir est déjà parabolisé d'une manière approximative. Cette précision est essentielle.

Trois zones sont à considérer (figure 4). La zone A toujours en contact avec le miroir s'use en principe d'une façon homogène. Je dis bien en principe car le miroir étant parabolique les contraintes sont très différentes d'une zone à l'autre du miroir. La zone C où le miroir frotte peu avec l'outil ne s'use que peu. C'est au niveau de la zone B que les chan-



gements sont les plus importants. En effet, cette partie du miroir correspond à l'amplitude des courses ainsi qu'au déport latéral. A cet endroit, le miroir frotte sur le bord de l'outil et se laisse creuser facilement. Comme on le voit sur le petit dessin, la zone B voit son rayon de courbure diminuer. Cette tendance peut être atténuée si l'amplitude des courses ne correspond pas au déport latéral.

Il est important de noter que d'une manière générale, un miroir parabolisé présente une zone saillante au niveau

de la zone 0,7. Bien entendu cette partie du miroir a tendance à s'user plus vite que le bord ou le centre. C'est pourquoi il est plus facile de raccourcir le rayon de courbure de cette zone que de remonter le bord du miroir.

Ces quelques lignes permettent de comprendre le principe. Mais il ne faut pas trop rêver car comme il est précisé plus haut, les forces ne sont pas identiques en tous points du miroir. L'adaptation de l'outil sur le miroir n'est jamais identique d'une retouche à l'autre. Ceci est fonction de la température, de l'état de la poix, de la durée de la retouche ainsi que de sa nature. La position des mains est également à surveiller. Ces fluctuations plus ou moins bien contrôlées

Le polissoir pour le miroir de 600 mm de diamètre. Il faut noter que le maniement manuel de cet objet assure à son utilisateur de bonnes séances de musculation qui n'ont rien à envier aux clubs de gym tonlque! par l'opérateur font que les résultats de certaines retouches sont parfois surprenants.

Mais revenons à notre retouche. Celle-ci diminue donc le rayon de courbure de la zone B. On peut également ajouter une constante afin que la zone B conserve sa focale. Dans ce cas les focales des zones A et C ont augmenté comme si le centre du miroir avait remonté et que le bord s'était rabattu. Cette dernière interprétation peut paraître a priori contraire aux réalités physiques. En fait, elle n'a rien de farfelu. Il ne faut jamais perdre de vue que nous avons affaire à un solide différentiel puisque la focale exacte du miroir n'a bien souvent qu'une importance bien relative.

Exemples de retouches

Considérons un miroir à cinq zones de contrôle notées de 1 à 5 en partant du centre pour aller jusqu'au bord du miroir (figure 5)

Pour creuser le centre, le miroir est posé dessus et les courses atteignent le quart du diamètre du miroir (fig 5-A)

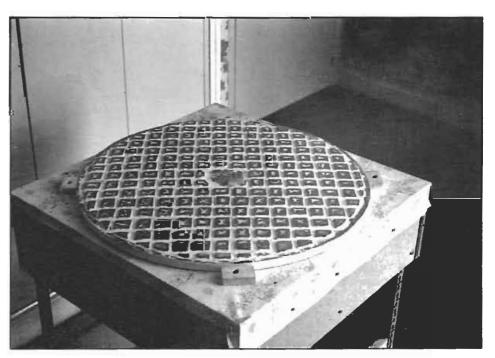
Pour rabattre le bord en remontant la zone 4 sans changer les zones 1, 2 et 3, le miroir est dessus avec un déport centré au milieu de la zone 4. L'amplitude des courses s'arrête au milieu de la zone 4 également (fig 5-B)

Pour rabattre le bord sans trop changer le rayon de courbure des autres zones, le miroir est dessous avec un léger déport surplombant de l'outil et avec surpression de la main à cet endroit. Les coures sont modérées, le tiers du diamètre, pour ne pas rabattre l'extrême bord du miroir (fig 5-C)

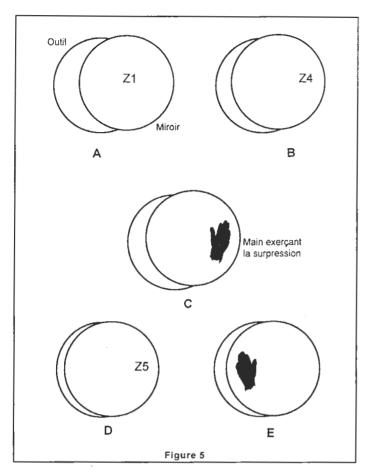
Pour remonter le bord, le miroir est dessus et les courses limitées au huitième du diamètre, le déport latéral est centré au milieu de la zone à retoucher (fig 5-D). On peut également pour remonter le bord, placez le miroir dessus avec des coures du quart du diamètre, le déport latéral oscille entre le dixième et le vingtième du diamètre avec surpression de la main sur la zone à retoucher (fig 5-E). Ces deux dernières retouches peuvent provoquer du mamelonnage.

Quelques commentaires

La retouche la plus facile à réussir est bien entendu de raccourcir le rayon de courbure des zones 3 et 4. Ces zones sont saillantes dans un miroir parabolique et les courses peuvent être un peu longues. D'autre part, la surface du miroir à retoucher est assez importante et la retouche avance



76 Pulsar n°708 - Mai - Juin 1995



donc à un rythme raisonnable ce qui limite les risques de surcorrection.

Creuser le centre est théoriquement facile. Le fort déport du miroir accentue la pression sur cette zone sans autre artifices. Mais il ne faut pas s'y tromper dans la pratique cette retouche est délicate car cette surpression importante qui se crée spontanément risque de provoquer de véritables puits dans cette zone centrale. Ajoutez à cela une surface du miroir très petite à creuser et toutes les conditions sont réunies pour un résultat catastrophique. Extrême prudence donc pour cette retouche.

Remonter le bord est également très difficile. Pour d'autres raisons. Les courses ici ne peuvent qu'être très courtes. Le rendement de la retouche en est diminué d'autant. Ajoutez à cela que le bord est protégé par la zone 0,7 plus saillante dans un paraboloïde, et vous comprendrez pourquoi cette retouche semble souvent sans effet. D'autre part, il faut bien comprendre que lorsque l'on veut remonter le bord, c'est tout le reste du miroir que l'on veut user. Cela représente une quantité de verre considérable à user. Si le défaut est important une altération de l'outil s'avérera certainement indispensable. On dégarnira bien entendu la partie externe de l'outil.

De tout ce qui précède, il découle que pour conserver la forme de votre parabole au cours du polissage, il faudra réaliser des séchées très perturbées. Les perturbations seront d'autant plus grandes que le miroir sera plus ouvert.

Voici un exemple de séchées: un tour centré sur la zone 1 avec des coures d'un tiers du diamètre suivi de deux tours centrés sur la zone 2 avec la même amplitude. Aucun tour centré sur la zone 3 qui correspond à la zone 0,7 très saillante et donc très fragile. Trois tours centrés sur la zone 4 avec une amplitude d'un quart de diamètre. Pour finir six tours centrés sur la zone 5 avec des courses d'un cinquième de diamètre.

Conclusion

On comprend bien que la retouche d'un miroir sphérique ou parabolique sont deux choses très différentes. L'opérateur doit toujours garder cette idée présente à l'esprit et se rappeler que l'amplitude et le déport latéral des courses déterminent de façon décisive l'évolution de la forme du miroir.

Mise en forme avec les petits polissoirs Avantages

Le travail est assez reposant. L'action est rapide sur la zone retouchée. Il n'y a pas d'effet parasite à distance. L'égalisation thermique après la retouche est rapide et permet donc de faire la retouche suivante plus tôt car le contrôle peut s'effectuer rapidement. Possibilité de retouche concernant une petite surface du miroir, si ce défaut est saillant bien entendu. Possibilité de retoucher les petits défauts saillants de non-révolution.

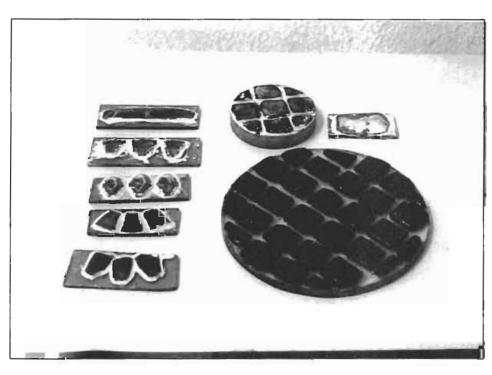
Inconvénients

Risque de création de sillons catastrophiques et très

longs à faire disparaître. Risque de créer un entonnoir autour de la carotte pour les combinaisons Cassegrain, La surface du miroir est moins homogène qu'avec le grand polissoir. Il y a tendance à la formation de stries concentriques. Tendance à la formation de filandres. Très fort risque de création d'astigmatisme zonal avec les polissoirs demi-diamètre et tiers de diamètre si le support du miroir n'est pas parfait et si on oublie de tourner celuici pendant la retouche. D'autre part le travail miroir dessous en permanence implique une plus forte tendance à l'astigmatisme.

Cette petite liste de problèmes engendrés par les polissoirs locaux peut paraître bien anodine au profane. Je voudrais néanmoins insister sur le premier risque signalé. Tout d'abord,

Divers polissoirs locaux utilisés avec plus ou moins de bonheur pour les retouches du miroir de 600 mm.



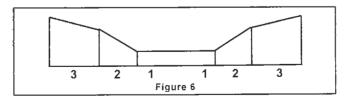
il faut savoir qu'il peut se produire très rapidement avec un petit polissoir local car la surface de ce dernier est faible et par conséquent la pression des mains de l'opérateur toujours plus importante que prévue. Pour compenser un tel ravage, il faudra user toute la surface du miroir d'une épaisseur égale à la profondeur du sillon. Ces retouches de rattrapage seront très longues car conduites avec le grand outil. Elles aboutiront certainement à une dégradation importante de la forme d'ensemble du miroir péniblement obtenue. Deuxième point important à noter: le lecteur attentif remarquera immédiatement que si ce sillon est crée vers le bord du miroir il sera encore plus difficile à effacer. Cela d'autant plus que le miroir sera plus parabolique.

La tranquille méditation de ces quelques remarques doit éviter bien des malheurs.

Principe d'action des polissoirs locaux

La perturbation engendrée est proportionnelle à la pression exercée par le polissoir. La perturbation est inversement proportionnelle à la surface du polissoir. Il est facile de comprendre que l'opérateur exerce à contrainte égale une pression supérieure sur les petits polissoirs que sur les grands.

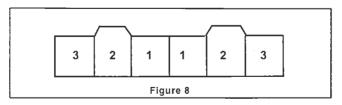
La retouche doit être exécutée principalement à côté de la zone à modifier. Le petit exemple suivant permettra de comprendre facilement. Soit un miroir dont l'écran comporte trois zones. La pente de la zone 2 est trop forte et on désire rallonger le rayon de courbure de cette zone (figure 6). C'est principalement sur la zone 3 que l'on va agir et sur la partie externe de la zone 2 (figure 7).



Les courses en 7-A descendent la hauteur de la zone 3 sans notablement en changer la pente. Les courses en 7-B descendent la zone 3 et rallongent le rayon de courbure de la zone 2 dans sa partie externe. Les coures en 7-C descendent la zone 3 et la partie externe de la zone 2. Elles rallongent le rayon de courbure de la zone 2 dans sa partie interne.

Comme on peut le comprendre, cette retouche dans son ensemble n'a pas modifié la zone 1, elle a changé la pente de la zone 2. Elle a descendu la hauteur de la zone 3 sans en changer notablement la pente. Bien entendu constamment varier les déports des courses pour raccorder convenablement les zones.

Les déformations sont proportionnelles à la durée de la retouche. Voilà encore un principe de travail qui paraît tellement évident qu'il en a l'air idiot. En fait, il y a une petite astuce que je vais donner.



Imaginons un grand miroir toujours limité à trois zones pour la compréhension facile des opérations. (figure 8). Dans cet exemple, la zone 2 est saillante et on veut la retoucher avec un polissoir 1/6e de taille.

En conduisant les courses comme indiqué sur la figure 9, c'est-à-dire centrées sur la zone 2 avec débordement sur les zones 1 et 3 il va se produire un phénomène curieux. Le polissoir va séjourner beaucoup plus longtemps sur la partie externe de la zone 1 que sur la partie interne de la zone 3, bien que la retouche semble durer le même temps. Il s'en suivra une modification plus importante de la pente de la zone 1 par rapport à la zone 3. La différence est fonction du coefficient d'occupation de ces zones du miroir par le polissoir local. Comme on le comprend, il faut bien analyser les courses de son outil pour prévoir la nature de la retouche dans les différentes zones du miroir.

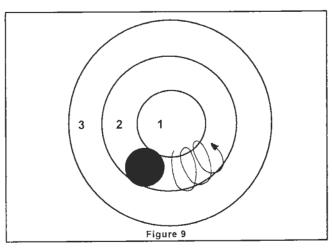
Le raccordement des zones est obtenu en réalisant une occupation dégradée do ou des bords de la zone à retoucher.

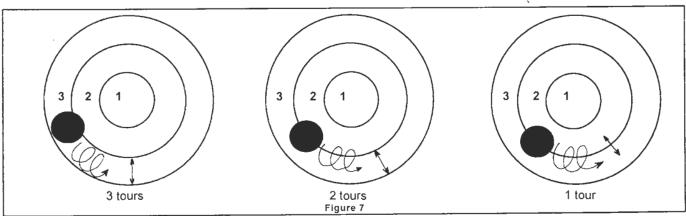
Les petits polissoirs locaux ne créent pas d'astigmatisme car ils suivent les grandes ondulations du miroir (si malheureusement elles existent) sans les modifier.

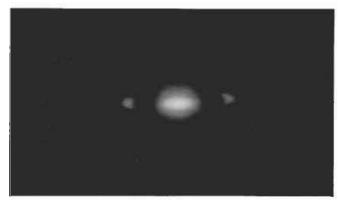
Les grands polissoirs locaux (moitié ou tiers de diamètre) produisent un astigmatisme formidable si le poste fixe n'est pas parfait (ce n'est jamais le cas avec des miroirs dont le rapport R⁴/e² est élevé) et si on oublie de faire tourner le miroir pendant la retouche.

(A suivre)

Thierry BADERSPACH







Saturne photographiée au T 210 mm dans de bonnes conditions et un très bon site. Il s'agit d'un massif des Alpes du Sud, à 2500 mètres d'altitude, lors d'un paller anticyclonique.

En consultant mes archives photographiques, j'ai été assez amusé de constater que toutes les photos de Saturne prises depuis mon domicile avec le T 400 mm étalent inférieures en qualité à ce cliché dû au T 210.

Il est vrai que j'évite d'observer Saturne dans la région lyonnaise car la faible hauteur de cet astre combinée à sa faible luminosité surfacique en font une cible difficile sous les ciels médiocres.

Comme quoi un petit télescope et le plein dans la volture constituent une solution qui réservera souvent de bonnes surprises.

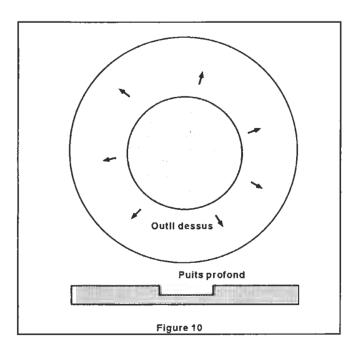
Différents types de polissoirs locaux

Le polissoir demi ou tiers de taille

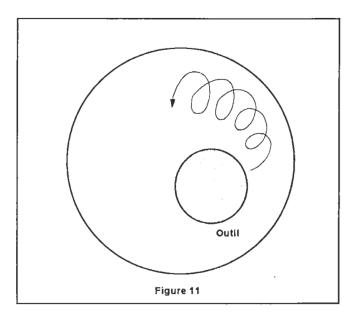
Il sert à mettre en forme le miroir ou à corriger des défauts énormes. Il permet facilement de creuser le centre. Attention dans ce cas de bien faire varier les courses en longueur et en largeur pour bien raccorder les zones. Il ne faut jamais réaliser des courses centrées systématiquement avec ce type de polissoir. En effet, dans ce cas, il se forme très rapidement un puits profond au centre. Bien entendu, le diamètre de ce puits est égal à celui de l'outil (figure n°10).

Si l'on veut utiliser cet outil pour la finition, il faut être très prudent. Si on ne travaille pas sur un système à flottaison, il faut vérifier la planéité du poste avec la plus grande attention et bien tourner le miroir régulièrement.

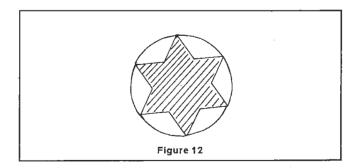
La figure n°11 montre une retouche qui permet de remonter le centre de façon assez importante. Le bord du miroir remonte un peu également mais de façon beaucoup plus modeste.



Réalisation de grands miroirs amateurs (4)



Les bords de ce polissoir peuvent avantageusement être échancrées. Le polissoir prend alors la forme d'une étoile (figure n°12). On réalise de cette façon un meilleur raccordement

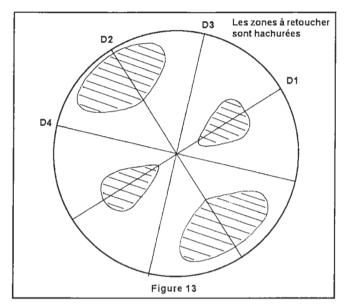


Le polissoir cinquième ou sixième de taille

C'est toujours un polissoir rond. Il ne provoque généralement pas d'astigmatisme, car avec sa petite taille il suit les grandes ondulations du miroir sans les modifie, si les courses sont de révolution bien entendu. On utilise généralement cet outil pour abaisser des zones en forme de couronne. Voir à ce propose le paragraphe consacré au principe d'action des polissoirs locaux.

Le deuxième usage de ces petits outils est bien sûr la retouche de l'astigmatisme. Pour illustrer cette retouche, nous allons étudier le cas d'un miroir souffrant d'astigmatisme d'ensemble. Le diamètre D1 possède un rayon de courbure plus

Pulsar n°709 - Juillet-Août 1995



grand que le diamètre D2. Ces deux diamètres sont orthogonaux entre eux. Il est remarquable de noter que les diamètres D3 et D4 peuvent ne montrer aucun astigmatisme entre eux. C'est pour cette raison qu'il faut contrôler au moins trois diamètres d'un miroir pour être sûr qu'il est exempt d'astigmatisme (figure n°13).

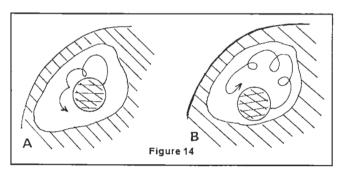
La retouche se fait en deux temps. Tout d'abord, on réalise des courses courtes au centre de la zone à retoucher (figure n°14-A). on poursuit par une série de courses plus larges (figure n°14-B). Une fois ces retouches locales effectuées sur toutes les zones à revoir, on égalise les facettes avec une retouche grand miroir dessus.

Les barrettes

A la périphérie du miroir les fenêtres de l'écran de contrôle deviennent très étroites. Les zones externes sont donc des petites couronnes très étroites. Seule une barrette peut retoucher ces couronnes sans déformer la zone voisine. On pourra coller les carrés de poix en forme d'arc de cercle pour suivre le rayon de courbure de la zone. Les carrés auront une forme de losange pour faciliter le raccordement avec la zone voisine. Ces carrés de poix doivent se toucher sinon il y aura production de mamelonnage sur la zone retouchée (figure n°15).

A la fin du travail, il peut se produire que la zone la plus externe du miroir présente de l'astigmatisme zonal. Pour arriver à une telle connaissance de la forme du miroir, il faut avoir pratiqué soigneusement tous les contrôles nécessaires. Nous reviendrons ultérieurement très en détail sur cette question qui réservera bien des surprises à quelques uns. Donc, pour corriger ces défauts ici encore la barrette trouvera un champ d'application idéal. La forme des carrés de poix différera par contre des barrettes utilisées pour les zones intermédiaires.

Sur la figure n°15, on a représenté le miroir avec sa zone externe relevée en deux endroits de sa circonférence.

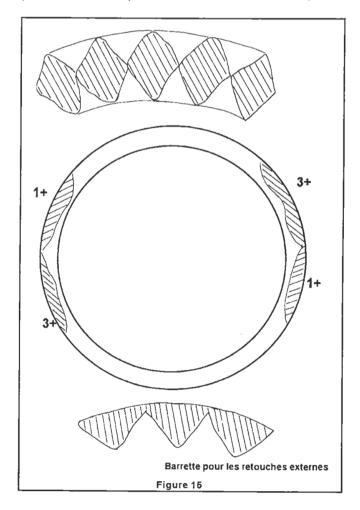


Bien sûr le temps de la retouche sera proportionnel à la correction désirée. Ici on agira trois fois plus longtemps sur la zone 3+ qui est trois fois plus relevée que la zone 1+. On remarquera au passage que les zones correspondent forcément à des diamètres du miroir puisque le contrôle s'effectue diamètre par diamètre.

Pour conclure ce paragraphe sur les polissoirs locaux, il faut signaler une fois encore que ces retouches sont dangereuses, car elles risquent de créer des sillons ou des facettes sur le miroir. Pour diminuer ces risques, on peut réaliser ces retouches avec le pouce ou la paume de la main. Ce polissoir local improvisé étant très dépressible, il y a moins de problèmes de raccordements de zones. Le frottement de la peau sur le verre a également tendance à diminuer notre ardeur et les retouches n'en sont que plus douces.

Notions sur les problèmes d'astigmatisme Introduction

Dans ce paragraphe, nous abordons le phénomène qui différencie le plus les grands miroirs des petits. Dans le cas d'un miroir de la classe des 200 millimètres, ouvert à f/ D=6, le rapport R4/e2 avoisine les 625, pour un disque de pyrex de 40 à 43 millimètres d'épaisseur. Comme nous l'avons déjà expliqué dans la figure des rapports R⁴/e² (voir courbe n°8. Pulsar n°706), ce paramètre deviendra 24 400 pour un miroir de 500 millimètres de diamètre dans la même dalle de 40 millimètres d'épaisseur. Le miroir de 500 millimètres est 40 fois plus flexible que le 200. Il n'est pas difficile d'imaginer que ce manque de rigidité de notre disque sera à l'origine de grandes difficultés. Pendant, la taille, le miroir aura tendance à devenir astigmate à la première négligence. Ce peut être un défaut du support, l'utilisation inadéquate d'outils demitaille ou bien simplement de courtes retouches ne respectant plus les lois statistiques du hasard. A cette difficulté, il faut



ajouter que les grands miroirs sont généralement plus ouverts que les petits, et par conséquent, les tolérances sont encore plus faibles. Cette deuxième exigence se rajoute bien entendu aux problèmes de flexion.

La conclusion de tout cela est très simple. Pour un petit miroir, les problèmes d'astigmatisme resteront des données anecdotiques théoriques si l'opérateur travaille normalement. Pour les grands miroirs, l'astigmatisme deviendra un impératif supplémentaire à respecter outre la forme de la parabole et l'état de surface du miroir. Améliorer la qualité d'un miroir impose naturellement de tendre vers la parabole parfaite, et ce quel que soit le diamètre contrôlé. Cette forme d'ensemble du miroir sera bien entendu concrétisée par une surface exempte de mamelonnage et autre défaut local.

Un ou deux exemples rapidement commentés permettront de concrétiser ces difficultés lorsqu'elles sont combinées.

Imaginons que notre miroir soit presque terminé (il n'est pas interdit de rêver un instant). Seul subsiste un léger bord rabattu bien de révolution. Quelques minutes avec le miroir dessus et des courses très courtes devraient suffire. Ce peut être vrai si l'opérateur arrondit parfaitement ses courses, ce qui n'est pas si facile lorsque la course est courte. Si par contre notre opticien provoque des saccades, il y a de fortes chances pour que cette ultime retouche génère un mamelonnage catastrophique sur tout le miroir.

Les grands miroirs comportent généralement un foyer Cassegrain. Le miroir est donc généralement muni d'une carotte pendant la taille. Voilà encore une source de problèmes supplémentaires. Les retouches de la zone centrale ne sont pas exemptes de surprises et il peut se produire de véritables entonnoirs autour de cette carotte lors de l'utilisation de petits polissoirs locaux pour creuser le centre par exemple. La retouche du centre est également susceptible de créer de l'astigmatisme zonal dans cette partie du miroir, car elle se retouche très vite. En effet, la surface très petite de cette zone implique des retouches courtes qui ne respectent pas toujours les lois du hasard.

Comme on a pu le comprendre, tout l'art de l'opticien consiste à retoucher un défaut sans en engendrer un autre plus difficile à éliminer. Il ne sera d'ailleurs pas toujours possible de corriger directement tel ou tel défaut. Quelques fois il faudra passer d'abord par des retouches intermédiaires avant de pouvoir s'attaquer au problème de départ. Ces circonstances rappellent un peu le destin du navigateur dont le voilier doit remonter au vent. Dans cette situation, les zig zag sont souvent la seule solution pour accomplir un bout de ligne droite dans la direction souhaitée.

Astigmatisme zonal et astigmatisme d'ensemble

Ce sont les deux formes principales que peut revêtir l'astigmatisme. En fait, il ne s'agit que de deux apparences d'un même phénomène physique, à savoir la déformation de non-révolution de notre solide différentiel.

L'astigmatisme zonal

Cette déformation affecte des petites parties du miroir. Ces défauts peuvent être nombreux et disséminés ou bien être localisés à quelques rares endroits du miroir. Du fait de leur petite surface, ils peuvent présenter des pentes importantes. Lorsque l'on mesure plusieurs diamètres avec un appareil de Foucault ordinaire, ce défaut peut être mis en évidence.

Bien que les écarts de pointés puissent être importants, il faut toujours estimer la surface du miroir concernée et donc la quantité de lumière défocalisée. Il convient également de différencier les défauts centraux des défauts périphériques toujours plus graves. Cela permet de tempérer le jugement trop négatif formulé sur tel ou tel miroir (en général celui du voisin). L'astigmatisme d'ensemble

Ce phénomène, bien qu'il puisse être détecté avec un appareil de Foucault ordinaire ne peut pas être mesuré avec ce même appareil de Foucault. Nous verrons par la suite que l'on peut modifier l'appareil de Foucault pour réaliser le test de Foucault tournant avec un écran spécial. Ce test que nous avons exploré avec mon collègue, le Docteur Béria, permet d'accéder à la connaissance globale de la forme du miroir.

Mais revenons à l'astigmatisme. Ce défaut d'ensemble est souvent ignoré des amateurs qui se contentent généralement de foucaulter leur miroir selon la méthode classique. Cette méthode si merveilleuse pour les 200 ouverts à 6 n'est plus suffisante pour les grands miroirs flexibles. Bien que notre test de Foucault puisse demeurer la base du contrôle, il doit être complété par un test permettant d'obtenir la corrélation entre les différents diamètres du miroir. Pourquoi cela? C'est très simple, l'astigmatisme d'ensemble affecte le miroir un peu comme une roue de vélo voilée. Tout l'ensemble du miroir est déformé d'une façon très progressive. Il n'y a pas de fortes pentes, mais tout le miroir est concerné et l'amplitude du défaut peut-être importante.

Pourquoi ce défaut peut-il passer inaperçu au Foucault utilisé avec un écran ordinaire. C'est en fait assez facile à comprendre. Lorsque l'on contrôle deux diamètres orthogonaux, les écarts entre les zones de l'écran peuvent rester semblables d'un diamètre à l'autre. Par contre, la pente d'ensemble du miroir fait qu'un des deux diamètres est en avant du deuxième diamètre contrôlé. Lorsque l'on utilise la méthode classique de contrôle on fait tourner le miroir de 90° pour amener les diamètres contrôlés à l'horizontale. Entre le contrôle du premier et du deuxième diamètre, la distance entre le miroir et l'appareil de mesure a changée. Là est tout le noeud de l'histoire.

En effet, pour pouvoir comparer les mesures des différents diamètres, on introduit une constante qui permet, par exemple, d'égaliser les mesures d'une zone de l'écran. ON choisit en général la zone de l'écran qui correspond à la zone 0,7 car elle est assez fiable. On compare ensuite les différents diamètres du miroir. Malheureusement pour un miroir flexible, rien ne permet d'affirmer que les deux diamètres sont dans le même plan. En effet, si le miroir est porteur d'astigmatisme d'ensemble, l'introduction de cette constante devient arbitraire et fausse. L'amateur victime de ces phénomènes et qui les aura négligés aura le bonheur de posséder un miroir à lambda sur 20 sur le papier mais n'obtiendra jamais en haute résolution que des images cotonneuses au faible contraste.

Contrôles

La mesure de l'astigmatisme d'ensemble

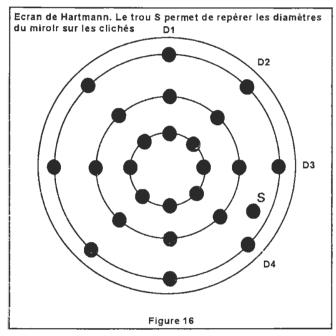
Cette mesure peut se réaliser de trois façons différentes que nous allons examiner.

La méthode de Hartmann

Bien que cette manipulation soit très bien décrite dans "Lunettes et télescopes" de Danjon et Couder, nous allons en donner une rapide description afin que le lecteur en comprenne le principe.

On place devant le miroir un écran percé de huit trous sur plusieurs cercles concentriques. Chaque groupe de huit trous correspond à un foyer théorique du miroir. En réalisant un cliché intrafocal et un cliché extrafocal, on obtient une image de l'écran pour chaque cliché.

Pour comprendre le principe étudions le trajet de quatre pinceaux de lumière. La source lumineuse étant ponctuelle. Pour clarifier, nous avons représenté sur la figure n°16 un écran muni de quatre trous seulement, ces trous définissent deux diamètres orthogonaux. Les pinceaux de lumière sont figurés deux par deux toujours pour simplifier le dessin.



Bien entendu dans l'essai classique l'écran possède huit trous par zone et plusieurs diamètres. Le nombre de ces zones varie suivant le diamètre et l'ouverture du miroir en contrôle. Pour un écran à cinq zones, il y a quarante pinceaux de lumière plus le pinceau d'orientation. Cela est bien entendu impossible à représenter graphiquement.

En examinant notre figure n°17, on comprend immédiatement que le plan AB et A'B' sont enregistrés sur le même

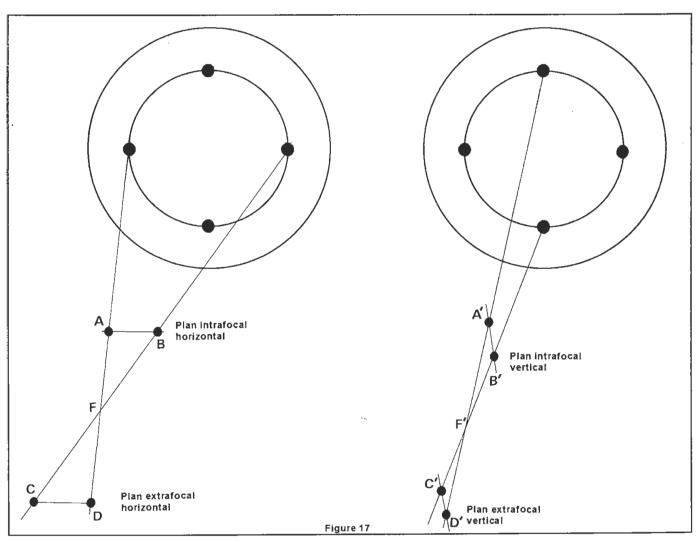
cliché. En mesurant l'écartement AB et A'B' on peut déceler l'astigmatisme d'ensemble. Il va de soi qu'un miroir strictement de révolution présente des mesures orthogonales identiques.

Le grand intérêt de la méthode de Hartmann étant la mesure de l'astigmatisme, il faudra donc veiller à réaliser un montage des plus soignés. On rapprochera donc le plus possible la source de l'axe optique. Un prisme peut rendre de grands services. Il faudra également vérifier très attentivement le parfait parallélisme de l'axe optique avec le chariot permettant d'accéder aux plans intra et extra focaux. Le miroir quant à lui ne doit subir aucune contrainte qui risquerait d'introduire une déformation de sa surface. L'écran qui généralement est en contreplaqué pour des raisons de commodité de perçage des trous et pour garantir une bonne rigidité, ne doit pas toucher le miroir.

Une fois toutes ces questions réglées, il ne reste plus qu'à exposer les clichés. On réaliser deux intrafocaux et deux extrafocaux. Si l'on veut obtenir des mesures irréprochables, il faut tourner le miroir de 90°, refaire tous les réglages précédemment décrits avec autant de soins et refaire quatre clichés. Si les montages sont convenables, les mesures absolues vont changer d'un test à l'autre car les distances entre le miroir et les plans du film varient lorsque l'on tourne le miroir. Par contre, l'astigmatisme doit tourner avec le miroir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait en déduire une maladresse dans la réalisation du test, ce qui est toujours un enchantement après trois heures de travail.

(A suivre)

Thierry BADERSPACH



Réalisation de grands miroirs amateurs (5)

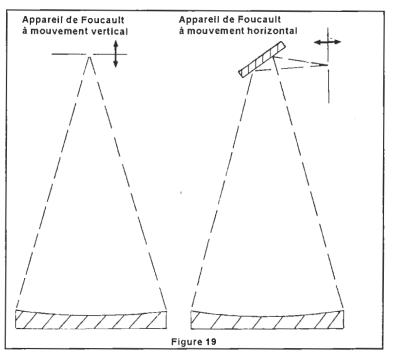
Il peut également se produire une déformation verticale du miroir avec les disques très flexibles. Cela ne modifie pas le foyer du diamètre horizontal mais raccourcit la focale du diamètre vertical. Dans ce cas, il faudra faire les contrôles le miroir dans son barillet en l'inclinant légèrement par rapport à la verticale de manière à bénéficier de l'effet dorsal du barillet. Cette contrainte rend bien entendu l'usage et les réglages du test plus délicats

Ces conclusions sur les flexions du miroir posé sur sa tranche peuvent paraître surprenantes mais n'en sont pas moins réelles. Je ne saurai dire à partir de quelle valeur de R⁴/e² elles se manifestent. Je peux par contre affirmer les avoir constatées sur mon 610 mm. Il appartient donc à chaque opérateur de s'assurer de l'absence de ces flexions, car elles ruinent toutes les mesures.

Développons le cas du contrôle si ces flexions verticales existent. Pour remédier à ce problème, la première idée qui vient à l'esprit est de contrôler le miroir en le posant horizontalement sur un support multipoints. Bien que théoriquement satisfaisante, cette méthode présente de grandes difficultés. Il faut en effet disposer l'appareil de Foucault au-dessus du miroir (fig.19), le chariot devant alors se déplacer verticalement. Cela implique la reconstruction de cet appareil pour éviter le basculement du chariot. Il existe en outre un risque de chute de pièces sur le miroir que l'on préférera éviter.

On peut envisager l'interposition d'un miroir plan pour replier le faisceau, mais il faut disposer d'un plan parfait pour ce montage.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que le miroir étant de grand diamètre, le rayon de courbure est généralement



supérieur à cinq mètres. On voit donc que ce montage n'est pas facile à mettre en oeuvre.

Pour ma part, voici comment je conseille de procéder. Deux cas peuvent se présenter:

 -on a réalisé la fabrication de son miroir sur un barillet de flottaison multipoints, il ne reste plus qu'à l'utiliser comme décrit ci-après pour le contrôle;

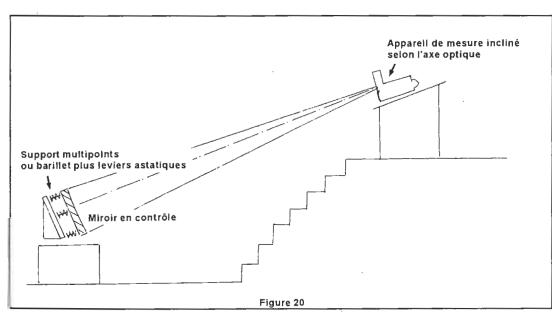
-on ne possède pas de barillet multipoints. Il est utile à ce moment du travail de construire le barillet du télescope avec ses leviers astatiques. Dans ce cas, il faut déjà disposer d'un miroir déjà bien avancé. Pour fixer les idées, disons que l'on peut le garantir à $\lambda/4$ au moins en le contrôlant verticalement.

Pour procéder à notre contrôle, on incline le miroir dans son barillet à 45° et on présente ce montage dans l'axe d'un escalier rectiligne. L'appareil de contrôle est quant à lui posé en haut de l'escalier et incliné d'un angle parallèle à l'axe optique. Cette disposition m'a été dictée par la topographie de ma maison qui possède cet escalier précieux! (fig. 20).

Comme on le comprend immédiatement, ce montage est très intéressant, car le miroir travaille dans des conditions proches de celles du futur télescope. On pourra tester le barillet ainsi que les touches latérales. Ces touches latérales

sont toujours une source de gros soucis pour les grands miroirs flexibles, car elles introduisent des contraintes qui tendent à vriller le miroir et à le déformer. Un autre sujet de satisfaction de ce montage réside dans le fait que nos appareils de mesure n'auront pas à subir de transformation, il suffira de les visser sur leur plan support incliné.

Dans le cas du test sur support de flottaison, le barillet n'exerce en principe pas de force active sur le dos du miroir et on est sensé mesurer la forme du miroir.



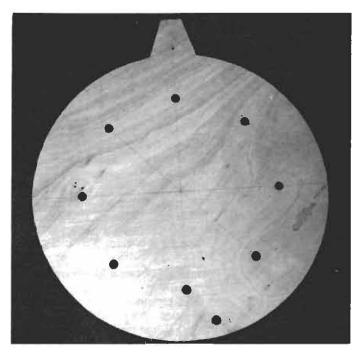


Figure 21 - Ecran en contreplaqué percé de neuf trous: huit sont disposés par paires sur les quatre diamètres orthogonaux; le neuvième permet de contrôler l'orientation sur les clichés.

Dans le cas du support à leviers astatiques, le barillet n'est plus un acteur innocent, car si un levier est un peu plus dur que les autres, ou bien un peu plus chargé, il va déformer le miroir. C'est pourquoi, il faut connaître la forme globale du miroir dans des conditions standard (miroir vertical) pour pouvoir détecter facilement ce genre d'anomalies.

Enfin, dernier commentaire sur cette méthode, et non des moindres, on peut dans ce cas considérer un miroir légèrement voilé par un astigmatisme d'ensemble, et dont la précision globale est de 1/4 ou 5 par exemple. Nous verrons par la suite qu'une telle déformation est très difficile à corriger sur le verre, mais qu'elle peut par contre se corriger très facilement avec les leviers astatiques grâce au test de Foucault tournant dont je vous parlerai un peu plus loin.

Le test de Hartmann simplifié Introduction

Après quelques explications sur le test de Hartmann et les notes sur les conditions de réalisation de ce test, nous allons aborder un test un peu hybride que nous avons imaginé avec mon ami le Docteur Béria. Le Docteur Béria en a par la suite assuré le développement. Les lignes de ce paragraphe retracent son travail.

Principe et mise en oeuvre

Lorsque le miroir parvient à un stade avancé, on se doit de connaître sa forme le plus exactement possible.

Réaliser un test de Hartmann complet après chaque retouche devient vite fastidieux. C'est surtout le cas lorsque la retouche à contrôler n'a pas pu introduire d'astigmatisme. Par exemple, retouche avec un petit polissoir local sur une zone. Un simple contrôle de Foucault sur quatre diamètres peut dans ce cas suffire. Il est alors intéressant de disposer des constantes de la zone 0,7 pour les quatre diamètres du miroir. Pour connaître cette constante, un test de Hartmann limité à cette zone 0,7 suffit. Il se déroule dans des conditions similaires au test complet, mais son dépouillement est plus rapide. Voici donc l'exposé de cette méthode.

On place devant le miroir un écran percé de neuf trous (fig 20). Quatre paires de trous correspondent aux quatre diamètres du miroir. Ces trous sont très exactement équidistants du centre de l'écran. Leur centre respectif correspond d'autre part parfaitement au centre d'une zone de l'écran de Foucault. Par exemple, la zone 0,7 car sa mesure est très fiable. Le neuvième trou est percé pour nous permettre d'orienter nos clichés.

Le centrage de l'écran devant le miroir est bien entendu très soigné. Le miroir ne subit aucune contrainte s'il n'est pas trop flexible. Il est dans ce cas posé sur la tranche. S'il est trop flexible, il est monté sur un barillet oblique comme indiqué précédemment.

Pour réaliser la mesure, nous allons construire un appareil de Foucault modifié. La fente sera remplacée par un trou circulaire réalisé aussi soigneusement que possible. On pourra le contrôler avec un petit microscope. Le couteau sera remplacé par un appareil photo reflex chargé bien sûr avec du 2415. La course du chariot sur lequel est monté le boîtier sera très allongée. Compter environ quinze à vingt centimètres de débattement le long de l'axe optique.

Voici pour le matériel. Reste maintenant à le régler correctement. On déterminera le foyer F exact de la zone étudiée. Pour cela il suffit dé déplacer longitudinalement le boîtier photo sur son chariot (fig. 22).

Lorsque le chariot est situé au foyer du montage, tous les pinceaux de lumière se croisent en un point F et on observe dans le viseur du boîtier un point très lumineux et très petit. Il s'agit bien entendu de l'image de la source.

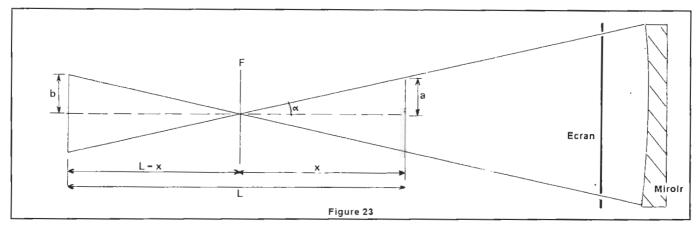
En avançant ou en reculant le chariot, on observe l'image de l'écran. Cette image est d'autant plus grande et plus floue que l'on s'éloigne du foyer.

Nous allons déterminer deux positions de contrôle photographique. Ces positions sont équidistantes du foyer. Une position est intrafocale, l'autre est extrafocale. Ces deux positions seront mesurées soigneusement. Leur écartement sera consigné et appelé distance L.

Source
Foyer

Figure 22

Pour centrer parfaitement le mouvement du chariot par rapport à l'axe optique, on pourra utiliser le stigmomètre du boîtier photo. Lorsque les positions intra et extrafocale seront bien identiques et centrées sur stigmomètre du viseur, on pourra exposer les clichés (fig. 24).



Deux clichés pour chaque position seront un minimum. Pour plus de sécurité, on peut tourner le miroir de 90° et refaire quatre clichés. Bien entendu, tout est à régler de nouveau, et le temps de travail est double. Une fois nos clichés développés, nous voici à la tête de quelques négatifs à mesurer. On pourra réaliser ces mesures à l'aide d'un petit microscope à oculaire réticulé et disposé sur un chariot micrométrique. Cet instrument peut être construit à l'aide de deux oculaires et du chariot du Foucault à condition que son mouvement soit appréciable à un centième de millimètre au moins.

Un palmer ou un comparateur seront ici les bienvenus.

On centre donc le réticule sur le centre d'un trou, on déplace ensuite grâce au chariot le réticule sur le trou opposé de ce même diamètre. La difficulté consiste ici à bien faire correspondre le trajet du chariot avec l'axe passant par le centre des deux trous mesurés. On

Microprismes

Position intrafocale

Figure 24

Position extrafocale

note grâce au palmer ou grâce au comparateur l'espace séparant les trous de ce diamètre D1. Cet écart correspond à la distance 2a sur notre dessin théorique (voir figure 23). On répète plusieurs fois la mesure pour plus de sécurité, et on fait la moyenne.

Exemple: pour le diamètre D1, nous obtenons les trois mesures suivantes 3,765 mm, 3,755 mm et 3,755 mm; soit la moyenne 2a de cette série de mesures pour le D1=3,76 mm.

On tourne ensuite notre négatif et on mesure successivement D1, D2, D3 et D4 en utilisant notre trou supplémentaire pour le repérage des diamètres notés à la prise de vue. Nous disposons maintenant de quatre séries de mesures pour les écartements intrafocaux de nos trous sur les clichés pris en position intrafocale.

Exemple: écart moyen D1=3,76 mm; écart moyen D2=3,85 mm; écart moyen D3=3,81 mm; écart moyen D4=3,805 mm.

On fait de même pour les clichés extrafocaux. L'écart est ici égal à 2b. Exemple: écart moyen D1=4,04 mm; écart moyen D2= 3,965 mm. Pour la suite du texte nous ne conserverons que les diamètres 1 et 2 afin d'éviter les trop longs tableaux chiffrés. Les diamètres D1 et D2 sont bien entendu orthogonaux.

Les mesures intra et extrafocales ne correspondent pas exactement, car il n'y a jamais parfaitement équidistance entre le foyer et les deux plans photographiques. Il ne nous reste plus qu'à définir notre constante grâce à un petit raisonnement trigonométrique.

Soit x cette constante. Nous avons tg $\alpha = a/x = b/(L-x)$ d'où a(L-x) = bx et x = aL / (a+b).

Dans notre exemple, L mesuré vaut 142 mm (distance entre les plans photographiques intra et extrafocal). Pour le diamètre D1 nous avons obtenu par mesurage 2a=3,76 mm et 2b=3,96 mm; d'où x1=68,46mm. Pour le diamètre D2 nous avons obtenu 2a=3,85 mm et 2b=3,96 mm d'où x2=70mm.

En faisant la moyenne pour ces deux diamètres, nous obtenons une valeur de réfèrence pour le plan du miroir. Dans notre exemple, cette moyenne vaut 69,23 mm.

Nous voyons immédiatement que le diamètre D1 focalise 0,77 mm en avant du foyer moyen de cette zone. Cette valeur devient donc -0,77

mm. Le diamètre D2 focalise 0,77 mm en arrière du foyer moyen. Cette valeur devient donc +0,77 mm.

Notre test de Hartmann simplifié est maintenant terminé. Dans la pratique courante, il comporterait par contre quatre diamètres explorés. Il ne reste plus maintenant qu'à contrôler le miroir sur les diamètres 1 et 2 avec l'appareil de Foucault. Avec un écran à cinq zones, nous réglons le tarage de notre vis sur la valeur théorique de la zone correspondante aux trous de l'écran de Hartmann. Par exemple, la zone 3. Nous réalisons nos mesures sur les deux diamètres 1 et 2 en partant de la zone 3 (tableau 2-a). Les mesures de la zone 3 correspondent exactement puisqu'elles sont prises comme référence de départ. Il ne nous reste plus qu'à intro-

Tableau 2-a					
	Zones				
	1	2	3	4	5
Diamètre 1	0,05	2,56	5,44	7,6	9,3
Diamètre 2	0,25	2,6	5,44	7,45	9,25
Tableau 2-b					
Diamètre 1	-0,72	1,79	4,67	6,83	8,53
	On a retranché 0,77 aux mesures				
Diamètre 2	1,02	3,37	6,21	8,22	10,02
Diametre 2	On a ajouté 0,77 aux mesures				

La conduite du test de Hartmann simplifié ou complet exige la réalisation d'un appareil de contrôle spécifique. Le cliché ci-contre montre ce dispositif avec le charlot mobile à grande course sur lequel un boîtier reflex doit prendre place. Cette réalisation est due au Dr. Béria.

duire les constantes calculées précédemment dans le Hartmann simplifié pour tenir compte de l'astigmatisme d'ensemble de notre miroir (tableau 2b).

Comme on le voit immédiatement la forme réelle de notre miroir n'a plus rien à voir avec celle du miroir dont on ne mesure pas l'astigmatisme

Commentaires sur les difficultés et le temps de contrôle

Après tous ces paragraphes consacrés au contrôle de l'astigmatisme, le lecteur pourrait penser que

nous en avons oublié de contrôler la méridienne du miroir. Bien entendu, il n'en est rien mais nous avons simplement voulu sensibiliser le lecteur à ces problèmes de non-révolution souvent ignorés. Nous savons également que notre lecteur connaît parfaitement le test de Foucault ainsi que son interprétation.

Pour connaître la forme de son miroir, notre lecteur sait maintenant qu'il peut procéder de deux façons différentes.

Soit réaliser un test de Hartmann complet (tableau 3-méthode 1); soit opérer en deux temps en contrôlant d'abord l'astigmatisme sur une zone avec le test de Hartmann simplifié suivi d'un test de Foucault sur quatre diamètres (tableau 3-méthode 2). Cette deuxième méthode permet de réaliser plusieurs retouches pour lesquelles on ne craint pas d'introduire de l'astigmatisme et de les contrôler simplement avec un test de Foucault en reportant à chaque fois les constantes du test de Hartmann simplifié.

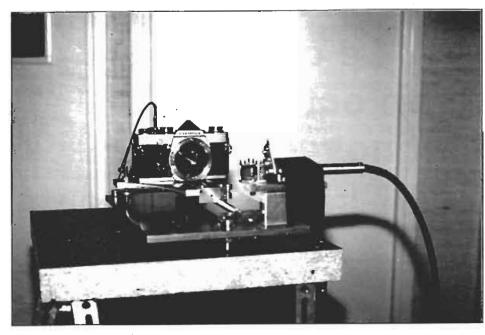
Comme on l'a vu plus haut, le test de Hartmann qu'il soit complet ou simplifié est incontournable et cela occasionne de grandes pertes de temps, du fait des procédés photographiques mis en oeuvre.

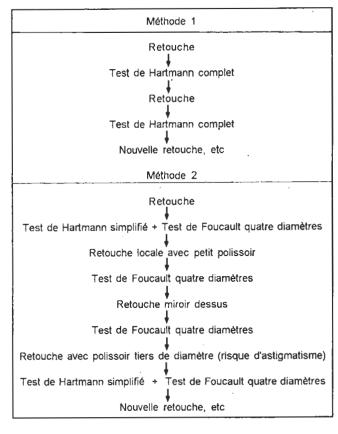
A ce stade du travail, lorsque le miroir approche une précision honorable, une retouche de deux minutes implique souvent plusieurs heures de contrôle (tableau 4)

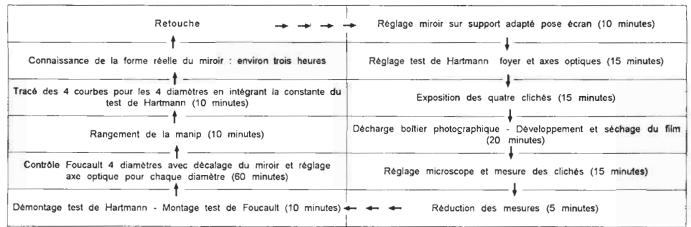
(A suivre)

Thierry BADERSPACH.

Tableaux 3 (ci-contre) et 4 (ci-dessous) donnant les enchaînements des opérations et les temps pour les réaliser.







Réalisation de grands miroirs amateurs (6)

Figure 27 - Ecran total

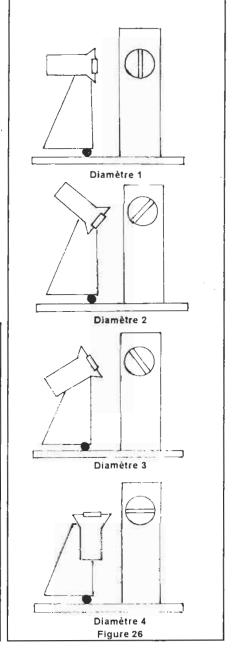
Le test de Foucault tournant

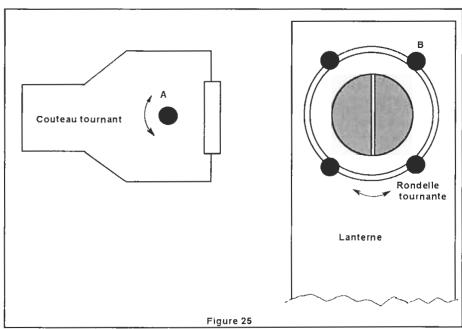
Il n'est pas étonnant à ce stade du travail de voir de nombreux opérateurs devenir moins rigoureux dans leur méthode de travail compte tenu de l'effort à fournir. Cela explique sans doute le fait qu'il existe si peu de grands miroirs d'amateurs d'une qualité optique vraiment satisfaisante.

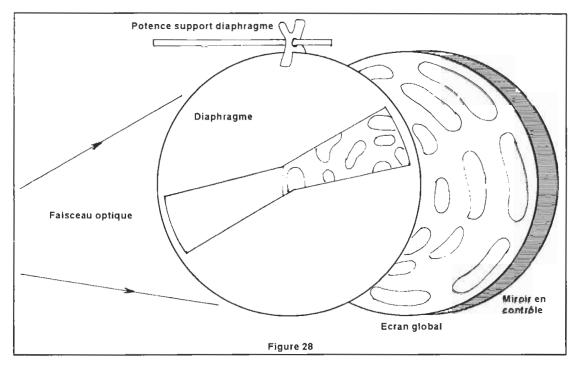
J'ai moi-même souffert de cette situation d'énorme perte de temps. Etant très attaché au test de Foucault, j'ai imaginé de réaliser ce test en faisant tourner la fente et le couteau. Cette technique permet d'explorer quatre diamètres du miroir sans le tourner ni le toucher et donc de mesurer la forme réelle de la parabole en intégrant directement l'astigmatisme zonal et d'ensemble dans la mesure.

Comme on peut le voir sur la figure 25, le principe est très simple. La fente est montée sur une grosse rondelle. Cette rondelle est supportée par quatre vis qui réalisent le blocage. Ces quatre vis lorsqu'elles ne sont pas bloquées permettent à la rondelle de tourner. Le couteau peut également tourner autour de l'axe A pour être réglé parallèle à la fente pendant la mesure. Le couteau possède en outre un mouvement vertical pour intercepter la lumière lorsqu'il est horizontal.

Le contrôle s'effectue donc le plus simplement du monde selon quatre diamètres grand miroir. Le test est très rapide, car le miroir ne devant absolument pas être touché pendant toute la durée des mesures, il n'y a pas besoin de régler le Foucault entre cha-





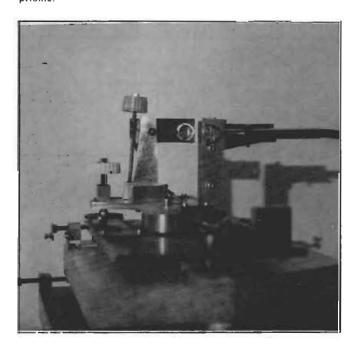


que diamètre. Il suffit simplement d'aligner la fente et le couteau comme on peut le voir sur la figure 26.

Donc tout se passe comme si l'on réalisait quatre tests de Foucault sur le même miroir.

Pour améliorer la qualité de la mesure, il est souhaitable de modifier légèrement l'entraînement du chariot. En effet, pour les grands miroirs, l'aberration longitudinale dépasse toujours un centimètre. Si la tige filetée de notre appareil de Foucault possède une faible erreur de 2/100 de millimètre par tour, au bout de dix tours c'est une erreur inacceptable de 2/10 de millimètre que nous reporterons sur notre courbe. Pour éviter ce problème, il suffit de monter sur notre appareil de Foucault un comparateur et d'effectuer la mesure sur son cadran. On utilise ici notre ancienne vis simplement pour déplacer le chariot.

Appareil de Foucault modifié. La configuration utilisée ici comporte la fente tournante et permet l'exploration complète d'un grand miroir. A noter que sur cet appareil dû au Docteur Beria, la source lumineuse est assurée par une fibre optique combinée à un prisme



En ce qui concerne l'écran, on peut procéder de plusieurs façons. Avec un écran classique, il faudra tourner l'écran entre chaque diamètre pour aligner l'axe des trous avec la perpendiculaire au couteau. Il faut alors de préférence disposer d'une potence en avant du miroir pour tenir l'écran. Ce dernier ne doit en effet pas toucher le miroir car en le touchant, on risquerait de faire bouger le miroir et de fausser toutes les mesures.

On peut également confectionner un écran global comme celui de la figure 27. On com-

prend immédiatement qu'avec cet écran, il n'est plus nécessaire de tourner l'écran entre chaque diamètre. Par contre, la teinte plate est plus difficile à évaluer car on reçoit de la lumière parasite des trous percés dans tout l'écran.

La solution idéale consiste à disposer notre écran global sur le miroir. On est certain en le fixant avec du ruban adhésif qu'il ne bougera pas. On peut également parfaitement contrôler le centrage, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise un écran standard placé quelques centimètres en avant du miroir. Donc une fois notre écran global collé sur le miroir, on dispose devant cet ensemble un deuxième écran uniquement destiné à filtrer la lumière parasite. Ce dernier écran diaphragme est bien sûr fixé en avant sur une potence indépendante. Il suffit de tourner notre diaphragme pour chaque changement de diamètre pour ne laisser visible que la zone en contrôle. Nous bénéficions ici de tous les avantages. Le centrage de notre écran global est parfait puisque posé directement sur le miroir. De plus ce centrage est toujours le même puisque notre écran servant à la mesure ne bouge pas d'un diamètre à l'autre. Le positionnement du diaphragme peut être approximatif car il ne sert qu'à éviter la lumière parasite.

Comme on le comprend immédiatement, ce test est de loin le plus efficace et le plus rapide. Lorsque la manip est bien rodée, en une heure, on peut connaître exactement la forme de son miroir et conduire la retouche suivante avec détermination.

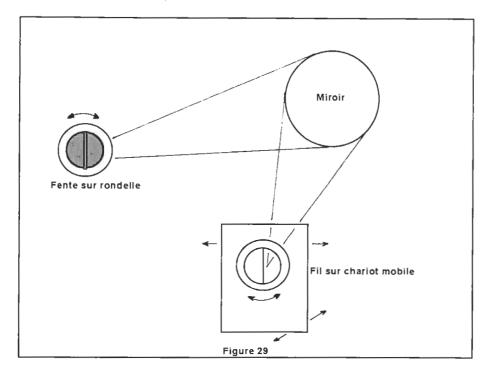
Le test du fil

Comme on a pu le voir dans les paragraphes précédents, on peut connaître très précisément la forme de son miroir en utilisant soit:

- -le test de Hartmann complet;
- -le test de Hartmann simplifié plus le test de Foucault quatre diamètres:
- -le test de Foucault tournant.

Ces méthodes sont très sûres et très puissantes. Mais il peut se produire au cours du travail de mise en forme que l'on veuille par exemple corriger des défauts grossiers d'astigmatisme sans obtenir de résultats chiffrés, la forme du miroir étant encore à ce stade très loin de la parabole finale.

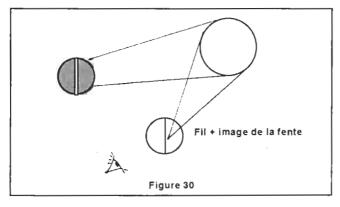
Les retouches sont ici encore grossières et on désire surtout ne pas perdre de temps en longs contrôles. Par contre, il faut tout de même savoir dans quel sens avance le travail.



Le test du fil est merveilleusement adapté à cette situation. Il se règle très vite et permet de voir instantanément l'aliure générale du miroir. Bien entendu, si l'on veut en savoir plus, on peut lui associer un test de Foucault sur un diamètre pour avoir en plus du contrôle de l'astigmatisme une idée sur la forme de la parabole.

Voici donc le principe et la mise en oeuvre de ce test. Le test utilise un appareil de Foucault légèrement modifié. La source de lumière est une fente pas trop fine montée sur une rondelle pouvant tourner à 360 degrés. Le couteau est remplacé par un fil. Ce fil est également monté sur une rondelle rotative. Le fil reste bien entendu fixé sur le chariot mobile de l'appareil de Foucault et peut se déplacer dans le sens longitudinal parallèle à l'axe optique (figure 29).

Pour réaliser ce test, on procède comme pour un test de Foucault classique. On place le fil au foyer approximatif du miroir. On aligne soigneusement le fil avec l'image de la fente



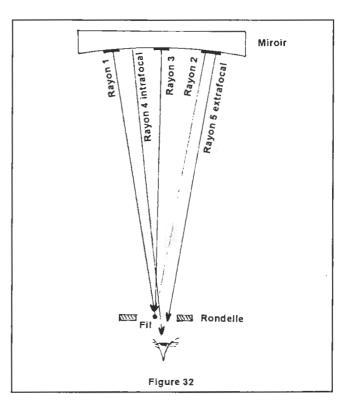
exactement comme on aligne le couteau avec la fente en se reculant pour voir l'image de la fente (figure 30)

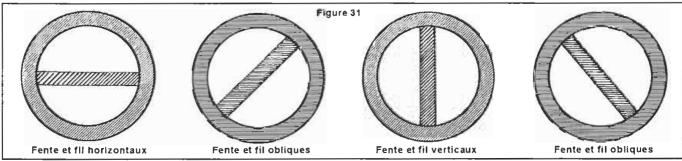
On masque ensuite la fente avec le fil. La figure 31 donne les aspects que l'on observe si le fil est placé au foyer de la zone 0,7 par exemple. Le miroir examiné ici n'a pas de défauts.

lci nous avons choisi de contrôler quatre méridiennes orthogonales entre elles au foyer de la zone 0,7. Voyons ce qu'il se passe sur la méridienne verticale. Le miroir semble éclairé sur toute sa surface sauf sur un anneau et une barre verticale qui semblent sombres. Voici comment on explique cette image (voir figure 32).

Les rayons 1 et 2 sont interceptés par le fil puisque nous sommes au foyer de cette zone. Le miroir est donc sombre sur la couronne correspondant à ce rayon. Le rayon 3 est intercepté sur toute la hauteur par le fil; le miroir présente donc une bande verticale sombre. Le rayon 4 intrafocal croise l'axe optique avant le fil

et arrive dans l'oeil de l'observateur. Le miroir est donc lumineux dans cette zone. Le rayon 5 extrafocal ne croise pas l'axe optique et passe à côté du fil. Le miroir est également lumineux pour cette zone.





Pour les miroirs très ouverts, le test de Foucault est parfois un peu limite pour fournir des mesures fiables. La solution élégante consiste alors à utiliser le caustic test. Ce test permet d'étudier la forme de la courbe caustique. Il comporte donc deux mouvements micrométriques orthogonaux. Le cliché ci-contre montre le caustic test du Docteur Béria. Comme on le voit cet appareil est très soigné. Les rails sont en acier étiré. La mesure s'effectue avec un comparateur. Cet instrument de mesure comporte également un chariot de tarage bien commode. La contemplation de cette superbe réalisation permet de comprendre pourquoi ce test est peu répandu.

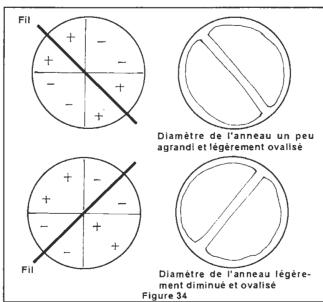
Bien sûr, dans notre exemple le miroir optiquement parfait montre un anneau bien régulier. L'aspect du miroir reste identique à l'inclinaison près de la barre verticale lorsque l'on tourne la fente et le fil.

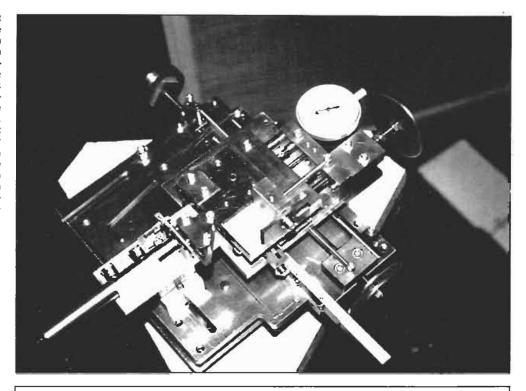
Voyons maintenant les images que nous observerons avec un miroir défectueux.

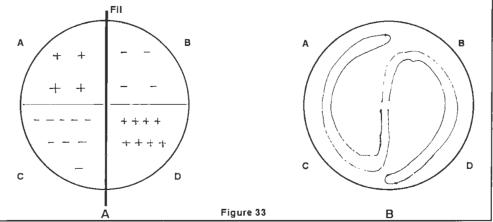
Le miroir en contrôle présente ici pour les besoins de la cause un astigmatisme régulier comme décrit ci-dessous. Les zones notées + présentent un rayon de courbure légèrement plus long que la valeur calculée. Les zones notées - ont un rayon de courbure trop court.

Effectuons notre test sur le miroir avec notre fil et notre fente en position verticale. L'image observée est représentée sur la figure 33B

La zone A étant plus abaissée que la zone B elle produit son ombre plus à l'extérieur sur le miroir. L'ombre de la zone B se produit quant à elle plus près du centre du miroir. On observe les mêmes phénomènes pour les zones C et D.







Voyons maintenant ce qu'il se passerait si sans tourner le miroir on tournait la fente et le fil (voir figure 34)

Bien sûr, dans notre exemple le miroir présente une déformation régulière d'ensemble qui est idéale pour comprendre les modifications observées sur les ombres du miroir. Dans la pratique, l'astigmatisme qui est par définition une altération de non-révolution peut présenter des défauts plus irréguliers et par conséquent plus délicats à interpréter.

On voit ici, comme nous l'avions laissé entendre en introduction, que ce test ne permet pas de quantifier les défauts par des mesures objectives. Par contre, il est très rapide et permet de montrer le miroir dans son ensemble. L'opérateur voit immédiatement où il faut enlever du verre.

Bien sûr, on peut observer toutes les zones du miroir. Il suffit pour cela de rapprocher ou d'éloigner le fil du miroir. On observe alors l'anneau sombre se profiler vers le centre ou bien au contraire vers les bords du miroir selon la direction imprimée au chariot de l'appareil de Foucault.

Ce test sera surtout utilisé au début du polissage et pendant l'avancement de la mise en forme de la parabole.

Pour la fin du travail on préférera les tests de Hartmann ou de Foucault tournant qui permettent d'obtenir des mesures et donc de caractériser le miroir avec précision.

(A suivre).

Thierry BADERSPACH

Réalisation de grands miroirs amateurs (7)

Problèmes spécifiques au contrôle des miroirs à combinaison Cassegrain droite.

Pour ce type d'instrument, on recolle généralement la carotte au miroir avec du plâtre avant de commencer l'ébauchage. Cette disposition ne comporte aucune difficulté jusqu'à la fin du douci, si ce n'est le nettoyage du sillon au changement d'émeri.

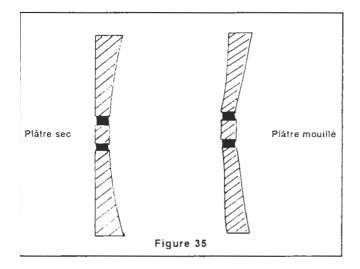
Il en va tout autrement à partir du polissage. Le sillon a toujours tendance à interférer avec les carrés de poix de l'outil. Cette tendance peut devenir catastrophique avec les petits polissoirs dont il faudra se méfier.

Au niveau du contrôle proprement dit, la présence du plâtre fausse complètement les mesures. En effet, le plâtre même protégé par un vernis et un joint silicone finit toujours par absorber de l'eau et gonfle. Le centre du miroir voit sa forme se modifier. Il se produit une dépression de la zone centrale. Si on laisse le miroir sécher quelques jours sans faire de retouche, et que l'on reprend le contrôle, on s'aperçoit que le centre du miroir est remonté (fig 35).

Pour fixer les idées, nous avons observé ce phénomène sur un miroir de 600 mm de diamètre. La zone centrale du miroir affectée, mesurait environ 18 centimètres de diamètre. Avec le plâtre mouillé, la mesure de l'aberration longitudinale de cette zone donnait un foyer un millimètre plus court que la mesure avec le plâtre sec quelques jours plus tard.

Comme on le voit, ce phénomène peut prendre avec des miroirs flexibles des proportions impossibles à négliger.

Pour conduire raisonnablement ses retouches, l'opérateur doit absolument savoir si cette déformation affecte son miroir. Pour cela, il faut procéder comme suit: lorsque le miroir approche la précision d'un lambda il faut réaliser les con-



trôles comme indiqués plus avant à quelques jours d'intervalle. Si la déformation est négligeable, le problème est de fait résolu. Par contre, si on ne peut le négliger plusieurs solutions sont possibles.

On peut continuer à faire ses retouches et contrôler sans attendre quelques jours. Il suffit d'ajouter une constante à chaque contrôle pour tenir compte de la déformation mesurée au préalable. Lorsque le miroir sera en finition on fera alors des contrôles plus espacés.

On peut également à ce moment enlever la carotte et dégarnir le centre de l'outil. Il se crée souvent un bord rabattu autour du trou central, mais ce défaut est souvent masqué par le miroir secondaire. A chacun de vérifier les diamètres du trou et du secondaire avant de prendre une décision.

Pour les plus malins qui auront pensé à ce problème dés le début du travail, ils peuvent éviter ces nuisances en perçant le miroir après ébauchage côté dos en laissant une épaisseur de verre de trois à quatre millimètres. On finira le débouchage après finition du miroir. Ici bien sûr la carotte non détachée du miroir n'a pas besoin de plâtre de scellement. Ce procédé est plutôt réservé à des miroirs un peu épais. La finition du perçage est ici réalisée côté surface optique. une fois celle-ci terminée. Cette opération n'est pas sans danger et nécessite quelques précautions. Il faut veiller au bon alignement des deux carottages ainsi qu'éviter de rayer le miroir terminé avec l'abrasif de perçage.

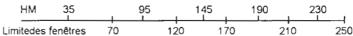
Comme on le voit ici il n'y a pas de solution idéale pour régler ce problème. Le travail des miroirs Cassegrain étant simplement plus compliqué que celui des Newton.

Le tracé des graphiques

Lorsque l'on a en sa possession le relevé de l'aberration longitudinale du miroir sur quatre diamètres, il reste à connaître d'une manière objective la forme de ce dernier. On peut procéder comme indiqué dans le Construction du Télescope Amateur II. Pour ma part, j'utilise la méthode décrite par A.Millies Lacroix il y a quelques années avec quelques modifications

Chacun sait que la parabole théorique du miroir est définie par la formule HM²/R. Le défaut maximum admissible pour ce paramètre est défini par la formula ∆c=p4F/HM à ajouter ou à retrancher à la parabole théorique.

Voilà pour la théorie. Voyons maintenant plus concrètement avec un exemple complet chiffré pour fixer les idées. Soit un miroir de 500 mm de diamètre, avec une focale de 2000 mm et un rayon de 4000 mm. Le rapport d'ouverture est de 4, p vaut 0,683 fois le rapport d'ouverture soit 2,73 microns. Dans notre exemple, prenons un écran de contrôle à cinq zones seulement pour la clarté de l'exposé. Dans la réalité, un tel miroir comporte un écran de contrôle à sept ou huit fenêtres. Voici donc la répartition de nos fenêtres:



Les calculs de HM²/R et de ∆c (maximum admissible)sont regroupés dans le tableau n°3.

Tableau n°3

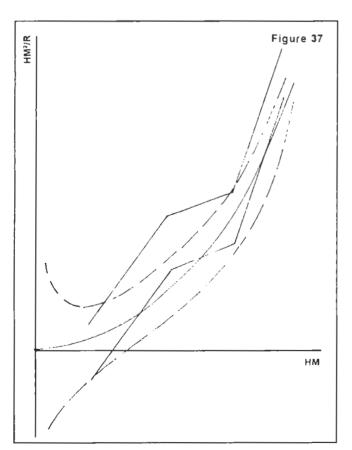
Valeurs de HM							
35	95	95 145 190		230			
	Valeurs de HM²/R						
0,3	2,25	5,25	9,05	13,47			
Valeurs de Ac							
0,61	0,22	0,15	0,11	0,09			

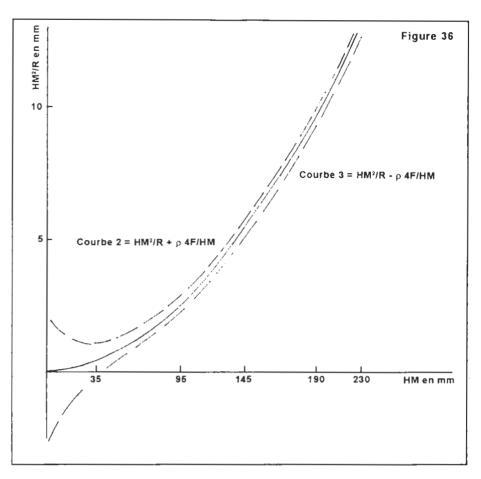
Nous voici donc maintenant en possession de toutes les données de notre miroir. Pour exploiter ces données. nous allons tracer la courbe des HM²/R ainsi que les deux courbes enveloppantes (fig.36) La courbe 1 est la parabole théorique de notre miroir. La courbe 2 est obtenue en ajoutant les p4F/HM au HM²/R de la parabole théorique. Pour la zone 1 on obtient 0,30+0,61=0,91 mm, et ainsi de suite pour chaque zone de l'écran jusqu'à la zone 5 ou l'on obtient 13,47+0,09=13,58 mm. La courbe 3 est obtenue en retranchant o4F/HM au HM²/ R soit pour la zone 1 0,30-0,61=-0,31 mm et ainsi de suite pour les autres fenêtres de l'écran. Elles garantissent en principe si toutes les mesures sont contenues entre ces deux courbes que toute la lumière converge dans un cercle de diamètre inférieur ou égal à p.

Comme dans la méthode décrite dans le Construction du Télescope Amateur //, nous pouvons ajouter ou retrancher une constante pour améliorer l'insertion de notre courbe dans les courbes enveloppantes. Cela revient à déplacer notre courbe de bas en haut ou de haut en bas sur le graphique (fig. 37).

Pour la tenue du cahier de retouches, il est avantageux de tracer la courbe théorique et les courbes envelop-

pantes sur un papier millimétré et de tracer la courbe de chaque contrôle sur un papier calque. Pour faire varier la constante, il suffit de déplacer le papier calque par rapport à la courbe théorique tracée sur le papier millimétré. Fini les tâtonnements, on voit tout de suite si le miroir s'insère entre les courbes enveloppantes. On peut ensuite tracer la courbe ob-





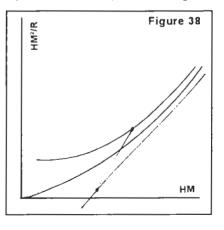
tenue sur le papier millimétré si on désire la conserver et constituer un cahier de retouches exploitable. Dans ce cas, on pourra photocopier la parabole théorique avec ses courbes enveloppantes à 30 ou 50 exemplaires.

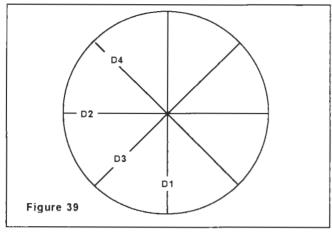
Après chaque retouche, une fois la constante déterminée avec un calque, on trace cette courbe sur le papier millimétré. On numérotera soigneusement le numéro de chaque retouche. Si on désire tirer parti de ce travail, il faut également noter dans un coin du papier la nature de la retouche effectuée. C'est-à-dire la nature du polissoir, la durée de l'intervention, quel type de courses one été utilisées ainsi que leur durée. Après bien des retouches on possédera ainsi un formidable outil de travail qui remplacera avantageusement les vagues souvenirs d'une retouche efficace faite deux mois auparavant.

Il peut dans certains cas se produire que bien que tous les points mesurés soient situés entre les courbes 2 et 3 que le miroir ne soit pas totalement parfait.

En effet, si deux points de deux fenêtres successives sont situés chacun à la limite des tolérances, l'un tangent à la courbe supérieure, l'autre tangent à la courbe inférieure (fig 38), la pente du miroir peut être ainsi trop forte et diriger la

lumière en dehors de la tache de diffraction. En règle générale, lorsque tous les points sont situés à l'intérieur des courbes enveloppantes, le miroir avoisine, sauf cas particulier, λ/8 à λ/10. A ce moment du travail, on se livre à un calcul complet en vue d'éditer le bulletin de contrôle





Après ces quelques explications concernant les miroirs peu sensibles à l'astigmatisme, voyons maintenant comment procéder avec nos grands miroirs. La transcription des résultats est un peu plus difficile, car nous devons à chaque contrôle tracer quatre courbes correspondant au HM2/R de chaque diamètre contrôlé du miroir. Bien entendu, c'est l'ensemble des quatre courbes qui doivent être contenues dans les courbes enveloppantes. Comme dans le cas classique. nous pouvons ajouter ou retrancher une constante pour amé-

Ι.	Figure 40
0,6	 Diamètre 1
	<u> </u>
1 1	
-0,6	
'	
ا م م ا	Diamètre 2
0,6	Diametre 2
I ⊦	
-0,6	
ł	
0,6	Diamètre 3
1	
1	
-0,6	
-,-	
,	
0,6	Diamètre 4
-0,6	
'	

	Zones				
Diamètres	Z1	Z2	Z3	Z 4	Z5
D1	-0,1	2,05	5,2	9	13,6
D2	0,15	2,6	5,75	9,5	13,95
D3	0,05	2,4	5,3	9,3	13,7
D4	0,05	2,35	5,3	9,25	13,75
	En retranchant 0,20 nous obtenons:				
D1	-0,3	1,85	5	8,8	13,4
D2	-0,05	2,4	5,55	9,3	13,75
D3	-0,15	2,2	5,1	9,1	13,5
D4	-0,15	2,15	5,1	9,05	13,55
	En soustrayant HM²/R nous avons:				
D1	-0,6	-0,4	-0,25	-0,25	-0,07
D2	-0,35	0,15	0,3	0,25	0,28
D3	-0,45	-0,05	-0,15	0,05	0,03
D4	-0,45	-0,1	-0,15	0	0,08

Tableau n°4

liorer l'insertion de nos quatre courbes dans les courbes enveloppes. Naturellement, il faut ajouter ou retrancher la même constante aux quatre

Reprenons maintenant l'exemple de notre miroir de 500 mm de diamètre ouvert à 4. Ce miroir a été contrôlé soit par la méthode de Hartmann complète (dans ce cas on se reportera à l'exemple traité dans l'ouvrage Lunettes et télescopes) soit par la méthode de Hartmann partielle plus Foucault quatre diamètres. On pourra revoir à ce propos dans le chapitre consacré à ce test, l'introduction de la constante d'astigmatisme à ne pas confondre avec la constante que nous ajoutons ou retranchons à toutes les valeurs de notre miroir pour améliorer l'insertion dans les courbes enveloppantes.

Le contrôle peut encore avoir été fait avec un test de Foucault tournant. Notons au pasage que le rapport d'ouverture de 4 est limite pour ce test. Pour les miroirs plus ouverts, on préférera utiliser le test caustique en combinaison avec le Hartmann partiel. Ce test sera expliqué par la suite. Il ne concerne que les amateurs désirant tailler des optiques très lumineuses.

Voici donc un exemple extrait du contrôle sur quater diamètres de notre miroir de 500 mm. Pour la clarté de la lecture des tableaux suivants les quatre diamètres sont disposés sur le miroir comme indiqué sur la figure n°39.

En traçant, à partir des valeurs du tableau n° 4. la courbe comme indiqué précédemment une chose frappe immédiatement. Il est impossible de représenter convenablement nos quatre courbes sur un seul graphique, car toutes les courbes se chevauchent dans tous les sens. Nous pouvons par contre y tracer nos courbes séparément sur un calque et les appliquer les unes après les autres sur notre courbe déjà tracée. Nous voyons que nos courbes sont dans l'ensemble décalées vers le haut. En déplaçant nos calques nous voyons qu'en retranchant une constante de 0,2 mm, toutes les valeurs des

On dit souvent des enfants : petits enfants petits soucis, grands enfants grands soucis. Peut-être ce proverbe trouveraitil un nouveau champ d'application avec les miroirs de télescopes. Sur ce cliché, les problèmes sont à mettre au passé, car le miroir est vu ici terminé. Il va maintenant attendre tranquillement dans une caisse que la monture destinée à lui donner vie soit achevée.

> courbes sont mieux centrées. Nous obtenons ainsi la partie centrale du tableau n°4.

En positionnant nos calques sur la courbe photocopiée, nous voyons que toutes les courbes ne sont pas comprises dans les courbes enveloppes. Le miroir n'est donc pas encore terminé. A ce stade du travail, nos lecteurs l'ont déjà compris, cette représentation graphique basée sur la parabole théorique et les cour-

bes enveloppes n'est plus suffisante pour représenter quatre courbes simultanément. Je vais donc proposer un autre mode de graphisme.

En soustrayant à chaque pointé le HM²/R théorique correspondant à la fenêtre de l'écran, on obtient immédiatement le DC de chaque fenêtre. Cela nous donne la partie basse du tableau n°4.

Comme on le comprend immédiatement, les courbes sont presque ramenées sur l'axe des X. Nous pouvons représenter les quatre courbes sur une même page soit séparément soit sur le même graphique. Il n'y a plus de problèmes de lecture avec cette technique, d'autant plus que l'on peut dilater l'échelle des Y.



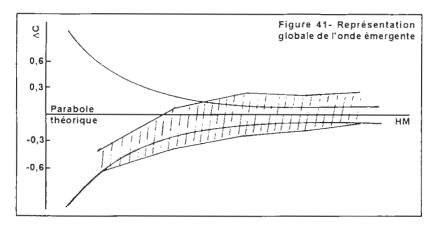
Bien entendu ici, l'axe des X ne représente plus la sphère comme cela était le cas dans l'ancienne courbe. L'axe des X représente maintenant la parabole parfaite.

Un rapide examen (voir figure 40) nous permet de dire qu'il subsiste un léger trou central résultant d'une retouche malheureuse. Le trou n'est d'ailleurs pas préoccupant puisqu'il est compris dans les courbes enveloppantes.

Les bords du miroir ont tendance à être rabattus dans leur ensemble. Il s'agit encore là d'un défaut bien classique.

Le contrôle au Foucault tournant nous permet également de déceler un important astigmatisme d'ensemble du miroir. Le diamètre 1 focalise un peu court dans son ensemble. Il présente donc un centre (à l'intérieur de la zone 0,7) un





peu creux et une partie externe un peu relevée. Le diametre 2 focalise un peu loin dans son ensemble. La zone centrale est donc un peu haute et la partie externe un peu rabattue. Les diamètres 3 et 4 sont à une hauteur moyenne plutôt satisfaisante dans l'ensemble.

Il est assez amusant de remarquer ici qu'un amateur ayant contrôlé son miroir sur D3 uniquement aurait conclu à tort que son miroir était parfait. Un autre amateur un peu plus sérieux ayant contrôlé sur deux diamètres perpendiculaires aurait pu déceler l'astigmatisme en mesurant D1 et D2, mais n'aurait rien vu en mesurant D3 et D4. Il faut donc pour être certain de connaître la forme de son miroir (s'il est déformable) impérativement le contrôler sur quatre diamètres.

Bien entendu, la forme du miroir dans son ensemble peut être représentée sur un cinquième graphique toujours sur la même page. Sur un même graphe, on représente tous les points des quatre courbes et on ne trace que les points externes supérieurs et inférieurs. On obtient donc un fuseau qui est la représentation globale de l'onde émergente du miroir. La largeur de ce fuseau indique l'importance de l'astigmatisme (fig 41).

Les valeurs du tableau peuvent également servir à représenter la surface du miroir et non plus l'onde. Cette représentation est indispensable si l'on désire retoucher l'astigmatisme d'ensemble avec un outil local. Voilà comment je conseille de procéder.

On trace deux représentations du miroir. Ces représentations seront photocopiées comme les courbes paraboliques si l'on désire répéter ces graphiques.

Chaque graphique reproduit donc le miroir vu de face. Chaque diamètre est repéré ainsi que la limite des fenêtres de notre écran de contrôle. Dans notre exemple, il comporte donc cing zones. La limite de la zone 0,7 sera également notée. Ce sont bien entendu les graphiques vides qui sont photocopiés. Ils seront remplis après chaque contrôle si besoin est

Le premier miroir est complété avec les valeurs △C correspondant à chaque case du miroir. Le deuxième miroir indique par un signe + si le miroir possède une surépaisseur de verre. Le signe - indique un creux dans le miroir. On peut également ajouter un chiffre pour indiquer l'importance du défaut. Ce chiffre est évidemment déduit du ∆C (fig42).

Conclusion

Le travail qui précède ces quelques lignes ne donne pas de description du test de Foucault car il est connu de tous les amateurs qui entreprennent un grand miroir.

Le travail du verre est décrit sans machine à ébaucher et sans machine à polir. Comme on peut l'imaginer, cette méthode valable pour un amateur peu équipé trouve assez vite ses limites. Pour fixer les idées, on pourra penser qu'un diamètre de 500 à 600 mm représente certainement une limite à ne pas dépasser. J'ai personnellement réalisé un 610 mm à la main. Mon ami David Vernet en a taillé deux dans ce diamètre (et beaucoup d'autres dans différents diamètres). Ni Vernet, ni moi-même n'envisageons de tailler d'autres grands miroirs à la main. En effet, lorsque l'ion veut entreprendre un grand miroir ou bien plusieurs plus petits, il est avantageux de construire une machine à polir. David Vernet et Eric Artaud ont dessiné et mis en oeuvre une telle machine. La description de ce travail pourrait constituer une agréable suite à cette série d'article.

En attendant, je souhaite bon courage à tous les aventuriers du pyrex qui voudraient se lancer dans cette galère. Même si les moments de découragement peuvent se succéder à haute cadence, la persévérance assurera certainement un résultat envié par tous les amateurs non constructeurs. Peut être également ce résultat suscitera-t-il des vocations?

Thierry BADERSPACH

