Cliché Étienne de Foras

Le Houghton Minimum

Étude d'un correcteur dioptrique simple en association avec un ou deux miroirs sphériques

par **Charles Rydel**
Commission des instruments
rydel_charles@yahoo.com

Pour l'amateur qui souhaite réaliser son instrument d'observation, la tradition et la raison veulent depuis longtemps qu'il s'agisse d'une combinaison Newton équipé d'un miroir parabolique. On sait qu'il y a de bonnes raisons à cela. D'abord cette combinaison conjugue la simplicité d'une optique unique et aux performances parfaites sur l'axe avec le coût le plus bas.
De tous les systèmes optiques, c'est donc lui qui présente le meilleur rapport performances/prix et pour l'observation planétaire, il reste imbattable. Le miroir parabolique et le télescope de Newton sont largement documentés, d'excellents experts se sont depuis longtemps chargés de décrire les principes, les méthodes, les moyens de mesures et de validations qui sont simples à réaliser et étonnamment précis en regard de l'investissement matériel. Néanmoins, l'opération de parabolisation est longue et délicate, en particulier si le miroir est plus ouvert que F/5 et le diamètre supérieur à 300 mm.

La parabole, problèmes et remèdes

Même si dans quelques dizaines de secondes d'angle autour de l'axe optique la combinaison Newton reste la plus performante quelle que soit l'ouverture. On sait aussi que le miroir parabolique présente des inconvénients qui en restreignent l'utilisation photographique : l'image, en dehors de l'axe, est entachée d'aigrettes et d'astigmatisme, aberrations qui limitent très vite la définition et ce d'autant plus que l'ouverture de l'optique est grande.

Ross [1] a proposé le premier dans les années 30 un doublet correcteur réalisé dans des verres identiques et disposés près du plan focal pour le télescope de 2,5 m du Mont Wilson. Ces correcteurs connaîtront ultérieurement divers avatars plus ou moins complexes [2] destinés à améliorer des télescopes paraboliques existants et ce à moindre coût. Vers

1 – F.E.Ross "Lens Systems for Correcting Coma of Mirrors" *Astroph.Journ.* 81 (1935), 156-172
2 – C.Wynne, Mon.Not. R. Astron. Soc. 167, 189, 1974.
3 – B.Schmidt, Mitt.Hamburg Sternw.Bergedorf 7, 15 (1932)

la même époque que Ross, Schmidt[3] invente le télescope éponyme. C'est l'association d'un miroir sphérique très ouvert et d'une lame de forme particulière, calculée en vue de corriger l'aberration sphérique du miroir, la coma et l'astigmatisme étant annulés par la position de la lame au centre de courbure du miroir. Cette formule optique allait révolutionner la cartographie stellaire et... le business du télescope d'amateur !

Des amateurs talentueux[4,5,6] ont réalisé des Schmidt. Néanmoins, c'est un travail délicat et dont il me semble qu'il reste hors de portée du plus grand nombre malgré des procédés astucieux. De plus le film est courbé sur un support et il est nécessaire d'assurer la stabilité du plan focal qui n'est pas disponible. Il faut découper le film spécialement. Des réalisations sérieuses utilisent des supports en Invar, alliage à coefficient de dilatation nul, mais de prix très élevé !

Bouwers et Maksutov[7], au cours des années 40, proposèrent une solution en apparence plus simple. Au lieu d'utiliser une lame de Schmidt dont on ne savait alors comment la réaliser industriellement, ils suggérèrent d'utiliser un ménisque sphérique très courbé en verre épais, associé là encore à un miroir primaire sphérique. Le résultat était remarquable, proche du Schmidt. Le ménisque ainsi que le miroir étaient moulés aux bonnes dimensions. Il ne restait donc que l'opération de polissage à réaliser. Un spot aluminé sur la face interne du ménisque servait de secondaire comme dans le télescope de Cassegrain. Ce télescope Maksutov-Cassegrain donnait d'excellents résultats mais le champ était faible.

Hélas, il n'existe pas aujourd'hui de sources pour un tel ménisque. De plus, celui-ci devient lourd quand on augmente le diamètre. Partir par exemple d'un bloc de verre de 80 mm d'épaisseur que l'on viendrait "formater" semble une solution difficilement envisageable par un amateur en raison du prix, du temps et de l'effort à investir. La raison qui fait que l'on trouve des Schmidt Cassegrain et des Maksutov au sein des réalisations commerciales tient essentiellement aux quantités que le marché amateur croissant est capable d'absorber, à la possibilité de commander sur spécifications, dans le sud-est asiatique, des pièces pré-moulées et bien sûr, à l'existence d'un outil de production *ad hoc*, qui permet de réaliser ces optiques en grande série et à vil prix.

De cela il faut surtout retenir que l'utilisation d'un miroir sphérique dans un télescope est une caractéristique très intéressante car l'opération de parabolisation est difficile à mener même industriellement (voir la qualité des miroirs de certaines grandes marques, je ne cite pas de nom...), longue et souvent démotivante quand elle est réalisée à la main par un amateur. En revanche, ni la lame de Schmidt ni surtout le ménisque de Maksutov ne répondent vraiment aux capacités et aux moyens d'un amateur capable de tailler un miroir sphérique. Est-il donc condamné pour autant à l'opération de parabolisation ?

Le "Houghton Minimum"

Une troisième voie existe. Toujours au cours des années 40, les Anglais se posèrent le même problème que Bouwers et Maksutov : comment contourner les difficultés de réalisation de la lame de Schmidt et obtenir un grand champ ? C'est ainsi qu'en 1942, Houghton publia un article[8] dans lequel il présentait une solution élégante, utilisant **un miroir sphérique seul associé à deux lames de même verre n'introduisant qu'un chromatisme infime, ayant des courbures également sphériques et donc faciles à réaliser industriellement**. Cette solution à deux lames réalisées dans un même verre pour éviter le chromatisme, n'est pas aujourd'hui la plus économique mais c'est celle je crois qui est la plus facile à mettre en œuvre par un amateur, en particulier dans la configuration que l'on pourrait baptiser "Houghton Minimum".

Il existe diverses stratégies en matière de correcteur de Houghton. Par exemple, on choisit une première lame biconvexe et une seconde plan concave de même puissance, c'est-à-dire : $r_1 = -r_2$, $r_3 = 2 \times r_2$, $r_4 = \infty$. On peut encore[9] choisir deux faces convexes ayant des rayons égaux à celui du miroir lequel sert de calibre, les deux autres faces sont concaves et testées au Foucault, ce qui simplifie la construction et le test. Mais le plus pratique du point de vue de la réalisation et des tests est constituée par un ensemble dans lequel $r_1 = -r_3$ et $r_2 = -r_4$. Dans cette combinaison, qui a été simulée avec le logiciel OSLO, les faces concaves du correcteur servent de calibres et permettent de tester les parties convexes aux franges. Ce correcteur est donc bien plus facile à réaliser par un amateur et demande moins de travail que les autres versions ou qu'une lame de Schmidt ou de Maksutov fortement courbée.

Le "Houghton minimum" dérive de cette dernière formule, mais au lieu d'avoir deux surfaces courbes, on garde une face plane par lentille, voire très proche du plan. La raison en est que le verre flotté n'est plan qu'à quelques franges. Un surfaçage légèrement sphérique est plus facile à réaliser qu'un plan de grande dimension. Il convient aussi de ne pas s'exagérer la difficulté car en transmission, les tolérances de surfaçage sont quatre fois plus grandes qu'en réflexion.

Ce correcteur montré *figure 1* s'applique parfaitement à un Newton, par exemple un 200 mm sphérique, ouvert à 5 où l'augmentation du champ utilisable est spectaculaire

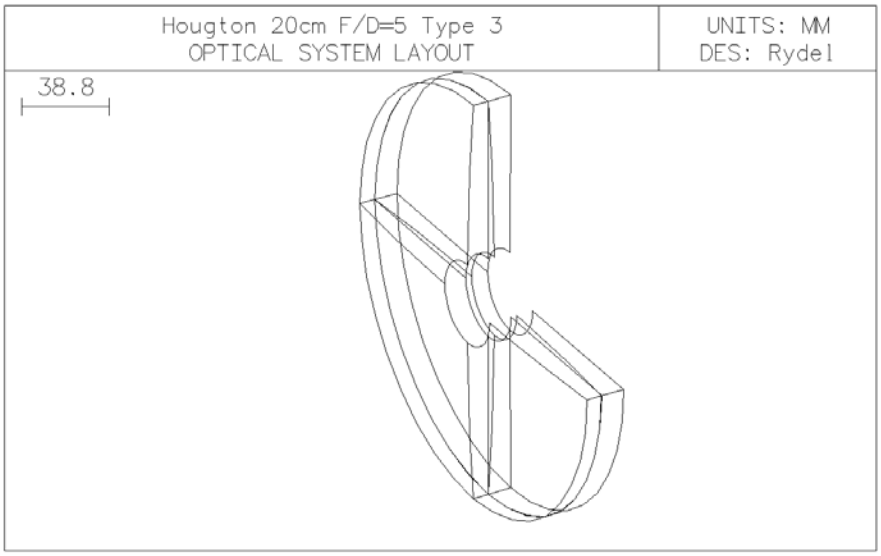

Figure 1 **– Le correcteur à deux lames du "Houghton Minimum"**.

4 – "La construction d'une chambre de Schmidt amateur", C.Cavadore. *Pulsar*,n°671, 672, 673, 1989

5 – "La construction d'un télescope de Schmidt", R.Lartigau, *l'Astronomie*, Mai 1973

6 – "Réalisation d'une chambre de Schmidt", J.Dijon, *Ciel et Espace*, n°201, 1984

7 – D.Maksutov,"New Catadioptrique Meniscus Systems", *J.Opt.Soc.Amer*.34, 270-284 (May 1944)

8 – J.L.Houghton, "Combinations of Spherical Lenses to Replace Non-spherical Refracting Surface in Optical Systems", *Proc.Phys.Soc*.57,84, (1945)

9 – Allan Mc Intosh, *"Advanced télescope making"*, Vol1, p.248: *"A simple Houghton Camera"*, N.J.Rumsey.

relativement à un miroir parabolique. Pour un demi-champ de 0,25° (qui représente la Lune en entier), la combinaison reste complètement limitée par la diffraction. En ciel profond, avec une pupille de 5 mm, grossissement de 40 fois et un oculaire ayant un champ de 55°, le demi-champ visuel est proche de 0,7°. Ainsi qu'il est possible de voir sur la *figure 2*, la tache d'aberration reste globalement dans le disque d'Airy jusque sur le bord du champ de l'oculaire. C'est donc l'oculaire qui limitera la qualité de l'image.

Dans cet exemple, le correcteur se trouve à 800 mm du miroir, l'obstruction centrale est de 20 %. Le spot diagramme entre 0,48 et 0,656 µ se compare favorablement à un apochromatique. Enfin *figure 3*, à ± 1° de l'axe (± 18mm, en vue de couvrir un format 24 x 36) et en rapprochant ce même correcteur du miroir (650 mm au lieu de 800 mm) on annule la courbure de champ. La tache au foyer est divisée par 6 relativement au Newton et reste inférieure à 20 µ sur tout le champ. L'obstruction centrale est ici de 35 %, ce qui n'est pas un problème en photographie. En effet, n'oublions pas que la résolution théorique d'un 20 cm est de 0,7" d'arc. Sauf circonstances exceptionnelles, le *"seeing"* est proche de 2". Les performances seront donc déterminées en majorité par la turbulence atmosphérique, la qualité du suivi, l'erreur périodique de la vis, etc.

On peut envisager d'utiliser ce correcteur avec un télescope commercial, à la condition de re-surfacer le miroir afin qu'il soit bien sphérique et de fixer le miroir diagonal sur la lame par collage en n'oubliant pas de le décaler légèrement comme il est de coutume sur un Newton. La position exacte de la lame le long de l'axe optique n'est pas très critique. Il est possible aussi de réaliser des télescopes homothétiques entre 150 et 300 mm. Au-delà, ils ne seront plus optimaux.

Le *tableau 1* suivant résume les caractéristiques de cette combinaison optique.
Mais il est possible de faire encore mieux avec ce type de correcteur.

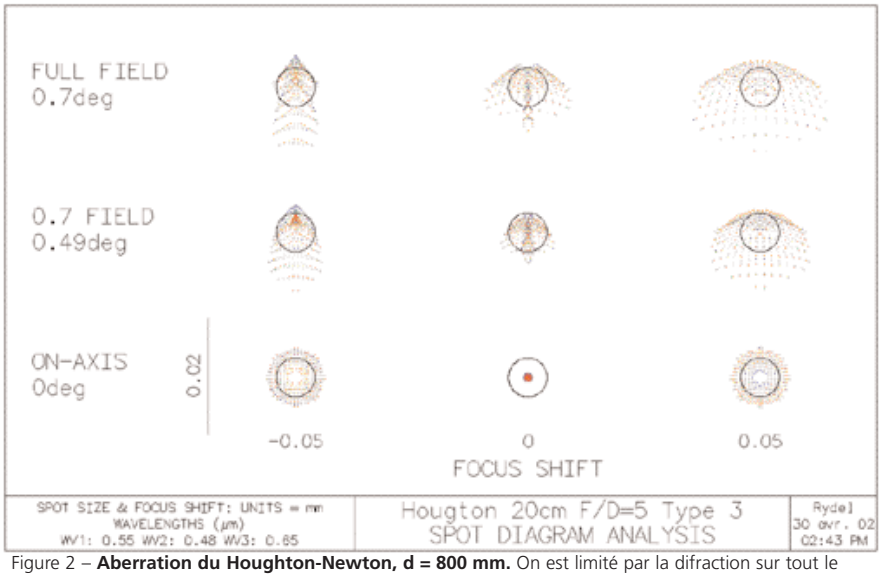

Figure 2 – **Aberration du Houghton-Newton, d = 800 mm.** On est limité par la difraction sur tout le champ. Le chromatisme est très faible.

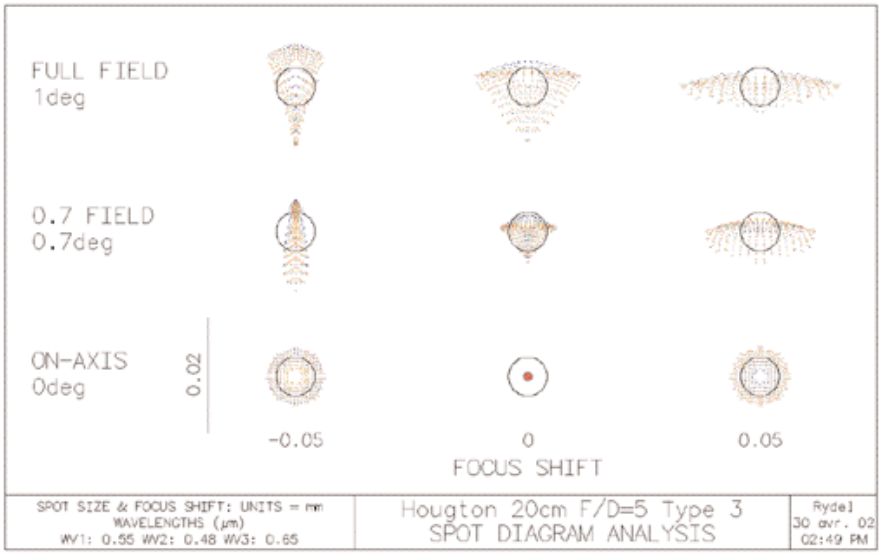

Figure 3 – **Aberration du Houghton-Newton, d = 650 mm.** Le télescope est plus court.

Un astrographe couvrant le moyen format

L'idée ici consiste à créer un astrographe de formule Cassegrain n'utilisant que des surfaces sphériques et utilisant comme secondaire convexe une découpe centrale réalisée dans la première lame plan-convexe du correcteur (figure 4). Cette partie, qui est conçue au cours du processus de fabrication du correcteur, est alors fixée sur le côté plan de la seconde lame. On voit donc que les deux lames du correcteur plus le secondaire sont créés en même temps. Le secondaire, carotté dans la première lame plan-convexe, n'est libéré qu'à la fin de l'étape de polissage. La combinaison optique que nous décrivons présentement est en cours de réalisation à l'atelier d'optique de la SAF.

En fait, les deux lames sont carottées afin de pouvoir être fixées sur un axe commun qui supportera aussi le secondaire convexe de l'astrographe, évitant ainsi l'araignée du Newton. Si la partie centrale plan-convexee issue de la première lame a servi de secondaire, la partie centrale de la seconde pourra être récupérée en vue de réaliser un petit télescope Newton. Il servira de viseur de suivi à l'astrographe. On voit donc que ce

Tableau 1 Caractéristiques du Houghton-Newton

	Rayon mm	Épaisseur mm	½ Diam. mm	Verre
diaphragme		50	100	
R1	1 452	10/11	91	k5 (ou St Gobain)
R2	-50 000	3,2	91	
R3	– 1 452	8	91	k5 (ou St Gobain)
R4	-50 000	800 (650)	91	
R5	– 2 000	– 770 (– 620)	105	Miroir
R6	∞	230 (380)	20 (35)	Secondaire
Plan focal	∞	1,2	(17,5)	

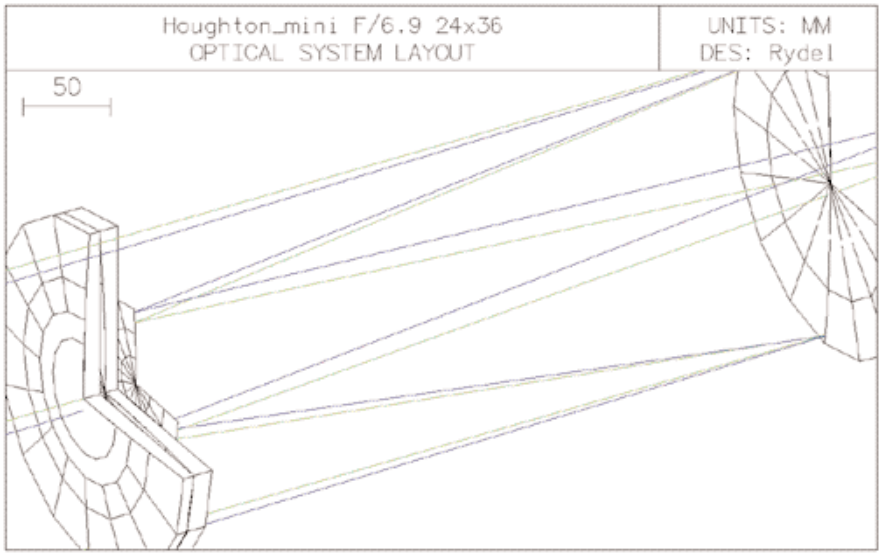

Figure 4 – **Architecture de l'astrographe**. À droite le miroir et à gauche le correcteur et le sécondaire.

sont quatre pièces optiques qui sont réalisées dans le même mouvement ! De cela résulte un gain de temps substantiel qui ajoute à l'intérêt purement optique de cette combinaison, qu'il n'est pas plus difficile de réaliser qu'un miroir sphérique.

L'astrographe d'ouverture 6,85 et de focale 1370 mm, dispose d'un miroir sphérique de 210 mm ouvert à 3,7 et carotté à 50 ou 80 mm, selon que l'on souhaite couvrir le petit ou le moyen format. L'obstruction centrale (100 mm) fait perdre ¼ de diaphragme. La distance entre le plan focal et le centre du miroir est de 100 mm.

En visuel une telle obstruction est sans doute rédhibitoire ; en photographie elle reste acceptable car les aberrations en bord de champ restent proches des limites de la figure de diffraction et couvrent sans difficultés le 24 x 36 jusque dans les coins si on opère un décalage de mise au point de - 2/10e de mm. Dans ce cas, la tache fait 30 µ au centre et 10 x 15 µ au bord du champ entre la raie F et la raie C comme il est possible de le voir sur la *figure 4*. Si l'on n'est pas intéressé par les coins du cliché 24 x 36, on met au point au centre ou bien à – 0,1 mm.

En 6 x 6, on obtient les meilleurs résultats en utilisant un champ courbe (– 1000 mm). Le spot diagramme *figure 5* montre le champ au bord de la pellicule à 1,23° (30 mm) où la tache au foyer fait 30 µ x 30 µ et la tache dans un coin à 1,75°, où la taille du spot atteint 50 µ x 50 µ. Le correcteur est toujours réalisé en verre flotté ou K5, de 12 mm d'épaisseur. Nous avons cherché à remplacer la courbure du plan focal par une lentille concave. Les résultats ne nous ont pas semblés probants car elle introduit du chromatisme de position qui a pour conséquence d'étaler la tache au plan focal.

Le *tableau 2* donne les caractéristiques de cette combinaison optique.

Il est possible de s'intéresser à d'autres performances, en particulier le sphérochromatisme (figure 6). Dans le vert à 0,55 µm l'aberration sphérique longitudinale est nulle. Le chromatisme varie de ± 50 µ entre 0,48 et 0,65 µm, autant dire qu'il est très faible. La courbure de champ est également nulle et seul demeure l'astigmatisme dont les deux courbures sont bien symétriques. La distorsion et la couleur latérale sont négligeables.

Tolérances de montage

Avec quelles tolérances les courbures du correcteur doivent-elles être réalisées ? Les simulations montrent que le rayon principal (r_1, r_3) peut varier entre 1447 et 1487 mm, soit une flèche de 3,412 mm ± 50 µm, en fait ± 0,1 mm si on fait une mesure différentielle entre les deux faces concave et convexe. On peut aussi adapter les faces r_2 et r_4, en fonction de r_1, de la façon suivante : r_1 = 1447, $r_2 = \infty$; r_1 = 1467 mm, r_2 = 30 000 mm ; r_1 = 1487 mm, r_2 = 15 000 mm. L'épaisseur de verre est sans grande importance. Ici on part d'une lame de 12 mm d'épaisseur.

Quelles tolérances de centrage entre les

Tableau 2 Caractéristiques de l'astrographe F/6.85

	Rayon mm	Flèche mm	Épaisseur mm	½ Ouverture mm	Verre
diaphragme			50	100	
R1	1 467	3,42	10	100	k5 (ou St Gobain)
R2	-30 000	0,167	4	100	Air
R3	– 1 467	3,42	8	100	k5 (ou St Gobain)
R4	-30 000	0,167	472	100	Air
R5	– 1 554	3,22	– 460	105	Miroir 1
R6	– 1 467		555,6	50	Miroir 2
Plan focal	(– 1 000)		0	20,96	Coin du format 24x36

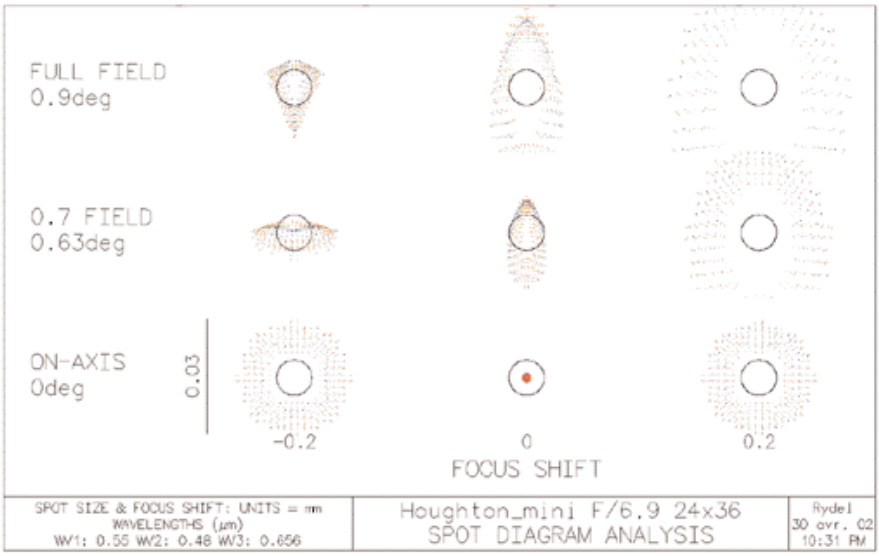

Figure 5 – **Aberrations en 6x6 sur champ courbe, au centre, aux bords et dans les coins**.

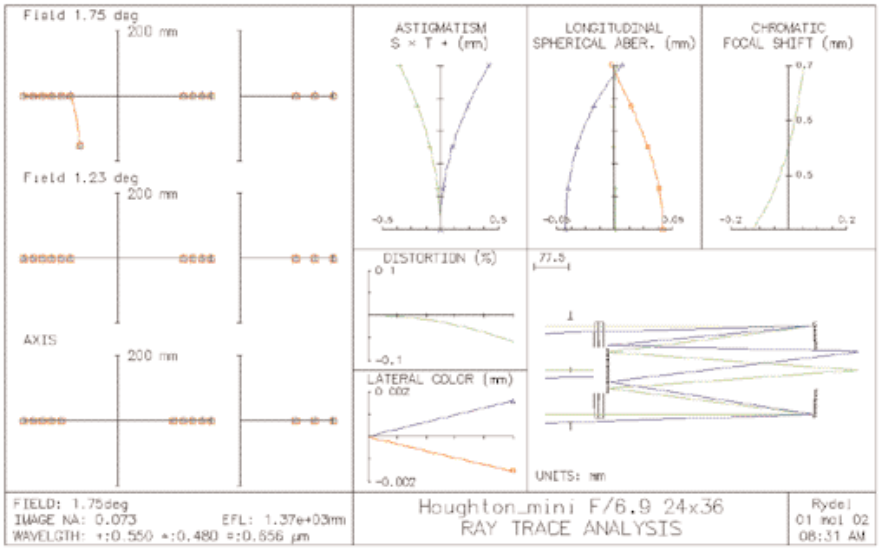

Figure 6 – **Diverses aberrations de l'astrographe**, e = 650 mm. Noter le bon équilibrage de l'aberration sphérique et de l'astigmatisme. Le chromatisme est de 100 µm à 400 nm.

deux lames et pour le secondaire ? Là-encore la simulation montre que les deux lames peuvent être décalées de 1 mm entre elles. Le chromatisme introduit est alors égal au rayon du cercle d'Airy. Le miroir secondaire devra être mieux centré qu'à ± 1,5 mm. Evidemment, il ne faut pas cumuler ! Aussi il convient de réaliser au tour, une pièce axiale qui supportera à la fois les deux lames et le secondaire, afin que le centrage soit parfait, voire réglable.

Supposons que la sphère soit déformée. Il y a introduction d'aberration sphérique positive ou négative. Il ne faut pas dépasser un coefficient de déformation de ± 0,2. En ce qui concerne le plan film, il faut que la mise au point angulaire soit faite à mieux que ½ degré au foyer, ainsi qu'au niveau du secondaire, les deux étant liés.

Conclusions

Un ou deux miroirs sphériques associés à un correcteur (dérivé de celui proposé par Houghton), permettent d'obtenir des performances qu'il n'est pas possible d'assurer aussi simplement avec d'autres combinaisons, tels que miroirs parabolique et/ou hyperbolique, lame de Schmidt, ménisque de Maksutov, etc.

Bien que ce correcteur possède deux lames, il est aussi facile à réaliser qu'un miroir sphérique. De plus, une petite variation sur une face peut être compensée sur une autre. Le fait d'utiliser du verre flotté et qu'une paire de face reste quasiment plane, ajoute à la facilité de fabrication par un amateur, sans que l'investissement soit démesuré. Pour information, il existe aussi un verre flotté chez Pilkington appelé "Optiwhite" ou "Diamant" chez Saint-Gobain. Ils sont très transparents et très plans, ils ne présentent pas cette composante verte qui est due à la présence d'oxydes de fer et de chrome.

Les moyens de contrôle nécessaires sont le sphéromètre, le Foucault et une source monochromatique de lumière (néon, lampes "éco", à vapeur de mercure ou de sodium…) permettant de réaliser un contrôle interférentiel aux franges. Il faut être sûr de la qualité de la surface convexe relativement à la surface concave qui est contrôlée préalablement par foucaultage. À cela s'ajoute OSLO, le logiciel de simulation optique (gratuit jusqu'à 9 surfaces) qui permet de simuler et contrôler sur PC, la combinaison optique au fur et à mesure de sa réalisation, voire de la modifier pour la réadapter à des courbures un peu différentes.

Dans sa version newtonienne, cette combinaison permet, pour un faible investissement, d'améliorer un instrument du commerce. Dans le cas de l'amateur réalisant son télescope, le temps passé à paraboliser semble aussi bien utilisé à la fabrication d'un correcteur de champ qui offre non seulement des qualités indiscutables en ciel profond que ne partage pas le parabolique mais aussi l'intérêt de clore l'extrémité de l'instrument, ce qui évite à la fois les salissures et les mouvements d'air qui contribuent à détériorer le piqué de l'image.

Dans sa version "astrographe" cette combinaison évite des asphérisations laborieuses (comme on a pu voir certains virtuoses en proposer dans une revue américaine) tout en réalisant quatre pièces optiques au cours d'un seul travail, dont l'optique de guidage.

L'ouverture un peu inférieure à F/7 constitue un bon compromis pour le ciel profond. L'obstruction centrale qui atteint 50%, n'est pas vraiment rédhibitoire pour cette utilisation et le champ très large couvre jusqu'au moyen format. Une utilisation avec un grossissement équipupillaire est aussi envisageable

Tout n'a pas été dit sur le sujet, et une validation pratique restera toujours plus convaincante que de longs discours. L'astrographe est donc en cours de réalisation à l'atelier. Des difficultés inattendues en cours de réalisation surgiront nécessairement et qu'il faudra surmonter. C'est l'autre aspect attrayant de cette combinaison optique dont j'espère qu'elle tiendra à terme ses promesses. ■

Références

H. RUTTEN/M. VAN VENROIJ, "Telescope Optics – Evaluation and Design", pp.126.

A. MACKINTOSH, "Advanced Telescope Making Techniques", pp. 192, pp.242, pp. 248, pp. 250.

E. TURCO, "Making an aplanatic 4-inch telescope", *Sky & Telescope*, November 1979, pp.473.

F. T. A. HOENDERKAMP, "A 200mm f/4 Houghton Telescope", *ATM Journal*, Spring 1994, pp. 12.

R. D. SIGLER, "A New Wide-Field All-Spherical Telescope", *Telescope Making* #30, pp. 4.

R. J. LURIE, "Anastigmatic catadioptric tel escopes", *Journal of the Optical Society of America* (JOSA), Vol. 65(3), 261 - 266, (1975).