

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS (*)

Méthode graphique simplifiée pour le contrôle et la conduite de la parabolisation

par Adrien MILLIÈS-LACROIX

Dans la pratique, la méthode préconisée pour le contrôle de la parabolisation reste bien souvent la mesure de l'aberration longitudinale au centre de courbure, à partir du test du couteau imaginé par Foucault.

Rappelons brièvement, pour mémoire, le principe de cette mesure : un écran opaque tel qu'une lame de couteau, qui intercepte un faisceau lumineux à proximité immédiate de l'image, est un moyen extrêmement sensible pour apprécier à l'œil, les défauts sur le miroir. Les écarts transversaux des rayons aberrants se traduisent par l'apparition d'ombres, donnant à l'observateur l'impression de percevoir les défauts par une vision en relief sous un éclairage rasant.

Pour l'appréciation quantitative des défauts, on utilise couramment un foucaultmètre, qui met directement en évidence les aberrations longitudinales au centre de courbure du miroir.

Ces mesures permettent à l'opérateur de vérifier l'avancement du travail de parabolisation. Les valeurs théoriques correspondent à une aberration longitudinale égale à hm^2/R , hm étant la hauteur d'incidence des rayons lumineux et R le rayon de courbure du miroir.

On suppose ici que la source lumineuse du foucaultmètre reste fixe, le couteau se déplaçant seul dans l'axe des rayons lumineux (1).

L'amateur néophyte, ou n'ayant pas une grande expérience de la taille des miroirs, est parfois rebuté par la relative complexité des calculs à mener et leur répétition avant de parvenir à caractériser son miroir et porter un jugement sur ses qualités optiques (2).

On comprend mieux ainsi le succès de méthodes d'approche consistant parfois simplement à amener l'aberration longitudinale totale à une valeur proche de l'aberration théorique calculée, deux mesures étant exécutées au centre et sur le bord du miroir.

L'amateur parvient en général assez rapidement à exécuter ces mesures ou « pointés », sur les fenêtres dans un écran du type Ritchey-Couder par exemple, avec une précision qui s'améliore généralement avec la pratique.

(*) La méthode décrite ici n'est pas limitée au test de Foucault proprement dit. Elle est utilisable avec tous les procédés de mesure optique déterminant les aberrations longitudinales ou les aberrations transversales d'un miroir.

(1) Pour davantage de précisions, le lecteur voudra bien se référer aux ouvrages classiques tels que :

— « Lunettes et télescopes » par Danjon et Couder, Paris 1935.

— « La construction du télescope d'amateur » par J. TEXEREAU (Société Astronomique de France).

— « Amateur telescope making », en 3 volumes, publiés par Munn and Co. et Scientific American inc. (pour les développements de la méthode de Foucault, on consultera plus particulièrement le chapitre rédigé par Schroeder, dans le tome III).

(2) A partir des deux conditions fixées par Danjon et Couder (« Lunettes et télescopes ») pour obtenir une optique pratiquement parfaite, à savoir :

Condition n° 1 : aberration transversale réduite inférieure à la tache de diffraction.

Condition n° 2 : défauts de la surface d'onde (écarts de tautochronisme) inférieurs à $\lambda/4$.

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

Cependant, dans la plupart des cas, il ne peut apprécier sérieusement les tolérances optiques admissibles qu'à l'issue d'un calcul complet des rapports $\lambda f/\rho$ (aberration transversale sur tache de diffraction) et des écarts de tautochronisme.

Le principe de la méthode exposée ici consiste à mesurer les écarts maximaux que l'on peut tolérer par rapport à la parabole théorique. On démontre que si cette différence dépasse $\frac{\rho}{4} \frac{F}{hm}$ au rayon de courbure (d'après les pointés au foucaultmètre), avec :

ρ = tache de diffraction

F = focale du miroir,

l'aberration transversale correspondante, dans le plan focal du télescope, donnera d'un point géométrique une image d'un diamètre plus grand que la tache de diffraction, violant ainsi la condition n° 1 de Danjon et Couder.

En pratique, la méthode consiste simplement à reporter les mesures obtenues au foucaultmètre sur un graphique tracé sur papier millimétré, où sont représentées une fois pour toutes :

a) la courbe des aberrations longitudinales théoriques au centre de courbure, obtenue avec une approximation suffisante en utilisant la formule habituelle $\frac{hm^2}{R}$.

b) les courbes-enveloppes de l'aberration longitudinale admissible, caractérisée par un ratio $\lambda f/\rho = \pm 1$.

ρ étant la tache de diffraction, égale ici à $0,683 \frac{F}{D}$ en prenant en considération une longueur d'onde dans le visible de 0,560 micron, moyenne pour laquelle l'œil est particulièrement sensible :

F étant la focale du miroir,

D son diamètre,

λf est l'aberration transversale = $\Delta c (hm/4 F)$,

Δc étant l'aberration longitudinale résiduelle au centre de courbure.

On pose :

$$\rho = \Delta c (hm/4 F),$$

$$\Delta c = \frac{\rho}{4} \frac{F}{hm}, \text{ toutes quantités étant connues.}$$

Toute courbe d'aberration longitudinale mesurée, se situant entre les deux courbes-enveloppes définies par $\lambda f/\rho = \pm 1$, satisfait automatiquement à la condition n° 1 de Danjon et Couder, condition la plus difficile à réaliser en pratique pour obtenir une optique parfaite.

Simultanément, et dans la très grande majorité des cas, la condition n° 2 est également satisfaite.

Pour en avoir le cœur net, on mènera éventuellement un calcul complet.

A. MILLIÈS-LACROIX

Cette conduite de la parabolisation présente un certain nombre d'avantages :

a) *Simplification des calculs* : on peut se contenter d'arriver à une courbe se situant à l'intérieur de la tolérance admissible, matérialisée par les courbes-enveloppes, par simple report graphique des pointés, sans calcul particulier.

En tout état de cause, pour l'amateur plus exigeant, il n'est pas utile de procéder à une mesure complète de λf tant que la courbe des aberrations mesurées ne s'intercale pas entre les deux courbes-enveloppes.

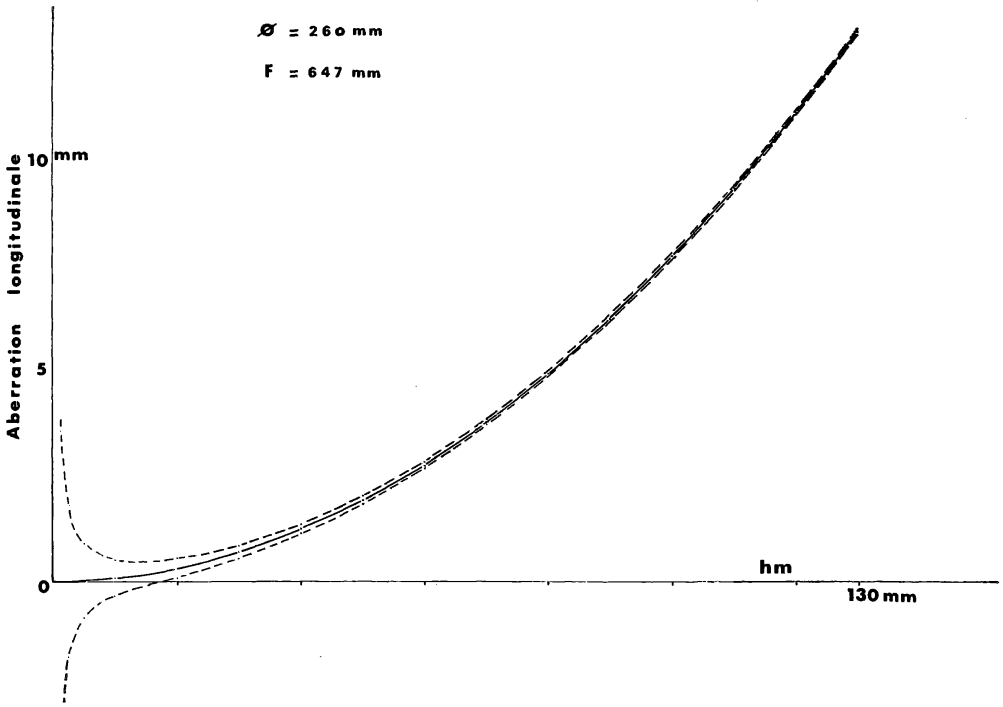


Fig. 66. — Aberration longitudinale admissible pour un miroir parabolique à grande ouverture (diamètre = 260 mm, focale = 647 mm).

b) La détermination de la constante à ajouter ou retrancher aux valeurs relevées sur le foucaultmètre se fait très aisément, au vu de la courbe tracée sur le graphique.

c) Le procédé est beaucoup plus *objectif*, car permettant une *appréciation directe* et précise des tolérances admissibles.

Il en résulte :

- un jugement plus sûr quant aux qualités optiques du miroir travaillé ;
- une meilleure conduite de la parabolisation et des corrections éventuelles, car on peut mieux suivre l'allure des déformations, d'une retouche à l'autre.

d) La méthode permet d'appréhender, avant exécution, la « *difficulté d'objectif* », sur un plan quantitatif : la tolérance est considérablement réduite dans un grand miroir à grande ouverture (comparer à ce propos les fig. 66 et 71).

Dans le cas d'un miroir de 350 mm de diamètre, ouvert à $F/2,6$, la tolérance n'atteint que $\pm 0,065$ mm pour un rayon $hm = 100$ mm et tombe à

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

$\pm 0,037$ mm sur le bord du miroir ($hm = 175$ mm) : l'entreprise n'est guère à la portée de l'amateur ⁽¹⁾.

e) Pour l'amateur très exigeant, le même procédé permet de choisir une *tolérance éventuellement plus faible*, avec par exemple des courbes-enveloppes définies par $\lambda f/\rho = \pm 1/2$, c'est-à-dire avec des défauts transversaux ne dépassant pas la moitié de la tache de diffraction ⁽²⁾.

f) Le graphique permet également de voir si un miroir projeté ou déjà réalisé peut être laissé à l'état de sphérique, tout en opérant parfaitement bien comme paraboloïde.

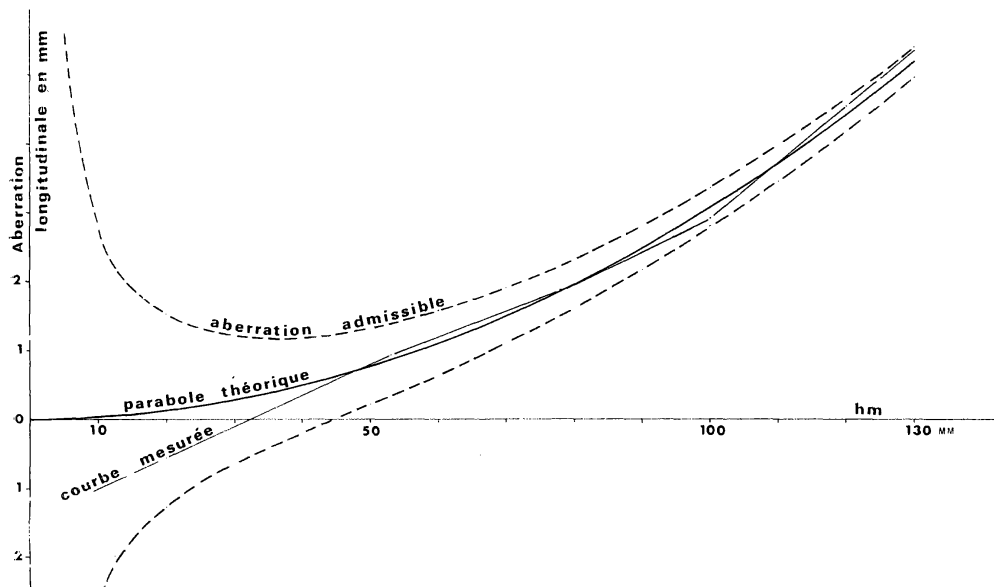


Fig. 67. — Aberration longitudinale admissible pour un miroir parabolique de 260 mm de diamètre avec une focale de 1630 mm.

Un point important, sur lequel il convient d'insister plus particulièrement, concerne l'appréciation rapide et objective des qualités optiques du miroir, *en cours de travail*, et l'évolution de la surface optique du miroir.

Dans la majorité des cas, l'amateur n'entreprend un calcul complet pour caractériser son miroir que lorsqu'il pense être très près des valeurs optimales, en considérant notamment la valeur de l'aberration longitudinale totale, par rapport à la valeur théorique. C'est d'ailleurs le mode opératoire recommandé par plusieurs manuels.

Un exemple concret montre qu'une aberration résiduelle supérieure à 0,50 mm, pour un miroir de 260 mm de diamètre, ouvert à $F/6$ par exemple, est le plus souvent jugée rédhibitoire : une reprise de la parabolisation est entreprise d'office, sans mesure préalable.

En fait, et pour ce même miroir, par le procédé proposé de représentation graphique, on a pu s'apercevoir, dans un cas réel, qu'une aberration résiduelle

⁽¹⁾ Toutes proportions gardées, un système optique du type « Schmidt » est probablement ici plus facile à réaliser... avec un champ exploitable beaucoup plus étendu.

⁽²⁾ Une telle précision peut d'ailleurs s'avérer illusoire pour des réflecteurs très ouverts, à partir de $F/3$ par exemple, où la méthode classique de Foucault pose des problèmes.

A. MILLIÈS-LACROIX

de l'ordre de 0,81 mm (entre partie centrale et bord du miroir) était encore parfaitement admissible, le miroir étant pratiquement parfait optiquement (fig. 67).

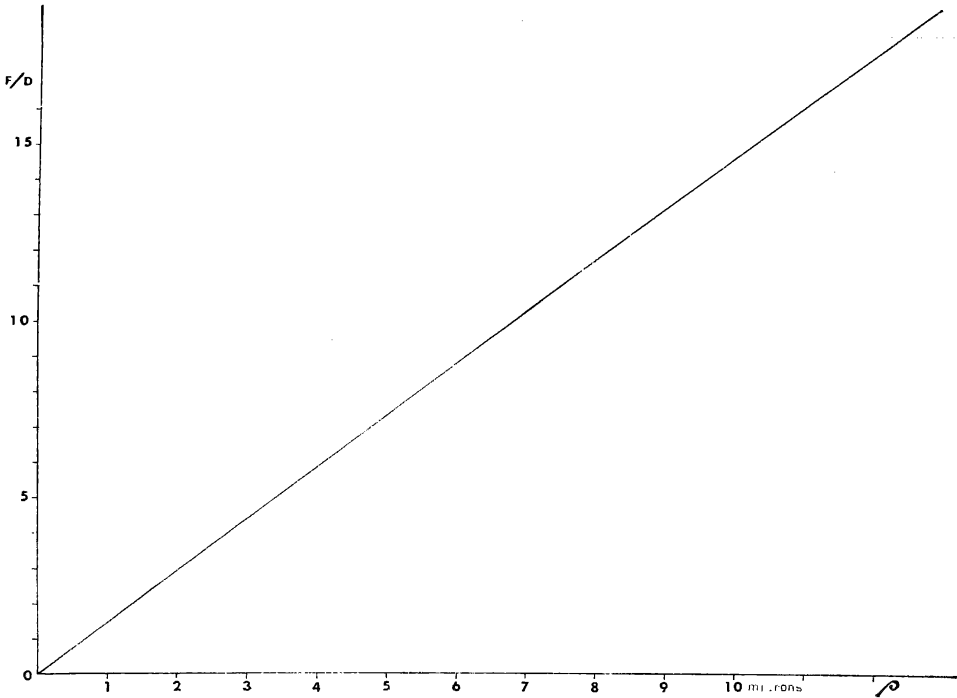


Fig. 68. — Aberration longitudinale admissible pour un miroir parabolique de 260 mm de diamètre avec une focale de 1 630 mm.

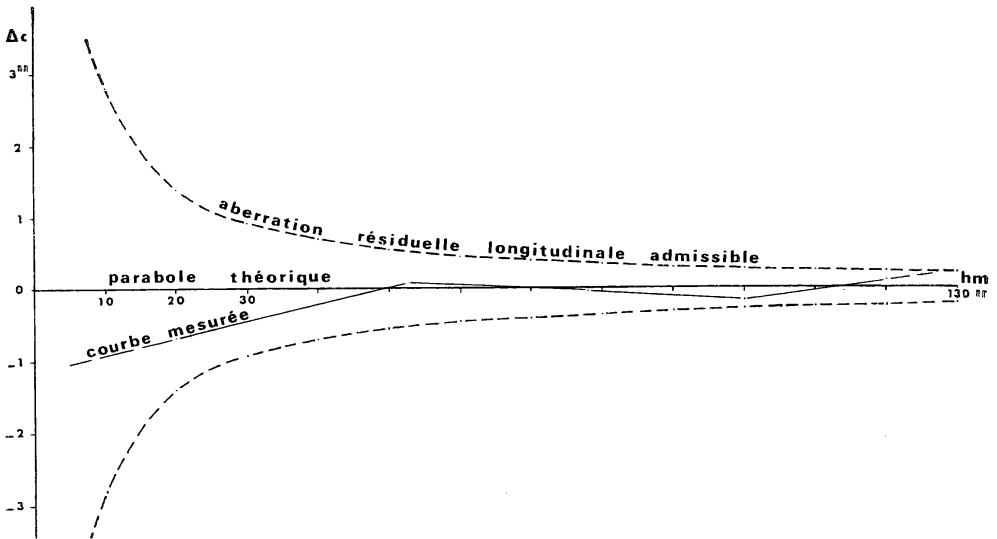


Fig. 69 — Détermination de ρ (tache de diffraction) (abaque 1).

On ramène aussi à leur juste valeur des défauts très apparents, avec la méthode de Foucault, mais qui n'ont parfois qu'une importance très secondaire : il est probable que nombre d'amateurs, voulant faire disparaître une anomalie telle qu'une bosse ou un creux central, ont, ce faisant, dégradé la

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

façon beaucoup plus importante les zones périphériques : au bout de plusieurs dizaines de retouches, on est peut-être parvenu à une aberration longitudinale totale correcte, mais avec des défauts bien plus graves en définitive.

Nul doute qu'en consultant de vieux cahiers de relevés de focaultage, l'amateur s'aperçoive plus d'une fois, par un rapport graphique de tous les pointés, que la meilleure retouche n'a pas été nécessairement reconnue comme telle, ou qu'un long travail de retouche a été entrepris pour un résultat finalement inférieur en qualité.

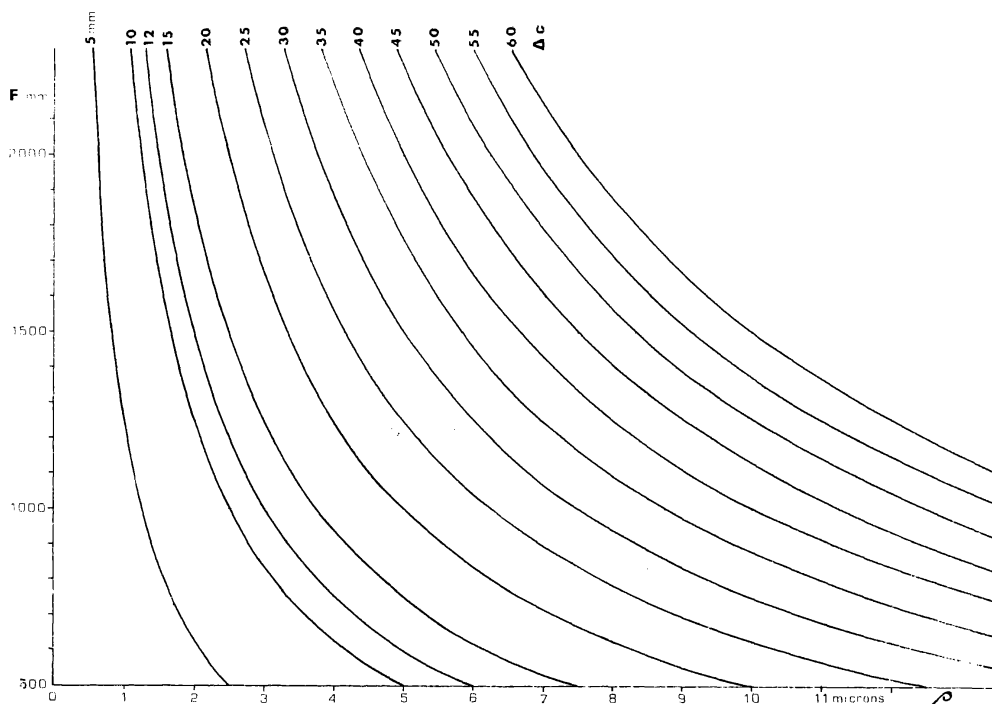


Fig. 70. — Détermination de l'aberration longitudinale admissible
 Δc (mm = 1 millimètre) (abaque 2).

La tendance du débutant est particulièrement de surestimer les défauts au centre, et de se satisfaire de mesures très approximatives sur les bords, souvent « tombés » : l'établissement du graphique proposé montre l'incidence réelle de ces défauts, la plupart du temps négligeables pour ce qui concerne la partie centrale du miroir ⁽¹⁾.

Sur un plan pratique, une représentation graphique un peu plus simple, surtout pour le débutant, consiste à confondre la parabole théorique hm^2/R avec l'axe des abscisses (fig. 68).

Les courbes-enveloppes sont alors données par les équations :

$$y = + \frac{\rho 4 F}{hm} \quad \text{et} \quad y = - \frac{\rho 4 F}{hm}$$

mais les reports de pointés sont moins aisés par la suite, puisqu'il faut à chaque fois retrancher hm^2/R .

⁽¹⁾ Il conviendrait en outre de tenir compte de l'effet d'obstruction du miroir secondaire dans un télescope newtonien.

Une autre solution plus rapide et suffisamment précise réside dans l'utilisation d'abaques (fig. 69 et 70), qui permettent de même de tracer les courbes-enveloppes. Le premier graphique (fig. 69, abaque 1) donne les valeurs correspondant à la tache de diffraction ρ , à partir du ratio F/D . Cette valeur de ρ est reportée sur le deuxième abaque (fig. 70, abaque 2), qui fournit l'aberration longitudinale maximale admissible ⁽¹⁾.

APPLICATION PRATIQUE

I. Exemple n° 1 (fig. 71)

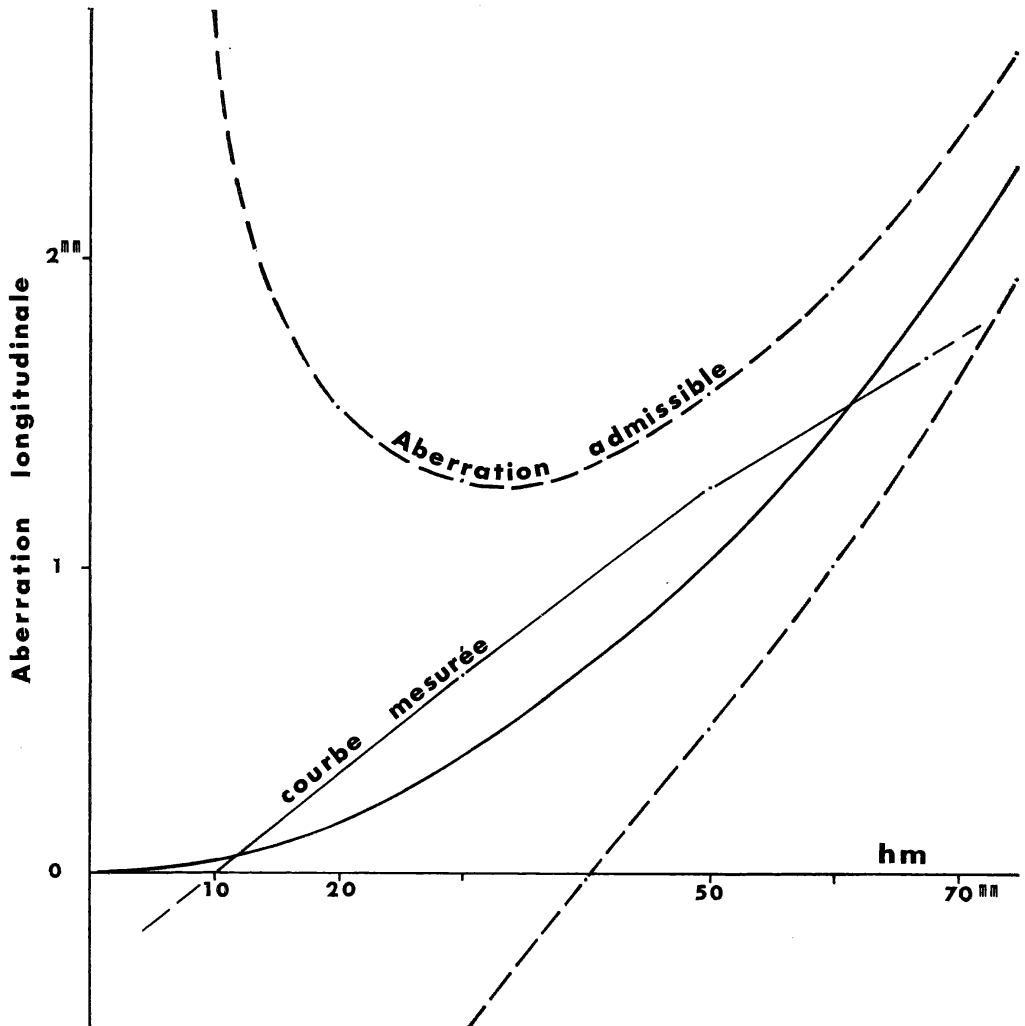


Fig. 71. — Exemple n° 1 : miroir parabolique d'un diamètre de 150 mm avec une focale de 1 230 mm.

⁽¹⁾ La méthode proposée rappelle quelque peu le procédé préconisé dans l'ouvrage américain A.T.M. (Amateur Telescope Making, Livre 1, 1946, page 259, Chapitre VI : « Accuracy in parabolizing »). En fait, la définition des courbes-enveloppes est ici tout à fait différente. Au surplus, le système graphique utilisé dans A.T.M. ne paraît guère à recommander, dans la mesure notamment où la tolérance maximale apparaît sur les bords du miroir... (là où elle est en fait la plus faible).

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

Soit un miroir ayant les caractéristiques suivantes :

Diamètre D = 150 mm

Focale F = 1 230 mm (d'où rayon de courbure R = 2 460 mm)

nous avons F/D = 8,20

Traçons d'abord sur papier millimétré la courbe de l'aberration longitudinale théorique hm^2/R (fig. 70).

Reportons-nous ensuite à l'abaque 1, figure 69, qui donne une valeur de la tache de diffraction ρ très voisine de 5,60 (microns).

Cette valeur de ρ reportée sur le graphique de la figure 70 donne, pour la focale F = 1 230 mm, un point situé presque à égale distance des courbes 25 mm et 30 mm, soit environ 27,5 mm (valeur de l'aberration Δc pour un rayon $hm = 1$ mm).

Pour un rayon $hm = 10$ mm :

$$\Delta c = \frac{27,5}{10} = 2,75 \text{ mm,}$$

pour $hm = 20$ mm :

$$\Delta c = \frac{27,5}{20} = 1,38 \text{ mm etc.}$$

Ces tolérances sont des valeurs en plus ou en moins, par rapport à l'aberration longitudinale théorique $\frac{hm^2}{R}$, qui permettent d'établir le graphique de la figure 71.

La courbe supérieure de tolérance est obtenue en ajoutant Δc à hm^2/R .

La courbe inférieure est obtenue en retranchant Δc à hm^2/R .

La courbe représentant notre miroir doit venir *s'intercaler* entre ces deux courbes-enveloppes.

Pour simplifier, et dès lors qu'on dispose de l'écran pour les mesures foucaultmétriques, on peut se contenter des seules mesures correspondant aux fenêtres de l'écran.

Supposons par exemple que les mesures au foucaultmètre soient exécutées à partir d'un écran dont les fenêtres correspondent aux rayons moyens hm suivants (en millimètres) :

	1 ^{re} FENÊTRE	2 ^e FENÊTRE	3 ^e FENÊTRE	4 ^e FENÊTRE
hm	10	30	50	67,5
Nous avons par ailleurs $hm^2/R =$	0,04	0,37	1,02	1,85
Δc tolérable	$\pm 2,75$	$\pm 0,92$	$\pm 0,55$	$\pm 0,41$
Courbes de tolérance $\frac{hm^2}{R} + \Delta c$ $\frac{hm^2}{R} - \Delta c$	$+ 2,79$ $- 2,71$	$+ 1,29$ $- 0,55$	$+ 1,57$ $+ 0,47$	$+ 2,26$ $+ 1,44$

A. MILLIÈS-LACROIX

Comment reporter la courbe représentative de notre miroir sur ce graphique ?
Soient les valeurs suivantes relevées au foucaultmètre :

Valeurs relevées	37,62 mm	38,26	38,86	39,30
------------------	----------	-------	-------	-------

Retranchons de chacun de ces nombres une *constante*, qui sera la valeur relevée sur la première fenêtre (37, 62).

Nous obtenons :	0	0,64	1,24	1,68
-----------------	---	------	------	------

En reliant ces points, après les avoir portés sur le graphique, nous aboutissons à une ligne brisée qui est intercalée entre les deux courbes de tolérance : le miroir est bon !

Commentaires :

A noter que les mesures foucaultmétriques sont en général relatives et non absolues, la très grande majorité des amateurs ne prenant pas la peine, à juste titre, de mettre le dispositif de mesure à zéro pour la lecture du pointé sur la première fenêtre.

Il est possible en fait de « caler » la courbe représentative du miroir sur n'importe quelle fenêtre, en prenant comme *constante* la valeur du pointé correspondant, moins hm^2/R .

Pour la première fenêtre, la constante serait ici
 $37,62\text{ mm} - 0,04\text{ mm} = 37,58\text{ mm}$.

Pour la troisième fenêtre, où les pointés sont en général plus précis, la constante serait $38,88\text{ mm} - 1,02\text{ mm} = 37,86\text{ mm}$.

Tout ceci n'est pas réellement utile, car il n'est pas nécessaire de se livrer à un calcul rigoureux pour le choix de la *constante* à retrancher aux valeurs lues sur le foucaultmètre. Il suffit d'effectuer une translation, ici dans le sens vertical, si la constante a été mal choisie initialement : on peut apprécier visuellement, sur le graphique, la valeur à ajouter ou retrancher à la constante pour recentrer la courbe représentative du miroir. D'autres techniques sont utilisables, telles que règles parallèles, film ou papier calque... Dans le cas où l'on utilise un calque, il convient de faire particulièrement attention à ne pas introduire d'erreur par suite d'éventuels mouvements de rotation lors de la translation de ce calque.

Un procédé qui paraît à recommander consiste à tracer, sur le même graphique, toutes les courbes successives obtenues après chaque retouche du miroir, chaque courbe étant repérée par un numéro (1, 2, 3...) ou une lettre (A, B, C...) avec éventuellement des traits ou des couleurs différents. On contrôle beaucoup mieux ainsi l'effet des retouches, avec un meilleur suivi de l'évolution de la surface optique.

II. Exemple n° 2 (fig. 72)

Pour un miroir ayant les mêmes caractéristiques
($D = 150\text{ mm}$ et $F = 1\,230\text{ mm}$),

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

supposons les valeurs suivantes relevées sur le foucaultmètre :

	1 ^{re} FENÊTRE	2 ^e FENÊTRE	3 ^e FENÊTRE	4 ^e FENÊTRE
Valeurs relevées	26,56 mm	28,32	28,90	29,80
Enlevons la constante 26,56				
nous obtenons	0	+ 1,76	+ 2,34	+ 3,24 mm

Reportons ces valeurs sur le graphique des tolérances : la ligne brisée obtenue (A) sort des limites de tolérance, mais nous voyons qu'elle est très

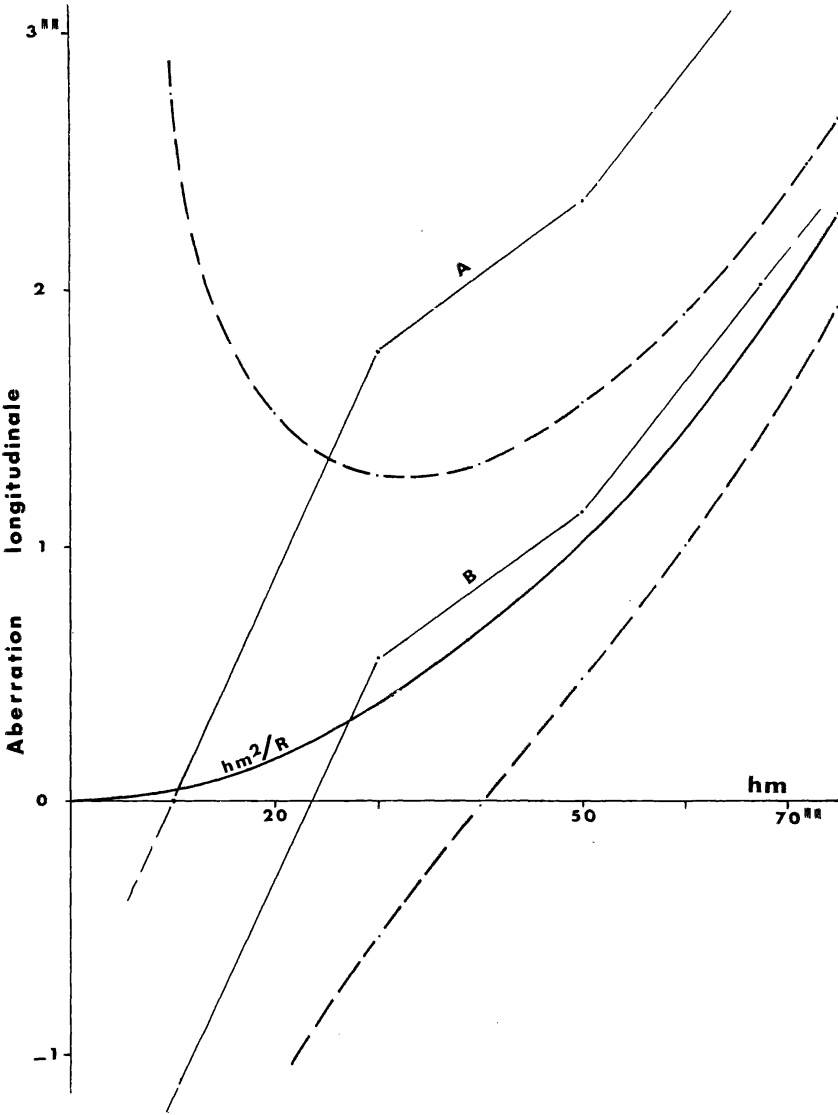


Fig. 72. — Exemple n° 2 : miroir parabolique avec un diamètre de 150 mm et une focale de 1 230 mm.

A. MILLIÈS-LACROIX

décalée vers le haut, par rapport à l'axe des abscisses (fig. 72). Cela signifie que la constante a été mal choisie. On peut calculer la valeur de la constante à retrancher, mais il est plus simple de recentrer la ligne brisée entre les deux courbes en prenant une valeur approximative, par exemple — 1,20 mm dans notre cas.

	1 ^{re} FENÊTRE	2 ^e FENÊTRE	3 ^e FENÊTRE	4 ^e FENÊTRE
	0 — 1,20	+ 1,76 — 1,20	+ 2,34 — 1,20	+ 3,24 — 1,20
Nous avons à nouveau :	— 1,20	+ 0,56	+ 1,14	+ 2,04

On obtient sur le graphique une deuxième ligne brisée (B), parallèle à la première, qui est cette fois-ci entièrement contenue entre les deux courbes de tolérance : *le miroir est encore bon*.

Lorsque les déformations sont trop grandes, la ligne brisée ne peut être enfermée entre les deux courbes de tolérance : *la parabolisation n'est pas terminée* dans ce cas.

III. Exemple n° 3 (fig. 73)

Soit un miroir sphérique projeté ou déjà réalisé. Peut-on l'utiliser comme paraboloïde ?

Une réponse pratique peut être fournie à partir du même système graphique. Le miroir sphérique est représenté par un trait horizontal, parallèle à l'axe des abscisses. Si nous pouvons intercaler cette droite entre les deux courbes-enveloppes du paraboloïde correspondant, le sphérique peut parfaitement convenir pour l'équipement d'un télescope newtonien par exemple.

Supposons un miroir sphérique « parfait » avec les caractéristiques suivantes :

F = 1 500 mm ; D = 150 mm.
Nous obtenons F/D = 10 ;
ρ = 6,83 microns, et le tableau suivant :

hm	$\frac{hm^2}{R}$	Δc	$\frac{hm^2}{R} + \Delta c$	$\frac{hm^2}{R} - \Delta c$
10 mm	0,03	± 4,10	+ 4,13	— 4,07
20	0,13	± 2,05	2,18	— 1,92
30	0,30	± 1,37	1,67	— 1,07
40	0,53	± 1,02	1,55	— 0,49
50	0,83	± 0,82	1,65	+ 0,01
60	1,20	± 0,68	1,88	+ 0,52
70	1,63	± 0,59	2,22	+ 1,04
75	1,88	± 0,55	2,43	+ 1,33

CONSTRUCTION DES MIROIRS D'AMATEURS

En reportant ces valeurs sur un graphique, nous aboutissons à la figure 73 : la condition n° 1 de Danjon et Couder est respectée pour ce miroir sphérique ; il peut être utilisé comme paraboloïde.

La condition n° 2 est également respectée puisque le défaut sur l'onde, calculé selon la méthode classique exposée dans l'ouvrage de J. Texereau (« Construction du télescope d'amateur »), est égal à $\lambda/8$.

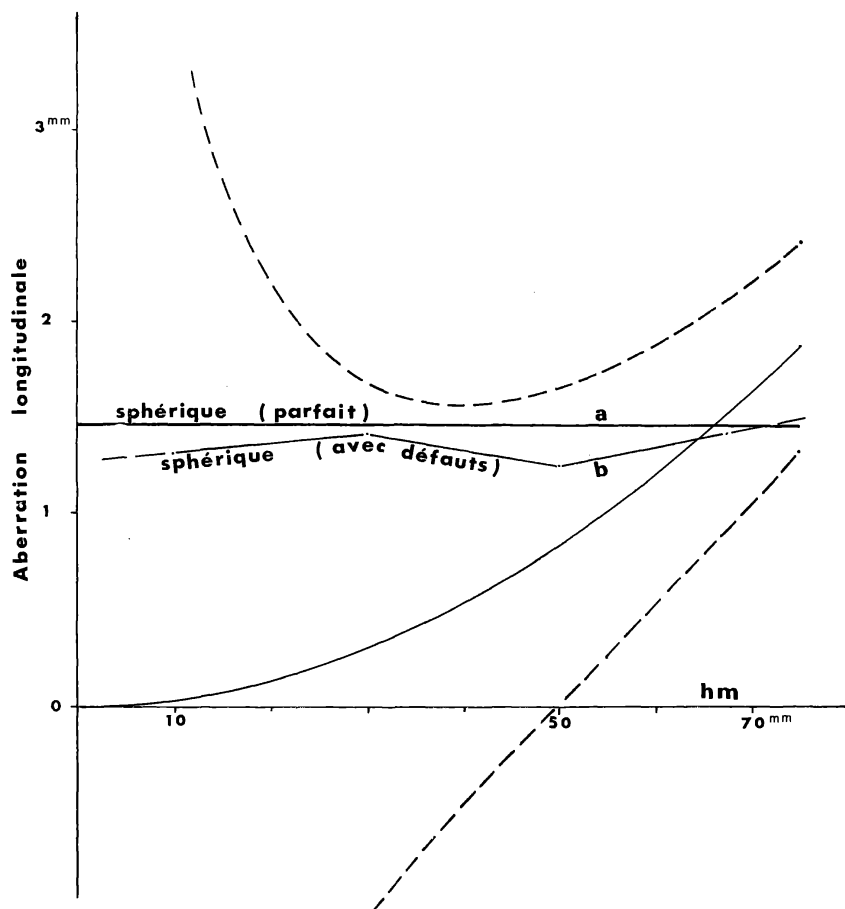


Fig. 73. — Exemple n° 3 : utilisation d'un miroir sphérique comme paraboloïde (diamètre = 150 mm, focale = 1 500 mm).

Des formules ont déjà été proposées pour répondre à ce problème de l'ouverture maximale d'un miroir sphérique de longueur focale déterminée, destiné à être utilisé comme paraboloïde, et notamment :

$$F^3 \geq 34,9 D^4 \quad (\text{Danjon et Couder, « Lunettes et télescopes », Paris 1935}).$$

En fait la condition n° 1 de la tache de diffraction est plus sévère que cette dernière formule, basée sur la loi de Rayleigh.

Par ailleurs, un miroir « sphérique » n'est *pratiquement jamais parfait* : il convient d'intégrer les défauts de ce sphérique.

La méthode graphique préconisée ici *permet de tenir compte de ces défauts* : la ligne brisée (b), représentative du miroir « sphérique », doit s'intercaler entre les deux courbes-enveloppes.