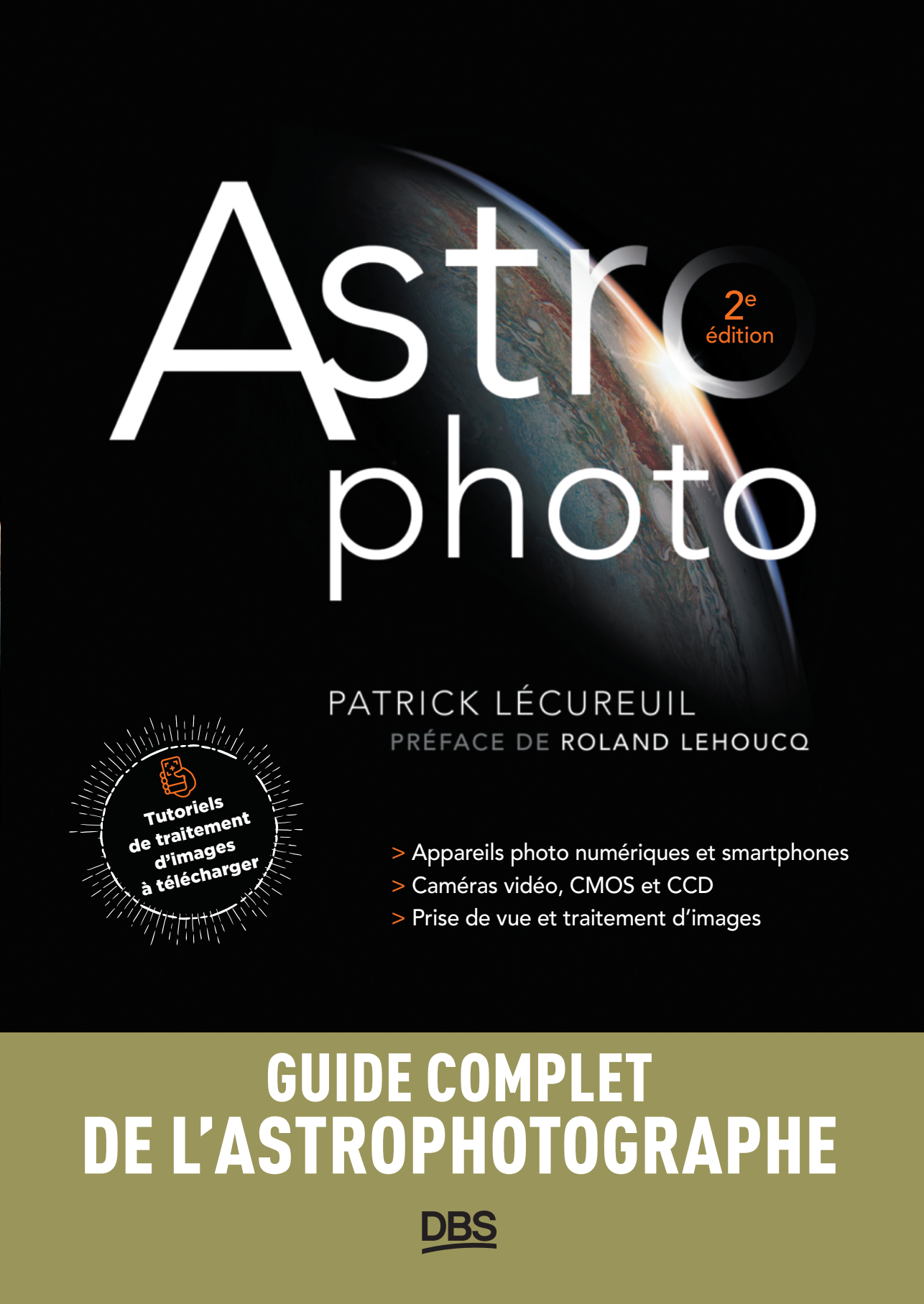


Astro photo



2^e
édition

PATRICK LÉCUREUIL
PRÉFACE DE ROLAND LEHOUCQ



Tutoriels
de traitement
d'images
à télécharger

- > Appareils photo numériques et smartphones
- > Caméras vidéo, CMOS et CCD
- > Prise de vue et traitement d'images

**GUIDE COMPLET
DE L'ASTROPHOTOGRAPHE**

DBS

Astro photo

2^e
édition

PATRICK LÉCUREUIL

PRÉFACE DE **ROLAND LEHOUCQ**

Smartphones

Appareils photo

Caméras vidéo, CMOS et CCD

Prise de vue et traitement d'images

DBS

Du même auteur :

Astroguide, préface de Hubert Reeves, 288 pages

Débuter en astronomie, 128 pages

Observer le ciel à l'œil nu, 208 pages

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :

www.deboecksuperieur.com

Passionné d'astronomie et d'astrophotographie depuis plus de trente-cinq ans, **Patrick Lécureuil** est médiateur scientifique. Il a déjà publié de nombreux articles consacrés à l'astrophotographie dans différentes revues d'astronomie.

Astrophysicien au CEA de Saclay, **Roland Lehoucq** est passionné de vulgarisation scientifique et y consacre une grande partie de ses loisirs. Outre de nombreux articles scientifiques, il est l'auteur de plusieurs ouvrages, parmi lesquels : *Le Soleil, notre étoile* et *La Lumière à la loupe*, « Les Minipommes » et *SF : la science mène l'enquête*, Le Pommier ; *Les Extraterrestres expliqués aux enfants*, Seuil ; *L'Univers a-t-il une forme ?*, « Champs », Flammarion ; *Les Constantes fondamentales* (avec Jean-Philippe Uzan), Belin.

En couverture : Clair de Mars ©Premium Access/Getty Image

Relecture & correction : Jean-Louis Liennard

Adaptation maquette et mise en pages : Jean-Louis Liennard/GraphieProd

Couverture : Primo&Primo

Iconographie par l'auteur

L'auteur tient à remercier les photographes, fabricants de matériel et commerçants qui lui ont aimablement donné l'autorisation de reproduire les nombreuses photos et documents.

Dépôt légal :

Bibliothèque royale de Belgique : 2023/13647/040

Bibliothèque nationale, Paris : mai 2023

ISBN : 978-2-8073-5122-6

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2023 – Rue du Bosquet 7, B1348 Louvain-la-Neuve

De Boeck Supérieur – 5 allée de la 2^e DB, 75015 Paris

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE de Roland Lehoucq	5
INTRODUCTION	7
CHAPITRE 1 – Les instruments	10
<i>Les instruments d'amateur pour l'astrophotographie</i>	12
<i>Montures et mise en station</i>	29
<i>Les accessoires de l'astrophotographe</i>	37
<i>Bien régler son instrument</i>	42
CHAPITRE 2 – Les capteurs numériques	48
CHAPITRE 3 – Photographier le ciel avec un smartphone	56
<i>Quels smartphones pour l'astrophotographie?</i>	58
<i>Quelques accessoires</i>	60
<i>Le choix de l'oculaire</i>	61
<i>Quelles applications</i>	63
<i>Photographier la Lune et les planètes</i>	64
<i>Photographier les constellations et la Voie lactée</i>	69
<i>Photographier le ciel profond</i>	70
<i>Le traitement des images</i>	72
CHAPITRE 4 – Photographier le ciel au moyen d'un appareil photo numérique	74
<i>Quel boîtier pour l'astrophotographie?</i>	76
<i>Les objectifs photo et leurs applications</i>	81
<i>Les accessoires pour appareils photo</i>	86
<i>Photographier le ciel sans instrument</i>	87
<i>Principes de la photo du ciel profond avec un reflex ou un hybride</i>	98
<i>La photographie stellaire au moyen d'un instrument</i>	106
<i>La photographie planétaire</i>	123

CHAPITRE 5 – Photographier le ciel au moyen d’une caméra vidéo	130
<i>Introduction à l’imagerie vidéo</i>	132
<i>La photographie planétaire au moyen d’une caméra vidéo</i>	136
CHAPITRE 6 – Photographier le ciel profond au moyen d’une caméra CMOS ou CCD	164
<i>De la caméra CCD à la caméra CMOS</i>	166
<i>L’imagerie CMOS ou CCD</i>	174
CHAPITRE 7 – Identifier et corriger les défauts d’un cliché	184
<i>Problèmes liés aux conditions météorologiques</i>	186
<i>La pollution lumineuse</i>	190
<i>Défauts liés aux aberrations optiques</i>	192
<i>Analyser ses erreurs de suivi</i>	195
<i>Défauts à la prise de vue et de traitement</i>	198
CHAPITRE 8 – Le traitement des images	202
<i>Logiciels pour le traitement des images</i>	204
<i>Le traitement des images planétaires</i>	205
<i>Le traitement des images stellaires</i>	217
EN GUISE DE CONCLUSION	233
BIBLIOGRAPHIE	235
SITES INTERNET	237

PRÉFACE

Adolescent, je pratiquais régulièrement l'astronomie d'amateur et notamment l'astrophotographie. J'en ai retenu que photographier le ciel est une tâche bien plus difficile que de photographier son petit-neveu. D'abord, réaliser l'image d'une nébuleuse ou d'une galaxie lointaine nécessitait de capter l'infime quantité de lumière en provenance de la source : il fallait donc faire une pose de longue durée. Ensuite, comme le jeune garçon, le ciel, ou plutôt la Terre, bouge durant toute la pose. Cela nécessitait d'utiliser une monture équatoriale motorisée capable de compenser la rotation terrestre. Si le second problème était facile à résoudre, le premier posait alors le dilemme suivant : dois-je réduire le temps de pose en choisissant une pellicule sensible affligée d'une résolution médiocre, au risque de perdre les subtiles volutes de la nébuleuse de la Rosette, ou faut-il plutôt utiliser une pellicule ayant une bonne résolution mais dont la sensibilité, déjà faible au départ, n'est pas constante durant toute la durée de la pose ? Pour résoudre ce problème, tout le monde ne jurait que par l'hypersensibilisation de la pellicule. L'opération consistait à faire subir un traitement chimique à la pellicule afin d'améliorer ses qualités de sensibilité durant une longue pose tout en préservant sa résolution. Et l'on voyait des astronomes plongeant leurs films dans des bains de nitrate d'argent (dans le noir total bien sûr !) ou dérochant la cocotte-minute familiale pour la transformer en une étuve apte à effectuer un traitement gazeux miracle sur le fameux film Technical PAN 2415 de Kodak.

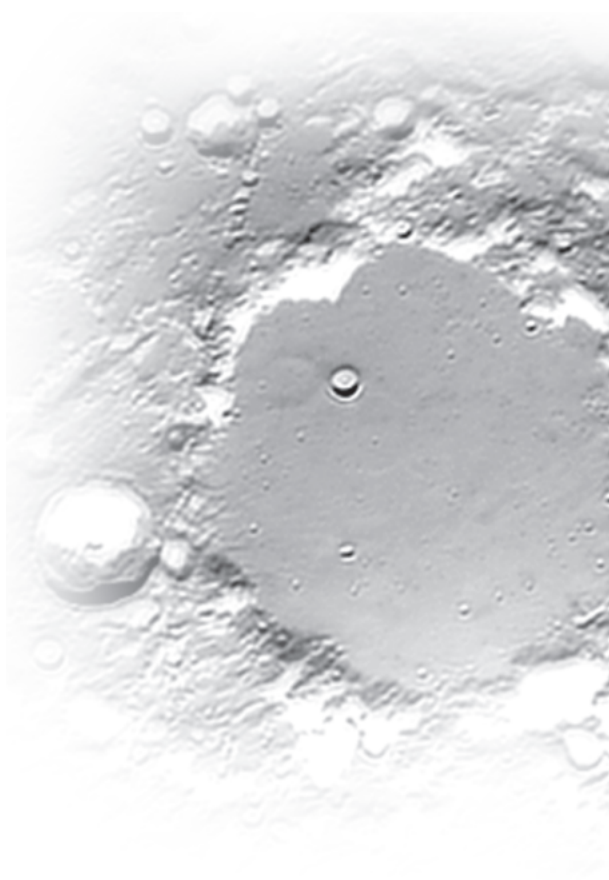
C'était aussi le temps où d'autres astronomes amateurs, passionnés d'électronique eux, passaient leurs journées à assembler de petits capteurs CCD qu'ils essayaient la nuit tombée. Les premiers n'avaient qu'une ligne de 128 pixels et il fallait faire défiler la Lune pour en obtenir une image ! Inutile de vous dire qu'elle rivalisait mal avec celles obtenues grâce à la photographie classique. Pourtant, l'évolution technique aidant, l'imagerie numérique finit par s'imposer dans l'astrophotographie amateur au point de devenir incontournable. Bientôt, l'utilisation de CCD permettait d'obtenir des images d'une qualité équivalente à celle des pellicules classiques. Une révolution était en marche. Désormais, l'utilisation de capteurs numériques est si facile et son coût si peu élevé, qu'elle n'est plus réservée à une élite de passionnés et que son usage s'est largement répandu.

Dans cet ouvrage très complet, Patrick Lécureuil nous livre l'état de l'art en matière d'astrophotographie numérique. Il nous décrit tous les pièges à éviter et toutes les astuces à mettre en œuvre pour réussir de magnifiques photos du ciel grâce à un appareil photographique numérique, à une caméra CCD ou à une caméra vidéo (ce sont ces dernières qui ont véritablement démocratisé l'astrophotographie numérique). Il nous décrit aussi l'importante et indispensable étape du traitement d'image, qui est à la photographie numérique ce que le développement et le tirage étaient à la photographie argentique. Et l'on est ébahi devant la qualité du travail et des images que ces amoureux du ciel parviennent à obtenir. Certaines rivalisent sans peine avec ce qu'obtenaient les astronomes professionnels il y a une trentaine d'années. Finalement, les astronomes « électroniciens » l'ont emporté sur les « chimistes », mais une chose reste sûre, ils ont tous en commun la passion du cosmos et la volonté d'en révéler les plus magnifiques paysages, pour notre plus grand plaisir.

Roland Lehoucq,
astrophysicien au CEA de Saclay

Je tiens particulièrement à remercier Sylvain Gurlay pour sa lecture avisée et ses conseils, ainsi que Vincent Hamel, les magasins L'Astronome, la Clef des Étoiles et Optique Unterlinden pour m'avoir fourni de nombreux documents visuels.

Je remercie également chaleureusement les amateurs qui m'ont autorisé à publier quelques-unes de leurs images.



À Yann,
qui aimait tant les étoiles,
et qui a décidé de les rejoindre.

INTRODUCTION

L'astrophotographie est née dans la nuit du 16 juillet 1850, lorsque Bond et Whipple ont obtenu le premier daguerréotype de l'étoile Véga avec une lunette de 38 cm de diamètre installée à l'observatoire de Cambridge.

Mais il fallut attendre 1880 pour qu'un astronome amateur, Henri Drapper, photographie le premier objet du ciel profond : la nébuleuse d'Orion. Quelques années plus tard, fut prise la première photographie, toujours de la nébuleuse d'Orion, qui fit apparaître plus d'informations que ce que l'œil pouvait percevoir à l'oculaire d'un instrument.

Dès lors, l'astrophotographie devint incontournable et ouvrit les portes d'un monde jusque-là invisible à nos yeux.

En 1889, sous l'impulsion des frères Henri, de l'observatoire de Paris, fut entrepris un travail de titan : la carte photographique du ciel, qui ne fut achevée qu'à la fin des années 1940.

Au début du ^{xx}e siècle, les instruments devenant de plus en plus puissants, les astronomes obtinrent des images de plus en plus profondes de la voûte céleste. Mais les plaques photographiques de l'époque, peu sensibles, exigeaient des temps de pose de 8 à 10 heures, réparties sur plusieurs nuits, pour enregistrer des objets jusqu'à la magnitude 20.

Mais c'est avec la mise en service, en 1949, du télescope de 5 m du Mont Palomar que l'astrophotographie prit véritablement son envol, d'autant que Kodak produisit des films spécialement conçus pour l'astrophotographie : les vénérables 103a. Disponibles en différentes sensibilités spectrales (bleu, rouge, vert et panchromatique étendu dans le rouge profond) et corrigés contre le défaut de réciprocité, ces films ont fait la gloire de l'astrophotographie durant plusieurs décennies, y compris dans le milieu amateur et ce jusqu'à la fin des années 1980.

L'apparition des grandes chambres de Schmidt dans les observatoires professionnels, couplées à ces émulsions, a permis de réaliser de somptueuses images détaillées.

À la fin des années 1960, un film noir et blanc produit par Kodak à des fins militaires, le Technical Pan 2415, provoqua également un grand bouleversement dans l'astrophotographie. Ce film, possédant une très large sensibilité spectrale, un fort contraste et un grain extrêmement fin, répondait parfaitement à des traitements chimiques, l'hypersensibilisation, pour compenser le défaut de réciprocité.

Produit jusqu'au début du ^{xxi}e siècle, le TP 2415 fut également très utilisé par les astrophotographes amateurs, aussi bien en photographie planétaire que stellaire.

La technique de la trichromie (photographie au moyen de filtres rouge, vert et bleu) permettait également d'obtenir de superbes images avec le TP 2415.

Mais au début des années 1970, les détecteurs électroniques firent leur apparition dans les observatoires et supplantèrent progressivement l'émulsion argentique. Leur sensibilité et le fait qu'ils ne connaissent pas le défaut de réciprocité les rendaient supérieurs aux films.

À cette époque, on ne savait pas encore réaliser des capteurs de grandes tailles et possédant une bonne résolution. C'est pourquoi les plaques argentiques, pour l'imagerie grand champ, étaient encore répandues, mais la révolution numérique était en marche et rien ne pouvait l'arrêter.

À l'aube des années 1980, les détecteurs électroniques, sous l'impulsion de quelques astronomes amateurs parmi lesquels figurait Christian Buil, firent leur entrée dans le milieu de l'astrophotographie d'amateur.

Les progrès réalisés sur ces capteurs numériques et en informatique permirent assez rapidement de voir apparaître les premières caméras CCD pour amateurs. Mais le coût de ces caméras et des ordinateurs étant relativement important et, comme en parallèle la photographie argentique produisait des films de plus en plus performants, il fallut attendre les années 1990 pour voir l'astrophotographie CCD d'amateur se développer.

Puis, au milieu des années 1990, est apparue une petite bombe qui, sous ses aspects anodins, allait profondément bouleverser l'astrophotographie : la webcam. Cette petite caméra CCD, bon marché, permit rapidement d'obtenir de magnifiques images planétaires et en quelques années, relégua la photographie planétaire argentique au rang de vieux souvenir.

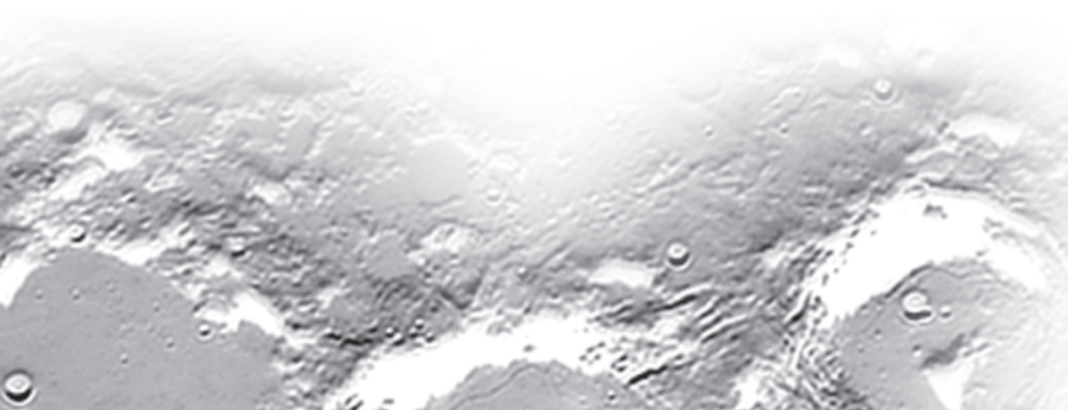
De par sa facilité d'utilisation et le fait qu'elle soit adaptable sur des petits instruments, la webcam permit à de nombreux astronomes amateurs de se lancer dans l'astrophotographie. Jusqu'à cette date, l'astrophotographie était plutôt réservée aux amateurs aguerris et bien équipés. La webcam a en quelque sorte démocratisé l'astrophotographie, d'autant que le coût d'un ordinateur devenait de plus en plus accessible.

Au tout début des années 2000, les progrès réalisés dans la conception des capteurs numériques allaient également profondément changer la donne dans le milieu des appareils photos.

L'apparition des premiers reflex numériques, performants et accessibles, fit définitivement passer le monde de l'astrophotographie dans le numérique.

Durant de nombreuses années, le prix des reflex entrée de gamme a permis à de nombreux amateurs de se lancer dans l'astrophotographie. Pendant ce temps, les fabricants de caméras dédiées proposaient des caméras de plus en plus performantes à base de capteurs CMOS. Aujourd'hui, ce type de capteur a supplanté, dans le milieu amateur, le capteur CCD. Depuis quelques années, les fabricants de smartphones ont commencé à produire des téléphones équipés d'appareils photos de bonne qualité, ce qui s'est traduit par une baisse importante du nombre d'appareils photos vendus. Désormais, certains modèles de smartphones sont capables de faire quelques photos nocturnes et, même si pour le moment les résultats sont inférieurs à ce que l'on peut obtenir avec un APN ou une caméra dédiée, le smartphone peut être considéré comme un moyen de s'initier à l'astrophotographie.

Le but de cet ouvrage est de dresser un panorama complet des différentes techniques de prise de vue et des différents sujets abordables en astrophotographie. Dans la mesure où il est indispensable de passer par des logiciels de traitement pour obtenir une image, une part importante de cet ouvrage sera consacrée aux différents traitements, au moyen de logiciels gratuits.



Tuto : Time-lapses

www.lienmini.fr/51226-tuto1



Pour télécharger des tutoriels repérés par un cartouche de ce modèle, flashez le QR code.

Des tutoriels téléchargeables :

<i>Réaliser des time-lapses</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto1	91
<i>Faire des panoramiques</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto2	97
<i>Faire ses acquisitions avec FireCapture</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto3	142
<i>Acquisition des images avec NINA</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto4	177
<i>Utilisation du logiciel PIPP</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto5	207
<i>Le prétraitement des images planétaires avec AstroSurface</i>	www.lienmini.fr/51226-tuto6	211

Les instruments

<i>Les instruments d'amateur pour l'astrophotographie</i>	12
<i>Montures et mise en station</i>	29
<i>Les accessoires de l'astrophotographe</i>	37
<i>Bien régler son instrument</i>	42

*« Ce qui s'offre à nous avec la lumière des étoiles, capte-le
tel un monde sur ton visage,
ne le prends pas à la légère.
Montre à la nuit que tu reçois silencieusement
ce qu'elle a apporté.
Ce n'est que lorsque tu seras confondu
avec elle que la nuit te connaîtra. »*

Rainer Maria Rilke



Les instruments d'amateur pour l'astrophotographie

Pendant de nombreuses années, les différents instruments dédiés à l'astronome amateur ont très peu évolué et le choix demeurait limité. Si l'on souhaitait posséder un télescope d'un bon diamètre, il fallait bien souvent le construire soi-même.

Mais, au début des années 1990, les importants progrès réalisés en électronique et en informatique ont permis de réaliser des instruments de plus en plus performants, tant sur le plan optique que sur le plan mécanique, et offrant de nombreuses possibilités pratiques.

Parallèlement à ce développement, de nouvelles marques, pour la plupart d'origine asiatique, sont apparues sur le marché, proposant une large gamme d'instruments à des prix très souvent compétitifs.

Aujourd'hui, l'observateur débutant est confronté à un grand nombre d'instruments, et il n'est d'ailleurs pas toujours facile de s'y retrouver.

QU'ATTEND-ON D'UN INSTRUMENT POUR L'ASTROPHOTOGRAPHIE ?

Outre le choix de la formule optique, qui fait que très peu d'instruments sont polyvalents, trois critères sont importants pour l'astrophotographe.

Le premier concerne bien sûr le diamètre de l'instrument ; on sait que plus il est important, plus il collectera de lumière et plus son pouvoir séparateur sera élevé.

Le second est la longueur focale ; celle-ci va déterminer la taille de l'objet photographié. Plus la focale est longue, plus l'objet sera agrandi (même s'il faut également tenir compte de la taille des photosites de l'appareil de prise de vue).

Le troisième est le rapport F/D ; rapport qui détermine en photographie la luminosité d'un instrument. Il correspond aux valeurs de diaphragme qu'on retrouve sur un objectif photo. Plus ce chiffre est petit, plus l'instrument est lumineux et donc parfaitement adapté à l'imagerie

stellaire, car il aura la capacité d'enregistrer un maximum d'informations dans un laps de temps assez court. Alors qu'en photographie planétaire, on cherche avant tout à s'approcher du pouvoir de résolution de son instrument en augmentant sa focale et par conséquent son rapport F/D .

Il faut également tenir compte d'un élément très important, « ennemi » des astrophotographes : l'atmosphère terrestre et ses remous. Cette turbulence limite la résolution des instruments, surtout en imagerie planétaire et plus l'instrument possède un diamètre important, plus il est sensible à la turbulence atmosphérique.

Le nombre de nuits par an où vous pourrez exploiter correctement votre instrument se compte généralement sur les doigts d'une seule main.

Un instrument de 200 à 350 mm de diamètre semble donc un bon compromis pour l'astrophotographe amateur. Quant au choix du rapport F/D , il sera déterminé par les centres d'intérêts de l'astrophotographe.

LA LUNETTE ACHROMATIQUE

Cet instrument, l'ancêtre de tous, que l'on disait moribond au milieu des années 1980, à cause de son encombrement et de son prix élevé, connaît aujourd'hui une seconde vie, encore plus florissante que la première.

En effet, de nombreuses lunettes achromatiques de construction asiatique ont vu le jour ces dernières années, commercialisées sous différentes marques.

Malgré cette résurrection, le principal défaut de la lunette reste le chromatisme. Cette aberration se produit lorsque la lumière traverse les lentilles ; elle est décomposée et les principales couleurs du spectre ne convergent plus en un seul et même foyer, notamment le pourpre et le vert.

Il en résulte des reflets colorés autour des objets, ce qui se traduit par une perte de contraste.

L'ajout, au XVIII^e siècle, d'une seconde lentille pour former le doublet achromatique a réduit cette aberration, mais ne l'a pas supprimée.

Il subsiste toujours une faible dispersion de la lumière que l'on nomme alors spectre secondaire, qui est surtout gênante sur les instruments ayant un rapport F/D très court (≤ 8).

Pour la rendre négligeable, il faut construire un instrument dont le rapport F/D est supérieur à 12. En pratique, cela veut dire qu'une lunette de 120 mm de diamètre doit avoir une focale d'au moins 1 450 mm pour donner des images de bonne qualité.

Néanmoins, s'il est correctement réalisé, un objectif achromatique donne des images plus lumineuses et contrastées qu'un télescope de même diamètre (pas d'obstruction due au miroir secondaire et bonne transmission de la lumière à travers les lentilles).

On a longtemps dit que les lunettes, du fait de leur longue focale, étaient davantage destinées à l'observation et à la photographie planétaire. C'est en partie vrai, mais les lunettes achromatiques fabriquées aujourd'hui possèdent un rapport F/D plus polyvalent, habituellement proche de 8.

Désormais, il est donc possible de réaliser de l'imagerie stellaire au moyen de ces lunettes. Mais n'oublions pas que ce compromis a un inconvénient non négligeable : un chromatisme bien visible, qui se manifestera sous la forme de halos bleutés entourant toutes les étoiles.



Lunette achromatique de 127 mm de diamètre sur une monture équatoriale motorisable. Malgré son diamètre assez important pour une lunette, ce type d'instrument peut permettre de s'initier à l'astrophotographie, mais restera limité par ses performances dans ce domaine. [Photo Bresser]



Lunette achromatique de 70 mm de diamètre sur une monture azimutale. Souffrant de nombreux défauts, cet instrument, avant tout dédié à l'astronome amateur débutant, est quasiment inutilisable en astrophotographie.

[Photo Sky-Watcher]

D'autre part, ces lunettes, à cause de leur encombrement, nécessitent une monture très stable. Et c'est bien souvent là le problème, notamment pour les lunettes ayant un diamètre supérieur à 100 mm fixées sur des montures trop frêles, qui rendent l'astrophotographie très difficile, voire impossible dans certains domaines (notamment en photographie stellaire).

Les possesseurs de tels instruments sont souvent confrontés à d'irréremédiables problèmes de jeux mécaniques et de stabilité.

Tout ceci fait de la lunette achromatique un instrument peu adapté à l'astrophotographie. Car, même si son rapport F/D la destine plutôt à la photo planétaire, son faible diamètre la pénalise en résolution. Ce rapport F/D est aussi trop élevé pour en faire un instrument utilisable en ciel profond.

LES LUNETTES APOCHROMATIQUES

Depuis près de vingt ans, les progrès techniques ont permis de réaliser des objectifs quasiment dénués d'aberration chromatique et donnant des images absolument fabuleuses pour un prix qui, même s'il est encore élevé, est accessible (si l'on ne dépasse pas 100 mm de diamètre) : il s'agit d'objectifs apochromatiques.

Leur conception fait appel à des verres spéciaux qui n'engendrent pas ou très peu de dispersion chromatique. Leur pouvoir de transmission est très élevé et ils donnent des images très lumineuses et très contrastées.

Un objectif apochromatique peut être composé de 2, 3 ou même 4 lentilles. Les triplets ou quadruplets apochromatiques possèdent une meilleure correction chromatique que les doublets, même s'ils transmettent un peu moins de lumière (de manière très négligeable).

Certains fabricants de lunettes apochromatiques assemblent les lentilles de leurs objectifs avec un film d'huile d'un indice de réfraction très proche de celui du verre ; ce qui évite de traiter

toutes les surfaces antireflet et permet de corriger quelques petits défauts de surfaçage.

Ces verres spéciaux permettent alors de fabriquer des réfracteurs possédant un court rapport F/D (donc des tubes également courts), parfaitement adaptés à la photographie stellaire à grand champ.

Les lunettes apochromatiques sont parmi les meilleurs instruments qui existent pour l'amateur. Elles donnent de superbes images tant en planétaire qu'en stellaire. Les images sont très contrastées, très piquées et très lumineuses. Cela fait beaucoup de superlatifs, mais il faut reconnaître qu'à diamètre égal aucun télescope ne donne des images aussi belles. Néanmoins, il faut se méfier de certaines lunettes, car certains fabricants ont tendance à donner l'appellation apochromatique à des lunettes dont la correction chromatique ne correspond pas à ce que l'on attend d'un tel instrument. C'est le cas de nombreuses lunettes apochromatiques premiers prix.

Dernier point positif, les lunettes apochromatiques n'ont pas besoin d'être réglées et collimées par l'amateur, contrairement à la plupart des télescopes. Même si les modèles haut de gamme possèdent des vis de collimation, il est extrêmement rare d'être obligé d'y toucher.

Néanmoins, ce ne sont pas des instruments dénués de défauts optiques. De nombreuses lunettes apochromatiques présentent de la courbure de champ, qui se traduit par un manque de netteté sur le bord du champ. Un aplanisseur de champ est alors indispensable pour couvrir un capteur de grande taille.

Ce sont donc des instruments qui semblent presque parfaits, adaptés à tous les types de travaux de l'amateur. Mais les lunettes apochromatiques présentent quelques inconvénients, surtout un et non des moindres : leur prix.

Même s'il existe des lunettes apochromatiques d'origine asiatique, de 80 à 120 mm de diamètre, pour un prix très compétitif, elles coûtent toujours plus chères qu'un télescope, à diamètre égal.

En effet, une apochromatique de 80 mm de diamètre, de type Orion ou Sky-Watcher, coûte environ deux fois plus cher qu'un télescope Newton de 114 mm de diamètre ; sachant que pour le même prix, ce 114 mm est livré avec une monture, ce qui n'est pas le cas de la lunette de 80 mm.

Et plus le diamètre augmente, plus la différence est importante : le tube d'une apochromatique de 150 mm coûte à peu près le même prix qu'un télescope Schmidt-Cassegrain de 355 mm de diamètre, tout équipé.

L'autre défaut des « apos » est la mise en température de l'objectif. Habituellement, on lit qu'un des avantages de la lunette par rapport au télescope (possédant un tube sans lame de fermeture) est sa mise en température quasi immédiate. Cela est valable pour les petites lunettes, mais dès que l'on dépasse un diamètre de 100 mm (et à plus forte raison pour les ouvertures de 150 mm), la mise en température de l'objectif, notamment s'il s'agit d'un triplet ou d'un quadruplet, peut être très longue. Il faut compter alors environ une heure à deux heures avant que la température des lentilles soit équilibrée avec l'air ambiant. Dernière chose, les lunettes apochromatiques sont limitées en diamètre et on ne trouve que très peu de lunettes d'un diamètre supérieur à 160 mm, car il est difficile de fabriquer de

«grands» objectifs d'excellente qualité. De ce fait, leur prix est souvent très élevé et leur poids et encombrement n'en font pas des instruments transportables.

Même si les lunettes apochromatiques donnent de magnifiques images en planétaire, leur « faible » diamètre ne les destine pas à la photographie planétaire à haute résolution. Les résultats obtenus dans ce domaine sont certes de très bonne qualité, mais un télescope de 200 mm bien réglé donnera bien souvent de meilleures images qu'une apochromatique de 150 mm. En imagerie planétaire, c'est le diamètre qui est important ; c'est lui qui détermine le pouvoir de résolution.

En revanche, ces lunettes sont particulièrement bien adaptées à la photographie stellaire. Elles donnent de superbes images très fines et très contrastées. Certaines possèdent un faible rapport F/D , ce qui les rend particulièrement redoutables en photographie stellaire à grand champ.

À noter qu'il existe aussi des lunettes à la focale très courte, souvent autour de $f/5$, basées sur la formule de Petzval. Il s'agit d'une formule optique à quatre lentilles : un doublet à l'avant, qui possède une focale assez longue, et à l'arrière près du porte-oculaire un second doublet qui a deux rôles : réduire la focale de l'objectif et aplanir le champ.



Les lunettes apochromatiques avec leur qualité optique de haut niveau sont d'excellents instruments pour la photographie du ciel profond grand champ, comme cette lunette Takahashi FSQ 106 mm à $f/5$.

[Photo Optique-Unterlinden]

Cette formule, assez ancienne et qui concernait à l'origine des lunettes achromatiques, donne de très beaux instruments quand elle comprend un ou plusieurs éléments ED.

Ce sont alors de redoutables lunettes, qui du fait de leur faible rapport F/D et de leur grand champ corrigé sont destinées à la photo stellaire, domaine dans lequel elles excellent.

LE TÉLESCOPE DE NEWTON

Ce télescope reste une des formules optiques les plus simples à réaliser et les plus répandues, en particulier chez l'astronome amateur débutant.

Il est à noter que certains modèles bas de gamme sont équipés d'un miroir primaire concave de forme sphérique, alors que le Newton classique possède un miroir primaire concave de forme parabolique.

À l'instar d'une lunette, la lumière ne traverse pas de verre dans un télescope, mais elle est réfléchi par des miroirs.

Il n'y a donc pas de problème de chromatisme, mais d'autres aberrations optiques sont présentes, comme la coma, liée à la forme du miroir primaire, qui se manifeste par des images floues quand on s'éloigne de l'axe optique.

Si le télescope possède un rapport F/D inférieur à 6, la coma sera encore plus marquée, au point d'être difficilement exploitable en photographie au foyer sans l'ajout d'un correcteur de champ. En effet, un Newton ouvert à 6 donnera une image nette au foyer sur un champ de 16 mm seulement et, plus on s'éloignera du centre optique plus les étoiles auront la forme de petites comètes, caractéristiques de la coma.

Le correcteur de champ est donc véritablement indispensable si l'on veut se lancer dans la photographie stellaire au foyer avec un Newton très ouvert.

Un autre inconvénient du télescope de Newton, et de tous les télescopes, est la présence (pour autant indispensable !!!) du miroir secondaire et de son

support, l'araignée, qui empêche à toute la surface du miroir primaire de recevoir la précieuse lumière des objets observés. Cette obstruction centrale engendre une légère perte de luminosité et de contraste par rapport à une lunette de même diamètre.

Un télescope de Newton possède en principe un tube ouvert. Cette caractéristique entraîne un inconvénient majeur ; il se produit un échange thermique entre l'intérieur du tube et l'extérieur tant que la température entre les deux n'est pas équilibrée : cette turbulence interne peut durer plus d'une heure et limite le rendement de l'instrument, notamment en photographie planétaire.

Un Newton, comme la grande majorité des télescopes, est conçu pour être réglé optiquement par l'utilisateur. Cette opération, la collimation, qui peut quelquefois effrayer, est pourtant primordiale en astrophotographie. Si l'instrument est très souvent transporté, il est indispensable de vérifier et de refaire l'alignement des optiques.

D'autant que le Newton est l'un des instruments les plus sensibles à la décollimation. Et, contrairement à la plupart des autres formules optiques, la collimation doit se faire sur les deux miroirs.

Enfin, il faut savoir que plus un télescope possède un rapport F/D court (inférieur à 6), plus la collimation doit être précise et plus elle est délicate à réaliser.

Pour réduire leur encombrement, la majorité des fabricants propose des Newton très ouverts ($F/D < 6$). Très lumineux, ils ont pour vocation le ciel profond, mais il faut pour cela que le foyer soit accessible, ce qui n'est pas le cas de certains télescopes de Newton.

Néanmoins, les télescopes de Newton sont des instruments très polyvalents. De base, ils sont très bien adaptés à la photo stellaire, mais couplés à un système d'agrandissement optique (Barlow ou oculaire), ils donneront d'excellents résultats en photo planétaire.



Un télescope Newton de 200 mm à $f/5$. Avec sa focale primaire courte, un Newton est d'origine bien adapté à la photo stellaire. Mais, en agrandissant l'image avec une lentille de Barlow, le Newton donnera aussi de très belles images en planétaire. Au final, c'est un instrument polyvalent.

[Photo Optique-Unterlinden]

Quelques fabricants proposent des Newton spécifiquement dédiés à la photo stellaire. Il s'agit de télescopes très ouverts (entre $f/2,8$ et $f/3,8$), équipés d'un correcteur de champ pour grand capteur, qui donnent des images très fines.

LE TÉLESCOPE DE CASSEGRAIN

Inventé à la fin du XVII^e siècle, peu de temps après le télescope de Newton, le télescope de Cassegrain possède un miroir primaire parabolique percé en son centre et un miroir secondaire hyperbolique de forme convexe.

Ce dernier permet de rallonger la focale, sans avoir un tube encombrant; ce qui est un des grands avantages du télescope de Cassegrain. La focale d'un Cassegrain est donc égale à la focale du miroir primaire multipliée par le grossissement introduit par le miroir secondaire.

Un télescope de Cassegrain possède un rapport F/D plus important qu'un Newton (habituellement entre 8 et 15), mais un tube beaucoup plus court que celui-ci.

L'avantage de ce réflecteur est de posséder une longue focale; celle-ci en fait un instrument plus particulièrement dédié à l'observation et à la photographie planétaire, même s'il possède une obstruction centrale non négligeable, qui réduit un peu le contraste. En revanche, son champ assez petit et son rapport F/D important le rendent moins adapté à l'imagerie stellaire.

Sur un Cassegrain, l'alignement des optiques est assez stable, mais il faut savoir que la collimation est assez délicate à faire.

Du fait de sa formule optique qui limite son usage essentiellement au planétaire, peu de télescopes Cassegrain sont commercialisés à l'heure actuelle. On trouve quelques modèles de 150 mm à 254 mm vendus sous les marques Kepler ou TS Optics.



Télescope Cassegrain Kepler de 254 mm de diamètre à F/D 12. Il s'agit d'un instrument essentiellement destiné à l'observation et la photographie lunaire et planétaire.

[Photo Optique-Unterlinden]

LE TÉLESCOPE DE DALL-KIRKHAM

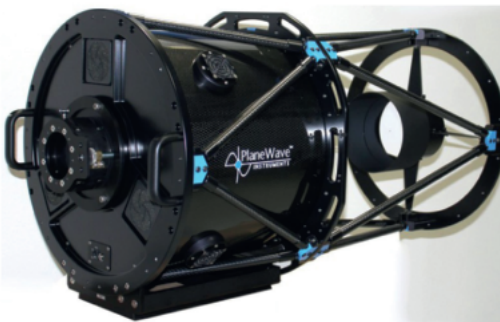
Dérivé de la formule Cassegrain, le Dall-Kirkham est composé à la base d'un miroir primaire elliptique et d'un miroir secondaire sphérique. Ce montage entraîne une coma non négligeable, ainsi qu'un champ exploitable assez petit, qui empêche par exemple de photographier la Lune en entier avec une image nette sur tout le champ.

Takahashi a popularisé cette formule optique avec sa série Mewlon. Ce sont d'excellents instruments, essentiellement destinés à la photographie planétaire, qui existent en quatre versions différentes, de 180 à 300 mm de diamètre, pour des rapports F/D compris entre 11,5 et 12.

On trouve également des Dall Kirkham modifiés, avec un correcteur de champs et un rapport F/D inférieur à 8 notamment chez Orion Optics et PlaneWave.

Cette entreprise américaine fabrique des Dall Kirkham modifiés équipés d'un correcteur qui leur donne un très grand champ corrigé, qui peut recevoir les très grands capteurs. Ces instruments, au prix élevé, sont disponibles entre 320 mm et 1 m de diamètre ! Ils possèdent un rapport F/D compris entre 6 et 8.

Ce sont des instruments très haut de gamme, d'excellente qualité optique et mécanique, possédant un F/D très polyvalents, qui les destine au planétaire comme à l'imagerie du ciel profond.



Télescope Dall-Kirkham modifié. Un correcteur situé près du foyer confère à cet instrument une grande polyvalence, qui rend ce télescope aussi performant en ciel profond qu'en planétaire. [Photo PlaneWave]

LE TÉLESCOPE DE RITCHIEY-CHRÉTIEN

Conçue au début du xx^e siècle, cette formule optique dérivée du montage Cassegrain est présente aujourd'hui sur de nombreux grands télescopes professionnels.

Longtemps cantonnée au milieu professionnel, notamment en raison de ses coûts de fabrication, la formule Ritchey-Chrétien fait partie désormais des montages que l'amateur peut acquérir. Elle présente la particularité de posséder deux miroirs de courbure hyperbolique, ce qui a pour conséquence de supprimer l'aberration de coma, que l'on retrouve sur les miroirs paraboliques. Même s'il subsiste encore quelques traces d'aberrations, comme l'astigmatisme et la courbure de champ, que l'on peut corriger avec un aplanisseur de champ, il s'agit là d'un télescope qui offre un grand champ exploitable.

Revers de la médaille, sa conception, plus complexe, entraîne un coût beaucoup plus important qu'un Schmidt-Cassegrain. De plus, la forte obstruction de la formule Ritchey-Chrétien, les limites en imagerie planétaire. Ce sont avant tout des instruments optimisés pour l'imagerie stel-



Télescope de Ritchey-Chrétien. Sa formule optique le destine particulièrement à la photographie du ciel profond. [Photo GSO]

laire, même s'ils ne sont pas habituellement très ouverts, leur rapport F/D étant bien souvent situé aux alentours de 8.

Ce sont donc des instruments haut de gamme, peu polyvalents, coûteux, mais qui excellent dans leur domaine de prédilection, la photographie stellaire, et qui sont avant tout réservés à des amateurs expérimentés.

Il y a encore quelques années, le Ritchey-Chrétien faisait partie du must de la photo stellaire. Mais aujourd'hui la très grande majorité des caméras dédiées à l'imagerie du ciel profond ou des appareils photos possèdent de petits photosites, plutôt adaptés aux instruments aux focales courtes. Il est donc beaucoup moins intéressant aujourd'hui d'acquérir une telle formule optique.

LE TÉLESCOPE DE SCHMIDT-CASSEGRAIN

Mis au point par un opticien américain, R. R. Willey, au début des années 1960, le télescope de Schmidt-Cassegrain a attendu près de 15 ans avant de s'imposer dans le monde de l'amateur.

Sa formule optique, exclusivement développée pour les amateurs, est basée sur un montage dérivé du télescope de Cassegrain, auquel a été associée une lame correctrice de Schmidt.

Le miroir primaire est sphérique et a la particularité d'être très ouvert; son rapport F/D est habituellement compris entre 2 et 2,5.

Le miroir secondaire est de forme convexe et elliptique; comme pour le télescope de Cassegrain, c'est ce dernier qui va augmenter la focale du miroir primaire, par un coefficient multiplicateur d'environ cinq.

La lame de Schmidt, qui ferme le tube et maintient le miroir secondaire, possède une forme particulière, qui lui permet de corriger les défauts du miroir primaire.

En effet, un miroir primaire sphérique très ouvert présente une énorme aberration de sphéri-

cité qui rendrait l'instrument quasi inexploitable sans la présence de cette lame correctrice.

En théorie, le télescope de Schmidt-Cassegrain devrait être, grâce à ce montage optique judicieux, un télescope presque parfait.

Mais en pratique, pour réduire l'encombrement du tube, les constructeurs n'ont pas placé la lame de Schmidt au bon endroit.

Pour remplir correctement son rôle, cette lame devrait se situer exactement au centre de courbure du miroir primaire, c'est-à-dire beaucoup plus loin du miroir principal qu'elle ne l'est en pratique.

Les Schmidt-Cassegrain présentent un autre défaut optique, pénalisant avant tout en photo planétaire: le sphérochromatisme. En réalité, la lame de fermeture corrige efficacement l'aberration sphérique sur une seule longueur d'onde correspondant au vert. Cela se traduit par des performances optiques fortement dégradées sur la couche bleue, phénomène bien visible sur cette couche couleur en imagerie planétaire.

Finalement, on obtient un télescope atypique, un réfracto-réflexeur, qui en raison du mauvais positionnement de sa lame et de la courbure du miroir secondaire, présente des défauts optiques, mais qui ne sont pas rédhibitoires.

Le deuxième défaut des télescopes de Schmidt-Cassegrain est une importante obstruction due à la taille du miroir secondaire, de l'ordre de 32 à 37%. Celle-ci entraîne une perte de contraste non négligeable par rapport à un Newton ou à une lunette de même diamètre.

Malgré tout, on a beaucoup exagéré sur cette obstruction il y a une vingtaine d'années. Certains amateurs affirmaient que cette obstruction réduisait considérablement l'ouverture d'un Schmidt-Cassegrain et qu'il était impossible de réaliser des clichés à haute résolution avec ce type d'instrument.

De nombreuses images prises ces dernières années avec des Schmidt-Cassegrain ont prouvé le contraire.

Vendus d'origine sans pare-buée, les Schmidt-Cassegrain sont très vulnérables à l'humidité. Il est impossible d'envisager l'observation et l'imagerie avec ce type de télescope sans l'ajout d'un pare-buée.

Le miroir primaire de ces télescopes est collimaté en usine ; l'amateur ne doit, en principe, pas y retoucher. En revanche, sur certains modèles, excepté les versions Edge, l'alignement optique n'est pas très stable. Il faut régulièrement vérifier la collimation du miroir secondaire qui ne supporte pas le moindre petit défaut d'alignement avec le primaire. Cette collimation doit être exécutée de façon très précise si l'on veut obtenir des images correctes.

Sur ces instruments, la mise au point s'effectue par déplacement du miroir primaire. Cela entraîne un défaut nommé shifting, qui se traduit par un déplacement de l'objet visé lorsque l'on fait la mise au point. Il peut devenir gênant en imagerie caméra vidéo, mais il a été considérablement réduit depuis quelques années.

Grâce à ce système particulier de mise au point, l'arrière d'un Schmidt-Cassegrain est dépourvu de tube porte-oculaire, ce qui permet de mettre un grand nombre d'accessoires derrière ce type de télescope.

Si aujourd'hui ces télescopes sont parmi les instruments les plus vendus dans le monde, c'est qu'ils présentent de nombreux atouts.

Leur principale qualité est d'être très compacts et facilement transportables (jusqu'à 200 mm de diamètre). Leur formule optique permet d'avoir une longue focale tout en ayant un tube très court, grâce à un aller-retour de la lumière dans le tube et la forme du miroir secondaire. Un télescope de Schmidt-Cassegrain de 200 mm d'ouverture possède généralement une focale de 2 000 mm pour un tube de 50 cm de long seulement.

De plus, comme ils sont fabriqués en grandes quantités, leur rapport qualité/prix est excellent surtout pour les télescopes de 200 et 254 mm de diamètre.

Ces télescopes très répandus chez les amateurs sont des instruments évolutifs, offrant une large gamme d'accessoires, qui en font des instruments polyvalents adaptés à tous les types de travaux de l'amateur : observations et imagerie planétaire ou stellaire grâce aux différents réducteurs de focale disponibles.

Celestron propose une option intéressante sur ses Schmidt-Cassegrain, pour les amateurs souhaitant faire de la photo stellaire : le Fastar. Il s'agit de retirer le miroir secondaire et de venir fixer une caméra dédiée au ciel profond ou un appareil photo directement au foyer primaire, à environ $f/2$. Ce montage se fait au moyen d'une bague



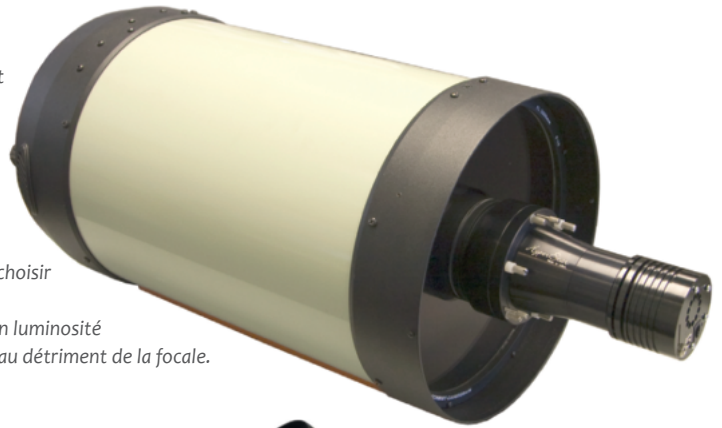
Le télescope de Schmidt-Cassegrain est un instrument très compact. De base, il est très bien adapté à l'imagerie planétaire, mais dans la mesure où il peut recevoir de nombreux accessoires, dont un réducteur de focale, c'est aussi une formule optique destinée à la photographie du ciel profond. [Photo Médas]

La fonction Fastar, développée par Celestron, est très pratique en photo stellaire. En retirant le miroir secondaire, on accède directement au foyer primaire, à environ $f/2$. Un correcteur de champ mis au point par Starizona (visible ici entre la lame de fermeture et la caméra CCD) est indispensable pour obtenir une image correcte sur tout le champ.

Pour limiter l'obstruction, il est nécessaire de choisir un appareil de prise de vue peu encombrant.

Cette configuration apporte un gain énorme en luminosité et réduit considérablement le temps de pose, au détriment de la focale.

[Document Starizona]



d'adaptation et d'un correcteur de champ et permet alors d'avoir un instrument extrêmement lumineux, mais à la focale réduite.

Le système permettant de transformer son Schmidt-Cassegrain en instrument très lumineux s'appelle l'HyperStar.

Le rapport F/D devenant alors très faible, les temps en sont fortement raccourcis, puisqu'une pose d'une minute à $f/2$ est l'équivalent en signal d'une pose de 30 minutes, au foyer primaire à $f/10$.

Pour limiter l'obstruction, suivant le diamètre de l'instrument, il faudra choisir un appareil de prise de vue bien adapté.

Aujourd'hui, on trouve sur le marché des Schmidt-Cassegrain de 125 à 406 mm de diamètre pour un rapport F/D voisin de 10. Ces télescopes sont disponibles soit sur des montures équatoriales allemandes motorisées, soit sur des montures à fourche altazimutales équipées de moteurs et d'un ordinateur de bord qui assure le suivi de l'instrument et le pointage automatique des objets, ou encore en tube seul.

Les rares fabricants de ce type d'instruments proposent depuis quelques années des Schmidt-Cassegrain modifiés. La série Edge HD de Celestron possède un correcteur/aplanisseur de champs qui donne des images où la coma est très fortement réduite. Munis d'un réducteur de focale spécifique, ce sont des instruments très bien adaptés à la photo stellaire.



Celestron (ici un télescope de la série Edge) propose des Schmidt-Cassegrain quasiment exempts d'un défaut coma, ce qui les rend bien adaptés à la photo stellaire, à condition de les équiper d'un réducteur de focale adapté. [Photo Médas]

LE TÉLESCOPE ROWE-ACKERMANN

Probablement inspiré par le succès de la formule HyperStar, Celestron a développé un télescope exclusivement dédié à l'astrophotographie, le RASA, pour Rowe-Ackermann Schmidt Astrograph.

Il s'agit de télescopes dénués de miroir secondaire et de porte-oculaire. Le miroir primaire est de forme sphérique, dont l'aberration de sphéricité est corrigée par une lame de Schmidt. À la place du miroir secondaire, il y a un correcteur de coma et de champ à quatre lentilles sur lequel vient se fixer un APN ou une caméra CCD ou CMOS. Ces instruments sont proposés en trois diamètres (200 mm, 280 mm et 355 mm) et sont très lumineux puisque le rapport F/D est compris entre 2 et 2,2. De par leur conception et leur domaine d'application, les RASA rappellent les chambres de Schmidt. En effet, ce sont des instruments très lumineux, avec une focale courte, qui les destine exclusivement à la photographie stellaire grand champ.

Le 200 mm n'est pas corrigé pour les grands capteurs (supérieurs à l'APS-C), mais de toute façon, l'obstruction occasionnée par un APN ou une caméra équipée d'un capteur 24×36 mm ou plus serait très importante par rapport au diamètre de l'instrument.



Celestron propose une formule optique atypique : le RASA ou Rowe-Ackermann Schmidt Astrograph. Il s'agit d'un instrument exclusivement destiné à l'astrophotographie du ciel profond.

[Photo Celestron]

En revanche, les 280 et 355 mm ont un très grand champ corrigé pouvant recevoir les très grands capteurs du marché actuel.

LES TÉLESCOPES DE MAKUTOV-CASSEGRAIN

À l'origine, il s'agissait d'instruments exclusivement photographiques.

Les opticiens ont cherché à corriger les défauts d'un miroir primaire sphérique en introduisant une pièce optique, en apparence plus simple à construire qu'une lame de Schmidt.

C'est durant la Seconde Guerre mondiale que D. Maksutov mit au point un astrographe dont la lame de fermeture était un ménisque : la lame de Maksutov.

Le miroir primaire de cet instrument était sphérique, très ouvert (F/D de 2 à 4) et, pour corriger le défaut d'aberration de sphéricité du miroir principal, Maksutov fixa à l'avant de ce télescope un ménisque épais très courbé.

Les bons résultats obtenus avec les petites chambres photographiques de Maksutov restaient tout de même en retrait par rapport à l'extraordinaire finesse des images obtenues par une chambre de Schmidt. En outre, les télescopes photographiques de Maksutov présentaient quelques défauts : légère aberration chromatique, champ assez étroit et astigmatisme. De plus, la réalisation de ménisques de grand diamètre est techniquement complexe et coûteuse.

Pour toutes ces raisons, les chambres de Maksutov ne se sont guère répandues dans les observatoires professionnels et sont totalement absentes des catalogues de matériel astronomique pour amateur.

C'est un opticien américain du nom de Grégory qui, en 1957, mit au point un télescope dérivé de l'astrographe de Maksutov, qui pouvait également être utilisé en observation visuelle.

Il perça le miroir principal pour permettre le passage des rayons lumineux au travers et trans-

L'astrophotographie offre une perception de l'Univers inaccessible à l'œil nu. Grâce au numérique, elle est maintenant à la portée d'un plus grand nombre d'astronomes amateurs.

Le but de cet ouvrage n'est pas seulement de comparer les **différents moyens de prises de vue** disponibles actuellement sur le marché, mais aussi d'**analyser les techniques** qui leur sont associées.

Comme l'astrophotographie est aujourd'hui indissociable de l'informatique, une large part de cet ouvrage est consacrée au **traitement d'images**, essentiellement au moyen de **logiciels gratuits**.

Cette nouvelle édition propose les dernières mises à jour :

- > du **matériel** (instruments astronomiques, appareils photo numériques, smartphones, caméras vidéo, CMOS et CCD),
- > des **techniques de prise de vue**, d'**identification** et de **correction des défauts**, avec le développement du visuel assisté, des logiciels d'acquisitions gratuits comme NINA ou APT,
- > du **traitement informatique des images** (par PIPP, Autostackert!3, Astrosurface et la mise à jour des dernières fonctionnalités de Siril notamment).

Patrick Lécureuil est animateur et conférencier en astronomie. Depuis plus de vingt ans, il transmet sa passion à tous les publics. Il est l'auteur d'*Observer le ciel à l'œil nu*, de *Débuter en astronomie* et d'*Astroguide* parus chez le même éditeur.



En ligne : des tutoriels de traitement d'images
également accessibles en haute définition
par flashcodes

30,90 €

ISBN : 978-2-8073-5122-6



9 782807 351226

DBS

www.deboecksuperieur.com

Du même auteur

