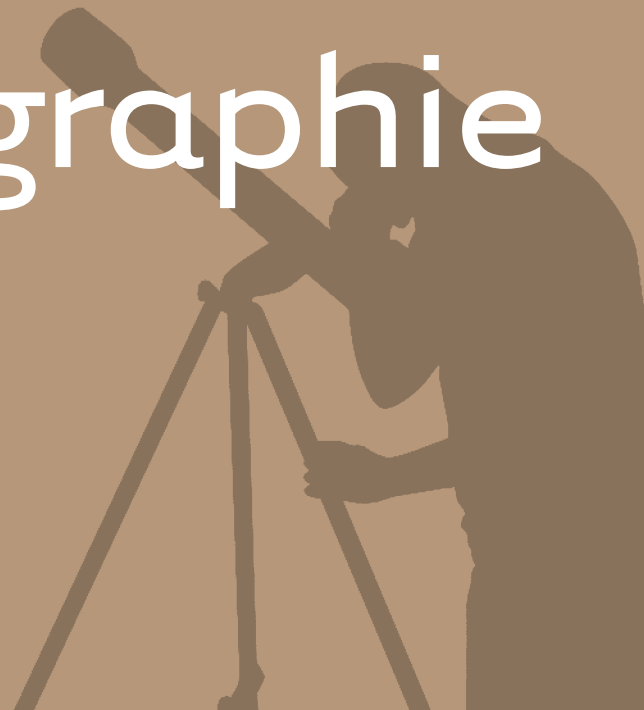


Thierry **Legault**



# Astrophotographie

EYROLLES



# Astrophotographie

#### **Chez le même éditeur**

V. GILBERT. – **Développer ses fichiers RAW.**  
N°11784, 2006, 340 pages.

B. FRASER. – **Camera Raw et Photoshop CS2.**  
N°11755, 2006, 318 pages.

M. EVENING. – **Photoshop CS2 pour les photographes.**  
N°11700, 2006, 516 pages + CD-Rom.

J. DELMAS. – **La gestion de la couleur pour les photographes.**  
N°11613, 2005, 214 pages.

A. FRICH. – **La photographie panoramique.**  
N°11354, 2004, 184 pages.

T. DEHAN, S. SENECHAL. – **Guide de la photographie ancienne.**  
N°11391, 2004, 124 pages.

#### **Aux éditions VM**

R. BOUILLOT. – **La pratique du reflex numérique.**  
N°67269, 2006, 464 pages.

V. LUC. – **Maîtriser le Canon EOS 350D.**  
N°67268, 2006, 316 pages.

V. LUC. – **Maîtriser le Nikon D50.**  
N°67271, 2006, 312 pages.

V. LUC. – **Maîtriser le Nikon D200.**  
*À paraître.*

I. GUILLEN, A. GUILLEN. – **La photo numérique sous-marine – Guide pratique.**  
N°67251, 2004, 182 pages + CD-Rom.

I. GUILLEN, A. GUILLEN. – **La photo numérique sous-marine – Guide expert.**  
N°67267, 2005, 228 pages.

E. BALANÇA. – **La photo d'animaux – Guide pratique.**  
N°67255, 2006, 182 pages.



# Astrophotographie

EYROLLES



Éditions Eyrolles  
61, bd Saint-Germain  
75240 Paris Cedex 05  
[www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)

Photographies et documents iconographiques reproduits dans l'ouvrage : tous droits réservés.

Sauf mention contraire :

- toutes les photographies du ciel sont de Thierry Legault ;
- toutes les photographies de matériel astronomique sont d'Arnaud Frich et de Thierry Legault.



Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reproduction, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'Éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.



# Remerciements

**J**e remercie les pionniers de l'astrophotographie argentique et numérique, ceux pour qui les limites sont faites pour être dépassées, en particulier Jean Dragesco, Christian Arsidi, Gérard Thérin et Robert Gendler.

Je remercie les auteurs qui m'ont donné l'envie d'observer et de photographier le ciel, notamment Pierre Bourge, Jean Dragesco, Serge Brunier et Patrick Martinez.

Je remercie les amateurs réalisateurs de logiciels astronomiques pour nous donner les moyens de tirer le maximum de nos images en étant toujours à l'écoute des utilisateurs, et en premier lieu Christian Buil (Iris) et Cyril Cavadore (Prism). Je remercie tout spécialement Christian Buil qui m'a donné l'envie de me lancer dans la photographie numérique et qui m'a aidé à le faire grâce ses caméras CCD, à ses logiciels et à ses écrits (livre, documentation, site web), qui m'ont tant appris et qui sont encore pour moi une source inépuisable d'information.

Je remercie Arnaud Frich pour avoir proposé l'idée de ce livre aux éditions Eyrolles et à moi-même, et pour son aide précieuse lors de la réalisation des photographies de matériel astronomique.

Je remercie les éditions Eyrolles pour m'avoir permis de réaliser cet ouvrage tout en me laissant une grande liberté dans sa conception. Je remercie tout spécialement mon editrice, Stéphanie Poisson, pour sa patience, sa gentillesse, ses précieux conseils et sa minutieuse relecture.

Je remercie les distributeurs de matériel astronomique pour leur concours, et en particulier Médas Instruments, Optique Unterlinden et la Maison de l'Astronomie pour nous avoir reçus et avoir mis à notre disposition leur matériel pour en réaliser des photographies.

Je remercie mes stagiaires du Festival d'Astronomie de Haute Maurienne et tous les internautes dont les questions si pertinentes m'ont, au fil des années, aidé à concevoir cet ouvrage de telle manière qu'il y réponde le plus clairement possible. Je remercie également tous les astronomes amateurs qui m'ont exprimé leurs encouragements lors de conférences, de rencontres, de stages ou par Internet.

Je remercie enfin les personnes et les organismes qui nous ont aidés à photographier le ciel austral et plusieurs éclipses totales dans les meilleures conditions, et en particulier Serge Koutchmy, Jaime Vilanga, le ministère de la Recherche et de la Technologie de l'Angola, l'ambassade de France à Luanda et l'université de Luanda, ainsi que toutes les personnes qui nous ont accueillis à Tchivinguiro.

# Sommaire

Avant-propos .....	XI
--------------------	----

## Chapitre

1



L'astrophotographie sans instrument .....	1
---	---

Appareils et réglages .....	2
Installation et réglages .....	3

Les sujets .....	4
Rapprochements de planètes .....	4
Fin croissant lunaire et lumière cendrée .....	4
Constellations et Voie Lactée .....	5
Comètes .....	8
Rotations et filés d'étoiles .....	9
Étoiles filantes .....	11
Lumière zodiacale .....	11
Aurores polaires .....	11
Éclipses de Lune et de Soleil .....	12
Phénomènes atmosphériques .....	13
Satellites artificiels .....	13

La retouche des images .....	15
Correction du fond de ciel .....	15
Ajustement des lumières .....	15
Retouches cosmétiques .....	15

## Chapitre

2



Les appareils de prise de vue et leur fonctionnement .....	17
--	----

Les capteurs numériques .....	18
Structure d'un capteur .....	18
Acquisition des images .....	19
Rendement quantique et sensibilité spectrale .....	20
Les capteurs couleur .....	21

Les appareils .....	23
Caméras CCD .....	23
Appareils numériques (APN) .....	24
Webcams et caméras vidéo .....	26
Le matériel informatique .....	27
L'impression des images .....	27



## Chapitre 3



### Défauts et correction des images.....29

Le signal thermique.....30
Causes et caractéristiques du signal thermique.....30
Correction du signal thermique.....31

Les défauts d'uniformité.....32
Caractéristiques des défauts d'uniformité.....32
Correction des défauts d'uniformité.....33

Prétraitement des images.....34
---------------------------------

Les bruits et leur réduction.....35
Les sources de bruit.....35
Améliorer le rapport signal sur bruit.....36
Méthodes de compositage.....37
Réduction du bruit sur une image unique.....39
Conseils pour les images de prétraitement.....39

## Chapitre 4



### Techniques instrumentales.....41

Monter l'appareil sur un instrument.....42
Montage en parallèle.....42
Montage au foyer de l'instrument.....43
Montage avec système grandissant.....44

Montage avec système réducteur.....45
Montage afocal.....46
Montages particuliers sur un objectif photographique.....47

### Calculer le champ et l'échantillonnage.....48

Calculer le champ.....48
Calculer l'échantillonnage et la taille des objets.....48

### Le réglage optique des instruments.....49

Conseils pour un réglage optimal.....49
Quel réglage pour quel instrument ?.....49

### La mise au point.....50

La tolérance de mise au point.....50
Les systèmes de mise au point.....51
Techniques et aides à la mise au point.....52

## Chapitre 5



### Les planètes et la Lune.....55

#### Instruments et résolution.....56

Où sont les limites de résolution ?.....56
Les instruments pour la photographie planétaire.....57
L'aberration chromatique.....57
L'obstruction centrale.....58
La collimation.....59
Montures et suivi.....59
L'atmosphère.....60

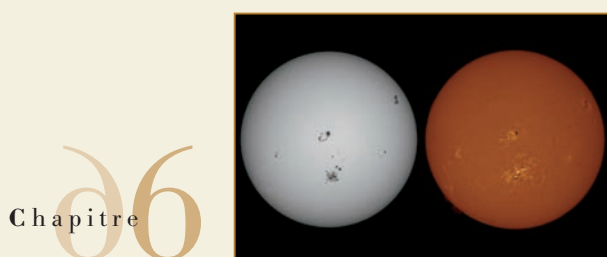
#### Appareils et réglages.....62

Focale et échantillonnage.....63
La prise de vue.....64

#### Le traitement des images.....65

Sélection des meilleures images.....65
Prétraitements.....66
Recentrage et compositage des images.....66
Amplification des détails.....66
Réglage des couleurs.....67

Animations .....	68
Images en stéréo .....	68
À quoi sert le traitement d'image ? .....	69
<b>Les planètes et leurs satellites</b> .....	70
Mercure .....	70
Vénus .....	70
Mars .....	71
Jupiter .....	71
Saturne .....	72
Uranus et Neptune .....	72
Pluton .....	72
Les satellites des planètes .....	72
<b>La photographie de la Lune</b> .....	73
La Lune en gros plan .....	73
Le mouvement propre lunaire .....	74
La Lune en entier .....	75
La lumière cendrée .....	76
Les éclipses de Lune .....	77
Les occultations lunaires .....	77



<b>Le Soleil</b> .....	79
<b>Le Soleil en lumière blanche</b> .....	80
Le filtrage .....	80
Appareils, prise de vue et traitement .....	82
<b>Le Soleil en H<math>\alpha</math></b> .....	83
Le filtre interférentiel H $\alpha$ .....	85
Le coronographe .....	86
Appareils, prise de vue et traitement .....	87
<b>Les éclipses de Soleil</b> .....	89
<b>Les transits</b> .....	91

## Chapitre 7



<b>Le ciel profond</b> .....	93
<b>Les instruments pour la photographie du ciel profond</b> .....	94
Rapport F/D et focale .....	94
La couverture de champ .....	95
<b>La collimation</b> .....	100
<b>Les montures</b> .....	100
Monture fixe .....	100
Monture altazimutale motorisée .....	100
Monture équatoriale motorisée .....	100
<b>L'alignement polaire</b> .....	102
Le viseur polaire .....	103
L'alignement polaire informatisé .....	103
L'alignement au chercheur .....	104
Les méthodes d'affinage de l'alignement polaire .....	104
<b>Les erreurs de suivi</b> .....	105
L'erreur périodique .....	105
Les autres erreurs .....	106
<b>Le guidage</b> .....	106
Guidage parallèle .....	107
Guidage par diviseur optique .....	107
Guidage visuel et autoguidage .....	108
<b>Les objets du ciel profond</b> .....	111
Les étoiles .....	111
Les nébuleuses diffuses .....	112
Les nébuleuses planétaires .....	114
Les galaxies .....	114
Les comètes .....	116
Les astéroïdes .....	117
<b>L'atmosphère</b> .....	118



Couleur, noir & blanc et filtrage .....	118
Les filtres à large bande .....	118
Les filtres à bande étroite .....	120
Les filtres anti-pollution .....	121
APN, Ha et filtre anti-infrarouge .....	121
Choisir et régler son appareil .....	122
APN ou caméra CCD ? .....	123
Quel temps de pose ? .....	124
Les autres réglages .....	124
La recherche des objets .....	125
Le chercheur .....	125
Le centrage à l'oculaire .....	125
La visée directe avec un APN .....	125
Les cercles de coordonnées .....	125
Le système GOTO .....	125
La prise de vue .....	125
Préparer sa séance de photographie .....	126
La technique du shift-and-add .....	127
Le traitement des images .....	127
Prétraitements .....	127
Recentrage et compositage des images .....	127
Fond de ciel et gradients .....	128
Amélioration de la netteté .....	129
Harmonisation des lumières .....	129
Retouches cosmétiques .....	130
Mosaïques .....	130
Animations .....	130
Réglage des seuils .....	130
Le traitement des couleurs .....	131
Pour les étoiles et les galaxies photographiées avec capteur couleur .....	131
Pour les étoiles et les galaxies photographiées avec capteur monochrome et filtres RVB .....	132
Pour les nébuleuses photographiées avec capteur couleur .....	133
Pour les nébuleuses photographiées avec capteur monochrome et filtres .....	133

## Annexes .....

A1 - Les images numériques .....	137
Formats les plus courants .....	137
Visualisation des images .....	139
Opérations courantes sur une image .....	139
A2 - Matériels et logiciels .....	140
Caméras CCD et vidéo .....	140
Filtres et accessoires photographiques .....	141
Logiciels astronomiques .....	141
A3 - Du capteur à l'image .....	141
Lecture de l'image .....	141
Obtention d'une image en couleurs .....	142
Le mode noir et blanc .....	143
A4 - Les principales causes des défauts d'uniformité et leurs remèdes .....	143
Le vignetage .....	143
Les poussières .....	145
A5 - Contrôler et régler sa monture équatoriale .....	145
Mesurer son erreur périodique .....	145
Régler sa monture .....	146
A6 - Calibrer un capteur et un jeu de filtres RVB .....	146
A7 - Réaliser un chapelet d'éclipse .....	147
Préparer la prise de vue .....	147
Assembler les images .....	147
A8 - Optimiser les paramètres d'un APN .....	148
A9 - Traduction de quelques termes techniques .....	149







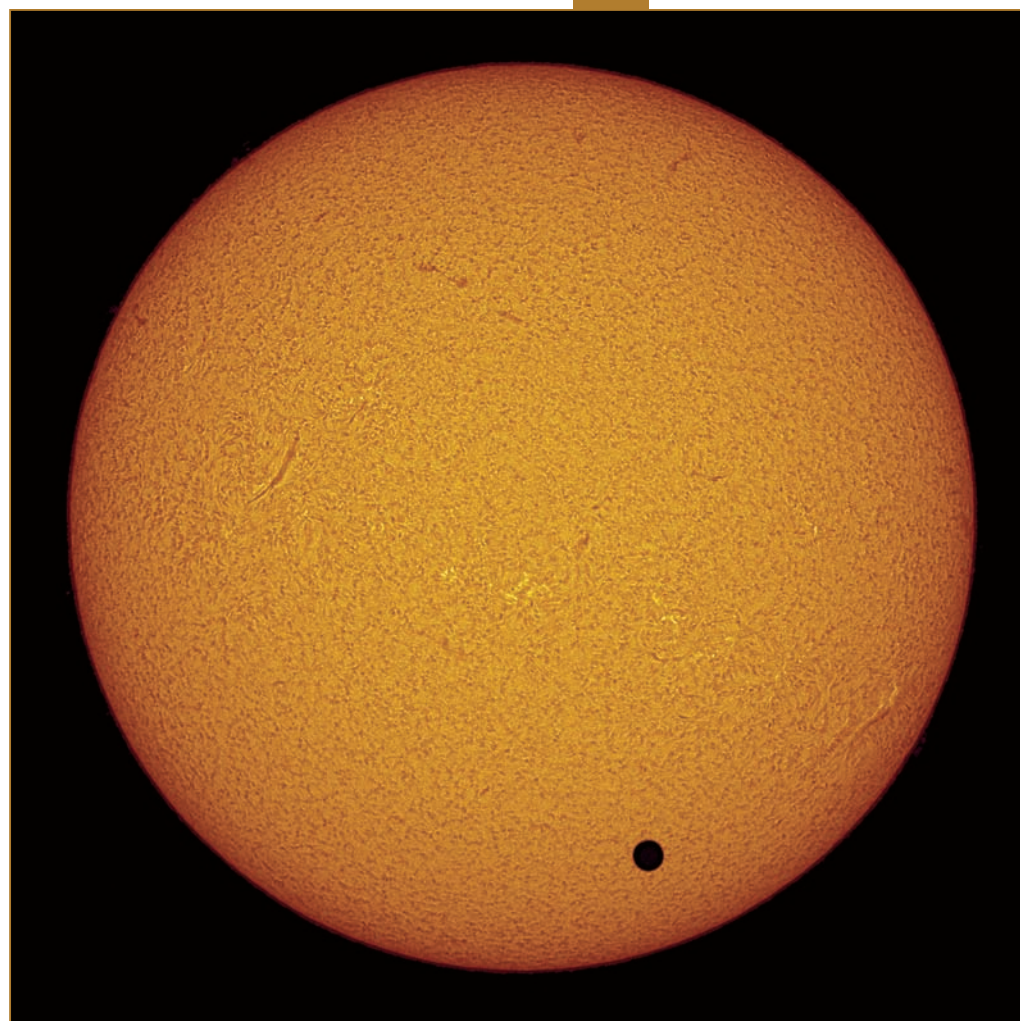
# Avant-propos

L'ouvrez les yeux une chaude nuit d'été : les étoiles sont là, à votre portée, elles n'attendent que d'être photographiées. Éloignez-vous des lumières des villes, placez votre appareil photo sur un trépied, réglez le zoom en position grand-angle, choisissez une constellation ou bien visez au hasard vers la Voie Lactée. Effectuez une mise au point manuelle puis lancez une pose d'une trentaine de secondes. Bravo, vous venez de réaliser votre première photographie astronomique ! Si elle vous plaît et que vous avez envie d'aller plus loin, ce livre est fait pour vous. Si elle ne vous plaît pas et que vous avez envie de comprendre ses défauts et de l'améliorer, ce livre est également fait pour vous.

Vous avez en mains l'essentiel de ce que j'ai appris et expérimenté durant plus d'une douzaine d'années d'utilisation d'instruments, d'appareils numériques, de caméras CCD, de webcams et de logiciels de tous types. Pressentant, comme beaucoup, que l'apparition des capteurs numériques marquait le début d'une ère nouvelle en astronomie d'amateur, je me suis procuré dès 1993 ma première caméra CCD. C'est avec le même enthousiasme que je continue aujourd'hui à photographier le ciel sous toutes ses facettes. Il faut dire que la révolution numérique a tenu ses promesses : les résultats obtenus de nos jours par nombre d'amateurs surpassent les photographies prises il y a quelques décennies depuis les grands observatoires.

Ne soyez pas effrayé par le nombre de pages de ce livre, il est lié à l'étendue du sujet et à l'extrême diversité des objets célestes : on ne photographie pas une galaxie de la même façon qu'une planète ou qu'une éclipse. Les focales utilisées pour la photographie du ciel entier (page 7) et pour celle de Saturne (page 56) diffèrent de plus d'un facteur mille ! En outre, la gamme des équipements de prise de vue disponibles est devenue très large et il était indispensable d'évoquer tous les types de matériels couramment utilisés en astrophotographie. Par exemple, les explications sur les avantages et les inconvénients des lunettes astronomiques ne vous concernent pas si vous possédez un télescope de Newton – à moins que vous ne décidiez, à la lecture de ces informations, de changer d'instrument ! Si j'ai choisi de traiter simultanément des différents types d'appareils, c'est que la réalisation et le traitement des photographies du ciel avec chacun d'entre eux présentent bien plus de points communs que de différences.

J'ai conçu ce livre pour qu'il soit le plus complet et auto-suffisant possible. Néanmoins, ce n'est pas un cours de photographie numérique, d'informatique ou d'astronomie générale : la lecture de certains ouvrages cités en bibliographie pourra donc se révéler utile. Quoi qu'il en soit, nul besoin d'être opticien ou informaticien pour réussir de magnifiques clichés du ciel : l'astrophotographie est à la portée de tous. Mais vous ne lirez nulle part dans ce livre que vous allez obtenir d'un coup de baguette magique des images semblables

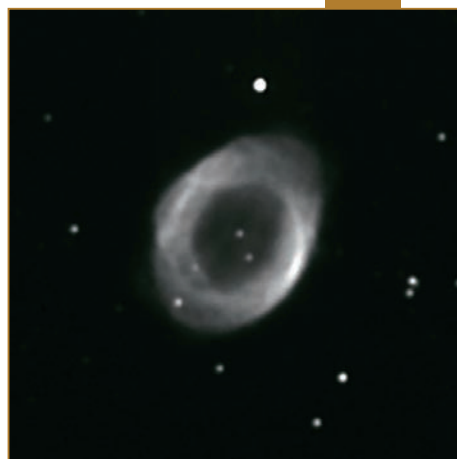


à celles qui illustrent les magazines et les ouvrages d'astronomie. Certains sujets sont faciles à photographier et réclament peu de matériel, d'autres nécessitent une instrumentation un peu plus complexe et relativement coûteuse. Surtout, au-delà des aspects purement matériels, n'oubliez jamais qu'un maillon incontournable de la chaîne de prise de vue c'est vous. Ne brûlez pas les étapes : à bien des égards, un équipement astrophotographique peut se comparer à un instrument de musique, tous deux nécessitent un peu d'apprentissage et de persévérance, plus un soupçon de curiosité et de bon sens. Combien en a-t-on vu, de ces amateurs victimes du syndrome du cavalier (« quand je tombe c'est toujours par la faute de mon cheval ») et qui, en achetant un équipement plus gros, plus cher et en théorie plus performant, pensaient s'offrir en même temps la garantie de

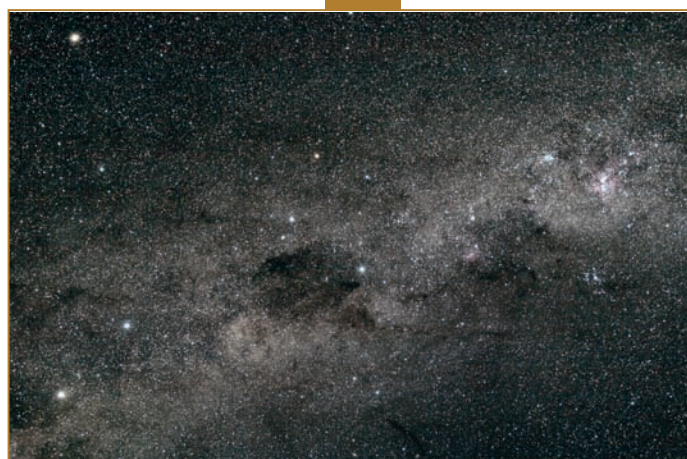
*Ce disque noir sur le Soleil n'est pas une tache mais la planète Vénus, photographiée selon les techniques décrites au chapitre 6, lors de l'un de ses rarissimes transits (8 juin 2004). Après celui du 6 juin 2012, il faudra attendre l'an 2117 pour revoir le disque de Vénus se profiler devant le Soleil.*



résultats meilleurs que ceux que leur procurait un télescope ou un appareil qu'ils n'avaient pas pris le temps d'approprier...



*Cette image de la nébuleuse annulaire de la Lyre revêt pour moi une importance particulière : après plusieurs nuits aux résultats peu convaincants, c'est ma première véritable image de ciel profond, réalisée à l'aide d'une caméra CCD et d'un télescope au printemps 1994. C'est elle qui m'a encouragé à persévérer en astrophotographie.*



*La Voie Lactée australe, ici photographiée à l'aide d'un reflex numérique, parcourt les magnifiques constellations de la Croix du Sud, du Centaure et de la Carène.*

Vous ne trouverez pas non plus ici de panorama exhaustif ni de mode d'emploi détaillé des matériels et logiciels disponibles sur le marché. Ceux-ci étant de plus en plus nombreux et évoluant constamment, ce livre ne pourrait être exhaustif et deviendrait, sur ces aspects, rapidement obsolète. Si j'ai cité les marques et les références de certains d'entre eux, c'est pour mettre en exergue les caractéristiques particulières dont ils sont dotés. Mais qu'un instrument, un appareil ou un logiciel précis ne soit pas cité ne signifie pas que je le déconseille ou qu'il est inutile ! Je me suis, en revanche, attaché à décrire les notions essentielles et les techniques générales dont vous aurez besoin aujourd'hui ou dans dix ans, ainsi que les solutions aux petits problèmes que, comme moi, vous ne manquerez pas de rencontrer au fil de vos expériences, que ce soit lors de votre première soirée d'astrophotographie ou lors de la centième, s'il y a une centième ; vous avez parfaitement le droit de ne pratiquer l'astrophotographie que deux nuits par an,

pendant vos vacances. Dans ce cas, vos exigences et vos moyens techniques ne seront pas les mêmes que ceux de l'astrophotographe passionné qui passe plusieurs nuits par mois aux commandes de son instrument et qui recherche le meilleur résultat possible.

Armé de ces notions de base, vous serez en mesure de déterminer vous-même, à partir des brochures des fabricants et des revendeurs et en faisant fi des arguments purement publicitaires et des idées reçues, l'équipement le plus adapté à vos envies, à vos contraintes et à votre budget. Vous serez également capable de retrouver et surtout de mettre en œuvre à bon escient les traitements d'image décrits dans ce livre, et cela quel que soit le logiciel que vous aurez choisi. Découvrez et expérimentez l'astrophotographie à votre rythme et avec le matériel dont vous disposez : ne tentez pas d'appliquer dès le premier jour toutes les techniques décrites dans ce livre et ne vous précipitez pas pour acheter tous les équipements qui y sont cités, mais cherchez-y simplement les réponses à vos questions au fur et à mesure qu'elles se présenteront. Je souhaite aussi que cet ouvrage contribue à éduquer votre vision afin que vous soyez en mesure de déterminer, sur vos photographies ou sur celles des autres, quels sont les points forts et, surtout, les points à améliorer et la manière d'y parvenir. Tout en se souvenant qu'un résultat ne peut s'évaluer qu'en tenant compte de la puissance des moyens employés.

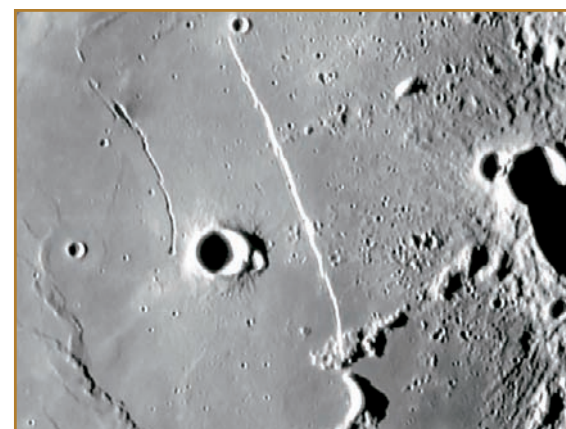
Je me suis attaché à expliquer, aussi souvent que possible, le pourquoi des choses : en effet, les « recettes de cuisine » que l'on applique aveuglément procurent rarement de bons résultats, surtout en astrophotographie où chaque situation est particulière. J'ai tenu à en rester à un niveau technique et mathématique modeste, en limitant le nombre de formules et leur complexité : nous n'irons pas plus loin



*La galaxie NGC5128 (Centaurus A), photographiée à l'aide d'une caméra CCD et d'une lunette astronomique selon les techniques décrites au chapitre 7.*

que la racine carrée. Surtout, je me suis concentré sur les notions essentielles et les techniques incontournables, celles qui ont fait leurs preuves et ont démontré leur efficacité sur le terrain ; c'est volontairement que j'ai fait l'impasse sur des points dont l'utilité pratique reste à démontrer. Ainsi, je ne décrirai pas tous les traitements d'image possibles et imaginables, je me concentrerai sur ceux qui permettent d'améliorer les photographies astronomiques d'une manière tangible. Enfin, nous nous en tiendrons – et c'est déjà beaucoup – à la prise de vue et au traitement des photographies réalisées dans un but esthétique, ce qu'on appelle couramment les « belles images » ; l'exploitation des photographies à des fins de compréhension des mécanismes physiques ou de contribution à la recherche scientifique est un thème si vaste et si passionnant qu'un livre entier pourrait lui être dédié (voir l'encadré « Un pas vers la science »).

Grâce au progrès fulgurant des moyens techniques, l'astrophotographie n'a jamais été aussi facile et performante qu'aujourd'hui. Puisse ce livre vous aider dans cette passionnante aventure !



*Gros plan sur le Mur Droit obtenu à l'aide d'une webcam sur un télescope, selon les techniques décrites au chapitre 5.*



# Comment lire ce livre ?

Pour aborder en douceur la photographie astronomique et vous familiariser avec la prise de vue nocturne, lisez le chapitre 1 qui vous apprendra comment photographier, avec un simple appareil photo, les objets et phénomènes célestes que vous voyez à l'œil nu.

Si vous possédez un instrument astronomique ou que vous envisagez son acquisition, ou encore si vous pratiquez déjà l'astrophotographie et que vous souhaitez vous perfectionner, vous trouverez décrite la photographie des planètes et de la Lune au chapitre 5, tandis que celle des étoiles, des nébuleuses et des galaxies se trouve au chapitre 7. Le chapitre 6 est dédié au Soleil et fait largement appel

aux notions vues au chapitre 5. Le chapitre 4, quant à lui, décrit les techniques générales telles que la mise au point et qui vous seront utiles pour tous les types d'objets astronomiques.

Pour connaître les différents types d'appareils de prise de vue utilisés en astronomie, leurs caractéristiques les plus importantes, leurs similitudes et leurs différences, consultez le chapitre 2. À sa suite, le chapitre 3 vous expliquera le pourquoi et le comment des techniques de base qui permettent de « nettoyer » de leurs défauts habituels les images issues de votre appareil.

## Un pas vers la science

*Pourquoi photographier le ciel en amateur, pourrait-on se demander en contemplant les extraordinaires photographies de planètes, de nébuleuses et de galaxies prises par les grands télescopes professionnels et les sondes spatiales et mises à notre disposition dans une multitude de sites Internet et de revues astronomiques. Une partie de la réponse à cette question réside dans l'envie d'obtenir ses propres clichés des astres : après tout, la plupart des touristes qui visitent les pyramides d'Égypte, les Chutes du Niagara ou la Grande Muraille de Chine en réalisent aussi des photographies, même si ces sites ont déjà été photographiés des millions de fois et que de magnifiques ouvrages leur ont été consacrés. Le plaisir de photographier le ciel est le prolongement naturel de celui de l'observation visuelle du ciel nocturne « en direct », d'autant que la photographie à longue pose offre des vues infiniment plus profondes et colorées des objets faibles que sont les nébuleuses et les galaxies.*

*Surtout, les astres évoluent et des phénomènes se produisent constamment dans le ciel. Lorsque nous sommes le témoin émerveillé d'un événement tel qu'une pluie*

*d'étoiles filantes, une éclipse, l'apparition d'une gigantesque tache solaire ou la visite d'une belle comète, le moyen d'en conserver la trace et de le partager avec les personnes qui n'ont pu l'admirer est de le photographier soi-même.*

*En outre, il est tout à fait possible de dépasser l'aspect purement esthétique (certains diront « touristique ») de l'astrophotographie et d'utiliser les photographies des astres pour étudier et comprendre leur comportement et les mécanismes physiques qui y président, voire pour en découvrir de nouveaux. Dans certains cas, les amateurs peuvent même faire œuvre utile en secondant les professionnels qui disposent certes de moyens techniques plus sophistiqués, mais en nombre si restreint qu'il leur est impossible d'exercer une surveillance complète et continue du ciel. Les thèmes d'étude sont innombrables, beaucoup ne réclament ni connaissance technique ou scientifique pointue, ni moyen technique autre que ceux décrits dans ce livre. Les logiciels astronomiques se chargent, quant à eux, des traitements adéquats : mesure de la luminosité des astres (photométrie), mesure de leur position et calcul de*

*leur trajectoire (astrométrie) ou mise en évidence de leurs raies spectrales (spectroscopie). Voici quelques thèmes parmi les plus abordés :*

- la recherche de novæ et de supernovæ, et le suivi de leurs variations de lumière ;
- la surveillance des variations de lumière des étoiles variables ;
- la recherche de nouveaux astéroïdes ou de nouvelles comètes et la détermination de leurs orbites ;
- la détermination de la forme et de la période de rotation d'astéroïdes à partir de leurs variations de lumière et des occultations d'étoiles ;
- la détermination de la composition chimique d'astres (étoiles, comètes...) et de certaines conditions physiques y régnant ;
- la surveillance de l'activité des surfaces et atmosphères planétaires des planètes principales, en particulier : évolution des bandes nuageuses et cyclones joviens, apparition de tempêtes saisonnières sur Saturne, évolution des calottes polaires et apparition des immenses tempêtes de sable à la surface de Mars ;
- le suivi des variations de l'activité solaire.







# L'astrophotographie sans instrument

Il n'est pas indispensable de posséder un instrument astronomique, lunette ou télescope, pour photographier le ciel. Les plus beaux spectacles célestes visibles à l'œil nu sont en effet à la portée de l'appareil numérique que vous utilisez pour vos photographies habituelles.

*Filé d'étoiles centré sur l'équateur céleste, réalisé depuis l'Afrique australe (Angola) avec un APN reflex équipé d'un objectif de 16 mm de focale. La photographie étant prise dans la direction de l'est, les étoiles se lèvent et leur rotation s'effectue autour du pôle sud céleste (à droite de l'image) et du pôle nord céleste (à gauche de l'image, sous l'horizon). La lueur au centre de l'image n'est ni l'aube ni la pollution lumineuse, il s'agit de la lumière zodiacale.*



Les astres et phénomènes astronomiques accessibles à un appareil photographique installé sur un trépied sont très nombreux : constellations, rotations de la voûte céleste, rassemblements de planètes, fins croissants lunaires et lumière cendrée, étoiles filantes... et même satellites artificiels. Sans compter, pour les amateurs chanceux ou voyageurs, les aurores boréales et australes, la lumière zodiacale et les éclipses de Lune ou de Soleil. C'est un terrain de chasse idéal pour le curieux du ciel et pour l'astrophotographe débutant qui pourra ainsi se familiariser avec le maniement de son appareil et la prise de vue nocturne ; l'astrophotographe confirmé y trouvera, quant à lui, l'occasion de réaliser facilement de magnifiques photographies des plus beaux spectacles et phénomènes célestes visibles à l'œil nu.

Bien sûr, tout ce qui se trouve dans le ciel n'est pas accessible à ce type de photographie : les vues détaillées des planètes, de la Lune, du Soleil, des galaxies ou des nébuleuses nécessiteront un instrument astronomique doté d'une monture équatoriale, ainsi que nous le verrons dans les chapitres suivants. En outre, les longues poses imposées par des sujets tels que les rotations et les étoiles filantes sont réservées aux plus performants et polyvalents des appareils numériques : les reflex.



Appareils numériques compact, bridge et reflex (de haut en bas).

## Appareils et réglages

On peut classer les appareils photographiques numériques (nommés « APN » dans la suite de ce livre) en deux grandes catégories : les compacts et les reflex. Les premiers sont dotés d'un zoom non interchangeable, tandis que les seconds (appelés en anglais « DSLR » pour *Digital Single Lens Reflex*) bénéficient d'une visée à travers leur objectif amovible et de fonctions plus perfectionnées... mais pas toutes utiles pour l'astrophotographie.

Parmi ces fonctions, une des plus importantes est le mode d'exposition. Ici, nul besoin de modes complexes et de programmes Expert, un seul nous intéresse : le mode manuel. Il est en effet impératif que l'astrophotographe puisse choisir librement les valeurs de vitesse d'exposition et de diaphragme, car les automatismes sont rarement fiables lorsqu'il s'agit de photographier des astres de petite dimension angulaire ou peu lumineux.

Pour la même raison, l'autofocus qui est désormais présent sur tous les appareils doit pouvoir être débrayé au profit d'un réglage manuel. Une mise au point automatique peut tout de même être tentée en centrant soigneusement une étoile ou une planète brillante dans le repère de l'autofocus, mais sans garantie de résultat car celui-ci « accroche » difficilement ce type d'objet. Dans tous les cas, il est prudent de contrôler la finesse de la photo sur l'écran LCD de l'appareil, en l'agrandissant autant que possible. Il faudra souvent passer en mode manuel et rechercher la bonne mise au point par tâtonnements.

Tous les reflex possèdent ces modes manuels d'exposition et de mise au point, mais ce n'est pas le cas de tous les compacts. Les appareils de type bridge, considérés comme des intermédiaires entre reflex et compacts (d'où leur dénomination qui signifie pont en anglais), possèdent ces modes indispensables. On trouve même, sur certains d'entre eux, un mode expert « ciel étoilé ». Séduisant de prime abord, il s'agit surtout d'un argument commercial car il se résume à désactiver le flash et l'éventuel stabilisateur d'image, et à positionner la sensibilité sur la valeur la plus basse : ce sont des réglages que l'on peut très bien effectuer sur les appareils dépourvus de ce mode. Surtout, la présence de ce mode n'implique en rien que la qualité d'image délivrée par l'appareil soit supérieure à celle de ses concurrents !



L'écran LCD de ce compact présente tous les réglages essentiels pour l'astrophotographie (colorés ici en jaune) :  
- flash désactivé ;  
- mise au point à l'infini (symbole ∞) ;

- retardateur (pas de déclencheur externe disponible pour cet appareil) ;
- exposition manuelle (symbole M) ;
- balance des blancs sur « Soleil ».

A contrario, la vitesse d'exposition la plus longue est un critère de choix important : à l'inverse des reflex dont la vitesse d'exposition n'est pas limitée, les compacts et les bridges plafonnent de 15 à 30 secondes (voire moins : une ou deux secondes pour certains), ce qui est rédhibitoire pour les sujets nécessitant des poses de plusieurs minutes comme les étoiles filantes ou les rotations du ciel. Cette limitation a une raison technique : au-delà de quelques secondes de pose, les petits capteurs des compacts délivreraient une image de très mauvaise qualité, voire inexploitable.



Sur les reflex, la longue pose est disponible via le réglage B ou « Bulb ».

Une grande ouverture d'objectif (par exemple F/2) est considérée à juste titre comme un atout sur de nombreux sujets astronomiques compte tenu de leur faible luminosité, sous réserve que l'objectif délivre une qualité d'image correcte à pleine ouverture. Sur les compacts, seuls les zooms dits optiques présentent un intérêt ; les zooms numériques consistent en un recadrage par l'appareil de la zone centrale de la photographie une fois celle-ci prise, ce qui n'est d'aucune utilité puisque cette opération peut très bien s'effectuer ultérieurement sur ordinateur. Avec un reflex, même si la mode est aux zooms, ne boudes pas les objectifs à focale fixe qui bénéficient généralement d'une ouverture plus importante et d'une qualité d'image meilleure dans les angles. Par exemple, un banal objectif de 50 mm peut offrir des performances très correctes pour un prix défiant toute concurrence.

La plupart des sujets cités plus bas nécessitent un objectif grand-angle (focales courtes) offrant un large champ de vision, seules les éclipses gagneront à être photographiées au téléobjectif (focales longues). Il est utile d'estimer le champ couvert, afin de s'assurer que l'ensemble des astres seront bien inclus dans ce champ, ou inverse-



ment pour déterminer la focale la plus adaptée aux circonstances. Le tableau ci-dessous donne, pour quelques focales et dimensions de capteur courantes, la taille du champ embrassé sur la largeur et la hauteur de l'image.

*Champ en degrés pour quelques focales d'objectif courantes. La colonne centrale du tableau est à consulter pour les reflex à capteur 24 x 36, ainsi que pour les compacts et bridges dont les focales d'objectif sont le plus souvent données en équivalence de 24 x 36 (il s'agit de la focale qu'il faudrait utiliser avec un capteur 24 x 36 pour obtenir le même champ : par exemple, le zoom du compact Casio EX-Z120 possède une plage de focales réelles 8-24 mm et une plage équivalente 38-114 mm). Le format APS-C (colonne de droite) correspond aux capteurs de reflex de coefficient de réduction 1,5 à 1,6 par rapport au 24 x 36, c'est-à-dire dont les dimensions sont approximativement 15 x 23 mm.*

Focale	Capteur	
	24 x 36 et équivalences	APS-C
16 mm	74° x 97°	50° x 71°
20 mm	62° x 84°	41° x 60°
24 mm	53° x 74°	35° x 51°
28 mm	46° x 66°	30° x 45°
36 mm	37° x 53°	24° x 35°
50 mm	27° x 40°	17° x 26°
85 mm	16° x 24°	10° x 15°
100 mm	14° x 20°	8,5° x 13°
135 mm	10° x 15°	6,5° x 10°
200 mm	7° x 10°	4,5° x 6,5°
300 mm	4,5° x 7°	3° x 4,5°

Vous l'aurez compris : si votre budget le permet, préférez un reflex qui vous offrira toutes les fonctions nécessaires avec, en prime, un confort de visée accru et une qualité d'image bien supérieure en longue pose. Si vous comptez utiliser un compact, veillez à ce qu'il dispose des fonctions minimales décrites plus haut.

### Les angles en astronomie

*En astronomie, les angles sont le plus souvent exprimés en degrés (notés °). Ses subdivisions sont la minute (notée ') qui vaut 1/60 de degré et la seconde (notée ") qui vaut 1/60 de minute. Un angle peut aussi bien exprimer la taille apparente d'un astre (par exemple, la Pleine Lune mesure 1/2°) que l'écart apparent entre deux astres (par exemple, les étoiles Castor et Pollux sont séparées d'environ 4°).*

## Installation et réglages

La photographie de sujets astronomiques nécessite impérativement que l'appareil soit installé sur un trépied. Il est en effet impossible de réaliser des photographies à main levée car les temps de pose sont toujours (sauf pour les éclipses partielles) supérieurs à une seconde ; même le stabilisateur d'image optique dont sont dotés certains appareils ou certains objectifs n'est pas suffisamment efficace pour des poses de cette durée. La fixation de l'appareil sur la rotule orientable surmontant le trépied s'effectue par l'écrout standard dont tous les appareils actuels sont heureusement dotés. Toutes les rotules photo et vidéo autorisent évidemment un cadrage horizontal, mais il est pré-



*Préférez si possible une rotule autorisant un cadrage vertical (à droite) et une visée au zénith.*

férable que celle que vous utiliserez permette également de cadrer le ciel dans le sens vertical. La solidité du trépied est à mettre en rapport avec le poids de l'appareil : un compact léger ne nécessitera pas le même trépied qu'un reflex équipé d'un long téléobjectif.

Pour les poses courtes, le déclenchement de la photographie peut s'effectuer à l'aide du bouton de l'appareil, sous réserve que le montage sur trépied soit suffisamment rigide pour ne pas vibrer lors de la manœuvre. En cas de doute, mettez en œuvre la fonction de retardateur de l'appareil. Tous les reflex et certains bridges peuvent être dotés, en option, d'un déclencheur externe filaire ou infrarouge : c'est la solution la plus pratique – mais pas toujours la moins coûteuse.



*Un déclencheur externe (l'appareil ci-dessus peut être doté des deux types de déclencheur, à fil et infrarouge) se révèle utile pour éviter toute vibration de l'appareil au déclenchement.*

Lors des prises de vue, n'oubliez pas de désactiver le flash intégré. Sélectionnez le format JPEG de plus haute qualité et de plus grande résolution. Mais si votre appareil le permet et si vous avez l'habitude de l'utiliser en photographie courante, n'hésitez pas à employer le format RAW en astrophotographie. Si un réglage d'accentuation est disponible, positionnez-le au minimum car ce traitement d'image interne à l'appareil a tendance à amplifier le bruit présent dans l'image. Évitez les plus hautes sensibilités, plus bruitées, cantonnez-vous aux sensibilités moyennes, surtout sur les compacts qu'il est préférable de maintenir au réglage le plus bas (50, 80 ou 100 ISO selon l'appareil). Positionnez toujours la balance des blancs de l'appareil sur « lumière du jour », ne la laissez pas en automatique car les couleurs que vous risqueriez d'obtenir pourraient être aussi étranges que décevantes.

L'un des avantages du numérique est la possibilité de contrôler immédiatement les images prises (cadrage, netteté et exposition), ce grâce à l'écran arrière, et de faire varier ces paramètres à volonté afin d'en déterminer les valeurs les plus appropriées. Attention toutefois, un écran LCD d'un APN vu la nuit est excessivement flatteur : les images y paraissent plus lumineuses et contrastées que sur l'écran de l'ordinateur.

## Les sujets

### Rapprochements de planètes

Il arrive parfois que plusieurs planètes visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne), éventuellement accompagnées d'une étoile brillante, soient situées dans la même région de la voûte céleste. Ces regroupements sont seulement apparents : les astres concernés semblent proches, mais il s'agit d'un effet de perspective et leurs distances à la Terre demeurent très différentes. De tels rapprochements sont des sujets très photogéniques et faciles à photographier. Ils sont généralement visibles au crépuscule, le soir vers l'ouest ou le matin vers l'est.

Les revues astronomiques annoncent de tels rapprochements à l'avance et indiquent l'écartement angulaire des astres concernés, ce qui vous permet de prévoir, à l'aide du tableau de la page 3, la meilleure focale à utiliser. Évitez cependant de cadrer de manière trop serrée le groupe d'astres, vous obtiendriez une photographie ne comportant que quelques points lumineux et sur laquelle l'échelle de l'image serait impossible à évaluer : on ne saurait pas, en regardant la photographie, s'il s'agit d'un rapprochement serré pris au téléobjectif ou d'un rapprochement large pris au grand-angle. Incluez plutôt dans votre photographie un avant-plan soigneusement choisi tel qu'un paysage ou un monument. La présence d'un fin croissant lu-

naire avec sa lumière cendrée agrémente énormément ce type de photographie, en outre il fournit une indication de l'échelle de la photographie et de l'écart angulaire des différents astres.

Le temps de pose avoisine une seconde : n'hésitez pas à le faire varier selon l'état d'avancement du crépuscule afin d'obtenir un ciel bleu foncé, ni trop clair ni complètement noir ; vous pourrez toujours ajuster ensuite sa luminosité au traitement.

### Fin croissant lunaire et lumière cendrée

Un fin croissant lunaire et sa lumière cendrée constituent un sujet particulièrement esthétique. À l'aide du tableau de la page 3, nous pouvons calculer la dimension de la Lune dans notre image. Par exemple, avec un capteur APS-C, un objectif de 100 mm couvre un champ de  $9^\circ \times 13^\circ$ . La Lune, qui mesure  $1/2^\circ$ , occupe donc  $1/26$  (soit 4 %) du grand côté de l'image. Si ce grand côté mesure 3 000 pixels, la Lune y représente 120 pixels : un téléobjectif n'est pas superflu !

Le fin croissant lunaire se photographie entre une vingtaine d'heures et trois jours avant et après la Nouvelle Lune. Pour les astrophotographes habitant l'hémisphère nord, le fin croissant du soir est plus facilement visible au printemps sur l'horizon sud-ouest alors que le fin croissant du matin est à guetter en automne au sud-est.



*Le rassemblement de planètes de mai 2002 vu au-dessus du Château de Versailles, photographié avec un bridge en 1 s de pose, zoom en position grand-angle (à gauche) et téléobjectif (à droite, après recadrage). Vénus et Mars accompagnent le fin croissant lunaire tandis que Jupiter occupe le coin supérieur gauche de la photographie. Quelques étoiles des constellations du Cocher et du Taureau sont également visibles.*





*Fin croissant lunaire photographié au téléobjectif, 36 heures après la Nouvelle Lune. Dans des conditions propices (position élevée de la Lune sur l'écliptique et bonne transparence atmosphérique), il est possible de repérer et de photographier le très fin croissant une vingtaine d'heures avant ou après la Nouvelle Lune.*

La lumière cendrée se photographie entre deux et quatre jours avant et après la Nouvelle Lune, à un moment où le ciel n'est pas trop clair mais la Lune pas trop basse sur l'horizon. Elle nécessite un temps de pose de l'ordre d'une à quelques secondes, selon l'ouverture de l'objectif employé. Le croissant sera alors surexposé mais, compte tenu de leur différence de luminosité considérable, il n'est pas possible de les obtenir tous les deux bien exposés sur la même photographie : l'œil humain est capable de tolérer des écarts de luminosité bien plus importants qu'un appareil. Comme pour les éclipses de Lune (voir page 12), l'utilisation d'un téléobjectif peut être contrecarrée par la rotation de la Terre. Quant à la photographie en gros plan de la lumière cendrée et des cratères lunaires, elle nécessite de très longues focales et par conséquent des instruments astronomiques sur monture motorisée, ainsi que nous le verrons au chapitre 5.

## Constellations et Voie Lactée

La plupart des constellations peuvent être cadrées en entier avec un objectif de 50 mm en 24x36 (ou un 35 mm avec un capteur APS-C). La photographie des constellations avec un appareil fixe ne se heurte qu'à un seul écueil, mais

*Une pose de 10 s avec un objectif de 35 mm de focale à F/2,8 sur un reflex APS-C a été suffisante pour enregistrer plus d'étoiles que celles visibles à l'œil nu dans cette région de la constellation d'Orion.*

il est de taille : la Terre tourne. Ce faisant, elle provoque le mouvement apparent de toute la voûte céleste. L'astrophotographe débutant est toujours surpris de la rapidité avec laquelle ce mouvement se fait sentir. En effet, il atteint 15" par seconde aux alentours de l'équateur céleste, soit 1/2° en deux minutes : c'est le laps de temps nécessaire à la Lune et au Soleil pour se déplacer de leur propre diamètre apparent. Cette vitesse diminue à mesure que l'on s'approche du pôle céleste : elle est de 10" par seconde à 50° de déclinaison et de 5" par seconde à 70° de déclinaison.

Reportons-nous au tableau de la page 3 et prenons l'exemple d'un objectif de 20 mm monté sur un reflex APS-C : le champ couvert est de 40° x 60°. Si ce capteur comporte 8 millions de pixels, l'image mesure environ 2 300 x 3 500 pixels. Une simple division nous indique qu'un pixel « voit » sur le ciel un angle de  $(60/3\,500) = 0,017^\circ$  ou 62" (cette information s'appelle l'échantillonnage, son calcul sera explicité au chapitre 4). Une pose de quatre secondes sur une étoile proche de l'équateur céleste suffit donc à provoquer sur l'image un bougé d'un pixel. On comprend aisément que, dans ces conditions, il ne soit guère possible de poser plus d'une vingtaine de secondes. Heureusement, une telle durée est suffisante pour enregistrer l'ensemble des étoiles visibles à l'œil nu et pour discerner la Voie Lactée, surtout si l'on prend soin d'utiliser un objectif suffisamment ouvert (F/1,8 à F/2,8). Le temps de pose maximal admissible est inversement proportionnel à la focale de l'objectif utilisé (par exemple, passer d'un 50 mm à un 24 mm permet de le doubler) et, comme nous venons de le voir, celle-ci dépend de la région du ciel visée et de la tolérance de bougé que vous vous autorisez.



*Ces vues serrées sur le centre d'Orion, de durées croissantes (même appareil que ci-contre), attestent des effets néfastes de la rotation de la Terre.*





*Même sur une pose de 10 s, la pollution lumineuse des villes n'est pas propice à la photographie des étoiles.*

### La pollution lumineuse

*Bien que l'UNESCO ait classé le ciel nocturne Patrimoine de l'humanité, de plus en plus rares sont les lieux de nos pays développés d'où il est possible de contempler et de photographier sans gêne l'univers dans lequel évolue notre petite planète. Entre les lampadaires-boules, qui éclairent plus le ciel que le sol, les éclairages permanents des monuments et des églises et les redoutables projecteurs de night-clubs qui n'illuminent que le ciel, il est en effet de plus en plus difficile de s'affranchir des méfaits d'un éclairage urbain souvent aussi inefficace qu'inutile et coûteux. Le premier outil de l'astronome européen n'est plus son télescope mais sa voiture !*

*En France, sous la houlette de l'International Dark Sky Association, l'Association nationale pour la pro-*

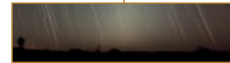
*tection du ciel nocturne (ANPCN) œuvre à la sensibilisation des éclairagistes et des collectivités pour la promotion d'un éclairage rationnel, le moins nuisible possible pour la faune nocturne, l'aviation, les astronomes... et les finances publiques. Et pour éviter qu'un jour pas si lointain « Voie Lactée » ne représente plus pour nos enfants qu'un vague nom lu au détour d'un livre. L'effort commence à porter ses fruits puisque certaines communes et des parcs naturels ont pris des mesures de protection. En fait, les solutions sont connues, il suffit de les mettre en place : extinction des monuments en seconde partie de nuit, pose de lampadaires et de projecteurs n'éclairant que vers le bas, utilisation de détecteurs de mouvement ne déclenchant l'éclairage que lorsque cela est réellement utile, etc.*

Pour le présent sujet comme pour tous ceux qui suivent (à l'exception des éclipses), il est impératif d'être installé dans un site éloigné des lumières des villes et des villages. Dans le cas contraire, les étoiles seront noyées dans un fond lumineux verdâtre ou rougeâtre provoqué

par l'ennemi numéro un des astronomes amateurs, la pollution lumineuse. Pour la même raison, la présence d'une Lune pleine ou gibbeuse est également à éviter, à moins que l'on ne souhaite profiter de sa présence pour éclairer le paysage. L'absence de nuages est évidemment une autre condition impérative : même un voile de nuages élevés n'est guère favorable à la photographie des étoiles.

*Malgré la Pleine Lune qui bleuit le ciel, les étoiles principales de la constellation du Sagittaire et de la queue du Scorpion sont visibles sur cette pose de 30 s prises dans le parc naturel des Arches (Utah, États-Unis).*





## Le fish-eye, un objectif singulier

Un objectif de type fish-eye (littéralement en anglais « œil de poisson ») est un objectif de très courte focale destiné à couvrir le plus large champ possible sur un reflex. Les plus courants procurent une image circulaire d'un diamètre angulaire de 180° capable d'embrasser, lorsqu'ils visent le zénith, la totalité de la voûte céleste. Selon le modèle de fish-eye, cette image circulaire peut occuper le petit côté, le grand côté ou la diagonale d'un capteur 24 x 36. Dans le premier cas, la totalité de la voûte céleste est présente sur l'image. Dans les autres cas, ou si le capteur est de plus petite dimension (APS-C), des parties plus ou moins grandes de la voûte céleste sont exclues ; dans cette situation, d'autres cadrages que la visée au zénith sont envisageables. Comme pour de nombreux autres objectifs, ce n'est que diaphragmé à F/5,6 ou plus qu'un fish-eye est susceptible de fournir une image fine sur tout le champ.

*Ce fish-eye biélorusse Peleng projette une image de 25 mm de diamètre dont un capteur 24 x 36 permet de recueillir la quasi-totalité. Grâce à sa très courte focale (8 mm), une pose de plusieurs dizaines de secondes est possible sans que le bougé ne devienne trop pénalisant. Un fish-eye est particulièrement sensible à la pollution lumineuse du moindre hameau situé à plusieurs kilomètres, ainsi qu'à la condensation.*



*Photographie du ciel obtenue en deux minutes de pose avec le fish-eye ci-dessus à F/D 4 et un reflex 24 x 36. On y reconnaît aisément les principales constellations (Grande Ourse, Cassiopée, Scorpion, Aigle...), ainsi que la Voie Lactée et la planète Jupiter (en haut à gauche).*



## Comètes

Les comètes très brillantes mais rares telles que Hale-Bopp, qui nous a gratifié de sa visite en 1997, sont facilement photographiables en quelques secondes de pose. Les comètes plus faibles mais néanmoins visibles à l'œil nu apparaîtront comme de petites taches floues sur des photographies réalisées selon la méthode décrite pour le sujet précédent.



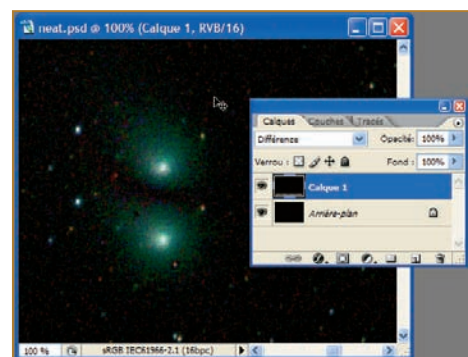
*Ces deux fragments de la comète Schwassmann-Wachmann 3 auraient été tout juste visibles à l'œil nu dans un ciel de campagne si la Pleine Lune n'avait illuminé le ciel de cette nuit de mai 2006. Néanmoins, ils ont été enregistrés sur cette pose de 15 s réalisée avec un reflex équipé d'un objectif de 50 mm diaphragmé à F/4.*

### Allonger le temps de pose ?

Pour photographier un plus grand nombre d'étoiles et mieux distinguer la Voie Lactée sur les photographies, il faut allonger le temps de pose. Pour contrecarrer la rotation de la Terre, la méthode classique consiste, comme nous le verrons au chapitre 7, à effectuer un suivi du ciel à l'aide d'une monture équatoriale motorisée.

Pour un appareil fixe, une solution consiste à combiner plusieurs poses courtes successives pour obtenir l'équivalent d'une pose longue, par exemple 20 poses successives de 15 secondes fourniront un résultat plus ou moins proche d'une pose unique de 5 minutes réalisée avec suivi du ciel. Naturellement, il faut recalibrer les images les unes par rapport aux autres avant de les combiner car les objets se sont déplacés d'une image à l'autre. Pour les logiciels comme Photoshop ou Paint Shop Pro, la méthode est la suivante :

1. Ouvrir la première et la seconde image et les afficher à pleine échelle (100 %).
2. Copier-coller la seconde sur la première en tant que Nouveau calque et régler ce calque sur le mode Différence.
3. Translater ce calque à l'aide de la fonction de déplacement manuel jusqu'à obtenir une superposition satisfaisante des deux calques (image uniformément noire), puis repasser le calque en mode Normal.
4. Opérer de même avec les images suivantes de la série, en les collant comme Nouveau calque sur l'image de travail.
5. Passer tous les calques en mode Superposition et fusionner l'ensemble.



*Le recalage des images s'effectue par déplacement de calque en mode Différence. Tant que la superposition n'est pas correcte, l'image paraît dédoublée.*

Selon la région du ciel considérée et l'objectif employé, le décalage d'une image à l'autre peut être une translation (combinaison d'un déplacement horizontal et vertical) ou une rotation (l'ensemble de l'image a légèrement tourné autour d'un point situé dans l'image ou en dehors de celle-ci). Dans ce second cas, il faudra faire subir à chaque calque, avant translation, une rotation d'un angle déterminé empiriquement. Nous verrons au chapitre 7 que certains logiciels dits « astronomiques » sont capables de recentrer en rotation et en translation puis de combiner de manière quasi automatique une série d'images, rendant ces opérations beaucoup plus rapides et précises que la méthode manuelle décrite ci-dessus.

*La comète Neat Q4 est passée dans le ciel de l'hémisphère sud en mai 2004. Une seule pose courte de 6 s (à gauche) avec un téléobjectif de 200 mm sur un APN reflex minimise le bougé dû à la rotation de la voûte céleste mais limite la visibilité de la comète à son noyau et sa chevelure. Une pose plus longue (une minute) met en évidence sa queue, au prix d'un bougé des astres (au centre). La combinaison de 10 poses successives de 6 s permet, après recalage, de bien distinguer la queue en évitant cet inconvénient (à droite).*







## Rotations et filés d'étoiles

Tournons cette source de complications qu'est la rotation de la Terre à notre avantage pour mettre en évidence, à l'aide d'un objectif grand-angle, le mouvement de la voûte céleste de manière esthétique sous la forme d'un ensemble d'arcs de cercle matérialisant les traînées des étoiles. Ici, le temps de pose s'allonge et peut atteindre plusieurs heures. Dans ces conditions, il est particulièrement important de choisir un site éloigné de toute source de pollution lumineuse : même un unique lampadaire situé à proximité n'est pas tolérable. Mais, même dans un site très sombre, l'atmosphère elle-même émet une faible lumière. Il n'est donc pas nécessaire de travailler à pleine ouverture, un diaphragme à 4 ou 5,6 est en général suffisant et limite la montée du fond de ciel, avec en prime une finesse des traînées d'étoiles meilleure qu'à pleine ouverture. La sensibilité de l'appareil peut être réglée à la valeur la plus basse.

L'appareil doit être capable de réaliser des poses très longues : ici, les reflex sont incontournables. Mais même ces appareils ne sont pas à l'abri d'un phénomène indésirable prenant naissance à l'intérieur du capteur numérique et dont nous reparlerons abondamment dans les chapitres qui suivent, car il complique la vie de tous les astrophotographes du ciel profond : le signal thermique. Il se manifeste sous la forme de points lumineux et colorés apparemment répartis dans l'image de manière aléatoire sur un nombre plus ou moins grand de pixels (les fameux pixels chauds). Sa présence dans la photographie se fait d'autant plus sentir que le temps de pose s'allonge. Il est donc souvent préférable de réaliser plusieurs photographies successives de dix à trente minutes chacune, plutôt qu'une seule pose de plusieurs heures. Ces poses seront ensuite aisément combinées par logiciel selon la méthode décrite plus loin.

Les APN proposent un mode « réduction du bruit longue pose » qui les oblige à réaliser, tout de suite après chaque pose longue, une seconde pose de même durée mais obturateur fermé, de manière à reproduire ce phénomène de pixels chauds. Cette seconde pose est soustraite automatiquement de la première par l'appareil avant enregistrement de l'image sur la carte mémoire. C'est la raison pour laquelle, lorsque ce mode est activé, un appareil semble occupé pendant deux minutes pour une pose d'une minute. Naturellement, ce mode est à proscrire pour une rotation du ciel segmentée en plusieurs poses, car les traînées d'étoiles présenteraient à l'issue du traitement un aspect haché du plus mauvais effet. L'expérience montre que l'intervalle entre deux poses successives ne doit pas excéder une seconde, faute de quoi de petites discontinuités apparaîtraient lors de l'assemblage des arcs de cercle. Pour éliminer les pixels chauds, la

solution consiste à désactiver ce mode « réduction de bruit longue pose » et à réaliser, une fois prises toutes les photographies successives de la rotation, une pose supplémentaire de même durée et selon les mêmes réglages, mais avec le bouchon en place sur l'objectif. Cette pose supplémentaire sera ensuite, au traitement, soustraite de chaque image de la rotation (voir plus bas).

Ici aussi, le cadrage et la composition de la photographie revêtent une importance considérable. Il est d'usage de viser le pôle céleste, c'est-à-dire l'étoile polaire pour les astrophotographes de l'hémisphère nord. Mais il n'est pas obligatoire de centrer le pôle dans le cadre, surtout si un bel avant-plan vient meubler l'image, par exemple un paysage montagneux, maritime ou forestier. L'angle sous-tendu par chaque traînée d'étoile autour du pôle céleste dépend du temps de pose total : il est de 15° par heure, soit un quart de tour en six heures (naturellement, un tour complet nécessiterait 24 heures). Une image originale peut également être obtenue en visant d'autres régions que le pôle, par exemple l'équateur céleste.

*Une brillante perséide traverse le champ de cette rotation d'une durée de quatre heures (8 poses de 30 min) et centrée sur le pôle nord céleste.*



La longueur des poses nous amène à nous soucier de deux autres points : la condensation (voir encadré page suivante) et l'autonomie de l'appareil. Cette dernière doit être suffisante pour lui permettre de poser en continu pendant toute la durée de la rotation car il est exclu d'interrompre la série de poses pour changer de batterie. Or, l'autonomie des piles et des batteries diminue souvent drastiquement lorsque la température baisse : il est donc prudent de réaliser des essais préliminaires et une alimentation additionnelle (secteur ou poignée *grip*) permet de s'affranchir de ce risque.





Cette rotation est entachée d'un affaiblissement progressif des étoiles dû à la condensation sur la lentille frontale de l'objectif.

À gauche, une chaufferette à fixer sous l'objectif photographique. Le modèle présenté est réutilisable : il se régénère en quelques minutes dans une casserole d'eau bouillante. À droite, une petite résistance chauffante pour matériel astronomique.



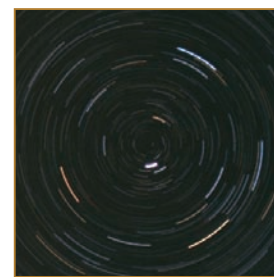
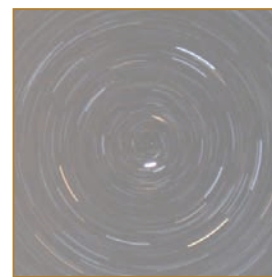
## Éviter la condensation

Laisser un objectif photographique tourné la nuit vers le ciel conduit presque inmanquablement à l'apparition de condensation sur sa lentille frontale au bout de quelques dizaines de minutes. Dans les contrées humides, ce temps se réduit à quelques minutes. Le pare-soleil fourni avec l'objectif peut retarder un peu ce phénomène mais ne permet pas de s'en affranchir. La meilleure solution consiste à chauffer très légèrement l'avant de l'objectif. Une chaufferette à main installée grâce

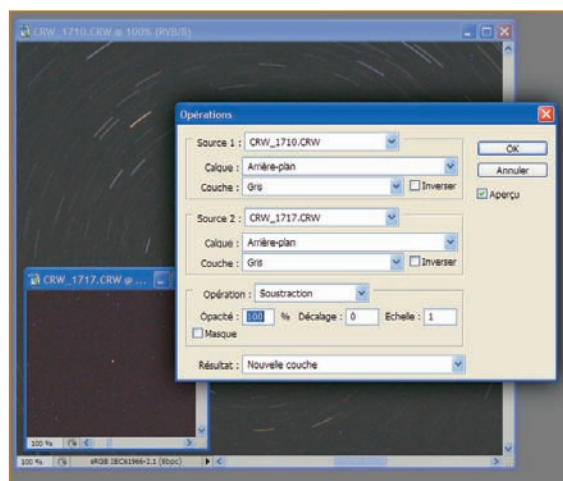
à des élastiques ou une bande Velcro fait parfaitement l'affaire pendant plusieurs heures. On trouve de telles chauffelettes dans les boutiques d'accessoires de randonnée. Le fabricant d'accessoires astronomiques canadien Kendrick propose également des résistances chauffantes de toutes longueurs pour les instruments astronomiques. Ces résistances sont à connecter à un contrôleur, alimenté en 12 volts, permettant d'ajuster la puissance dissipée au strict nécessaire.

Avant de combiner l'ensemble des images, il faut éliminer les pixels chauds de chacune d'elles en lui soustrayant la dernière image, obtenue objectif obturé. Pour ce faire, il suffit d'utiliser les possibilités de soustraction d'une image à une autre, disponibles dans tous les logiciels de retouche classiques. Dans Photoshop, il s'agit de la commande Appliquer une image du menu Image, avec la fonction Soustraction. Dans Paint Shop Pro, la fonction se nomme Traitement arithmétique, dans le menu Image également. Une fois ceci fait pour chacune des images de la rotation, il nous faut combiner la première image de la série avec la seconde, puis le résultat obtenu avec la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière. Nous allons utiliser les mêmes commandes que celles que nous venons de citer, mais cette fois avec la fonction Éclaircir pour Photoshop ou Pixels les plus clairs

pour Paint Shop Pro. Avec ces fonctions, le résultat est bien plus satisfaisant que si l'on avait effectué une simple superposition des images. Si l'appareil est resté rigoureusement fixe durant toute la durée de la rotation et si les poses ont été enchaînées sans délai, les arcs de cercle de chaque étoile devraient se raccorder sans problème.



À gauche, une combinaison des images par addition ou par superposition de calques noie les traînées d'étoiles dans le fond du ciel. À droite, grâce aux fonctions de combinaison par éclaircissement, cet inconvénient est évité.



L'élimination des pixels chauds s'effectue en soustrayant l'image ne contenant que ceux-ci.

## Étoiles filantes

Les étoiles filantes, ces fines traînées lumineuses causées par des poussières interplanétaires lors de leur rentrée dans notre atmosphère, sont de capricieuses coquettes : alors qu'elles ne durent généralement qu'une fraction de seconde, capturer ne serait-ce qu'une seule d'entre elles nécessite des poses de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes. Il est en effet absolument impossible de réagir suffisamment rapidement à la vision d'une étoile filante pour la pointer et déclencher une pose. La seule solution est d'utiliser un objectif grand-angle et de poser le plus longtemps possible en espérant qu'une étoile filante coopérative traversera le champ visé par l'appareil. La technique est, par conséquent, la même que pour une rotation d'étoiles. Il est d'ailleurs tout à fait possible de combiner ces deux types de sujet sur la même photographie.

Ici aussi, un site sans lumières parasites et une nuit sans Lune sont préférables. Les météores les plus faibles visibles à l'œil nu ne laisseront probablement pas de trace sur la photographie car ils sont trop fugitifs. Pour avoir une chance de photographier la belle traînée d'un brillant « bolide », il faut poser pendant plusieurs dizaines de minutes en ayant réglé l'objectif sur son ouverture maximale et, pour un zoom, sur sa focale la plus courte. Les périodes d'essaims d'étoiles filantes sont à privilégier : plusieurs dizaines d'essaims se produisent à date fixe et peuvent varier en intensité selon les années, le tableau ci-dessous récapitule quelques-uns des plus intenses en moyenne. Chaque essaim possède son radiant, c'est-à-dire la constellation depuis laquelle toutes les étoiles filantes semblent provenir par effet de perspective, mais il est démontré que la probabilité d'en observer une est la même quelle que soit la région du ciel observée ; l'appareil peut donc être tourné dans n'importe quelle direction.

*Quelques essaims remarquables. La période d'observation s'étend sur plusieurs jours avant et après la date indiquée.*

Essaim	Radiant	Maximum
Quadrantides	Bouvier	3 janvier
$\eta$ -Aquirides	Verseau	5 mai
Perséides	Persée	12 août
Orionides	Orion	20 octobre
Léonides	Lion	17 novembre
Géminides	Gémeaux	14 décembre

## Lumière zodiacale

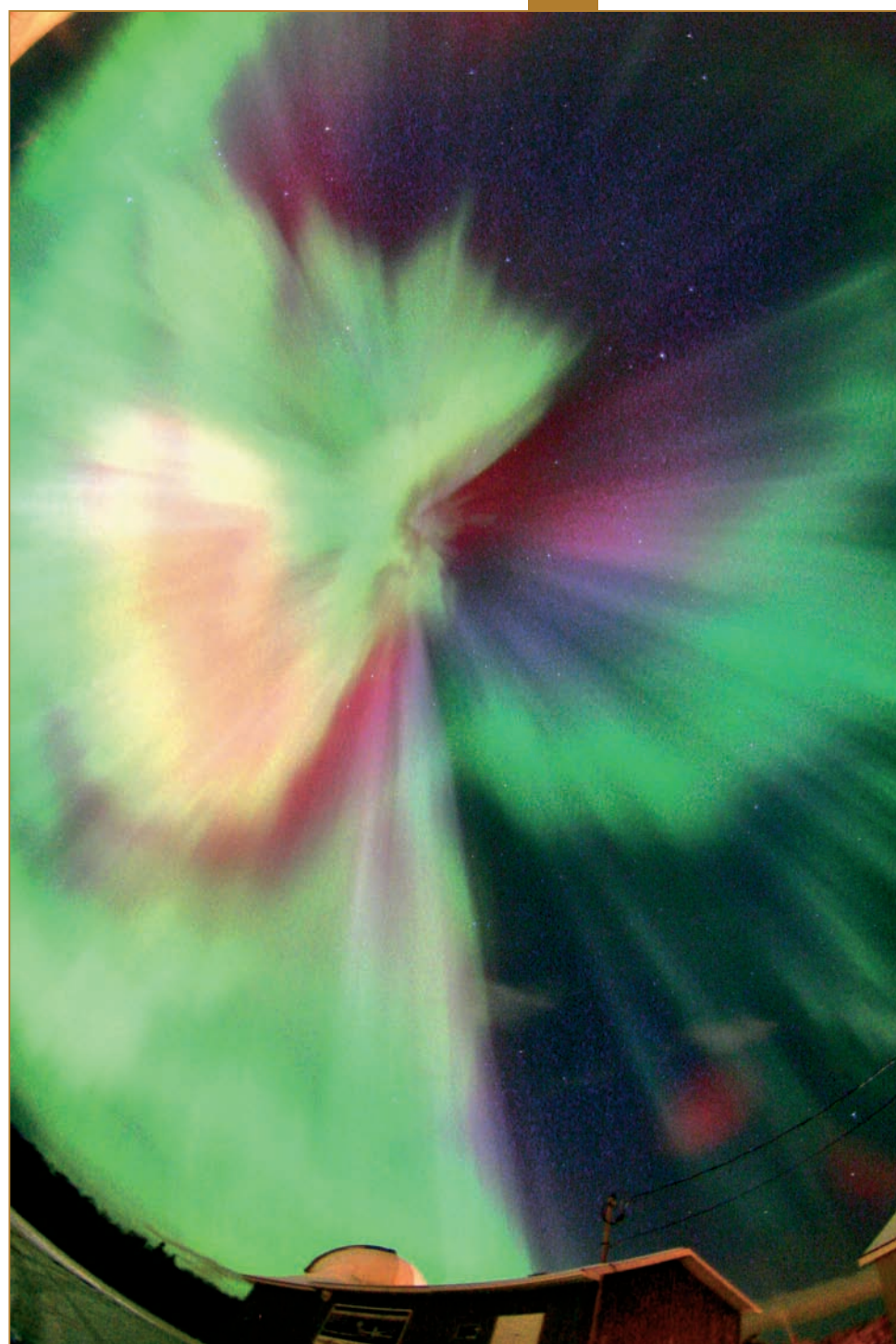
La lumière zodiacale provient de l'éclairage par le Soleil des poussières situées dans le Système Solaire, principalement au voisinage du plan de l'écliptique. Elle prend la forme d'un fuseau faiblement lumineux, photographiable en quelques minutes de pose. Mais elle n'est bien visible à l'est avant le lever du Soleil ou à l'ouest après son coucher que si la pollution lumineuse est totalement absente : les sites privilégiés sont les déserts africains, sud-américains ou australiens. En Europe de l'ouest, la lumière zodiacale est presque devenue un rêve...

## Aurores polaires

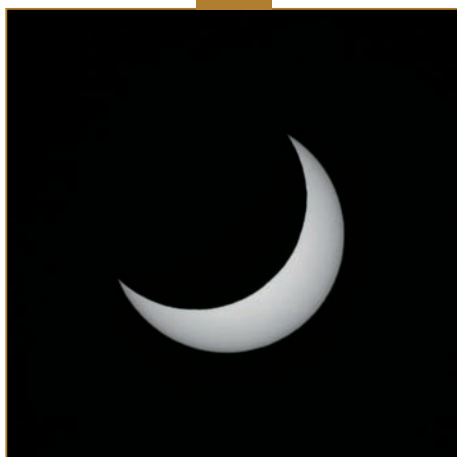
Qualifiées de boréales dans l'hémisphère nord et d'australes dans l'hémisphère sud, les aurores polaires sont dues à l'excitation des atomes de la haute atmosphère par des flots de particules rapides émises par le Soleil lors d'événements tels que les éruptions. Ces particules sont canalisées par le champ magnétique terrestre, c'est la raison pour laquelle les aurores sont plus fréquemment visibles depuis les régions de haute latitude (au-dessus de 60°), et en particu-

lier depuis les pays du cercle polaire arctique et le Canada. Elles prennent la forme de grandes draperies mouvantes d'une couleur allant généralement du vert au rouge et durent de quelques minutes à plusieurs heures. De magnifiques clichés peuvent être obtenus au grand-angle sur des poses de quelques secondes à quelques dizaines de secondes.

*Aurore polaire photographiée au fish-eye depuis le Québec. Photographie Philippe Moussette.*







*Éclipse partielle photographiée avec un téléobjectif de 300 mm équipé d'une feuille filtrante souple et un APN reflex. Pose de 1/4 000 s à F/4, 100 ISO.*

## Éclipses de Lune et de Soleil

La description de la photographie des éclipses de Lune et de Soleil (respectivement aux chapitres 5 et 6) est tout à fait applicable à un appareil fixe, y compris pour les mesures de sécurité (filtres) indispensables lors des phases partielles d'une éclipse de Soleil. Comme nous l'avons vu plus haut, l'emploi d'un téléobjectif est préférable si l'on veut obtenir un disque lunaire ou solaire d'une dimension suffisante pour y distinguer quelques détails. Les phases partielles d'une éclipse de Lune se photographient avec des temps de pose courts, de l'ordre de 1/1 000 s. Mais les phases totales ré-

clament, comme pour la lumière cendrée, des temps de pose d'une à plusieurs secondes. Il faudra donc veiller à ce que le mouvement apparent de la Lune (environ 15" par seconde) ne provoque pas un bougé de plus de quelques pixels en évaluant à l'avance, par un calcul similaire à celui que nous avons effectué plus haut, le temps de pose maximal en fonction de l'appareil et de l'objectif utilisés.

Une éclipse partielle de Soleil, de même qu'une éclipse annulaire ou les phases partielles d'une éclipse totale, nécessite l'emploi d'un filtre solaire installé à l'avant de l'objectif. Le temps de pose adéquat doit être déterminé par essais, ces essais pouvant être effectués quelques jours avant l'éclipse afin de prévenir toute mauvaise surprise. Au téléobjectif, le temps de pose pour une éclipse totale varie dans de grandes proportions selon que l'on souhaite photographier la basse couronne ou ses extensions (voir chapitre 6), mais ici aussi la rotation de la voûte céleste peut limiter la durée admissible des poses. Au grand-angle, des plans larges incluant le paysage peuvent donner sur des poses de l'ordre de la seconde de magnifiques photographies d'ambiance. N'oubliez pas de retirer le filtre solaire dès que l'éclipse est totale et de le remettre sitôt celle-ci terminée !

Quelques astrophotographes chevronnés et méticuleux étaient capables de réaliser en argentique de magnifiques chapelets montrant sur la même photographie, à intervalles de quelques minutes, les phases successives d'une éclipse lunaire ou solaire. Pour ce faire, ils devaient utiliser un appareil installé sur trépied et dont le champ de vision et le cadrage étaient soigneusement calculés à l'avance en fonction de la durée de l'éclipse et de la trajectoire de l'astre dans le ciel. La photographie était ensuite réalisée par le biais d'expositions multiples, sans avancer le film. Si le cadrage avait été mal évalué, si l'un des temps de pose était erroné ou si l'appareil avait été malencontreusement bougé avant la fin de l'éclipse, la photographie était ratée. Aujourd'hui, le traitement d'image permet de réaliser en



*Éclipse totale du 29 mars 2006 photographiée à l'aide d'un fish-eye placé devant un capteur 24 x 36. Vénus est visible à droite du Soleil éclipsé. C'est le sol terrestre situé hors de l'ombre lunaire qui illumine l'horizon : un crépuscule sur 360° !*

toute sécurité les mêmes montages à partir de plusieurs photographies réalisées avec un APN compact ou reflex sur trépied. Les logiciels de retouche tels que Photoshop ou Paint Shop Pro s'acquittent très bien de cette tâche : l'image finale est obtenue en superposant des calques issus de chacune des images individuelles. La méthode détaillée de réalisation d'un chapelet est décrite en Annexe 7.



*Chacun des trous de cette passoire tenue à quelques décimètres de la feuille de papier donne naissance à une petite image du Soleil partiellement éclipsé (effet sténopé).*

## Phénomènes atmosphériques

Les phénomènes provoqués par l'action de notre atmosphère sur la lumière provenant d'un astre sont nombreux : levers et couchers de Soleil et de Lune, rayon vert, halos et parhélies lunaires et solaires, arcs-en-ciel... La gamme de lumière pouvant être extrêmement étendue, il est conseillé de passer en mode d'exposition manuel et de faire varier le temps de pose dans une plage très large pour choisir ensuite la meilleure image.

*Halo solaire provoqué par une couche épaisse de nuages élevés. Le temps de pose permettant de bien le mettre en valeur a été considérablement plus long que ce que conseillait l'automatisme de l'appareil, trompé par la présence du Soleil au centre de l'image. La Lune peut également être ornée d'un tel halo. Les halos les plus courants mesurent 22° de rayon (c'est le cas de celui-ci) ; un rayon de 42° se rencontre parfois.*



*Chapelet de l'éclipse totale de Soleil du 21 juin 2001 photographiée depuis l'Angola. Nous sommes dans l'hémisphère sud : l'éclipse commence à droite et se termine à gauche.*

## Satellites artificiels

La plupart des satellites artificiels se classent en deux grandes familles : celle des satellites d'orbite basse et celle des satellites géostationnaires.

Les premiers évoluent à une altitude de quelques centaines de kilomètres. Ils effectuent une révolution autour de la Terre en quelques dizaines de minutes. À l'instar du plus connu d'entre eux, la Station Spatiale Internationale (ISS), certains sont visibles à l'œil nu lorsqu'ils survolent l'observateur et qu'ils sont éclairés par le Soleil, ce qui se produit peu avant ou peu après le coucher du Soleil (leur durée de visibilité au crépuscule est d'ailleurs plus longue en été qu'en hiver). Leur vitesse de déplacement apparent dans le ciel est voisine de celle des jets volant à haute altitude (environ 1° par seconde), ces derniers se distinguant toutefois des satellites par leurs lumières clignotantes. Les uns comme les autres provoquent couramment des traînées recti-





Une étoile filante ?  
Non, un « flash » Iridium.  
Pose de deux minutes  
avec APN reflex et objectif  
de 28 mm (image recadrée).

lignes sur les photographies du ciel à longue pose, traînée s'interrompant si le satellite cesse d'être éclairé par le Soleil pour entrer dans l'ombre de la Terre. Dans cette famille se distingue la petite centaine de satellites de télécommunication Iridium orbitant à 780 km d'altitude. Leurs antennes plates, lorsqu'elles se trouvent convenablement orientées par rapport à l'observateur, réfléchissent directement la lumière du Soleil vers celui-ci et rendent le satellite visible à l'œil nu pendant une vingtaine de secondes, sa magnitude pouvant

descendre à -8 (plus de vingt fois plus brillant que la planète Vénus !). Le site [www.heavens-above.com](http://www.heavens-above.com) vous indique les instants de ces flashes pour la région dans laquelle vous résidez, ainsi que les données de passage relatives à d'autres satellites tels que l'ISS.

Les satellites géostationnaires ont un comportement radicalement différent. Évoluant à environ 35 800 km d'altitude, ils effectuent une révolution autour de la Terre en un jour sidéral, ce qui leur confère une position fixe dans le ciel de l'observateur (relativement fixe devrait-on plutôt dire car leurs caractéristiques orbitales les amènent en réalité à osciller autour d'une position moyenne, cette oscillation pouvant tout de même atteindre plusieurs degrés). Les plus connus d'entre eux sont les satellites de télévision vers lesquels pointent nos paraboles, ainsi que les célèbres Meteosat. Ils sont à la fois plus faciles et plus difficiles à photographier que les satellites de basse altitude. Plus difficiles car leur distance les rend bien moins lumineux que leurs cousins de basse altitude : l'écart entre deux satellites semblables appartenant à chacune des deux familles peut atteindre un facteur dix mille, ce qui correspond à dix magnitudes. Pas question de les repérer à l'œil nu ni aux jumelles. Heureusement, leur situation quasi immobile dans le ciel permet d'accumuler leur lumière lors de poses de plusieurs minutes avec un appareil sur trépied (attention cependant à ne pas confondre pixels chauds et satellites géostationnaires !). Autre facteur favorable, ils sont éclairés par le Soleil durant toute la nuit pendant la plus grande partie de l'année, sauf aux périodes d'équinoxe où leur durée de disparition dans l'ombre de la Terre n'excède pas 1h30.

Les satellites géostationnaires orbitent au-dessus de l'équateur terrestre, ce qui correspond, vu de la surface de la Terre, à l'équateur céleste. Le plus simple est de diriger l'appareil plein sud (ou plein nord si vous résidez dans l'hémisphère sud), à une hauteur au-dessus de l'horizon approximativement égale à 90° moins la latitude du lieu d'observation (par exemple : pour une latitude nord de 50°, viser à 40° environ au-dessus de l'horizon sud). Plusieurs dizaines de satellites géostationnaires se partagent la circonférence de la bande équatoriale, ils sont parfois rassemblés en essaims (à noter que les fameux satellites de la constellation GPS n'appartiennent à aucune des deux familles précitées puisqu'ils orbitent à 20 000 km d'altitude). Des sites Internet (par exemple [www.hansa-electronic.com/satcalceng.asp](http://www.hansa-electronic.com/satcalceng.asp)) indiquent la position de nombreux satellites géostationnaires dans le ciel d'un lieu d'observation donné.

Une simple pose de 10 min avec un APN reflex équipé d'un objectif de 50 mm diaphragmé à F/5,6 et dirigé vers l'équateur céleste a permis d'enregistrer cette ribambelle de satellites géostationnaires, petits points lumineux au milieu des filés d'étoiles. Les deux grappes serrées sont les essaims Astra (à gauche) et Hotbird (à droite).

Il est préférable de laisser l'appareil en mode « réduction de bruit longue pose », voire, pour ne pas risquer de confondre un résidu de pixel chaud avec un satellite, de réaliser deux photographies successives en décalant légèrement le champ visé par l'appareil et de les comparer : les satellites auront changé de place dans l'image, pas les pixels chauds.



# La retouche des images

Sont décrits ci-dessous quelques traitements d'image classiques permettant d'améliorer et de finaliser facilement vos photographies du ciel. Ce sont des opérations qui n'ont rien de typiquement astronomique et que vous avez probablement l'habitude d'appliquer à vos photographies de la vie courante à l'aide de votre logiciel de retouche favori. Des traitements plus élaborés et, surtout, spécifiquement adaptés à l'astrophotographie, seront décrits dans les chapitres qui suivent (en particulier les chapitres 3 et 7) ; la plupart d'entre eux sont pris en charge non pas par les logiciels de retouche courants, mais par les logiciels dits « astronomiques ». Certains de ces traitements, notamment les corrections de PLU et de gradient, sont tout à fait applicables aux photographies du ciel sans instrument.

## Correction du fond de ciel

En astrophotographie, l'ajustement du fond de ciel au traitement revêt une importance considérable. Si ce fond de ciel est trop sombre, une partie de la rare et précieuse information lumineuse disparaît. S'il est trop clair, en particulier à cause de la pollution lumineuse, l'image semble délavée et manque de contraste. En outre, il peut être affublé d'une dominante colorée verdâtre ou rougeâtre, toujours à cause de la pollution.

La correction du niveau et de la coloration du fond de ciel est très facile à réaliser dans les logiciels de retouche tels que Photoshop ou Paint Shop Pro. Tous deux comportent une fonction Niveaux permettant de jouer sur les basses lumières en entrée ou en sortie : si le fond de ciel est trop brillant sur les images originales, il suffit de

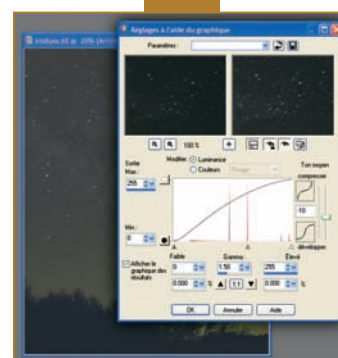
remonter le niveau bas en entrée. Ces fonctions autorisent une modification séparée des canaux rouge/vert/bleu, ce qui permet de corriger très simplement une dominante colorée. N'en déduisez cependant pas que ces traitements vous permettront d'obtenir en ciel pollué une aussi belle image que dans un ciel noir : rien ne remplace une prise de vue de qualité et une image brute aussi exempte de défauts que possible.

## Ajustement des lumières

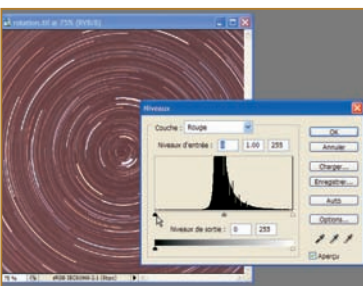
Outre les classiques fonctions de modification des niveaux et de lumière/contraste, les mêmes logiciels comportent de nombreuses fonctions permettant d'ajuster l'importance relative des hautes et des basses lumières. On peut citer les fonctions Courbes qui permettent, entre autres manipulations, de rehausser les basses lumières sans saturer les hautes lumières et qui se révèlent souvent bien utiles en astrophotographie.

Les fonctions Clarifier dans Paint Shop Pro et Tons foncés tons clairs dans Photoshop peuvent également procurer un supplément de « pêche » à votre image : n'hésitez pas à les expérimenter.

Un dernier conseil toutefois : une photographie du ciel est généralement obtenue dans des conditions de lumière faible et l'information qu'elle contient est par conséquent subtile (fragile pourrait-on même dire) : évitez de la malmenier et de chercher à lui faire dire plus qu'elle ne peut !



*Dans Paint Shop Pro, la fonction Réglages à l'aide du graphique comporte un ensemble très complet de réglages de niveaux et de courbes ainsi qu'une présentation de l'histogramme de l'image.*



*La fonction Niveaux (ici de Photoshop) permet d'ajuster le fond de ciel, dans l'ensemble des couleurs ou dans chacune d'entre elles si nécessaire. Ici, la dominante orangée du fond de ciel due à la pollution lumineuse est éliminée en rehaussant le niveau bas d'entrée des couches rouge et verte. En présence de pollution lumineuse, il peut être tentant de régler la balance des couleurs de son appareil sur « lumière*

*artificielle », mais cette opération a pour fâcheuse conséquence de biaiser la balance des couleurs des astres photographiés.*

## Retouches cosmétiques

Lorsque les pixels chauds sont très nombreux, il est préférable de les éliminer selon une des méthodes vues plus haut. Dans le cas contraire, il est toujours possible de les supprimer un par un à la souris à l'aide des fonctions de type Clonage : une petite zone comprenant le pixel chaud est remplacée par une zone immédiatement voisine, choisie de telle manière qu'elle présente les mêmes niveaux de lumière et la même couleur. Cette opération peut également être effectuée sur les ombres des poussières déposées sur le capteur, à condition qu'elles ne soient pas de trop grande dimension.



*Les fonctions de type Pinceau de clonage ou Tampon de duplication permettent, en zoomant fortement sur l'image, de corriger de très petites zones centrées sur un pixel chaud ou une petite ombre de poussière.*









# Les appareils de prise de vue et leur fonctionnement

Webcams, APN et caméras CCD spécialisées : tous les types d'appareils numériques ont leur place en astrophotographie, car ils sont plus complémentaires que concurrents. Il est important de comprendre leurs principes essentiels de fonctionnement, afin d'être capable de les choisir en connaissance de cause et de mieux les utiliser.

*C'est le système anti-blooming du capteur CCD qui a permis de faire cohabiter sur cette photographie les faibles nébulosités de la région de la Tête de Cheval avec la très brillante étoile Alnitak de la constellation d'Orion.*



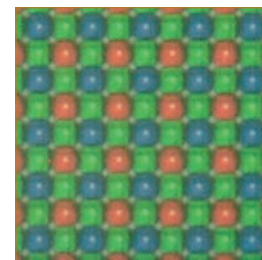
## De l'argentique au numérique

*En astronomie professionnelle, plus aucun observatoire n'utilise de film argentique. La disparition de certains films adaptés à l'astronomie (tels que le célèbre Kodak TP2415) et surtout, l'apparition de reflex numériques performants et abordables ont incité nombre d'amateurs à se convertir au numérique. Une conversion qu'ils sont bien peu nombreux à regretter, compte tenu des bénéfices apportés, à commencer par l'instantanéité du résultat : le numérique permet de vérifier très rapidement (sans avoir à attendre de développement) et de corriger dans la foulée de nombreux paramètres tels que le cadrage, la mise au point, le suivi ou tout simplement le temps de pose. Les essais au télescope ou à l'ordinateur ne coûtent rien et peuvent être effectués en aussi grand nombre que voulu. L'apprentissage en est considérablement écourté et les progrès des apprentis astrophotographes peuvent être fulgurants en comparaison de l'argentique que les moins persévérants abandonnaient avant d'avoir pu obtenir des résultats à la hauteur de leurs espérances. Pour toutes ces raisons, les aspects purement argentiques de l'astrophotographie (choix des films, développement...) ne seront pas abordés dans ce livre, mais la plupart des techniques de prise de vue qui y sont décrites lui sont également applicables. De la même manière, de nombreux traitements d'image décrits plus loin peuvent être mis en œuvre sur des images argentiques numérisées à l'aide d'un scanner à négatif et à diapositives.*

Malgré leurs différences morphologiques, les appareils numériques utilisés en astrophotographie présentent de nombreux points communs. À commencer par leur cœur : un capteur numérique, petite puce électronique chargée de recueillir la lumière. Ces divers appareils sont plus complémentaires que concurrents : chacun d'entre eux est plutôt adapté à un type d'astre... et à un budget.

C'est ainsi que les webcams font merveille en photographie planétaire et les caméras CCD en ciel profond. Les appareils numériques grand public tels que nous les avons définis au chapitre 1, et en particulier les reflex, n'ont pas véritablement de domaine de prédilection mais ils peuvent être utilisés pour tout type d'astre. Leur plus grand mérite est d'ouvrir les portes de l'astrophotographie à un grand nombre d'amateurs grâce à un rapport performances/prix très séduisant. Les différences majeures entre appareils ne se situent pas toujours où l'on pense : par exemple, la présence d'un capteur noir et blanc (monochrome) au lieu d'un capteur couleur est un atout fondamental car il confère aux appareils qui en sont dotés une polyvalence et des capacités sans égales.

sentant chacun une cellule capable de recueillir les particules de lumière, les photons, de manière indépendante. Pour cette raison, ces éléments sont appelés « photosites » ; par abus de langage, on les appelle souvent « pixels » (abréviation de *picture element*), mais restons-en pour l'instant à « photosite » car nous verrons qu'il est important de distinguer ces deux notions.



*Portion de la surface sensible d'un capteur de webcam, vue au microscope. La structure en photosites y est nettement reconnaissable.*

Un des paramètres fondamentaux d'un capteur numérique est évidemment le nombre de photosites dont il est constitué. Les photosites étant généralement disposés en quadrillage, comme sur un échiquier, ce nombre se calcule facilement : par exemple, un capteur de 1 500 sur 2 000 photosites en contient au total 3 millions. En astronomie amateur, le nombre de photosites des capteurs varie de quelques centaines de milliers à une vingtaine de millions. Il peut atteindre, pour l'astronomie professionnelle, plusieurs centaines de millions par assemblage de capteurs.

Un autre paramètre important est la taille du photosite (ce qui est un autre abus de langage : il faudrait plutôt parler de l'écartement entre les centres de deux photosites voisins, car les photosites proprement dits n'occupent malheureusement pas toute la surface exposée à la lumière, comme le montre la photographie du capteur au microscope). La taille d'un photosite se mesure en microns, elle se situe habituellement entre 3 et 24  $\mu\text{m}$ . Pour la majorité des capteurs utilisés par les astronomes amateurs, la taille des photosites varie entre 4 et 10  $\mu\text{m}$ .

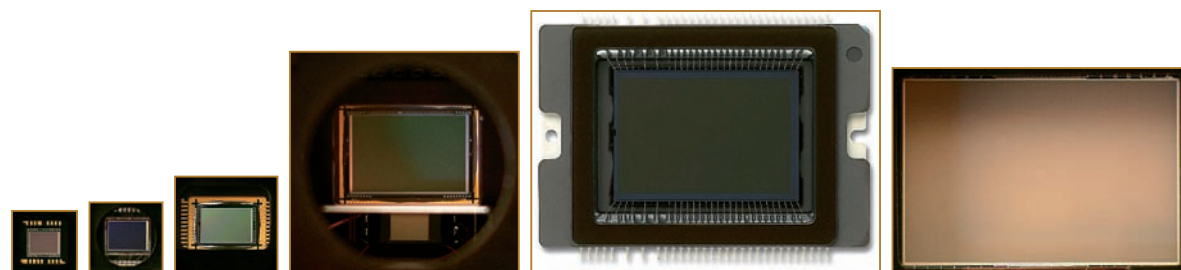
La taille d'un photosite est souvent la même sur la largeur et sur la longueur (photosites carrés), mais certains capteurs font exception à cette règle. Il va de soi que la multiplication de cette taille par le nombre de photosites sur la largeur ou la longueur donne les dimensions de la surface sensible. Par exemple, un capteur de 2 000 sur 3 000 photosites de 7,5  $\mu\text{m}$  offre une surface sensible de 15 x 22,5 mm. Les petits capteurs des webcams mesurent environ 3 mm de côté. Les capteurs des APN compacts sont à peine plus grands. Pour les bridges, les dimensions montent jusqu'à 5 voire 10 mm. Les capteurs de reflex grimpent au-dessus de 15 mm. Le capteur du boîtier reflex Canon 5D, de même que celui de la caméra CCD SBIG STL-11000, est au format 24 x 36 mm ; ce sont les plus grands capteurs accessibles aux amateurs à l'heure actuelle. Le tableau de la page 48 indique les dimensions des capteurs les plus courants. Pour conserver un nombre de photosites important, les constructeurs de petits capteurs sont conduits à réduire la taille des photosites, ce qui n'est pas sans conséquence sur la qualité de l'image, comme nous le verrons par la suite.

## Les capteurs numériques

Il est utile, pour comprendre les notions et les conseils des chapitres qui suivent, de connaître dans leurs grandes lignes les principes de fonctionnement des capteurs numériques.

### Structure d'un capteur

Un capteur numérique se présente sous la forme d'une puce électronique reconnaissable par la présence de pattes et d'une petite fenêtre en verre protégeant une surface sensible à la lumière. Cette surface est constituée d'une grille d'éléments microscopiques repré-



*De gauche à droite, quelques capteurs parmi les plus courants, imprimés à l'échelle 1 : 1/4" (webcam) ; 1/3" (caméra vidéo) ; KAF-402E et KAF-3200E (caméras CCD) ; CMOS format APS-C (APN) ; KAI-11000M (caméra CCD 24 x 36). Leurs dimensions exactes sont récapitulées dans le tableau de calcul de champ du chapitre 4 (page 48). La surface sensible à la lumière est le rectangle sombre situé au centre de la puce électronique.*



### Les dimensions de capteurs en fractions de pouce

*Certains constructeurs indiquent les dimensions des capteurs de leurs appareils en fractions de pouce (un pouce vaut 25,4 mm). Ainsi, les webcams actuelles (2005) comportent des capteurs de type 1/4". On pourrait logiquement supposer que la diagonale de leur surface sensible mesure 1/4 de pouce, soit 6,35 mm. Il n'en est rien, elle mesure en réalité 4,5 mm. Pour un capteur dit « 1/3" », la diagonale vaut 6 mm. Ces indications en fraction de pouce se réfèrent au diamètre extérieur des tubes électroniques qui équipaient, il y a quelques décennies, les caméras vidéo ; elles sont sans rapport avec une quelconque dimension de nos capteurs numériques. Quand le marketing s'empare des chiffres, il semble que les mathématiques ne soient plus tout à fait une science exacte...*

Le coût d'un capteur n'est pas tant lié au nombre de ses photosites qu'à l'étendue de sa surface sensible. En effet, les galettes de semi-conducteurs d'où sont extraits les capteurs contiennent inmanquablement quelques défauts aléatoirement répartis. Au fur et à mesure que la dimension des capteurs augmente, le taux de rejet s'accroît très vite car il devient de plus en plus improbable qu'un capteur ne contienne aucun défaut. C'est la raison pour laquelle le coût d'un capteur augmente exponentiellement avec l'étendue de sa surface sensible. Ainsi, un capteur de quelques millimètres de côté fabriqué en très grande série n'excède pas quelques dizaines d'euros ; un grand capteur 24 x 36 mm, quant à lui, peut dépasser le millier d'euros.

Le capteur dit « CCD », *Charge Coupled Device* (en français, DTC : dispositif à transfert de charge) fut le premier à faire son apparition, et cela dès le début des années 1970. Les premiers capteurs comportaient peu de photosites et une de leurs premières applications fut la vidéo qui peut se contenter de moins de photosites que la photographie. Les scientifiques, et en particulier les astronomes professionnels, comprirent vite les multiples intérêts de cette invention et les premiers observatoires furent équipés à la fin des années 1970. Au tournant du millénaire sont apparus des capteurs numériques issus d'une filière technologique produisant depuis longtemps toutes sortes de composants électroniques : le CMOS. Jusqu'à une époque récente, les capteurs fabriqués selon cette filière n'étaient pas viables pour l'astronomie, car ils étaient peu sensibles et les images qu'ils délivraient étaient plus bruitées que celles des capteurs CCD. Mais certains fabricants tels que Canon sont parvenus, à force de recherche, à produire des capteurs CMOS aussi performants que les CCD tout en présentant un coût de fabrication et une consommation électrique plus faibles.

Malgré leurs différences technologiques, les capteurs CCD et CMOS se comportent de la même manière à l'usage, et il est souvent impossible de deviner si un appareil contient un capteur d'un type ou d'un autre. L'avenir technologique est difficile à prévoir ; pour l'instant, même si la suprématie du CCD est contestée par l'arrivée en force du CMOS, les deux filières coexistent car chacune présente ses propres avantages.

## Acquisition des images

L'obtention d'une photo numérique nécessite naturellement une phase d'exposition mais également plusieurs opérations effectuées par l'appareil de manière transparente pour l'utilisateur.

### Phase d'exposition

Lorsqu'un photon atteint un photosite, il peut s'y produire un phénomène appelé « effet photoélectrique » : grâce à l'apport d'énergie

du photon, un électron est expulsé d'un des atomes de silicium composant ce photosite. La propriété fondamentale des photosites est de constituer des pièges à électrons (on parle aussi de « puits à électrons ») : ils sont capables de stocker aussi longtemps que voulu les électrons libérés par effet photoélectrique sans que ceux-ci puissent s'échapper vers les photosites voisins ou reprendre leur place dans leurs atomes d'origine. Nous trouvons là un avantage majeur des capteurs numériques, qui fait si cruellement défaut au film photographique (voir encadré) : la linéarité de leur réponse à la lumière, c'est-à-dire la proportionnalité entre la quantité de photons reçus et le nombre d'électrons stockés. (En réalité les choses sont un peu plus complexes : des électrons parasites d'origine non lumineuse peuvent venir se mêler aux autres ; nous verrons au chapitre 3 comment corriger l'image pour retrouver la précieuse linéarité.)

Lancer une pose sur un appareil numérique consiste tout simplement à exposer le capteur à la lumière et à laisser l'effet photoélectrique agir et les électrons s'accumuler dans les photosites. Bien sûr, un photosite ne peut stocker les électrons en quantité illimitée. La capacité des photosites des capteurs les plus courants est de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'électrons. Toutes choses égales par ailleurs, la capacité d'un photosite dépend de sa surface : plus elle est importante, plus il peut recueillir de photons et stocker d'électrons, ce qui est un avantage, comme nous le verrons au chapitre 3. Lorsque la quantité de lumière reçue est excessive, le puits est plein et les électrons commencent à se répandre sur les photosites voisins, provoquant dans l'image un effet nommé éblouissement (*blooming*). Pour pallier cet effet, on dote les capteurs, à leur fabrication, d'une structure dite « anti-blooming » : des drains, accolés aux photosites, sont chargés d'évacuer l'essentiel d'un trop-plein éventuel d'électrons. Malheureusement, ce système ne présente pas que des avantages : les drains occupent une partie de la surface exposée à la lumière, au détriment du photosite qui capte donc moins de photons. Un capteur doté d'un système anti-blooming présente ainsi un déficit de sensibilité de 20 à 50 % par rapport à un capteur qui n'en est pas équipé, ce qui est loin d'être négligeable en astronomie. Les capteurs proposés sur certaines caméras CCD n'en sont donc pas dotés. Cherchant à compenser ces pertes, les concepteurs de capteurs ont inventé un dispositif nommé « microlentilles », minuscules tubes hémisphériques alignés sur les rangées de photosites et chargés de faire converger le maximum de photons sur leur surface sensible.

### Capteurs numériques et défaut de réciprocity

*Le film argentique présente un grave inconvénient en astronomie : son défaut de réciprocity en faible éclaircissement. Cela signifie que la réaction du film n'est plus proportionnelle à la quantité de lumière reçue dès lors que cette quantité devient petite, ce qui est le cas en photographie du ciel profond. Tout se passe comme si sa sensibilité diminuait énormément sur les objets faiblement lumineux. Il présente même un effet de seuil : si l'éclaircissement est vraiment très bas, il ne réagit plus du tout, quel que soit le temps de pose. Avec les capteurs numériques, rien de tel : ils sont parfaitement linéaires, c'est-à-dire que l'efficacité de l'effet photoélectrique reste identique quel que soit l'éclaircissement (sauf éventuellement dans les très hautes lumières).*



*Lorsqu'un photosite a dépassé sa capacité en électrons, ceux-ci se répandent selon des directions privilégiées liées à la structure intrinsèque du capteur, provoquant un effet d'aigrette (le blooming) bien visible ici sur les deux étoiles les plus brillantes de cette portion d'image CCD.*

### Phase de lecture et de numérisation

À l'issue de la pose, le photosite est vidé de son stock d'électrons (selon un processus décrit en Annexe 3) et une mesure est effectuée. Grâce à un composant électronique appelé « convertisseur analogique-numérique » (CAN), cette mesure aboutit finalement à quelque chose qui soit compréhensible par l'ordinateur : un nombre entier (d'où le terme « numérisation »). Ce nombre n'est pas égal



au nombre de photons captés ni à celui des électrons stockés, mais il leur est proportionnel et c'est cela qui importe pour conserver la linéarité d'un bout à l'autre de la chaîne.

La plage des valeurs que peut prendre le nombre issu d'un convertisseur dépend du type de convertisseur employé, plus précisément du nombre de bits (voir encadré) sur lequel il effectue la numérisation. En photographie, on considère qu'un convertisseur 8 bits est un minimum. Un tel convertisseur fournit un nombre compris entre 0 et 255, soit 256 ( $2^8$ ) valeurs possibles. Certains appareils sont dotés d'un convertisseur 16 bits. Il fournit un nombre compris entre 0 et 65 535, soit 65 536 ( $2^{16}$ ) valeurs possibles. Certains appareils sont dotés de convertisseurs 10, 12 ou 14 bits (voir tableau suivant).

*Nombre de niveaux et plages de valeurs pour les précisions de numérisation les plus courantes.*

Nombre de bits	Nombre de niveaux	Plage de valeurs
8	256	0 à 255
10	1 024	0 à 1 023
12	4 096	0 à 4 095
14	16 384	0 à 16 383
16	65 536	0 à 65 535

### Bits et octets

*Le bit est l'information élémentaire manipulée par un ordinateur. Cette information est dite « binaire » car elle ne peut prendre que deux valeurs : 0 et 1. Quatre valeurs sont possibles lorsque deux bits sont associés, huit valeurs pour trois bits, seize pour quatre bits, et ainsi de suite suivant les puissances successives de 2. Lorsque les bits sont groupés par paquets de huit, ils prennent le nom d'octet (en anglais byte... à ne pas confondre avec bit !).*

On peut se demander pour quelle raison on pourrait avoir besoin de plus de 256 niveaux de gris, sachant que l'œil ne sait guère distinguer plus d'une centaine de niveaux à l'écran. Et il est vrai que, s'il s'agit uniquement d'afficher une image sur un écran ou de l'imprimer, 8 bits suffisent. Mais, par exemple, une image de ciel profond comporte des intensités lumineuses faibles susceptibles de n'occuper, en 8 bits, que les tous premiers niveaux de gris. De nombreux traitements décrits dans ce livre ont pour objectif de mettre en évidence de petites variations d'intensité, mais cela n'est possible que si ces variations ne sont pas noyées, par manque de discrimination, dans le même niveau de gris.

Par exemple, supposons qu'un convertisseur 8 bits donne, pour un certain photosite, une mesure égale à 128, c'est-à-dire la moitié de la dynamique disponible en 8 bits. S'il est remplacé par un convertisseur 16 bits, celui-ci donnera un nombre certainement voisin de 33 000 (c'est-à-dire environ la moitié de la plage correspondant à 16 bits), par exemple 32 580. Si un photosite voisin a stocké un nombre d'électrons très légèrement inférieur de 0,2 %, le premier convertisseur devrait donner un nombre égal à 127,7... mais il ne le peut pas et va l'arrondir au nombre entier le plus proche, soit 128. L'écart entre les deux photosites a été perdu, alors qu'avec le convertisseur 16 bits, une valeur différente (par exemple 32 515 dans le cas présent) aurait été calculée.

Autrement dit, utiliser un convertisseur avec plus de bits équivaut à mesurer les dimensions d'une table de salon avec un mètre-ruban gradué en millimètres au lieu de centimètres : le résultat est plus précis. Du moins jusqu'à un certain point : il est absurde de vouloir mesurer la longueur de notre table au micron près. De même, il est vain d'utiliser un convertisseur 16 bits si l'appareil sur lequel il est installé délivre des images très bruitées, car les derniers bits, ceux qui offrent la précision, sont noyés dans les défauts de l'image. Le fabricant d'un

appareil doit donc choisir un convertisseur cohérent avec la qualité de l'ensemble de la chaîne électronique de prise de vue. Méfions-nous des arguments publicitaires : un appareil 16 bits ne délivre pas nécessairement une image de meilleure qualité qu'un appareil 14 bits !

À la conception de l'appareil, la chaîne de numérisation est conçue pour que la valeur maximale possible corresponde à une quantité d'électrons un peu inférieure à la capacité du photosite. Par exemple, si un capteur est doté de photosites d'une capacité de 60 000 électrons et d'un convertisseur 8 bits, la valeur 255 pourra être atteinte autour de 50 000 électrons, soit environ 200 électrons ( $50\,000 / 255$ ) par niveau. Au-delà, la valeur émise par le convertisseur est bloquée à 255.

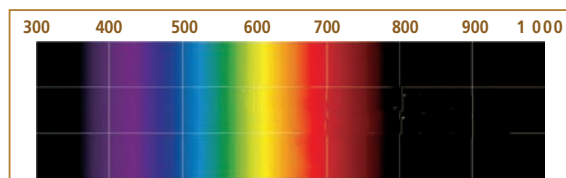
Sur un capteur CCD, la récupération du contenu de chaque photosite se fait séquentiellement, à l'aide de transferts successifs du contenu des photosites d'une ligne à l'autre (voir Annexe 3). Pendant ces opérations, les photosites demeurent naturellement sensibles à la lumière. Si rien n'empêche celle-ci de les atteindre, l'image sera entachée d'un effet nommé « smearing » : les objets lumineux laissent une traînée verticale qui est le témoin direct des décalages du contenu des lignes. La manière la plus évidente d'éviter le smearing consiste à utiliser un obturateur mécanique (à rideaux ou à iris) installé devant le CCD. Cet obturateur est fermé en fin de pose et empêche ainsi la lumière d'atteindre le capteur durant la phase de lecture. Mais cette solution est relativement coûteuse, de plus elle convient mal à une prise de vue en continu de type vidéo. Ont donc été développés les capteurs CCD dits « interligne », dans lesquels tout se passe comme si une colonne de photosites sur deux était masquée de la lumière et servait au stockage temporaire de l'image. L'avantage est naturellement l'absence de tout élément mécanique en mouvement, source de vibrations et de pannes ; ce type d'obturation est appelé « obturation électronique ». L'inconvénient est la diminution du pourcentage de la surface exposée à la lumière : un capteur interligne est moins sensible qu'un capteur non interligne (aussi appelé « capteur pleine trame » ou *full frame*) ; les microlentilles permettent de compenser en partie cette perte.

## Rendement quantique et sensibilité spectrale

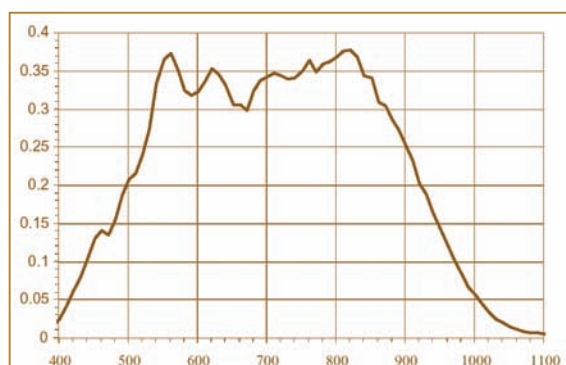
Dans un monde idéal, l'effet photoélectrique aurait une efficacité totale : le rendement quantique, c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'électrons stockés et le nombre de photons reçus, serait de 100 %. Malheureusement, il n'atteint jamais cette valeur, et cela pour de nombreuses raisons, en voici quelques-unes :

- la fenêtre de protection du capteur et sa surface sensible réfléchissent un peu de lumière : un capteur n'absorbe pas toute la lumière incidente ;
- les photosites n'occupent pas toute la surface exposée à la lumière, il se trouve entre les photosites des zones non sensibles où les photons incidents sont perdus (notamment les drains d'anti-blooming et, pour un capteur interligne, les registres de transfert) ;
- les photons de lumière ultraviolette, bien que d'énergie plus grande que les photons de lumière visible, pénètrent très peu dans le silicium, la plupart d'entre eux ne parviennent pas à provoquer l'expulsion d'électrons ; les photons de lumière infrarouge de longueur d'onde supérieure à un micron, quant à eux, pénètrent profondément mais ils ne sont plus assez énergétiques pour expulser des électrons.

Le rendement quantique d'un capteur ne peut donc s'exprimer par un seul nombre : il faut prendre en compte la longueur d'onde de la lumière incidente. On a coutume de représenter ce rendement sous forme d'une courbe indiquant la valeur du rendement (en pourcentage) en fonction de la longueur d'onde, du bleu au proche infrarouge.

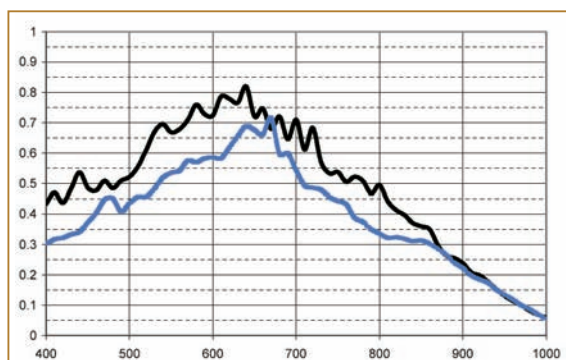


Le spectre lumineux. Les longueurs d'onde sont généralement exprimées en nanomètres (milliardièmes de mètre). À gauche, aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm, la lumière ultraviolette ; puis la lumière bleue, de 400 nm à 500 nm ; le vert, de 500 nm à 600 nm ; le rouge, de 600 nm à 700 nm ; enfin l'infrarouge, à partir de 700 nm. Bien sûr, il n'y a pas de transition abrupte entre les couleurs et les valeurs numériques indiquées ici sont approximatives.

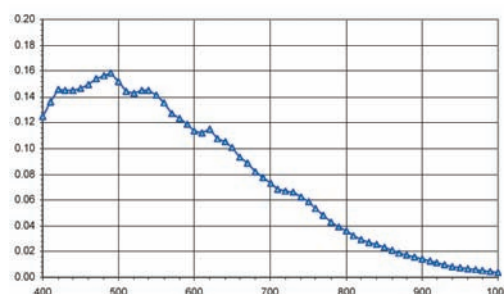
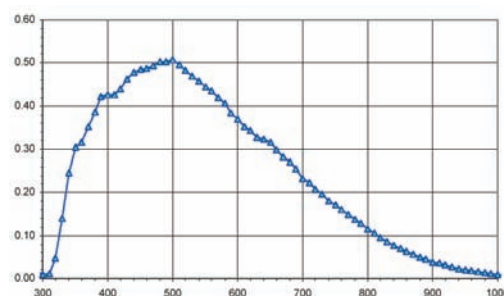


Courbe de rendement quantique du KAF-0400, capteur Kodak de 400 000 photosites apparu au début des années 1990 ; ce fut l'un des premiers capteurs à être utilisé par les amateurs et c'est celui qui équipait ma première caméra CCD, en 1993. Document Kodak.

Les premiers capteurs présentaient un décalage significatif de sensibilité, par rapport à la vision humaine, vers le rouge et le proche infrarouge, au détriment du bleu. La sensibilité à la raie rouge  $H\alpha$ , si importante en astronomie (voir les chapitres 6 et 7), était excellente. Des améliorations technologiques ont permis d'améliorer la sensibilité des capteurs à la lumière bleue tout en conservant une bonne sensibilité au rouge : le pic de sensibilité, situé selon le capteur dans le vert ou le rouge, varie habituellement de 25 % à 60 % de rendement environ pour les capteurs interligne et de 40 % à 80 % pour les capteurs pleine trame. Ces chiffres remarquables attestent de la supériorité considérable du capteur numérique par rapport au film argentique en matière de sensibilité effective, ce dernier étant doublement pénalisé par un rendement de quelques pourcents seule-



Courbe de rendement quantique du KAF-0402E à sensibilité étendue dans le bleu, successeur du KAF-0400, en noir avec microlentilles, en bleu sans. Document Kodak.



Courbe de rendement du capteur interligne KAI-11000M, en haut avec microlentilles, en bas sans. Document Kodak.

ment et par son défaut de réciprocité. Ces capteurs ont rendu les objets de Messier très (trop !) faciles à photographier et ont étendu les possibilités ouvertes aux amateurs à des dizaines de milliers d'objets de ciel profond.

### Infrarouge proche et lointain

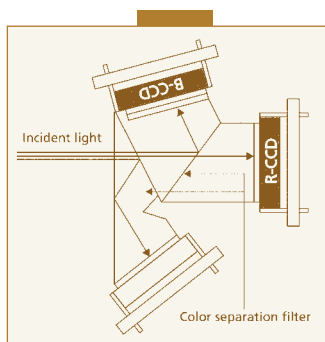
Les capteurs numériques utilisés en photographie présentent une sensibilité à l'infrarouge, mais il s'agit de l'infrarouge proche, celui qui correspond à des longueurs d'onde juste un peu plus grandes que le rouge, jusqu'à 1 000 nm (ou 1  $\mu\text{m}$ ). Il ne s'agit pas de l'infrarouge lointain, autrement dit ces capteurs sont incapables de détecter l'émission d'origine thermique d'un être vivant. Mais la lumière émise par un fer à souder sous tension est, elle, facilement détectée. Ne confondez pas filtre infrarouge et filtre anti-infrarouge. Le premier ne laisse passer que les longueurs d'onde supérieures à environ 700 nm, alors que le second les bloque et transmet la lumière visible.

## Les capteurs couleur

Les courbes de sensibilité et les valeurs de rendement quantique données ci-dessus sont celles de capteurs monochromes : les images qui en sont issues sont en noir et blanc puisque ces capteurs sont incapables de distinguer les photons de lumière bleue de ceux de lumière verte ou rouge. Il est cependant possible de réaliser des images en couleurs si l'on dispose d'un jeu de filtres, par exemple rouge, vert et bleu.

Cette technique est celle qui donne les meilleurs résultats en astronomie, comme nous le verrons en détail au chapitre 7. Nécessitant trois (ou quatre) poses successives, elle n'est évidemment pas applicable aux scènes de la vie courante. Les concepteurs de capteurs numériques et d'appareils ont donc dû très tôt trouver des solutions permettant de réaliser des photos en couleurs en une seule pose.

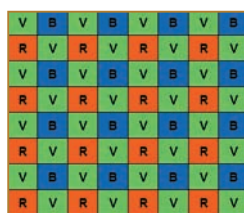




Le système tri-CCD.

Une solution très performante consiste à employer trois capteurs monochromes devant lesquels sont placés des éléments optiques spéciaux, à la fois filtrants et réfléchissants, destinés à acheminer chaque couleur vers le capteur qui lui est attribué. Pour des raisons évidentes de coût et de complexité de réalisation, cette solution n'est cependant mise en œuvre que sur des matériels professionnels et sur certains Caméscopes amateur haut de gamme (tri-CCD).

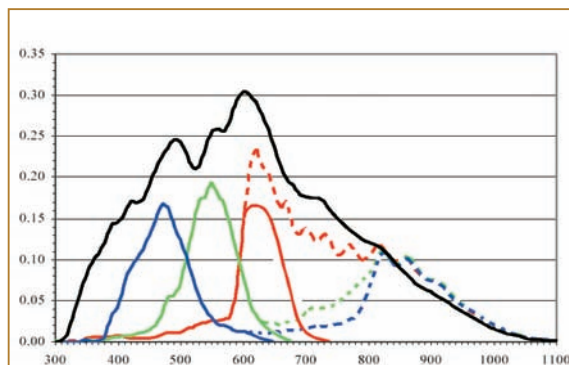
La solution adoptée de manière générale sur les appareils grand public est de se contenter d'un seul capteur dont les photosites sont recouverts d'une grille de minuscules filtres colorés. La disposition est dite « en matrice de Bayer » alternant en motif répétitif des groupes de quatre photosites. De nombreuses dispositions de couleur sont possibles, par exemple cyan + magenta + jaune + vert, mais la solution la plus répandue fait appel à des filtres rouges, verts et bleus. Chaque groupe comporte un photosite rouge et un photosite bleu pour deux photosites verts, la prédominance de ces derniers ayant été choisie pour des raisons de cohérence avec la sensibilité de l'œil humain (maximale dans le vert). La plupart des capteurs à huit millions de photosites comportent donc deux millions de photosites captant la lumière bleue, quatre millions la lumière verte et deux millions la lumière rouge. Ces minuscules filtres étant plus ou moins transparents à l'infrarouge proche, un filtre additionnel (dit « anti-infrarouge », en anglais IRB pour *IR-blocking*) bloquant les grandes longueurs d'onde est placé sur le capteur dans les appareils couleur.



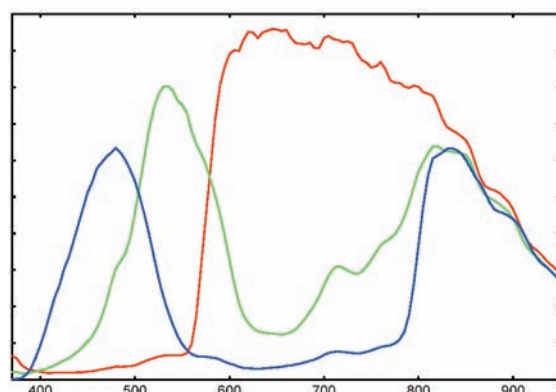
Matrice de Bayer standard.

## Monochromatique et monochrome

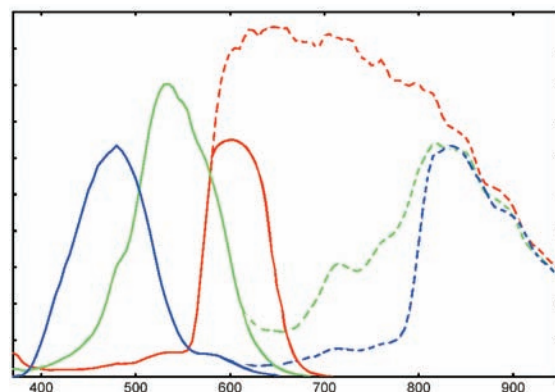
*Ne confondez pas les termes monochromatique et monochrome. Une lumière est dite monochromatique si elle est émise dans une plage de longueur d'onde extrêmement étroite (l'émission H $\alpha$  des nébuleuses en est un parfait exemple, voir chapitre 7). Un capteur monochrome est sensible à une grande étendue de longueurs d'onde, il fournit des images en niveaux de gris car il ne sait pas différencier les couleurs*



*La comparaison de l'aire située sous la courbe noire (capteur monochrome) et de celle située sous les courbes rouge, verte et bleue (capteur couleur) donne une bonne indication de l'écart de sensibilité considérable entre les deux types de capteur. Écart amplifié par le fait que sur le capteur couleur, seul un photosite sur deux recueille le vert et un sur quatre le bleu ou le rouge. Document Kodak.*



Courbes de rendement typiques d'un capteur couleur, ici un capteur CMOS Kodak. À gauche, sans filtre anti-infrarouge, à droite avec (lignes continues). La sensibilité dans l'infrarouge proche est plus ou moins élevée selon le capteur. Document Kodak.



La matrice de Bayer présente l'avantage d'une relative simplicité de fabrication, mais aussi un grave inconvénient : la majeure partie des photons incidents est perdue. En effet, tous les photons de lumière bleue, rouge et infrarouge atteignant un photosite recouvert d'un filtre vert ne sont pas captés, et ainsi de suite pour les autres couleurs. De plus, le taux de transmission de chaque filtre dans sa propre couleur est très inférieur à 100 %. Résultat : une part significative du gain obtenu par rapport à l'argentique en termes de rendement quantique est perdue. Un calcul rapide montre que le capteur couleur recueille globalement bien moins du quart des photons que son cousin monochrome sait, lui, prendre en compte ! On comprend

pourquoi les capteurs monochromes sont tant prisés en astronomie où la lumière fait toujours cruellement défaut. Nous verrons de plus au chapitre 7 que, sur les nébuleuses émettant de la lumière monochromatique, de même que sur le Soleil en H $\alpha$  (voir chapitre 6), les capteurs couleur sont également la source d'importantes complications : certains d'entre eux peuvent être plus de vingt fois moins sensibles à ce type de lumière qu'un capteur monochrome.

Avec un capteur à matrice de Bayer, l'élaboration des trois composantes (rouge, verte et bleue) d'une image couleur s'effectue par le jeu d'interpolations (voir Annexe 3), lors d'une opération appelée « dématricage ». Lorsqu'un logiciel comme Photoshop ouvre une



image en format RAW, il réalise à votre insu cette opération de dématricage, en prenant soin d'équilibrer les couleurs avec les coefficients propres à l'appareil utilisé et au réglage de balance des couleurs (intérieur, extérieur, flash, etc.) qui a été mémorisé dans les données EXIF incluses dans le fichier RAW.

La reconstruction d'une image comportant quatre millions de pixels couleur à partir d'un capteur de quatre millions de photosites n'équivaut pas à l'acquisition de cette même image à partir d'un capteur fournissant réellement douze millions d'informations : la qualité d'image n'est pas aussi bonne, notamment en termes de finesse et de rapport signal sur bruit (voir chapitre 3). Avec la matrice de Bayer, quatre photosites sont nécessaires pour constituer un pixel couleur. Autrement dit, il faudrait plutôt considérer qu'un capteur de quatre millions de photosites fournit une image d'un million de pixels, même si ceux-ci font ensuite l'objet d'interpolations portant l'image à quatre millions de pixels. Mais les constructeurs d'appareils, on s'en doute, profitent allègrement de cet amalgame entre photosites et pixels car il est commercialement avantageux... Bien qu'elle soit la façon la plus courante d'obtenir des images en couleur à partir d'un capteur unique, la matrice de Bayer n'est donc pas la solution idéale car elle conduit à une perte importante de photons et à une diminution de la définition effective. D'autres voies sont à explorer, le capteur Foveon étant l'une d'entre elles (voir Annexe 3).

### Il y a sensibilité et sensibilité...

*Les APN comportent un réglage appelé « sensibilité » permettant d'obtenir des vues correctement exposées tout en s'adaptant aux contraintes de la scène à photographier en termes d'éclairage, de diaphragme et de temps de pose. Sur leurs prédecesseurs argentiques, la modification de la sensibilité s'effectue naturellement par changement du film, avec quelques inconvénients : un film de 400 ISO autorise certes un temps de pose quatre fois plus court qu'un film de 100 ISO, mais il présente un grain moins fin. A contrario, dans un APN, le capteur ne change pas ; pas plus que sa sensibilité intrinsèque à la lumière, c'est-à-dire son rendement quantique. En réalité, le passage d'un réglage de 100 à 400 ISO s'effectue par amplification d'un facteur quatre du signal électronique recueilli par le CAN. Et, là aussi, il y a un prix à payer, comme nous le verrons au chapitre suivant...*

## Les appareils

Trois types d'appareils numériques sont utilisés par les amateurs : les caméras CCD, les appareils numériques grand public et les appareils vidéo dont les webcams sont les représentants les plus répandus.

### Caméras CCD

À tout seigneur tout honneur, commençons par un appareil conçu spécifiquement pour la photographie astronomique : la caméra CCD (le terme « caméra » peut sembler curieux, puisqu'il s'agit ici d'images fixes et non de vidéo : c'est un anglicisme, ce terme désignant, en anglais, un appareil photographique). C'est aussi le premier appareil numérique à avoir été utilisé par les amateurs, bien avant l'apparition des APN et des webcams puisque les premières caméras CCD ont été commercialisées au début des années 1990. C'est même un français, Christian Buil, qui a conçu et construit dès 1985 la première caméra amateur.

Une caméra CCD est un objet étrange aux yeux de celui qui n'en a jamais vu : elle n'a ni objectif, ni bouton, ni écran, ni viseur. Juste

un hublot protégeant le capteur, des prises pour différents connecteurs et un corps en métal comportant généralement des ailettes et un petit ventilateur. Il faut dire qu'à l'image d'une webcam, une caméra CCD n'est pas autonome et doit être connectée à un ordinateur : c'est par son intermédiaire que l'utilisateur va transmettre des ordres à la caméra et récupérer les images qu'elle a prises, via un logiciel capable de piloter la caméra, appelé « logiciel d'acquisition ». Ce logiciel possède toutes les fonctions d'un intervalomètre, c'est-à-dire qu'il permet de lancer une série de photographies de temps de pose aussi longs que voulu. Les premières caméras CCD dialoguaient avec l'ordinateur par le port série ou parallèle. Aujourd'hui, c'est la liaison USB qui est la plus couramment utilisée, à laquelle se substitue une liaison Ethernet pour certaines caméras devant être pilotées à très longue distance.

Une caméra CCD est, avant tout, un appareil conçu pour des poses de plusieurs minutes, voire plusieurs dizaines de minutes. Or, comme nous le verrons en détail au chapitre suivant, l'agitation thermique des atomes composant le capteur provoque l'apparition dans l'image d'un signal parasite qui est d'autant plus gênant que la pose est longue et la température élevée. Afin d'obtenir des images les moins dégradées possible par cet effet thermique, il convient de refroidir le capteur. Dans les observatoires professionnels, une solution radicale mais lourde est mise en œuvre :

l'azote liquide. Dans les caméras amateur, c'est un petit composant électronique nommé « module Peltier », couramment utilisé dans les mini-réfrigérateurs pour automobile, qui est affecté à cette tâche. Le corps en ailettes et le ventilateur présent sur la plupart des caméras CCD complètent cet élément en évacuant le maximum de calories dans l'air ambiant. L'efficacité du système de refroidissement peut se mesurer par la différence de température entre l'air ambiant et le capteur. Sur les caméras amateur, cet écart s'établit entre 20° C et 30° C environ. Certaines caméras sont équipées d'une régulation de température : elles sont capables de maintenir le capteur à une température précise choisie par l'utilisateur (dans la limite des capacités de refroidissement de la caméra bien sûr), ce qui est un avantage, comme nous le verrons au chapitre suivant.

Mais le refroidissement du capteur cause quelques complications. Dès qu'un corps est porté à une température inférieure à celle de l'air qui l'entoure, l'humidité que celui-ci contient se condense à sa surface. Si notre capteur était laissé à l'air libre, outre les poussières qui ne manqueraient pas de s'y déposer, si tôt refroidi il se recouvrirait de condensation, rendant les photographies sombres et floues. Il est donc indispensable de le protéger en l'enfermant dans une enceinte relativement hermétique et fermée par un hublot en verre. Certaines caméras renferment un sachet d'un produit absorbant très efficace contre l'humidité qui aurait pu s'y glisser malgré tout. Ce produit doit être déshydraté de temps à autre dans un four. Moyennant cette opération très simple et un minimum de précautions (par exemple ne pas stocker la caméra dans un lieu humide), les risques de givrage du capteur sont très limités.

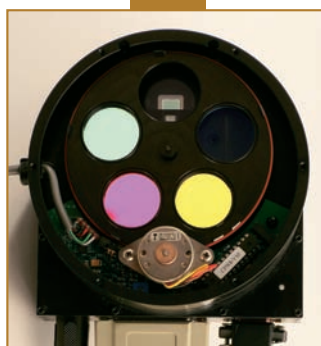
La plupart des caméras sont équipées d'un obturateur mécanique destiné à protéger le capteur CCD de la lumière pendant la lecture de l'image. Ils ne sont généralement pas capables de descendre au-dessous de 1/100 s. Certaines caméras d'entrée de gamme n'en étant pas dotées, des amateurs astucieux en ont fabriqués eux-mêmes à partir d'obturateurs récupérés sur d'anciens appareils ou même de vu mètres à aiguille.

Les caméras CCD s'alimentent soit en courant secteur, soit en 12 V à partir d'une simple batterie automobile. Cette seconde solution est très pratique pour l'amateur qui prend la route afin de s'éloigner des lumières des villes. Attention toutefois : lorsque le refroidissement est en marche, une caméra CCD consomme un courant de plusieurs



Plusieurs modèles de caméras CCD distribués en France.

De haut en bas :  
Platinum/Audine ;  
Celestron Neximage et Meade DSI ;  
Starlight Xpress SXV  
(document Starlight Xpress) ;  
SBIG STL11000M.



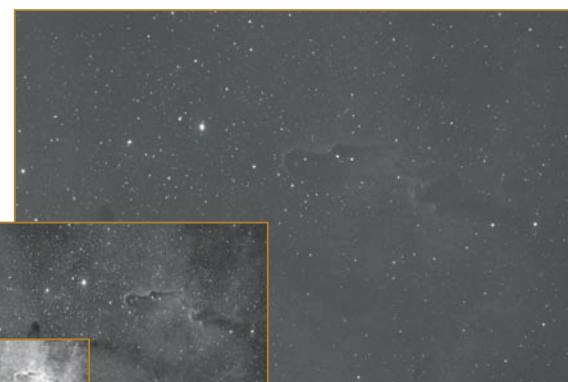
De haut en bas :  
roue à filtres motorisée  
incorporée à une caméra  
CCD (le choix du filtre  
s'effectue via le logiciel  
d'acquisition) ; caméra CCD  
et sa roue à filtres manuelle ;  
roue à filtre motorisée  
autonome et son boîtier  
de commande.

ampères. Si la séance d'acquisition risque de durer toute la nuit, il est prudent de se munir d'une batterie auxiliaire.

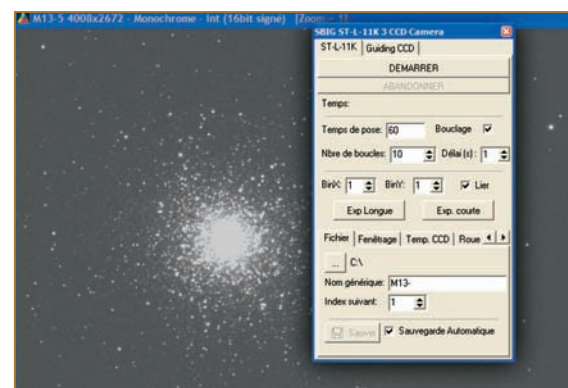
Certaines caméras CCD sont proposées avec un capteur couleur, mais la grande majorité d'entre elles sont dotées de capteurs monochromes : nous verrons au fil de ce livre que les avantages de tels capteurs sont considérables, tant en termes de sensibilité que de polyvalence. Pour la réalisation d'images en couleurs, est proposé, de base ou en option, un accessoire « nommé » roue à filtres permettant d'interposer successivement divers filtres devant le capteur sans avoir à démonter la caméra de l'instrument. Ces roues peuvent recevoir, selon le modèle, des filtres en monture 31,75 mm ou 50,8 mm. Comme le montrent les photos de la page 18, certaines caméras sont dotées de deux capteurs placés côte à côte, le plus petit des deux prenant en charge une fonction très utile en ciel profond : l'autoguidage (voir chapitre 7).

Une fois la pose terminée, les données sont transmises à l'ordinateur au fur et à mesure de la numérisation effectuée par le convertisseur, afin de ne pas perdre de temps. Pour une caméra CCD amateur, le temps de lecture moyen est d'environ 300 000 photosites par seconde, soit quelque 10 secondes pour une caméra à 3 millions de photosites. Ce temps peut sembler long par rapport à un appareil numérique grand public, mais la grande précision de mesure requise en 16 bits n'est pas compatible avec une lecture trop rapide.

Toutes les caméras CCD (et leurs logiciels d'acquisition) présentent deux fonctions très pratiques dont on aimerait disposer sur les appareils grand public : le *binning* et le *fenêtrage*. Le *binning* consiste à rassembler, à la lecture de l'image, le contenu de photosites adjacents pour en faire des photosites virtuels de plus grande dimension. Le mode de *binning* le plus utilisé est le *binning 2 x 2* qui regroupe quatre photosites en carré. Le *binning 3 x 3* en regroupe neuf, le *binning 4 x 4* seize, et ainsi de suite. Le signal lumineux reçu par chaque photosite virtuel est amplifié d'autant. En *binning 2 x 2*, le temps de lecture est divisé par quatre puisqu'il y a quatre fois moins d'informations à numériser et à transférer ; évidemment, revers de la médaille, si l'image embrasse le même champ sur le ciel, elle comporte maintenant quatre fois moins de pixels. Le *binning* est particulièrement utilisé dans deux circonstances : lorsqu'il s'agit de photographier un objet extrêmement faible et au moment de la recherche et du centrage des objets de ciel profond. En *binning 4 x 4*, la lecture de l'image est très rapide et l'augmentation de sensibilité permet de repérer la plupart des objets en quelques secondes de pose tout au plus. À noter que, sur un APN, la taille d'image peut être choisie par l'utilisateur, en général sur trois valeurs : grande, moyenne et petite (ou *small*, *medium*, *large*), mais cela n'équivaut pas à effectuer un *binning* car l'appareil ne réalise pas ici de combinaison du signal reçu par des photosites adjacents : il extrait simplement une partie des photosites de l'image complète.



Images de même temps de pose  
mais de mode de *binning* différent (1 x 1, 2 x 2 et 4 x 4).  
Le gain en signal par photosite est flagrant.  
En *binning*, le champ n'est pas modifié mais  
la finesse peut se réduire.



Le panneau de commande de caméra CCD de Prism permet de choisir le temps de pose, le nombre de poses à effectuer, le nom des fichiers à stocker sur l'ordinateur, le mode de *binning*, l'éventuel *fenêtrage* ainsi que d'autres paramètres tels que le comportement de l'obturateur ou, pour les caméras qui en sont dotées, la régulation de température ou la position de la roue à filtres.

Le *fenêtrage*, comme son nom l'indique, consiste à n'effectuer la lecture que d'une partie des photosites, au choix de l'utilisateur, ce qui est utile si l'astre intéressant n'occupe qu'une petite partie du champ visé par le capteur. Cette fonction est également utilisée lors de la mise au point sur une étoile, afin de travailler avec une petite image rafraîchie à cadence rapide (voir chapitre 4).

L'Annexe 2 présente les principaux fabricants actuels (2005) de caméras CCD et d'accessoires astrophotographiques.

## Appareils numériques (APN)

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, tous les types d'appareils (compacts, bridges et reflex) peuvent être employés en astrophotographie sans instrument, moyennant des limitations pour certains d'entre eux. Par le biais d'une adaptation afocale, c'est-à-dire un montage tel que l'objectif de l'appareil est positionné juste derrière l'oculaire d'un instrument astronomique (voir chapitres 4 et 5), les compacts sont également capables de réaliser des photographies des planètes, de la Lune et du Soleil. En général, le volumineux objectif d'un bridge n'est pas mécaniquement compatible avec ce montage et ces appareils sont par conséquent pratiquement inutilisables en astrophotographie avec instrument.





L'astronome amateur qui souhaite utiliser un APN, en particulier pour la longue pose en ciel profond, aura tout intérêt à se procurer un reflex qui présente de nombreux avantages : accessibilité à la pose longue (« pose B », *bulb* en anglais), adaptation beaucoup plus aisée sur un instrument astronomique, visée facilitée par le système reflex, et surtout, une qualité d'image supérieure permise par des capteurs plus performants dotés de photosites de plus grande dimension. En outre, le format RAW (voir Annexe 1) permet de conserver, généralement en 12 bits, les données brutes issues du capteur sans dématricage de la matrice de Bayer.

Les dimensions des capteurs des APN reflex varient entre le format dit « APS-C », soit 15 x 23 mm environ, et le plein format 24 x 36 mm. Ce dernier fait naturellement rêver beaucoup d'amateurs mais, outre son coût, c'est une arme à double tranchant : on ne peut en exploiter le potentiel que s'il est couplé à des objectifs ou des instruments astronomiques offrant une qualité d'image et une couverture de champ suffisantes (voir chapitre 7), ce qui est loin d'être le cas de tous les matériels disponibles dans le commerce.

Avec un APN reflex monté sur un instrument astronomique, il faut pouvoir déclencher la photographie sans toucher l'appareil lui-même, sous peine de vibrations catastrophiques pour la netteté de l'image. La solution la plus évidente, mais pas la plus pratique, consiste à enclencher le retardateur de l'appareil. Un déclencheur souple manuel est une solution peu coûteuse mais, aussi étonnant que cela puisse paraître, peu d'appareils disposent du connecteur adéquat sur le bouton de déclenchement ; sur la plupart d'entre eux, c'est par l'intermédiaire d'un petit boîtier de commande à liaison par fil ou infrarouge que l'on peut déclencher une exposition. Les télécommandes les moins chères comportent un simple bouton de déclenchement à blocage : elles sont tout à fait suffisantes pour des instantanés (Lune, Soleil) mais, pour les longues poses, elles vous obligent à rester près de l'appareil pour libérer le blocage du bouton lorsque votre chronomètre indique que le temps de pose est écoulé et pour lancer la pose suivante. Dans cette catégorie, on peut citer les MC-DC1 pour Nikon D70s et RS60 pour Canon 350D.

Les plus sophistiquées de ces télécommandes, mais aussi les plus onéreuses, font office d'intervallomètres en étant capables de prendre en charge une série de poses avec réglage du temps de chaque pose, du nombre de poses et de l'intervalle entre elles : TC80-N3 pour Canon 30D et 5D, ML3 pour Nikon D100. À noter que ces accessoires ne sont ni interchangeables entre marques ni même souvent entre boîtiers d'une même marque : ainsi, la RS60 pour Canon 350D ne s'adapte pas sur le 30D qui, lui, nécessite la RS80 car leurs connecteurs sont différents. Des logiciels, fournis de base ou en option, permettent de contrôler depuis un ordinateur certains appareils via leur liaison USB, mais généralement la pose B n'est pas accessible, et cette solution n'est donc utilisable que pour les poses de durée inférieure à la durée maximale permise par l'appareil hors pose B (le plus souvent 30 s).

Les APN sont aujourd'hui capables de fonctionner de longues heures sur leurs piles ou leurs batteries mais celles-ci présentent une fâcheuse tendance à perdre leur autonomie au froid. En outre, une utilisation intensive de l'écran lors des phases de cadrage et de mise au point contribue à diminuer cette autonomie. Une batterie ou un jeu de piles supplémentaire, conservé au chaud dans une poche, se révèle parfois bien utile. Tous les reflex peuvent être dotés, en option, d'une alimentation secteur (à brancher éventuellement sur un convertisseur 12 V / 220 V) : c'est l'assurance que la séance d'astrophotographie ne risque pas d'être écourtée par manque de courant électrique. Autre accessoire optionnel, coûteux mais pratique : le viseur d'angle, qui évite le torticolis avec certains instruments lorsqu'ils pointent vers le zénith.

La question du meilleur boîtier pour l'astrophotographie revient fréquemment sur les forums astronomiques. De prime abord, tous les reflex sont à égalité car tous possèdent les capacités essentielles pour

ce loisir : format RAW, pose B, mode manuel pour le réglage d'exposition (vitesse et diaphragme), affichage de l'histogramme d'une image. En astrophotographie, les modes perfectionnés d'exposition ou d'autofocus ne servent à rien ! De même, une vitesse d'obturation très élevée (1/8 000 s) ou encore la capacité à prendre un grand nombre d'images en rafale (grâce à la mémoire-tampon, nommée *buffer*) ne sont pas nécessaires. Et nul besoin d'insister sur l'inutilité du flash, qui doit être désactivé systématiquement lors des prises de vue.

À l'heure où ces lignes sont écrites, ce sont les reflex de la gamme Canon (30D, 350D, 5D) qui sont, et de loin, les plus répandus chez les astrophotographes, grâce à un bruit de lecture et un signal thermique (voir chapitre 3) particulièrement bien maîtrisés et qui leur confèrent une indéniable longueur d'avance en longue pose. Canon a même proposé en 2005 une variante astronomique du 20D, le 20Da dont nous en reparlerons au chapitre 7. Mais cela ne signifie pas que des appareils d'autres marques ne puissent pas être utilisés : de bons résultats ont également été obtenus notamment avec des appareils tels que le Nikon D70. Et cette situation peut vite évoluer : le marché des APN est en perpétuel renouvellement et un fabricant peut très bien sortir demain un appareil qui dominera le marché de l'astrophotographie en étant doté, par hasard ou non, de caractéristiques particulièrement adaptées à cet usage.

### L'APN reflex, plus facile que la caméra CCD ?

Dans le milieu amateur, les caméras CCD ont une réputation de lourdeur et de complexité d'utilisation par rapport aux APN. C'est en grande partie une idée reçue.

1. Une caméra CCD consomme plus de courant électrique qu'un APN : aujourd'hui, la plupart des caméras CCD fonctionnent sur 12 V et ne consomment pas plus de 2 A : une simple batterie automobile auxiliaire de 40 Ah offre plusieurs nuits d'images à l'amateur itinérant. Lorsqu'il faut transporter une monture équatoriale et un tube optique, un pare-buée, des contrepoids, un trépied, une valise d'accessoires ainsi qu'un siège et une bouteille thermos, une batterie supplémentaire est-elle vraiment un problème ?
2. Une caméra CCD nécessite un ordinateur : c'est exact, mais cet inconvénient se traduit par un confort d'utilisation supérieur et des possibilités de pilotage accrues. On constate d'ailleurs que la plupart des amateurs qui utilisent un APN et qui disposent d'un ordinateur portable ne se privent pas de l'emporter avec eux (voir encadré). Et les webcams, reines de la photographie des planètes, nécessitent également un ordinateur !
3. Le repérage et le cadrage des objets sont plus faciles avec un APN : c'est exact seulement pour les objets brillants, par exemple la Lune ou les planètes, que l'on voit bien au travers du viseur du reflex. Beaucoup d'objets de ciel profond sont difficiles voire impossibles à distinguer de cette manière, le dépoli d'un appareil reflex procurant une image qui est bien moins lumineuse qu'un oculaire (et sur laquelle il est de surcroît difficile de juger de la mise au point). Si l'on parvient à distinguer le noyau d'une galaxie ou la partie brillante d'une nébuleuse, ses exten-



APN reflex équipé de sa télécommande programmable (intervallomètre), de son adaptateur secteur et d'un viseur d'angle.

### L'APN avec ou sans ordinateur ?

*Même si un APN n'a pas besoin d'ordinateur pour fonctionner, l'astrophotographe qui dispose d'un ordinateur de bureau en poste fixe ou d'un portable s'il est itinérant aurait tort de s'en priver. En effet, apprécier la qualité des images (en termes de cadrage, de bruit, de suivi ou de netteté de mise au point) ou détecter un contretemps survenant en cours de prise de vue (bougé, modification du cadrage ou de la mise au point, apparition de buée sur les optiques...) s'effectue de manière plus pratique et précise sur un véritable écran d'ordinateur que sur le minuscule écran de l'APN qui est, de surcroît, souvent placé en astrophotographie dans une position telle que sa consultation relève de la contorsion ! De plus, ces vérifications peuvent être effectuées pendant que les poses continuent sur l'APN.*

sions sont inaccessibles visuellement, ce qui ne facilite pas un cadrage soigné. Il faut lancer une pose de quelques secondes à quelques dizaines de secondes pour les faire apparaître, recadrer, lancer une nouvelle pose de contrôle, et ainsi de suite. A contrario, la caméra CCD, grâce au binning qui la rend des dizaines de fois plus sensible qu'un APN, permet de distinguer directement à l'ordinateur les extensions faibles d'une galaxie ou d'une nébuleuse en quelques secondes de pose, avec un temps de lecture très court. Côté mise au point, la méthode d'acquisition en fenêtrage continu sur une étoile, disponible uniquement pour les caméras CCD, se révèle très pratique et précise (voir chapitre 4).

Pour avoir utilisé les deux types d'appareil de manière intensive et ne rechignant pas à emporter un ordinateur portable, j'ai, sur le terrain, un peu plus de plaisir à utiliser ma caméra CCD que mon APN. Mais ce n'est qu'un point de vue personnel...

## Webcams et caméras vidéo

C'est en 1998 que des amateurs français ont eu l'idée, étrange mais ô combien fructueuse, d'installer une webcam dépourvue de son objectif sur un instrument astronomique pour réaliser des photographies de la Lune et des planètes. Ils se sont vite aperçus que, grâce à la lutte contre la turbulence permise par la vidéo, les performances planétaires étaient bien supérieures à celles obtenues avec les APN et les caméras CCD, ainsi que nous le verrons au chapitre 5.

À l'heure actuelle (2005), les webcams les plus évoluées disposent de capteurs d'environ 300 000 photosites et de 4,5 mm de diagonale, délivrant des vidéos au format VGA, soit 640 x 480 pixels. C'est tout à fait suffisant sur les planètes mais cela limite le champ de vision sur la Lune ou le Soleil. On peut espérer que des webcams à plus grand nombre de photosites, dotées de liaisons rapides USB2 (j'entends par là une véritable liaison au débit USB2 et non une liaison compatible avec l'USB2 mais au débit de l'USB1...), voient bientôt le jour. Ici aussi, sachez déjouer les pièges du marketing : certaines webcams présentées comme délivrant des images en 800 x 600 ou 1 280 x 960 pixels ne disposent pas d'un capteur différent des autres ; cette taille

d'image est réservée aux images fixes et non aux vidéos, car elle est obtenue tout simplement par agrandissement logiciel (interpolation) des images, ce qui n'offre aucun intérêt. De la même manière, certaines webcams sont présentées comme étant capables de fournir 60 ou 90 images par seconde, mais sans préciser qu'il s'agit alors d'images quatre fois plus petites (320 x 240 pixels) ! En réalité, même la vitesse de 30 images par seconde n'est jamais utilisée en USB1 à cause de la compression trop forte des données nécessaire à leur transmission en temps réel à l'ordinateur. Les webcams fournissent des fichiers vidéos au format AVI (voir Annexe 1), exploitables par de nombreux logiciels astronomiques. Les plus performantes effectuent une numérisation sur 10 bits mais les images sont converties en 8 bits pour leur enregistrement en AVI.

Dès son apparition, c'est la Vesta Pro de Philips qui fut adoptée par la majorité des amateurs pour sa qualité d'image supérieure à celle délivrée par la plupart des autres modèles. Elle a été remplacée par sa sœur jumelle, la ToUcam Pro puis la ToUcam Pro II. Leurs photosites mesurent 5,6 microns. Certaines webcams sont proposées avec des capteurs CCD, d'autres avec des capteurs CMOS ; pour l'instant, ce sont les premières qui procurent les meilleurs résultats. Comme pour les APN, le marché évolue vite mais il se trouve toujours un amateur pour tester une nouveauté : je vous conseille de consulter les listes de discussion et forums Internet afin d'obtenir les informations sur les essais des matériels les plus récents.

Bien que plus coûteuses (quelques centaines d'euros contre une centaine), les petites caméras vidéo utilisées à l'origine pour la surveillance sont une alternative intéressante aux webcams. Certaines d'entre elles comportent des capteurs de dimensions plus importantes que celles des webcams (format 1/3"). Elles délivrent, en couleur ou en monochrome selon le modèle, un signal vidéo au standard PAL pour l'Europe et NTSC pour les USA. Elles sont donc connectables directement à un téléviseur. En revanche, leur connexion à un ordinateur pour l'enregistrement des séquences d'images nécessite un dispositif d'acquisition vidéo transformant le signal vidéo analogique en séquence numérique. On trouve facilement de tels dispositifs dans le commerce (Dazzle, Pinnacle...) sous forme de carte pour un ordinateur de bureau ou de boîtier avec liaison USB2, Firewire ou PCMCIA pour les portables. En PAL, le format des images est un peu plus grand que celui d'une webcam (720 x 576 pixels) et l'enregistrement se fait à 25 images par seconde en format MPEG2 ou en format vidéo numérique DV. Il faut veiller, lors de l'achat, à ce que le dispositif soit effectivement capable d'enregistrer des vidéos selon ces spécifications. Ces vidéos seront converties en format AVI pour les rendre exploitables par les logiciels de traitement astronomique.

De nombreux modèles de ce type de caméra sont disponibles auprès d'Astrovid aux USA (voir Annexe 2).

En 2005 est apparue, sous la marque Lumenera notamment, une nouvelle génération de caméras vidéo couleur et monochrome. Celles-ci présentent l'avantage d'une liaison directe à haut débit USB2 ou Firewire et sont pourvues de capteurs de plus d'un million de pixels. Bien que nettement plus coûteuses que les webcams, elles sont très attirantes pour les amateurs férus d'imagerie planétaire, solaire et lunaire à haute définition.



Ci-dessus, deux caméras vidéo et un boîtier d'acquisition vidéo.

Ci-contre, la caméra et son petit boîtier de commande permettant de régler le gain, la vitesse d'obturation et le gamma.

Ci-contre, une caméra Lumenera, sorte de « super-webcam » (document Lumenera).



La Philips ToUcam Pro II à capteur CCD a été, en 2005, la webcam la plus prisée par les astrophotographes.





## Webcam, capteur monochrome et longue pose

Les premières webcams étaient dotées de capteurs monochromes. Mais, partant du principe que la couleur c'est le progrès, les constructeurs leur ont vite substitué des modèles couleur. Pourtant, des webcams monochromes bon marché auraient beaucoup de succès chez les astronomes amateurs. La preuve : certains d'entre eux les modifient pour y installer un tel capteur. Le nouveau capteur monochrome doit naturellement être compatible avec celui qu'il remplace, et ce sur de nombreux aspects tels que le nombre de photosites ou les tensions d'alimentation et de commande. Cette opération nécessite un bon savoir-faire en matière de soudage, car les pattes des composants sont extrêmement serrées et fragiles. Elle est un peu plus simple si les deux capteurs sont de même dimension, ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, il est possible de remplacer un capteur couleur 1/4" par un capteur monochrome 1/4", 1/3" ou 1/2". Difficulté supplémentaire : ces capteurs monochromes ne sont pas très coûteux mais ils ne sont pas vendus à l'unité, les amateurs doivent donc se regrouper pour les commander par lots de plusieurs dizaines et se les redistribuer.

Utilisée telle quelle, une webcam n'est pas apte à la photographie du ciel profond. En effet, le temps de pose le plus long qu'elle est capable de supporter est très inférieur à la seconde. Mais, là encore, ce serait sans compter avec l'ingéniosité technique des amateurs, et en particulier Steve Chambers qui fut le premier à contourner cette limitation. Sa modification « longue pose » d'une webcam ouvre l'accès à des temps de pose aussi longs que voulu et consiste en quelques modifications matérielles nécessitant des composants supplémentaires... et un fer à souder. Le logiciel d'acquisition doit, en outre, être capable de piloter la webcam en mode longue pose, ce qui est notamment le cas d'Iris, d'Astroart, d'Astrosnap ou encore de Registax. Une modification auxiliaire consiste à permettre la coupure de l'alimentation du préamplificateur du capteur, susceptible de générer de la lumière parasite (voir chapitre 3).

Ces diverses modifications sont décrites, pour plusieurs modèles de webcams, sur le site de Steve Chambers ([www.pmdo.com/wintro.htm](http://www.pmdo.com/wintro.htm)) et sur les sites connexes.

Dans la foulée, d'autres modifications des webcams ont été développées. Elles sont plus simples à mettre en œuvre et sont réversibles car elles ne nécessitent que le chargement dans la webcam d'une version modifiée de son logiciel interne (firmware) :

- la modification « mode RAW » permet récupérer les vidéos en mode RAW, comme pour un APN reflex ; il faut ensuite utiliser un logiciel capable de convertir ces vidéos du format RAW en format RVB, ce que savent faire notamment Registax et Iris ;
- la modification « sharpen 0 » permet de supprimer le traitement interne d'accentuation des images (voir chapitre 5).

Le logiciel WcRmac de Martin Burri permet de charger de manière très simple dans de nombreux types de webcams un firmware modifié, les instructions d'installation et d'utilisation se trouvent sur le site d'Étienne Bonduelle :

[www.astrosurf.com/astrobond/ebrawf.htm](http://www.astrosurf.com/astrobond/ebrawf.htm).

La firme Atik propose des caméras longue pose fabriquées à partir de webcams, avec capteurs couleur et monochromes de différentes dimensions (voir Annexe 2).

## Le matériel informatique

Les exigences concernant le matériel informatique dépendent du type d'appareil utilisé et des contraintes de prise de vue. Par exemple, l'amateur itinérant qui utilise une webcam ou une caméra CCD devra se doter d'un ordinateur portable : il est exclu, pour des raisons de fiabilité et de consommation électrique, d'emporter un ordinateur de bureau. Un portable ne craint pas le froid et l'humidité de la nuit tant qu'il reste allumé car il réchauffe et assèche l'air autour de lui. Un modèle peu performant, éventuellement acheté d'occasion suffit : il n'est là que pour stocker les images et permettre de les contrôler confortablement sur un grand écran. Son disque dur doit offrir une capacité suffisante pour toutes les images d'une nuit (images brutes, PLU, noirs, etc.).

Pour le traitement et l'affichage des résultats, les exigences dépendent du type d'image. Avec une webcam, un affichage en 640 x 480 suffit. En revanche, pour des images prises avec des capteurs à plusieurs millions de pixels, un affichage en 1 600 x 1 200 pixels est intéressant (même s'il est incapable, avec ses 2 millions de pixels à peine, d'afficher à pleine échelle une image de 8 millions de pixels !), ainsi qu'un processeur rapide. 65 000 couleurs et 64 niveaux de gris sont un minimum, il est préférable de travailler en 16 millions de couleurs et 256 niveaux de gris. Les gigaoctets s'accumulent vite en astrophotographie et un stockage de masse se révèle indispensable : disque dur de très grande capacité ou, plus économique, graveur de CD ou de DVD. Il est conseillé de conserver les images brutes car elles sont l'équivalent du négatif argentique. Les APN ne leur donnant pas de noms explicites, il faut les répertorier soigneusement (par objet et/ou par date) et conserver quelques notes sur leurs conditions de prise de vue (instrument, lieu, temps de pose, réglages, etc.) : la mémoire humaine fait vite défaut au bout de quelques semaines !

La quasi totalité des logiciels astronomiques ne fonctionnent que sur Microsoft Windows.

## L'impression des images

La photographie astronomique est une des plus délicates qui soit en matière d'impression. Une imprimante de qualité n'est pas superflue pour bien rendre les aplats noirs et les subtiles variations de couleurs et de niveaux de gris d'une planète ou d'une nébuleuse. Le meilleur résultat est fourni par le procédé par « sublimation » mais certaines imprimantes « photo » à jet d'encre s'en tirent très bien, surtout celles qui disposent de plusieurs encres noires ou qui utilisent les encres couleur pour rendre les noirs plus denses. Le format d'impression dépend évidemment de l'appareil utilisé : avec une webcam, il n'est pas utile de dépasser le format 10 x 15 ; avec un APN à 8 millions de photosites, des tirages format A4, voire un peu plus grands, peuvent être envisagés... à condition que la finesse des images le permette !







# Défauts et correction des images

Une photographie astronomique peut être affectée par de nombreux défauts d'origines très diverses. Certains apparaissent de manière systématique, quel que soit le type d'objet céleste photographié ; des méthodes et traitements d'image appropriés, regroupés sous les termes « prétraitement » et « composition », permettent de les combattre efficacement afin de rendre les images plus fidèles et plus esthétiques.

*La nébuleuse de la Rosette  
dans la constellation de la Licorne.*





Dans le langage courant, le qualificatif « numérique » est souvent associé à l'idée de fidélité, voire de perfection. Pourtant, un appareil électronique, tout autant que la lumière capturée, n'échappe pas aux lois de la physique : dans le monde réel, la perfection n'existe pas ! Il suffit d'examiner les images brutes issues d'engins spatiaux ou de grands télescopes terrestres pour s'en convaincre. Tout appareil introduit dans l'image des défauts qui constituent en quelque sorte sa signature et qui doivent être éliminés. Une des grandes forces du numérique n'est pas de fournir des images exemptes de défauts, elle est de permettre, grâce à des techniques telles que le prétraitement et le compositage, de combattre

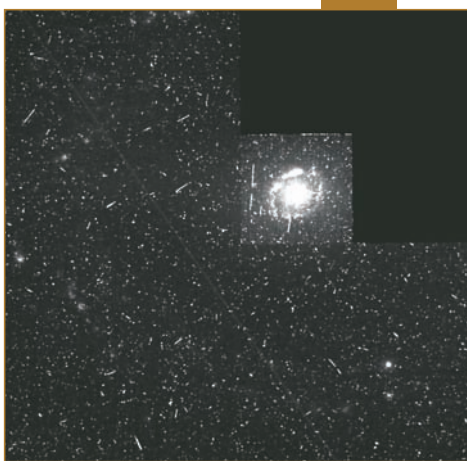
certain d'entre eux de manière simple et efficace.

Nous allons, dans ce chapitre, examiner les propriétés de trois défauts majeurs et la manière de les éliminer ou de les minimiser : le signal thermique, les défauts d'uniformité et enfin le plus redoutable de tous, le bruit. Les explications associées nous aideront aussi à comprendre les réponses à de nombreuses questions que nous nous poserons au fil des autres chapitres, par exemple : une combinaison de 10 poses d'une minute est-elle équivalente à une seule pose de 10 minutes ? Ou encore : peut-on photographier une galaxie depuis un centre-ville aussi facilement qu'une planète ?



Partie centrale d'une image brute de la nébuleuse de la Rosette obtenue avec une lunette de 130 mm et une caméra CCD monochrome en 5 minutes de pose.

L'image de la page précédente est un compositage de 60 images telles que celle-ci, prétraitées, recentrées et composées comme décrit dans le présent chapitre.



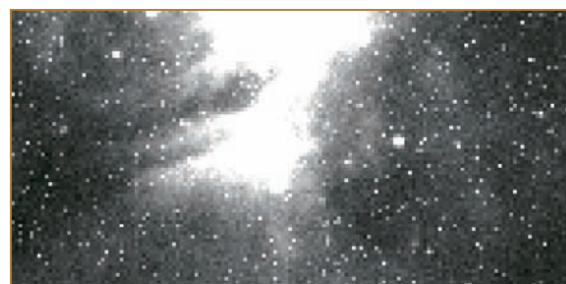
Tout comme les images d'amateurs, les images brutes du télescope spatial Hubble comportent des défauts bien visibles, dus en particulier au très grand nombre de rayons cosmiques traversant le capteur durant les poses. Elles subissent des traitements similaires à ceux décrits dans ce chapitre avant leur publication. Copyright NASA et STScI.

## Le signal thermique

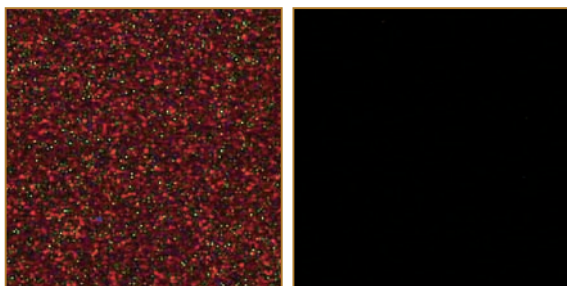
### Causes et caractéristiques du signal thermique

Le signal lumineux provenant du ciel n'est pas la seule composante d'une image issue d'un appareil numérique. Nous avons vu au chapitre 2 qu'un capteur stockait l'information lumineuse dans chaque photosite par l'intermédiaire d'électrons, grâce à l'effet photoélectrique. Mais un phénomène supplémentaire se produit : à température ambiante, les atomes de la matière sont sujets à une agitation extrêmement rapide, ce qui provoque, chez certains de ceux qui constituent les photosites, la libération d'électrons qui viennent, lors des poses longues, s'ajouter aux premiers.

On pourrait supposer que cette accumulation d'électrons d'origine thermique est homogène d'un photosite à l'autre, provoquant une espèce de voile de fond uniforme. En réalité, à cause d'infimes différences de composition chimique, chaque photosite se comporte à sa manière et accumule les électrons thermiques selon son rythme. Certains sont particulièrement prolifiques en électrons, on les appelle les « photosites chauds » (ou « pixels chauds » par abus de langage), car ils se comportent comme s'ils se trouvaient à une température supérieure à celle de leurs voisins. Une pose de plusieurs minutes dans l'obscurité totale prend donc la forme d'un fond noir parsemé d'une constellation de points plus ou moins brillants.

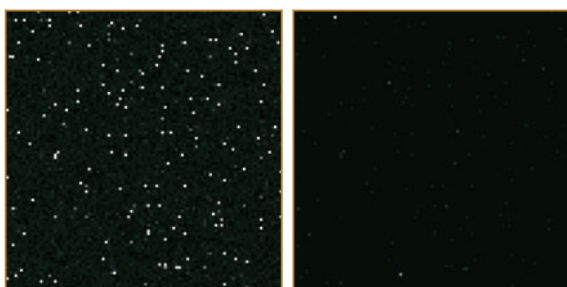


Portion agrandie d'une pose de 5 min en ciel profond, prise avec une caméra CCD, avant et après correction du signal thermique. Les seuils de visualisation (voir Annexe 1) ont été fortement resserrés afin de bien distinguer le signal thermique.



Portions agrandies de poses de 5 min prises dans l'obscurité à 20° C avec deux modèles d'APN différents. On constate que le signal thermique peut varier énormément d'un modèle à l'autre. Même si son origine n'est pas lumineuse, le signal d'un photosite chaud apparaît coloré à l'image puisque l'appareil interprète l'information provenant de chaque photosite comme étant de la couleur du filtre le recouvrant.

Pour un photosite donné, la quantité d'électrons accumulée est proportionnelle au temps pendant lequel on a laissé l'agitation thermique agir sans vider le photosite de son stock d'électrons, c'est-à-dire au temps de pose. Mais un autre facteur intervient : la température du capteur. Plus elle est élevée, plus les atomes sont agités et libèrent facilement leurs électrons. La relation est exponentielle : lorsque la température augmente d'environ 6 à 7° C, le signal thermique, aussi appelé « courant d'obscurité », double. L'intérêt de refroidir le capteur est évident : une diminution de température d'environ 13° C provoque une réduction du signal thermique d'un facteur 4, une diminution de la température d'une vingtaine de degrés réduit le signal thermique d'un facteur 8, et ainsi de suite.



Portion d'une image de 10 min prise dans l'obscurité avec une caméra CCD. À gauche, à 20° C ; à droite, à -20° C.

## Correction du signal thermique

Une fois mélangés, il est impossible de distinguer les électrons d'origine thermique de ceux d'origine lumineuse. Mais nous allons pouvoir retirer le signal thermique qui pollue l'image en profitant de son caractère reproductible. Le moyen de le refabriquer est simple : faire une pose dans l'obscurité totale. Cette image de correction est appelée couramment « une image noire », ou « noir » tout court (*dark* en anglais). La correction s'effectue ensuite par soustraction de ce noir de l'image du ciel à corriger. Cette correction n'est pas nécessaire lorsque les poses sont courtes (par exemple 1/1 000 s ou même 1/30 s), car le signal thermique n'a pas le temps de se manifester.

### Acquisition d'un noir

Compte tenu de la sensibilité d'un capteur numérique, il convient de s'assurer qu'il est très bien protégé de la lumière durant l'acquisition du noir et qu'il n'y a pas la moindre fuite de lumière dans l'appareil ou dans l'instrument. Il peut arriver que certains photosites chauds apparaissent saturés, car les électrons thermiques les ont complète-

ment remplis. Sur ces pixels, la correction ne sera pas correcte puisque l'information lumineuse a été perdue.

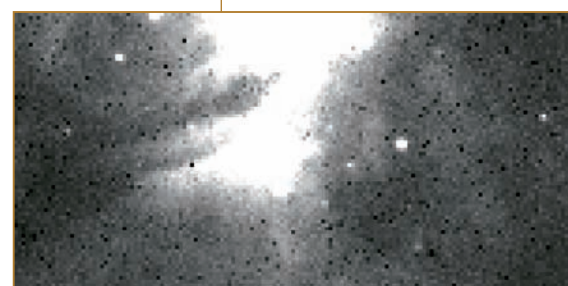
Puisque le signal thermique dépend à la fois de la température et de la durée de la pose, le noir doit avoir été obtenu avec le même temps de pose et à la même température que l'image à corriger. Avec une caméra CCD régulée en température, les noirs peuvent être réalisés à n'importe quel moment de la nuit, et même réutilisés lors de nuits ultérieures : il est tout à fait possible de constituer une bibliothèque de noirs correspondant à divers temps de pose et diverses températures. Mais lorsque la température du capteur n'est pas régulée, elle risque fort de varier au cours de la nuit, en suivant l'évolution de la température ambiante. L'expérience montre que la température du capteur d'un APN peut mettre longtemps à se stabiliser et qu'elle peut varier de plusieurs degrés selon l'activité de l'appareil dans les minutes qui précèdent la prise d'une image ! Dans ce cas, il est important de prendre les noirs juste avant ou après les images du ciel, voire en alternance avec celles-ci.

Sur les APN, il existe une fonction – débrayable – dont le rôle est d'éliminer automatiquement le signal thermique. Lorsqu'elle est activée, l'appareil, à l'issue de la pose, fait une seconde pose de même durée que la pose écoulée, obturateur fermé, et la soustrait automatiquement de la première avant enregistrement de l'image. Cette fonction est appelée par les fabricants « Réduction de bruit » (à ne pas confondre avec une autre fonction, portant souvent le même nom, destinée à lisser les images par un traitement numérique interne à l'appareil). Ce terme est particulièrement malheureux : il s'agit bel et bien de la soustraction d'un signal et non d'un bruit (la nuance a son importance car un bruit subsiste à l'issue de cette soustraction de signal, comme nous le verrons plus loin). L'inconvénient de cette méthode est que la moitié du temps d'acquisition est occupée à la réalisation des noirs !

### Le noir générique

Lorsqu'il n'a pas été possible d'acquérir un ou plusieurs noirs à la même température que celle des images à corriger, il existe encore un moyen de s'en tirer : utiliser un noir, appelé « noir générique », réalisé à une autre température et/ou avec un autre temps de pose, et laisser le logiciel astronomique déterminer lui-même le bon coefficient d'ajustement permettant de corriger au mieux l'image du ciel. Cette possibilité se base sur une propriété remarquable du signal thermique qui fait que deux noirs réalisés avec des temps de pose différents et/ou à des températures différentes sont proportionnels : pour chaque photosite, le signal thermique est dans le même rapport entre les deux images.

Par exemple, si un noir de 5 min est utilisé pour corriger des images de 1 min obtenues à la même température, le logiciel astronomique sait l'ajuster en lui appliquant un coefficient qu'il va déterminer précisément en analysant les images et qui sera, dans cet exemple, voisin de 1/5. Pour une image issue d'une caméra CCD ou d'un APN en mode RAW, une image d'offset (voir encadré) doit avoir été retirée d'un noir générique avant son utilisation, afin de n'inclure dans cet ajustement que le signal thermique et non le signal d'offset. Par conséquent, il faudra également soustraire explicitement un offset des images à corriger, puisqu'il n'est plus inclus dans le noir.



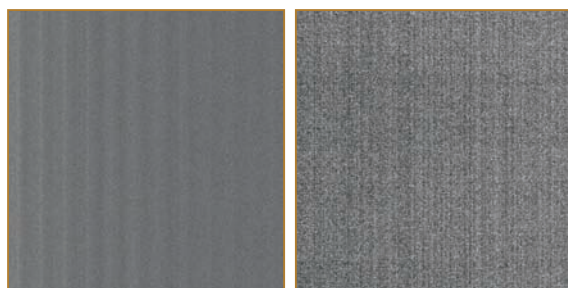
En haut, l'image de la page précédente après soustraction d'un noir réalisé à une température trop basse de 5° C. La correction n'est plus satisfaisante, les résidus de pixels chauds sont encore bien visibles. Si, au contraire, le noir avait été réalisé à une température trop élevée (en bas), le fond de l'image corrigée serait constellé de points sombres.



## Le signal d'offset

Si l'on installe une caméra CCD dans l'obscurité et que l'on déclenche une pose de très courte durée, on pourrait s'attendre à ce que tous les pixels de l'image soient à la valeur zéro puisque aucune lumière n'a atteint le capteur et que le signal thermique n'a pas eu le temps de se manifester. En réalité, on constate qu'ils ont tous une valeur faible, plus ou moins constante d'un pixel à l'autre. En effet, pour éviter tout risque de perte d'information, les valeurs d'intensité issues de la numérisation de l'image sont volontairement biaisées : le fond des images n'est pas tout à fait noir mais gris très sombre, au maximum de quelques pourcents de la dynamique disponible.

Le signal contenu dans cette image s'appelle indifféremment « offset », « bias » ou « précharge ». Sur les images issues d'un APN en format JPEG, ce signal d'offset n'est pas visible car il est déjà soustrait par l'appareil avant l'enregistrement des images. En revanche, il subsiste dans une image en format RAW puisqu'elle contient les données brutes directement issues du capteur et de la chaîne de lecture. Sa soustraction au moyen d'une image appelée « offset » est donc nécessaire lors des prétraitements sur des poses courtes en format RAW ou issues d'une caméra CCD, que ce soit pour les images brutes ou pour la PLU.



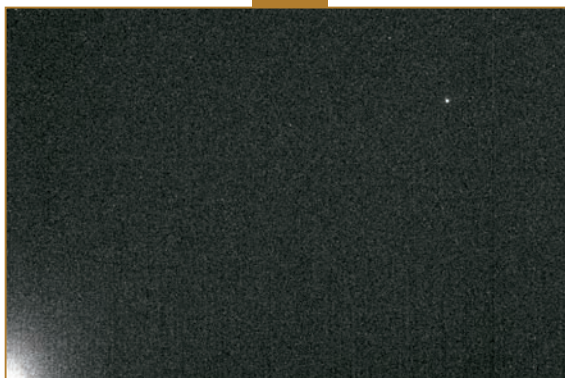
Une image d'offset est généralement uniforme mais, lorsque les seuils ou les niveaux sont fortement resserrés afin de mettre en évidence de très petites variations dans l'image, une trame peut s'y dessiner, en plus du bruit de lecture (voir plus loin). À gauche, une portion d'offset issu d'une caméra CCD montre quelques oscillations dans une partie de l'image. À droite, un offset issu d'un APN reflex en mode RAW comporte un quadrillage en filigrane. Tant que ces figures se reproduisent à l'identique d'une image à l'autre, elles ne posent pas de problème car on peut les soustraire. Mais si elles varient en intensité ou en position, par exemple à cause de câbles défectueux ou d'une source de parasites située à proximité de l'appareil ou dans celui-ci, les choses deviennent plus délicates car ces trames risquent de subsister à l'issue des prétraitements.

## Électroluminescence

Les caméras CCD actuelles présentent de meilleures performances que leurs ancêtres, mais le refroidissement du capteur reste indispensable pour des poses de plusieurs dizaines de secondes et, même dans ce cas, leur signal thermique est encore bien visible et doit être corrigé. Certains appareils reflex numériques présentent un niveau de signal thermique étonnamment bas, à tel point qu'il passe parfois pratiquement inaperçu sur des poses de plusieurs minutes. Bien que leurs fabricants gardent jalousement leurs secrets, on peut supposer que

des traitements à base d'algorithmes d'identification des pixels chauds ou d'ajustement d'un noir générique sont appliqués dans certains appareils avant enregistrement de l'image. Toutefois, ces traitements ne sont pas toujours anodins et sont malheureusement capables, sur certains appareils, d'altérer les étoiles fines en les prenant pour des pixels chauds !

Le phénomène d'électroluminescence, ici dans le coin inférieur gauche.



On pourra remarquer dans un coin de l'image prise avec certains appareils une lumière diffuse dont l'origine est le pré-amplificateur intégré au capteur CCD : ce pré-amplificateur reste sous tension pendant toute la pose, même si cela n'est pas utile. Sur les appareils spécifiquement destinés à la longue pose, il n'est mis en fonction que durant la lecture de l'image et n'émet donc pas de lumière pendant la pose. Tant que cet effet, nommé « électroluminescence », ne touche qu'une petite partie de l'image et n'est pas trop intense, il n'est pas rédhibitoire car un noir le corrige facilement.

## Les défauts d'uniformité

Certains défauts trouvent leur origine dans l'altération de la lumière avant qu'elle n'arrive sur la surface sensible. Impossible en argentique, leur correction est facile en numérique.

## Caractéristiques des défauts d'uniformité

Les défauts d'uniformité prennent deux formes.

- Un assombrissement de l'image en périphérie ou dans les angles, nommé « vignettage » et bien connu des photographes. Tout instrument optique, que ce soit un objectif photo, une lunette ou un télescope, présente ce phénomène à des degrés divers dépendant de sa formule optique, de son ouverture et de la présence éventuelle de compléments optiques. La dimension du capteur joue évidemment un rôle : plus celui-ci est grand, plus le vignettage est perceptible. La conséquence de ce phénomène est que le fond de l'image n'est pas uniforme, ce qui rend difficile une visualisation correcte de toutes les parties de l'image simultanément.

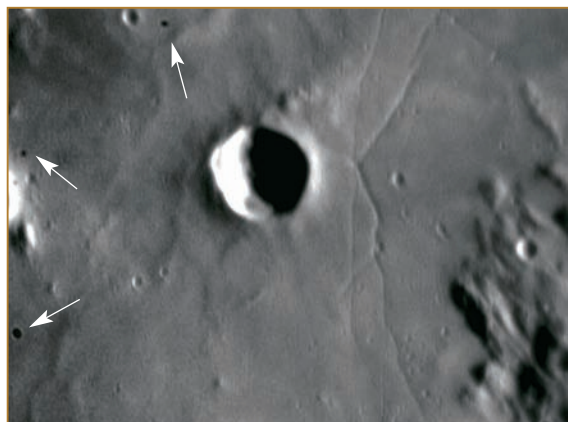


Image du ciel nocturne obtenue avec une caméra CCD montée sur un télescope de type Schmidt-Cassegrain équipé d'un réducteur de focale (F/D 6). À cause de petits décalages mécaniques, il est fréquent que le vignettage ne soit pas parfaitement centré dans l'image.

- Des petites taches sombres plus ou moins floues disséminées sur l'image. Elles sont causées par des poussières qui se sont déposées sur le capteur de l'appareil et qui projettent leur ombre sur la zone sensible (voir encadré). La taille et la netteté d'une ombre sur l'image dépendent de la dimension de la poussière, de sa distance à la zone sensible ainsi que du rapport F/D de l'instrument. Le capteur des APN à objectif non interchangeable est protégé des pous-



sières par l'objectif, à l'inverse de celui des appareils reflex, des webcams à objectif amovible et des caméras CCD.



Plusieurs ombres de poussières sont visibles sur cette image extraite d'une vidéo lunaire réalisée à F/D 40, près des bords gauche et supérieur.

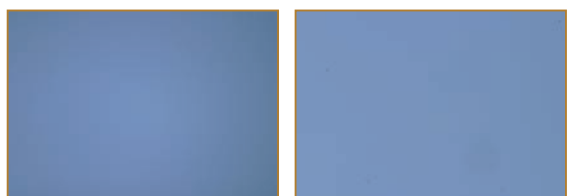


Image du ciel diurne obtenue avec un APN et un objectif ouvert à F/D 2,8 (à gauche) puis diaphragmé à F/D 32 (à droite). Lorsque l'optique est plus fermée, le vignetage est généralement moins prononcé alors que les ombres de poussières sont plus petites et plus nettes. En regard de ces images, l'explication par les rayons lumineux : un faisceau ouvert donne des ombres de poussières grandes et diluées, alors qu'un faisceau plus fermé engendre des ombres plus petites mais plus marquées.

L'Annexe 4 décrit les principales causes de défauts d'uniformité et leurs remèdes, notamment le vignetage par la bague d'adaptation de l'appareil qui est une cause sur laquelle il est facile d'agir si nécessaire.

Il existe une autre source de non uniformité de l'image : les photosites d'un capteur ont des sensibilités à la lumière très proches, mais pas exactement semblables. Cette source est plus difficile à mettre en évidence car le bruit peut la masquer, mais elle n'est pas forcément négligeable.

## Correction des défauts d'uniformité

Tout comme le signal thermique, les défauts d'uniformité peuvent être corrigés car ils sont reproductibles. Il suffit pour cela de prendre une image en visant une plage lumineuse uniforme (PLU). Ce qui est plus facile à dire qu'à faire, car l'uniformité de cette plage doit être très bonne : une variation de luminosité d'un ou deux pourcents, difficilement détectable à l'œil nu, se décèle très bien après correction des images.

### La réalisation de la PLU

Plusieurs techniques sont possibles pour réaliser ce qu'on appelle « une image de PLU », ou « PLU » tout court, aussi appelée en anglais *flat-field* ou *flat* (ce qui signifie « plat »). La méthode classique consiste à viser le ciel en fin de nuit, lorsque le jour commence à se lever et que les étoiles ne sont plus visibles.

Peu de temps après avoir débuté en imagerie, en 1993, j'ai imaginé la méthode suivante : une simple feuille de papier blanc, faisant office de diffuseur de lumière, est tendue sur l'ouverture de l'instrument de manière à l'obturer complètement, et une pose de quelques secondes est lancée sur la caméra. Pendant ce temps, je me place devant l'instrument avec un flash photographique déclenché à la main. Au bout de quelques essais permettant de trouver la bonne distance pour que l'image ne soit ni trop faible ni saturée, je réalise une série d'une dizaine d'images qui seront ensuite composées (voir plus loin).

J'utilise encore cette méthode qui me donne des PLU de bonne qualité, avec l'avantage de pouvoir la mettre en œuvre à tout moment de la nuit et en particulier lorsque je dois changer la configuration optique, sans devoir attendre que le jour se lève. N'importe quel objet diffusant la lumière peut être utilisé, à condition que la diffusion de lumière soit bien uniforme et que les objets ne soient pas visibles au travers. Une autre solution consiste à construire une boîte à lumière contenant le diffuseur et une ou plusieurs lampes. Une telle boîte, accrochée à l'avant de l'instrument, se révèle très pratique avec une webcam, elle permet de prendre des petites vidéos de PLU.

Avec mon APN, j'utilise la méthode suivante : je laisse l'objectif en place jusqu'au lendemain, je place dans son pare-soleil un disque de papier blanc et je réalise quelques clichés en visant un mur blanc.

### Les conditions d'une bonne PLU

Une PLU doit être réalisée strictement dans les mêmes conditions optiques que les images à corriger : même mise au point, même diaphragme et même focale sur un objectif photo. Sur un instrument astronomique, la mise au point doit également être conservée et les mêmes compléments optiques éventuels doivent rester en place (lentille de Barlow, réducteur de focale, oculaire de projection, flip-mirror et/ou filtres). L'appareil ne doit pas avoir été démonté puis remonté, ni même tourné sur lui-même, car la présence des poussières ou le centrage du vignetage pourraient s'en trouver modifiés.

Il est important que la PLU présente une bonne dynamique, environ la moitié ou les deux tiers de la dynamique disponible, mais elle ne doit comporter aucune zone saturée.

### Mécanisme de correction des défauts d'uniformité

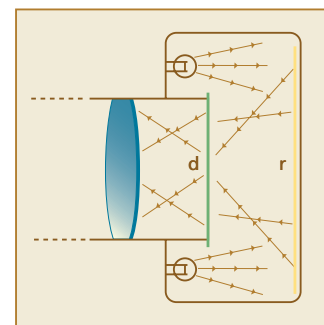
La correction de PLU s'effectue toujours après soustraction du noir, mais elle ne se fait pas de la même manière ; il serait en effet absurde de soustraire une PLU, qui présente des niveaux de lumière élevés, d'une image de ciel profond dont les niveaux de lumière sont faibles : le résultat contiendrait des valeurs très négatives ! Les effets du vignetage et des poussières étant l'atténuation de la lumière arrivant sur le capteur, celle-ci doit être ré-amplifiée lors de la correction qui se fait donc par une autre opération mathématique : une division des valeurs de l'image pixel à pixel.

Par exemple, supposons qu'une image de ciel profond présente un vignetage tel que les angles soient atténués de 20 % par rapport au centre de l'image. L'image de PLU, si elle est bien réalisée, va également présenter une atténuation de 20 % entre sa périphérie et son centre, même si ses niveaux de lumière sont très différents. Lorsque l'image à corriger va être divisée par l'image de PLU, il y aura compensation ( $0,80 / 0,80 = 1$ ) et elle va retrouver son uniformité. Pour des raisons pratiques, lorsqu'elle est effectuée par le logiciel astronomique, la division par l'image de PLU s'accompagne d'une multiplication de l'ensemble des pixels par la valeur moyenne de la PLU, afin de ne pas modifier le niveau d'intensité général de l'image à corriger. Si l'appareil délivre des images présentant un signal d'offset

Diverses techniques de PLU sont envisageables. Une simple feuille de papier blanc servant de diffuseur recouvre complètement l'avant de l'instrument ou de l'objectif (à gauche) ; de nuit, une pose de quelques secondes est lancée sur l'appareil, le temps de déclencher manuellement une lampe ou un flash photographique placé devant l'instrument.

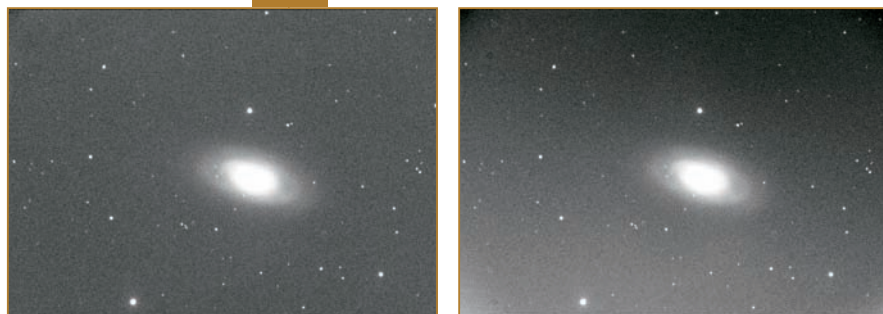


La distance à laquelle doit être placée la source de lumière est à déterminer par essais et dépend de nombreux facteurs tels que le rapport F/D de l'instrument ou la présence de filtres.



À droite, une boîte à lumière se fixant sur l'avant de l'instrument comporte un réflecteur (r) et un diffuseur (d) de lumière éclairés par plusieurs lampes ou leds.

non nul (caméra CCD ou APN en mode RAW), il est indispensable d'avoir soustrait une image d'offset de la PLU avant son utilisation.



À gauche, le vignetage bien visible sur l'image de la page 32 a été éliminé grâce à la correction de la PLU. À droite, la correction a été effectuée avec une PLU réalisée après que la caméra a été tournée sur elle-même : la correction n'est plus aussi bonne.

## Prétraitement des images

Le prétraitement des images brutes du ciel n'est rien d'autre que la correction combinée des défauts que nous venons de passer en revue : soustraction du signal thermique puis division par la PLU. L'objectif est de ne conserver que le signal qui nous intéresse, celui de la lumière recueillie, et cela de manière aussi fidèle que possible.

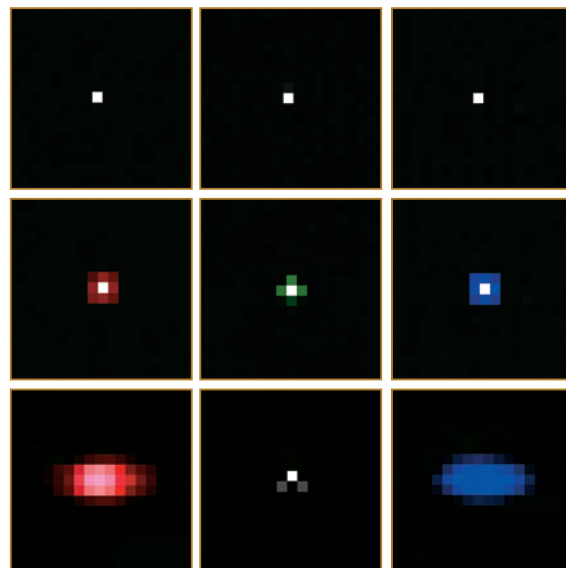
Les logiciels non astronomiques savent effectuer des soustractions entre images mais pas des divisions. Ils ne sont donc pas capables d'effectuer une correction de PLU rigoureuse. Photoshop, par exemple, comporte bien une fonction de compensation de vignetage (Correction de l'objectif, menu Filtre>Déformation), mais celle-ci est effectuée à partir d'un modèle de vignetage ajustable par quelques paramètres et non à partir d'une véritable image de PLU mesurant le vignetage réel de l'instrument ou de l'objectif et son éventuel décentrement. De plus, les ombres de poussières ne sont pas corrigées par cette fonction, ni la variation de sensibilité d'un photosite à l'autre.

À l'inverse, les logiciels astronomiques sont très bien adaptés à toutes les opérations de prétraitement et savent même, ce qui est un grand avantage, les effectuer en une commande unique sur tout un lot d'images : il suffit de leur indiquer la liste des images brutes à prétraiter ainsi que le nom des images de correction. Selon le logiciel utilisé, le prétraitement d'images RVB se fera couleur par couleur ou de manière globale. Les images obtenues avec une webcam se prétraitent comme les images issues d'une caméra CCD ou d'un APN,

car ce n'est pas le fichier vidéo qui est traité dans son ensemble, mais la série d'images sélectionnées qui en est extraite.

Il est toujours préférable de traiter les images en format non compressé et si possible codées sur plus de 8 bits. C'est le cas si on travaille en format 16 bits (FITS ou format propriétaire, voir Annexe 1) avec une caméra CCD ou en format RAW avec un APN reflex. Le format JPEG, fort utile une fois tous les traitements effectués pour transmettre l'image par e-mail ou pour la placer sur un site Web, est à éviter autant que possible : la compression d'image inhérente à ce format provoque en effet une

perte d'information et l'apparition d'artefacts et de motifs de fond indésirables qui viendront perturber la correction des images.

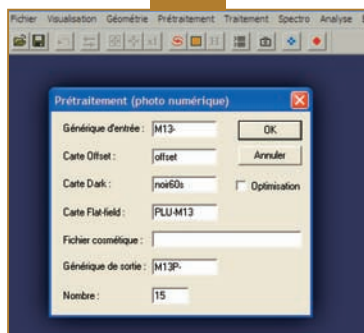


Portions fortement agrandies d'un noir obtenu en mode RAW, centrées autour de photosites chauds rouge, vert et bleu, avant dématricage sur la ligne supérieure et après dématricage sur la ligne centrale : les photosites chauds se sont transformés en pixels chauds. Ne touchant qu'un seul photosite, ces points ne devraient logiquement occuper qu'un seul pixel dans l'image. Mais les interpolations de dématricage les étalent quelque peu sur les pixels voisins, c'est la raison pour laquelle on effectue la correction du noir avant cette opération. Sur la ligne inférieure, le noir a été obtenu en JPEG : les pixels chauds sont fortement dégradés par des artefacts de compression. Ces artefacts dépendant du contenu de l'image, il y a toutes les chances pour que l'image à corriger avec un tel noir contienne des artefacts différents : la qualité de la correction risque de ne pas être satisfaisante.

Le prétraitement des images réalisées en mode RAW doit être effectué avec un logiciel astronomique sachant décoder le format RAW de l'appareil utilisé et prétraiter ce type d'image. Pour la réalisation des images de prétraitement, seul le réglage de sensibilité doit être conservé, les autres réglages (balance des blancs ou température de couleur, contraste/netteté/saturation, etc.) n'ayant pas d'effet sur une image RAW. En revanche, si les images fournies par l'appareil sont en JPEG, tous les réglages influant sur l'apparence ou le contenu des images (autres que le temps de pose) doivent être conservés : taille de l'image et taux de compression, contraste/netteté/saturation, balance des blancs ; pour une webcam, les réglages de gain/luminosité/contraste/gamma et de balance des blancs doivent également être conservés.

Bien qu'une image RAW soit censée être la retranscription fidèle des informations issues du capteur (voir Annexe 1), des amateurs ont découvert que le processeur de certains appareils reflex, notamment les Nikon D50, D70 et D200, appliquaient un traitement « masqué » d'analyse de l'image et d'élimination des pixels chauds avant enregistrement sur la carte mémoire. Sans inconvénient en photographie ordinaire, ce traitement constitue un véritable handicap pour la photographie du ciel profond puisqu'il est susceptible de prendre certaines étoiles pour des pixels chauds !

Le prétraitement des images par lot est une des fonctions de base de tout logiciel astronomique (ici Prism). Entre autres options, on reconnaît l'optimisation du noir.





# Les bruits et leur réduction

Nous venons de passer en revue différents défauts affectant systématiquement les images numériques et la manière de les corriger. Dans un monde (presque) parfait, ce chapitre s'arrêterait là. En réalité, il faut tenir compte d'un phénomène aussi sournois qu'omniprésent : le bruit – ou plutôt les bruits car ils sont d'origines diverses.

Le bruit se manifeste sous la forme d'une granulation plus ou moins visible dans l'image, c'est un peu l'équivalent du « grain » bien connu en photographie argentique (voir encadré). Cette granulation peut masquer des détails peu contrastés, voire être confondue avec de véritables détails. Sur une image couleur, lorsque chaque couche présente son propre bruit, le résultat est un patchwork plus ou moins coloré. Dans tous les cas, il s'agit d'un artefact qui altère la fidélité de l'image, un peu comme le souffle altère le son d'une chaîne hi-fi de mauvaise qualité.

## Signal et bruit

*La différence fondamentale entre un signal et un bruit est que seul le signal peut être reproduit à l'identique. Prenons une analogie avec un film diffusé à la télévision ; si la chaîne re-diffuse l'enregistrement, vous reverrez bien sûr le même film, on peut donc considérer qu'il s'agit d'un signal puisqu'il est reproductible à volonté. Mais, en cas de mauvaise réception, vous avez également vu des parasites superposés à l'image, une sorte de neige frétilante. Lors d'une rediffusion, il n'y a aucune raison pour que les mêmes parasites réapparaissent au même endroit et au même instant. C'est ce caractère aléatoire qui en fait un bruit : il ne redevient jamais identique à lui-même. (À noter qu'un spot de publicité interrompant le film au milieu d'une scène captivante est un signal, ce qui illustre le fait que certains signaux peuvent être moins recherchés que d'autres et que tout ce qui est indésirable n'est pas forcément un bruit...)*

## Les sources de bruit

En schématisant, on peut dire qu'à chaque signal est associé un bruit. Ce bruit altère de manière plus ou moins importante le signal qui lui correspond et l'empêche d'être reproduit de manière parfaite. Tout détecteur numérique ajoute dans l'image un bruit dû à son électronique de lecture et de numérisation, appelé « bruit de lecture ». Le bruit de lecture d'une caméra CCD se mesure souvent en nombre d'électrons par photosite, les bonnes caméras présentent des valeurs inférieures à 20 électrons par photosite.

Un autre bruit intervient dans les photographies à longue pose : le bruit thermique, à ne pas confondre avec le signal thermique qu'il accompagne et que nous avons décrit précédemment. Si l'on réalise deux noirs de même temps de pose à la même température, et que l'on soustrait une image de l'autre, on obtient une image dont le niveau moyen est nul mais qui présente de légères variations d'un pixel à l'autre : le signal thermique a bien été éliminé, mais les petites variations aléatoires de ce signal subsistent (et se combinent à celles du bruit de lecture). C'est la raison principale pour laquelle les capteurs des caméras CCD sont refroidis : on cherche à réduire le bruit thermique en diminuant le signal thermique.

Le dernier bruit – mais non le moindre – que l'on trouve dans une image du ciel est dû à la lumière elle-même. En effet, la lumière est composée de photons qui, comme des gouttes de pluie tombant sur le sol, arrivent de manière quelque peu désordonnée et jamais exactement en même quantité. Cette variation aléatoire du nombre de

photons – et donc du nombre d'électrons qui en découle – est naturellement appelé « bruit de photons ».

L'ensemble des bruits présents dans une image est souvent appelé « bruit numérique ». Mais il ne faut pas déduire de ce terme que le bruit présent dans l'image est purement dû à l'appareil. Plus l'appareil est de bonne qualité, c'est-à-dire moins il introduit de bruit, plus le bruit de photons devient prépondérant. Il s'agit d'une limite physique ultime : à cause de cette source de bruit, même un appareil parfait (c'est-à-dire sans aucune source interne de bruit) délivrerait des images bruitées.

## Le comportement du bruit

Une propriété fondamentale des bruits thermique et de photons est que leur amplitude dépend de l'intensité du signal qu'ils accompagnent. Plus il y a de signal, plus il y a de bruit, mais les lois de la physique, confirmées par l'expérience, nous enseignent qu'il n'y a pas proportionnalité entre signal et bruit : le niveau de bruit augmente comme la racine carrée du signal. Ainsi, un signal quatre fois plus élevé s'accompagne d'un bruit dont l'amplitude est seulement deux fois plus importante. Or, ce qui importe dans une image n'est pas la quantité absolue de bruit mais le niveau de bruit rapporté au niveau de signal utile (les photons des astres photographiés). C'est ce qu'on appelle le « rapport signal sur bruit » ou « RSB » et qui varie également comme la racine carrée du signal. Le RSB s'améliore donc lorsque la quantité de lumière recueillie augmente, de la même façon que questionner davantage de personnes améliore la fiabilité d'un sondage d'opinion. Le RSB est un facteur fondamental de la qualité esthétique d'une image : plus il est élevé, plus l'image sera profonde et douce et mieux les parties faibles des nébuleuses et des galaxies seront visibles.

Ce comportement présente la conséquence suivante : dès qu'un bruit domine un peu les autres, ces derniers peuvent être considérés comme négligeables. Il est donc inutile de faire la chasse aux sources de bruit secondaires, il est plus profitable de se concentrer sur la source principale de bruit. Celle-ci varie selon le type d'image et l'appareil. Si l'objet est suffisamment lumineux pour remplir une bonne partie de la dynamique du capteur (Lune, Soleil, planète), la source de bruit sera probablement le bruit de photons de l'objet lui-même. Mais, pour un objet de ciel profond, le bruit de photons est plus faible et il est possible que les bruits de lecture et thermique ne soient plus négligeables. Pour les objets faibles, un autre bruit peut avoir une influence importante : le bruit des photons du fond de ciel. Lorsque les images sont prises dans un ciel éclairé par la Lune ou par les lumières des villes, le signal de fond de ciel est élevé et s'accompagne donc d'un bruit important. En pratique, lorsque l'objet à photographier est faible, ce bruit de fond de ciel devient prépondérant et c'est alors lui qui limite le RSB de l'image finale. D'où l'intérêt de travailler dans un ciel non pollué par des éclairages : à temps de pose égal et pour le même objet, le RSB sera d'emblée meilleur, car la contribution du fond de ciel au bruit présent dans l'image sera moins importante. En revanche, il est tout à fait possible de photographier la Lune ou une planète depuis un centre ville sans aucun inconvénient, car le bruit de la lumière du fond de ciel est négligeable devant le bruit de photons de l'astre.

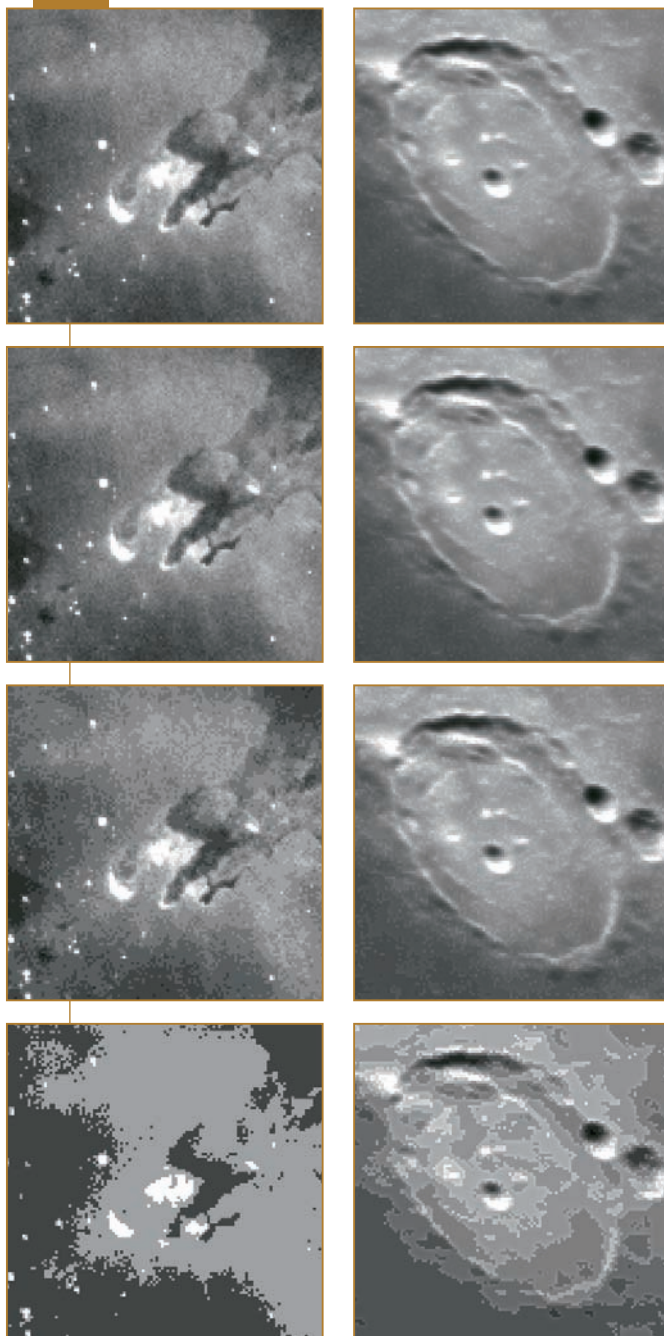
## Nombre de bits et bruit

Le corollaire de cette propriété est que, pour un appareil, le nombre de bits optimal dépend du type d'objet photographié. Les calculs et l'expérience montrent que, pour les objets brillants, il est inutile de dépasser dix à douze bits car les éventuels bits supplémentaires seraient noyés dans le bruit de photons. Par contre, s'il s'agit de photographier des objets peu lumineux, le bruit de photons diminue et il est intéressant d'utiliser un convertisseur ayant un nombre de bits plus élevé à condition, bien sûr, que les bruits de lecture et thermique de l'appareil soient raisonnablement faibles. En pratique, une



numérisation sur 14 bits est généralement suffisante en photographie amateur du ciel profond, il n'est pas indispensable de monter à 16 bits (mais qui peut le plus peut le moins !).

*Ces images ont été réalisées avec une caméra CCD 16 bits, puis elles ont été modifiées pour simuler (de haut en bas) un appareil 14, puis 12, puis 10, puis 8 bits. L'image lunaire commence à être altérée au-dessous de 10 bits environ et l'image de ciel profond au-dessous de 14 bits. Ces limites ne sont pas des chiffres absolus, ils ne sont valables que dans le cas précis de cette caméra, de ces objets célestes, de ces conditions de prise de vue (temps de pose, pollution lumineuse, etc.) et de traitement.*



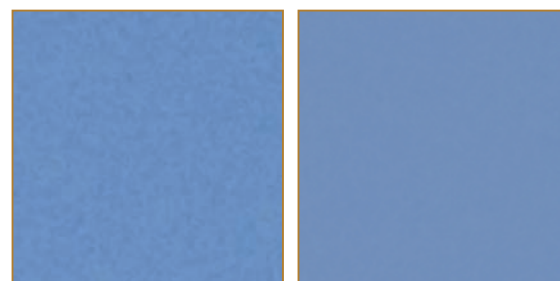
### Taille des photosites et qualité d'image

Comment la taille des photosites influence-t-elle le contenu et la qualité de l'image ? Prenons deux capteurs qui ne diffèrent que par la dimension de leurs photosites, plaçons-les sur le même instrument et examinons leurs comportements respectifs vis-à-vis des signaux et des bruits vus précédemment :

- le bruit de lecture est identique ;
- le signal thermique augmente proportionnellement à la surface du photosite, ce qui est défavorable puisque le bruit associé augmente également ;

- le signal lumineux recueilli augmente proportionnellement à la surface du photosite, ce qui est bien sûr favorable car le RSB s'améliore.

À moins que le signal thermique ne soit prépondérant, ce qui n'est plus le cas dans les appareils modernes, l'augmentation de dimension des photosites est globalement favorable à la qualité de l'image. Ce n'est pas un hasard si les photosites des APN reflex sont de plus grande taille que ceux des APN compacts !



Portion d'une image agrandie du ciel diurne, à gauche obtenue avec un appareil numérique à petits photosites, à droite avec un appareil reflex à grands photosites. La plus grande capacité des photosites du second appareil est l'une des principales causes de la différence de bruit visible ici.

### Les comparaisons entre appareils

Le bruit de lecture et le signal thermique sont des indications importantes de l'aptitude d'un appareil à la photographie astronomique et tout particulièrement à la photographie du ciel profond. Mais on ne peut comparer directement deux appareils sur ces caractéristiques, que si d'autres facteurs ne viennent pas biaiser la comparaison. Par exemple, si le facteur de conversion (voir chapitre 2) diffère entre deux modèles d'appareils, ils donneront de la même scène des images dont le contenu est différent en termes de niveaux d'intensités. Ainsi, un appareil A dont le facteur de conversion est le double de celui d'un appareil B montrera un bruit de lecture et un signal thermique doublés, sans que la qualité d'image soit finalement différente entre les appareils. Autre exemple : un capteur aura le même signal thermique, qu'il soit en version monochrome ou en version couleur, puisque ce signal thermique ne dépend pas de la présence de la matrice de filtres à la surface du capteur. Mais son influence dans une image du ciel sera différente car la sensibilité du capteur n'est pas du tout la même entre les deux versions. Il convient également d'être vigilant lors d'un examen visuel du signal thermique. La présence de quelques photosites chauds très énergiques peut faire penser que l'appareil est de piètre qualité, mais il faut bien garder à l'esprit que si ces pixels sont en petit nombre, ils ne représentent qu'une infime proportion des millions de pixels présents dans l'image et sont de ce fait négligeables quant à la qualité finale des images. La présence de quelques rares photosites chauds est finalement préférable à celle d'une grande quantité de photosites « tièdes ».

### Améliorer le rapport signal sur bruit

Il est facile de déduire de ce qui précède que la solution pour augmenter le RSB d'une image est d'allonger le temps de pose. Ce qui n'est pas toujours sans inconvénient car poser trop longtemps peut provoquer une surexposition de l'image ou mettre en évidence un défaut de suivi de l'instrument : il est souvent préférable de faire plusieurs poses et de les combiner par une des méthodes décrites plus loin. Sur le plan des bruits thermique et de photons, une pose de 10 minutes est strictement équivalente à une combinaison de 10 poses d'une minute. Ce découpage a toutefois ses limites car il



ne faut pas oublier le bruit de lecture qui intervient dix fois dans le second cas contre une seule dans le premier : on ne peut pas pousser le raisonnement à l'extrême et considérer qu'une pose de 10 minutes est équivalente à six cents poses d'une seconde !



Le RSB augmentant comme la racine carrée du signal, on peut en déduire assez facilement le gain pour quelques valeurs courantes du nombre de poses (tableau suivant). On constate ainsi que 25 poses permettent un gain d'un facteur 5, tandis qu'il faut atteindre 100 poses pour gagner un facteur 10 : le gain finit par plafonner, il y a un seuil au-delà duquel le jeu n'en vaut plus la chandelle. Pour dépasser cette limitation, la solution la plus simple (mais pas la moins coûteuse) consiste à utiliser un détecteur plus sensible ou un instrument de plus grand diamètre. C'est la raison pour laquelle les télescopes professionnels, dont l'un des buts principaux est l'observation d'astres très faibles aux confins de l'univers, sont de plus en plus grands.

Gain en RSB en fonction du nombre de poses.

Nombre de poses	2	4	9	16	25	100	400	1 000
Gain en RSB	1,4	2	3	4	5	10	20	32

C'est grâce à la nature aléatoire du bruit que la combinaison des images permet à celui-ci d'augmenter moins vite que le signal. Il va de soi que cette propriété du bruit ne se manifeste que si l'on utilise des images certes prises dans des conditions identiques mais distinctes : en effet, combiner plusieurs fois une image avec elle-même n'améliore strictement rien !

## Méthodes de compositage

Les logiciels astronomiques proposent plusieurs méthodes pour combiner des images prises dans des conditions identiques afin d'améliorer le RSB. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients.

### Compositage par somme et par médiane

Les deux techniques de base pour le compositage des images sont la somme et la médiane. Chacune présente des avantages et des inconvénients que nous allons examiner en détail, car le compositage est un traitement que vous serez amené à utiliser fréquemment.

Faire la somme de plusieurs images consiste tout simplement à les additionner pixel à pixel. Lorsque la dynamique est limitée, la somme peut conduire à une saturation des hautes lumières. Pour éviter cet inconvénient, on peut faire la moyenne des images, c'est-à-dire diviser cette somme par leur nombre. Du point de vue du RSB, les deux méthodes sont équivalentes.

La médiane, elle, est un traitement un peu plus élaboré capable d'éliminer les défauts présents dans une seule des images de la série (voir encadré).

*La galaxie NGC 6946 prise avec un APN reflex sur une lunette. À gauche, une seule pose de 5 min prétraitée. Au centre et à droite, des compositages respectivement de 4 et 16 poses. Le rapport signal sur bruit s'améliore d'un facteur deux à chaque fois (la racine carrée de 4) et permet de faire ressortir des détails qui sont, sur l'image individuelle, noyés dans le bruit.*

### Le compositage par médiane

Supposons que l'on veuille composer cinq images prétraitées. On choisit un pixel et l'on regarde les valeurs qu'il prend dans chacune des images, par exemple :

99, 103, 101, 98, 102.

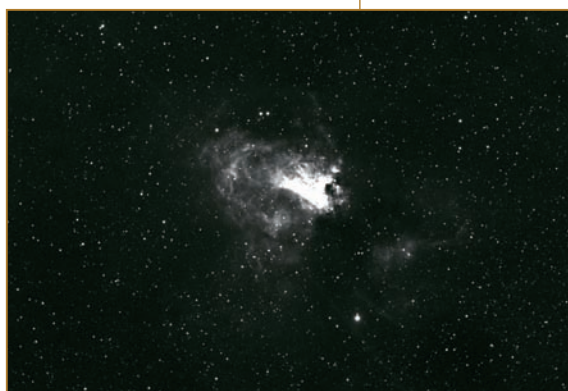
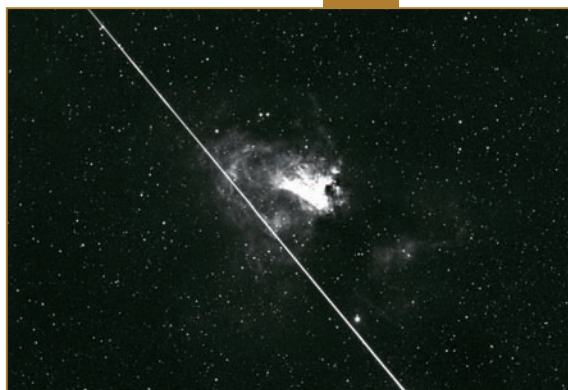
On classe ensuite ces valeurs dans l'ordre croissant :

98, 99, 101, 102, 103,

et l'on extrait la valeur centrale (la médiane), en l'occurrence 101. Si l'on effectue cette opération pour chaque pixel des images à composer, l'image résultante sera appelée « image médiane ».

La moyenne calculée des valeurs de l'exemple précédent est 100,6 que l'on peut arrondir à 101. La moyenne et la médiane semblent donc donner des résultats équivalents, ce qui est vrai si les valeurs à combiner sont assez cohérentes et qu'aucune d'entre elles n'est aberrante par rapport aux autres. En revanche, si un satellite ou un rayon cosmique avait traversé le capteur pendant la pose de la première image, il aurait pu occasionner une saturation du pixel à la valeur maximale, soit 255 si l'image est codée sur 8 bits. Il est facile de vérifier que la médiane n'a pas bougé, elle vaut toujours 101. En revanche, la moyenne a changé, elle vaut maintenant 131. La médiane donne visiblement, dans cette situation, une valeur plus réaliste que la moyenne qui s'est trouvée biaisée par un défaut présent dans une image. C'est la grande force du compositage par médiane : il permet d'éliminer toute particularité présente dans une des images et pas dans les autres, contrairement à la somme (ou la moyenne) qui la conserve.





Une série de cinq images CCD a été réalisée sur la nébuleuse Messier 17 dans la constellation du Sagittaire. En haut, un satellite artificiel (à moins que ce ne soit un météore...) a laissé une trace brillante de son passage dans le champ lors d'une des poses. Au centre, la traînée est encore bien visible sur un compositage par moyenne des cinq images. En bas, une médiane de ces mêmes cinq images élimine complètement la traînée tout en faisant participer l'image en cause dans le compositage au même titre que les quatre autres. Il n'est pas rare de retrouver plusieurs traces de satellites sur les images d'une nuit de photographie.

Le compositage par médiane impose toutefois une contrainte : il faut que toutes les images à combiner soient cohérentes et contiennent des niveaux comparables. Alors qu'il est tout à fait possible d'effectuer la somme d'images du ciel prises avec des temps de pose différents, en calculer directement la médiane n'a pas de sens. En effet, supposons que l'on souhaite composer cinq images prétraitées, de temps de pose respectifs 1, 2, 3, 4 et 5 min. Si l'on sélectionne l'un des pixels et que l'on examine ses valeurs dans chacune des cinq images, on trouvera probablement des valeurs plus ou moins proportionnelles au temps de pose, par exemple 30, 61, 84, 115 et 159. Il est facile de comprendre qu'un compositage par médiane va systématiquement favoriser l'image N°3 dont les valeurs vont toujours se trouver encadrées par les valeurs mesurées dans les quatre autres images : la contribution de ces dernières sera nulle, elles auront été réalisées pour rien.

Il est cependant possible de composer des images présentant des niveaux différents, à condition de les avoir normalisées au préalable, c'est-à-dire de les avoir ramenées à des niveaux moyens cohérents. Dans l'exemple ci-dessus, si l'on porte le niveau de toutes les images à un temps de pose équivalent de 5 min (en multipliant la première par 5, la seconde par 5/2, la troisième par 5/3, et ainsi de suite), la médiane redeviendra possible. En particulier, la normalisation est indispensable pour composer par médiane une série d'images de PLU car celles-ci présentent généralement des niveaux de lumière différents.

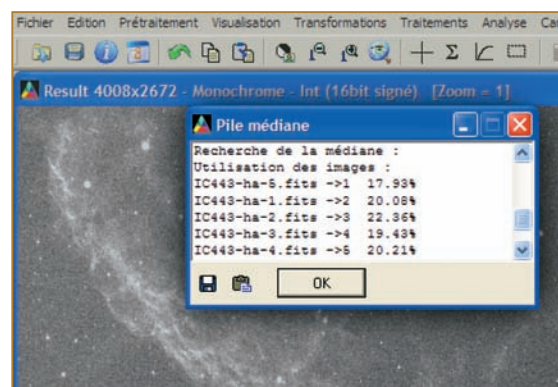
Le calcul de médiane est une spécialité des logiciels de traitement astronomique qui indiquent en général le pourcentage de contribution de chaque image dans l'image finale. Ces pourcentages doivent être proches les uns des autres (dans

l'exemple présenté, on pourrait obtenir 23 %, 21 %, 20 %, 19 %, 17 %), des pourcentages très déséquilibrés étant le signe que les images ne sont pas homogènes. En théorie, faire la médiane d'une série d'images suppose qu'elles soient en nombre impair ; en pratique, les logiciels savent composer un nombre pair d'images. La normalisation d'une série d'images avant médiane est également une des fonctions de base des logiciels astronomiques.

## Compositage par sigma-clipping

Il existe une troisième méthode de compositage, hybride entre la somme et la médiane : le sigma-clipping. Il s'agit d'une somme à ceci près que les différentes valeurs d'intensité pour chaque pixel sont examinées et que les valeurs jugées aberrantes sont exclues de cette somme. L'un des paramètres de ce calcul est l'intervalle de tolérance (exprimé en écart-types) au-delà duquel les valeurs sont rejetées. Cette méthode nécessite, comme la médiane, que les images soient cohérentes et donc qu'elles aient été si nécessaire normalisées au préalable.

Il va de soi que les images à composer doivent être bien recentrées les unes par rapport aux autres avant d'effectuer cette opération. Nous examinerons les différentes techniques de recentrage dans les chapitres décrivant la prise de vue planétaire et de ciel profond (chapitres 5 et 7), car elles sont propres à chaque type d'objet.



Les logiciels astronomiques savent normaliser et composer une série d'images par médiane (Prism, comme ici) ou par sigma-clipping. Le compositage de plusieurs images avec un logiciel comme Photoshop ou Paint Shop Pro ne peut se faire que par moyenne, à l'aide de calques, comme décrit au chapitre 1.



Cette tache blanche au milieu d'un noir n'est pas un photosite chaud mais la trace d'un rayon cosmique ayant traversé le capteur durant la pose. De tels phénomènes sont très fréquents sur les longues poses, en particulier lorsque le site est situé en altitude. Le compositage d'une série d'images par médiane est, là aussi, un moyen radical de les éliminer.





## Réduction du bruit sur une image unique

La plupart des logiciels de retouche grand public proposent une panoplie de fonctions de traitement du bruit agissant sur une image de manière plus ou moins élaborée. Il est d'ailleurs plus que probable que les processeurs internes de nombreux APN contiennent de tels traitements de réduction de bruit.

Le bruit se logeant préférentiellement dans les hautes fréquences de l'image (granulation fine), l'application d'un filtre passe-bas permet de lisser l'image et de diminuer le bruit apparent. Il en existe de nombreuses variantes, par exemple le lissage par gaussienne qui consiste à appliquer sur chaque pixel une forme en cloche (la gaussienne) : le pixel se trouve étalé sur ses voisins et cela d'autant plus que la gaussienne est large. Chaque pixel de l'image filtrée est donc un mélange des pixels situés dans son voisinage, ce qui améliore le RSB par effet de compositage entre pixels contigus. L'inconvénient de ce filtre est qu'il diminue la netteté de l'image car il ne fait pas la différence entre le bruit et les détails réels, qu'il lisse de la même manière.

Certains logiciels tels que Iris implémentent des algorithmes plus élaborés destinés à agir sur le bruit tout en touchant le moins possible aux détails, par exemple la gaussienne avec seuil : au-dessous d'un seuil (paramétrable), une variation d'intensité entre pixels voisins est assimilée à du bruit alors qu'au-dessus elle est considérée comme une information réelle et n'est donc pas modifiée. Certains logiciels récents tels que NeatImage ou Noise Ninja, spécialisés dans le traitement du bruit, sont capables d'analyser une partie de l'image uniforme afin de déterminer les propriétés fréquentielles du bruit pour corriger l'ensemble de l'image à partir de ces caractéristiques.

Les résultats que procurent ces algorithmes sont tout à fait satisfaisants à condition de ne pas leur demander plus qu'ils ne peuvent donner : comme il est impossible de différencier de manière absolue le bruit et les détails une fois qu'ils sont mélangés dans une image, ces traitements agissent peu ou prou sur les détails réels et peuvent provoquer dans certaines zones de l'image, s'ils sont utilisés sans modération, une diminution importante du contraste ou de la netteté, voire une disparition d'information. En outre, ils sont évidemment incapables de retrouver les détails qui n'ont pas été enregistrés faute d'un temps de pose suffisant. Il faut employer ces traitements en tant que retouche finale destinée à réduire un peu le bruit résiduel, en complément des techniques d'amélioration du RSB dont nous avons parlé plus haut et auxquelles ils ne sauraient se substituer.

## Conseils pour les images de prétraitement

Revenons un instant sur les prétraitements. À la lecture de ce qui précède, vous aurez compris que le rôle des prétraitements est d'éliminer le signal thermique et les défauts d'uniformité, il n'est pas d'améliorer le RSB des images brutes, ils auraient plutôt tendance à le dégrader car les images de correction apportent leur propre bruit. En effet, une autre propriété fondamentale du bruit est que les bruits ne se soustraient jamais : la combinaison de deux images conduit toujours à une image résultante dont le bruit est plus important que dans chacune d'elles, même s'il s'agit d'une soustraction d'une image à l'autre.

C'est la raison pour laquelle il faut éviter d'utiliser une image unique pour ces images de prétraitement. Il est préférable de réaliser, selon le temps disponible, 5 à 15 images de noir et de PLU (et éventuellement d'offset), en fin de séance ou intercalées avec les images du ciel. C'est particulièrement bénéfique en ciel profond avec les noirs et les offsets et en planétaire avec les PLU, car utiliser une seule image implique que le bruit présent dans cette image revient à l'identique



*Le compositage de quatre poses de NGC 6946 (page 37) a été traité à l'aide d'une fonction de réduction de bruit. Malgré le lissage obtenu, la qualité du résultat est loin d'égaler celle du compositage des seize images.*

sur toutes les images prétraitées, ce qui est très défavorable sur le plan du RSB. On composera par médiane chacun de ces groupes d'images pour en faire l'offset, le noir et la PLU de référence qui seront ensuite utilisés pour prétraiter chaque image du ciel.

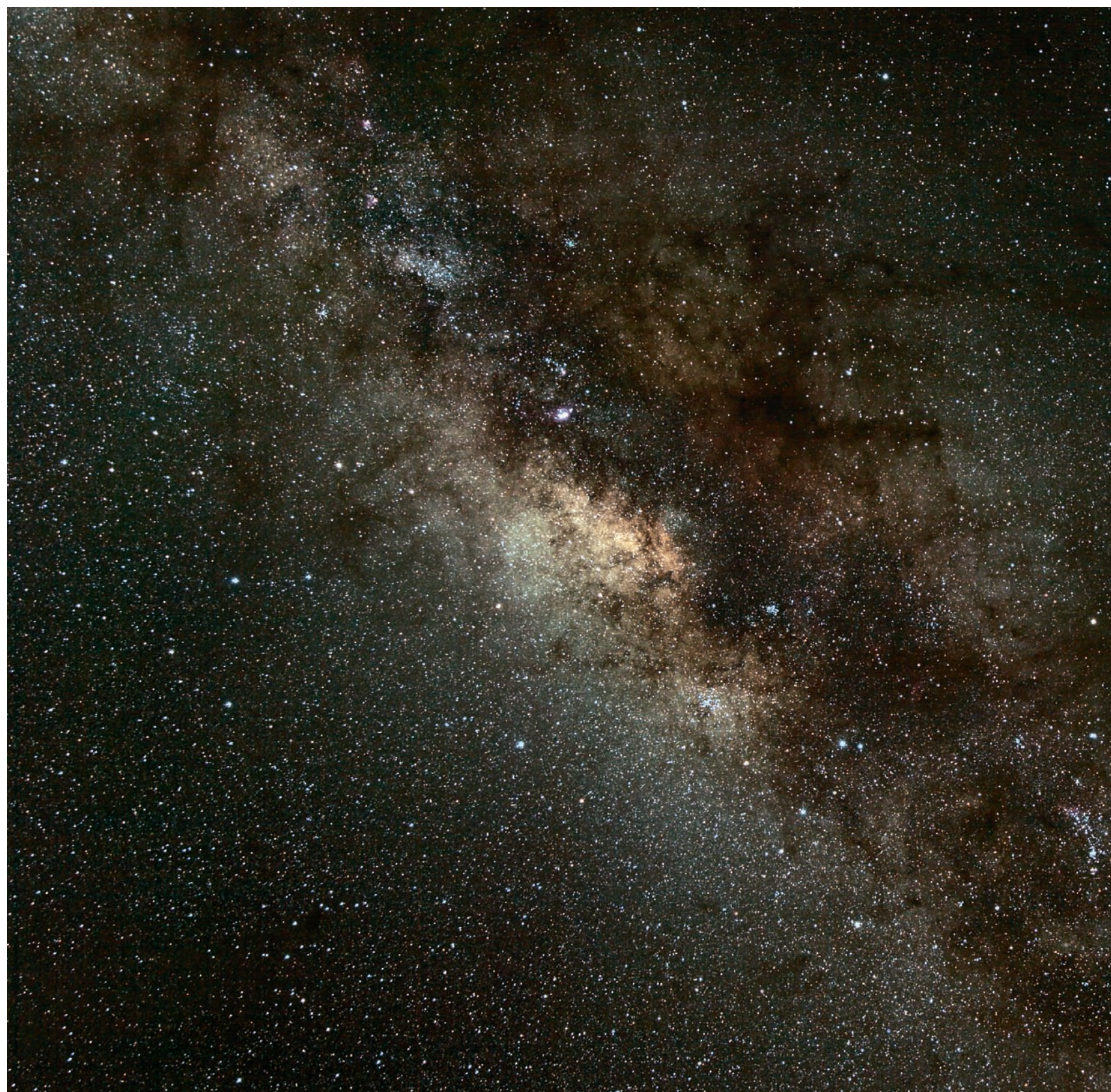
Pourquoi employer préférentiellement le compositage par médiane ? Parce que, comme nous l'avons vu, cette méthode permet d'éliminer les singularités, ce qui est particulièrement important lorsqu'il s'agit d'images qui vont servir à corriger toutes les images du ciel. De même, lors de la constitution d'une bibliothèque de noirs ou d'un noir générique, on aura intérêt à combiner un grand nombre d'images afin que ces noirs présentent un très bon RSB et ne contribuent pas à l'augmentation du bruit dans les images prétraitées.

### Les prétraitements pas à pas

*Lors de votre première nuit d'astrophotographie, ne vous préoccupez pas trop des prétraitements, vous aurez d'autres chats à fouetter pour dompter votre matériel. Avec un APN, faites vos premiers essais en JPEG, les images seront directement affichables et traitables. Si votre appareil est en mode « réduction de bruit », laissez-le faire, c'est la manière la plus simple d'éliminer le signal thermique. Vous pourrez, dans un second temps, réaliser des noirs en cours de nuit et les soustraire a posteriori, de préférence en travaillant en mode RAW et en prenant plusieurs images du même objet afin de les composer. Puis, lorsque vos traitements feront apparaître un fond d'image non uniforme ou des ombres de poussières, il sera temps de s'intéresser aux PLU.*

*Les prétraitements et le compositage sont des techniques simples mais performantes qu'aucun astronome aguerri, qu'il soit amateur ou professionnel, ne peut ignorer. Les prétraitements doivent être effectués avec beaucoup de soin pour obtenir l'image la plus réaliste possible et un résultat qui soit esthétique, en particulier pour la photographie de ciel profond. Mais ils sont également très importants lorsqu'on veut exploiter les images, par exemple en photométrie pour mesurer la brillance d'une étoile ou d'un astéroïde. En effet, si un pixel chaud mal corrigé se superpose à cet objet, sa brillance sera surestimée. Ou, si le vignettage est mal corrigé et que l'objet se trouve dans un angle, sa brillance sera sous-estimée.*







# Techniques instrumentales

Comment adapter un appareil sur un instrument astronomique ? Comment régler un télescope ? Comment calculer le champ photographié ? Comment réaliser une bonne mise au point ? Les réponses à ces questions vous seront utiles pour tous les types d'astrophotographie, c'est la raison pour laquelle elles sont rassemblées dans ce chapitre.

*Image de la région la plus dense de la Voie Lactée : le Sagittaire et le Scorpion. Compositage de poses de 5 min prises avec un APN reflex et un objectif de 24 mm à F/D 5,6 installé en parallèle sur une monture équatoriale.*





**A**vant d'entrer dans le vif du sujet et de décrire les techniques permettant de photographier une planète ou une nébuleuse, intéressons-nous à quelques techniques de base dont l'astrophotographe aura besoin quel que soit l'objet visé, à commencer par l'adaptation de son appareil sur l'instrument. Il existe en effet

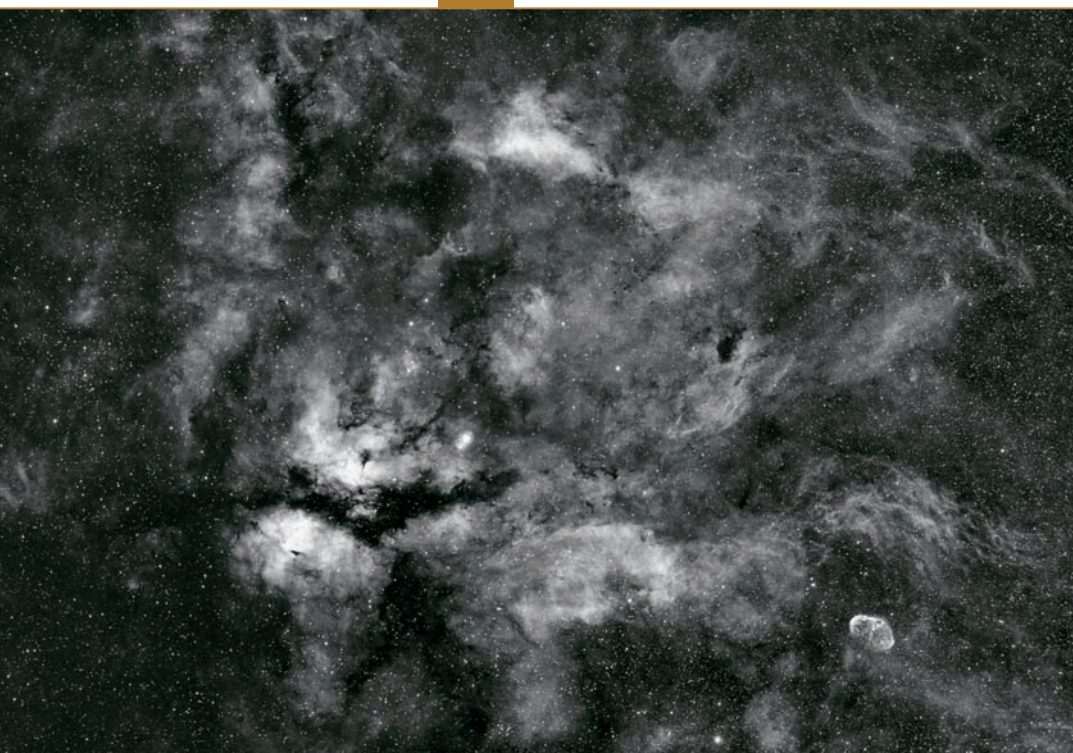
## Monter l'appareil sur un instrument

Un instrument astronomique, télescope ou lunette, est un système polyvalent et modulaire auquel on peut adjoindre de nombreux accessoires visuels ou photographiques. Certains d'entre eux permettent d'adapter un appareil photo. D'autres aident à allonger ou à raccourcir la focale primaire de l'instrument, permettant à l'astrophotographe de retrouver un peu de la souplesse du zoom qu'il utilise tous les jours et de photographier à l'échelle appropriée des objets célestes de dimensions très diverses. Mais attention, la focale d'un instrument astronomique ne peut être modifiée que dans certaines limites, et pas n'importe comment !

### Montage en parallèle

Nous avons vu au chapitre 1 qu'il était possible de réaliser des photographies du ciel avec un simple appareil monté sur trépied. Avec, cependant, une limitation importante : l'appareil étant fixe, le temps de pose ne doit pas être trop long sous peine de voir apparaître les effets de la rotation de la Terre ; au-delà de quelques dizaines de secondes, même en grand-angle, l'image est bougée.

L'astronome qui possède une monture équatoriale motorisée peut éviter cet écueil en fixant l'appareil sur la monture ou sur le corps de l'instrument. Un adaptateur pour photographie en parallèle est proposé en série ou en option sur de nombreux instruments. Si l'appareil et son objectif sont lourds, il faut réaliser un montage suffisamment rigide et rééquilibrer l'instrument pour compenser le surplus de poids. Avec une monture équatoriale motorisée et correctement mise en station (voir le chapitre 7), on pourra réaliser des poses longues tout en conservant le même champ d'une pose à l'autre.

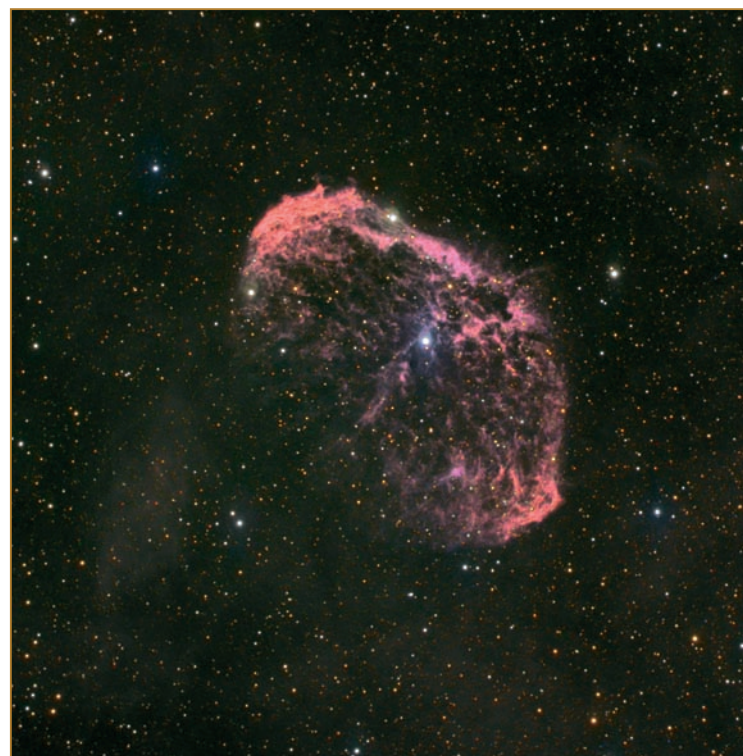


*Ce grand complexe nébulaire entourant l'étoile Gamma Cygne, photographié ici avec une caméra CCD monochrome 24 x 36 et un téléobjectif de 300 mm, couvre un champ de plusieurs degrés. En bas à droite de l'image se trouve la nébuleuse du Croissant.*

différentes manières d'adapter un appareil et il est facile de se perdre dans la gamme des bagues proposées par les fabricants. D'autant que les compléments optiques fréquemment utilisés tels que les lentilles de Barlow et les réducteurs de focale nécessitent parfois des adaptations particulières ou, tout au moins, des précautions quant à leur positionnement par rapport au capteur de l'appareil. Cette question en amène vite une autre : quel est le champ que couvre l'appareil ainsi installé, quelle sera la taille de l'astre sur les images ?

Un autre sujet devra retenir l'attention de l'astrophotographe désireux de tirer le meilleur parti de son télescope : le réglage optique (collimation), opération simple mais ô combien rentable ! Si, en photographie ordinaire, la mise au point est désormais une simple formalité prise en charge par l'appareil, il n'en va pas de même dans notre discipline. Elle constitue en effet une des principales difficultés auxquelles se heurte l'astrophotographe, et quelques techniques et astuces ne seront pas superflues pour l'aider à obtenir des images bien nettes.

*Ci-contre, un gros plan sur cette nébuleuse a été réalisé avec une caméra CCD à capteur 10 x 15 mm sur une lunette de 1 000 mm de focale : l'échantillonnage plus fin a permis d'enregistrer plus de détails, au détriment du champ qui s'est rétréci.*





Appareil monté en parallèle sur un télescope. Il convient de veiller, en particulier lors de l'emploi d'un objectif grand-angle, à ce que l'extrémité du tube de l'instrument principal ne soit pas visible dans le champ photographié. À gauche, ce système de fixation simple ne permet pas le cadrage de l'appareil en rotation : les axes du capteur sont obligatoirement parallèles aux axes célestes (ascension droite et déclinaison). À droite, le collier rotatif du téléobjectif autorise la rotation de cadrage.

## Montage au foyer de l'instrument

Le montage au foyer consiste à installer l'appareil à l'arrière d'un instrument astronomique dépourvu d'oculaire ou de tout autre complément optique. Il peut être tentant d'installer l'appareil encore muni de son objectif, mais c'est une erreur ! L'objectif d'une webcam ou d'un boîtier reflex doit être retiré avant installation sur l'instrument, car c'est ce dernier qui remplit la fonction d'objectif. Tout instrument astronomique digne de ce nom est doté, en série ou en option, d'un adaptateur pour photographie au foyer qui se présente sous la forme d'une bague faisant la jonction entre l'instrument et l'appareil. Dans cette configuration, l'instrument astronomique se comporte comme un téléobjectif (à la différence qu'il n'y a ni diaphragme ni autofocus comme sur un véritable objectif photographique !).

### Éviter les reflets

La surface interne des bagues permettant d'adapter l'appareil ne doit pas être réfléchissante, faute de quoi le contraste de l'image risque d'en pâtir et des reflets indésirables sont susceptibles d'apparaître. Lorsque les bagues ne sont pas anodisées, deux solutions s'offrent à l'amateur : la peinture noire mate ou la feutrine noire autocollante.



Deux types de reflets sont présents sur cette image :  
(1) le halo circulaire entourant les étoiles brillantes est causé par le filtre situé devant la caméra CCD ;  
(2) le rayonnement sur la droite de l'image n'est pas la queue d'une comète mais le reflet, sur la face interne d'une bague en aluminium non noirci, de la lumière d'une étoile brillante située légèrement hors champ.

Côté appareil, le standard est un filetage de 42 mm de diamètre au pas de 0,75 mm. Ce filetage permet d'adapter directement la plupart des caméras CCD. Pour un boîtier reflex, il est nécessaire de compléter cet adaptateur par une bague T2 correspondant à la marque de l'appareil. On trouve chez les revendeurs de matériel astronomique des bagues T2 pour toutes les grandes marques de reflex : Canon, Nikon, Olympus, Pentax, etc.

L'adaptation d'une webcam sans son objectif s'effectue par l'intermédiaire d'une bague se vissant à la place de cet objectif. De telles bagues sont disponibles chez les revendeurs de matériel astronomique pour les webcams les plus utilisées en astronomie.

Côté instrument, ces bagues d'adaptation peuvent se présenter sous deux formes différentes :

- une adaptation vissante, mâle ou femelle, parfois spécifique à l'instrument ; c'est notamment le cas des Schmidt-Cassegrain pour lesquels un adaptateur qui se visse directement à l'arrière de l'instrument ou sur leurs réducteurs de focale dédiés est proposé en option ;
- un tube mâle du même diamètre qu'un oculaire, à glisser dans le porte-oculaire de l'instrument, au coulant 24,5 mm pour les petits instruments d'entrée de gamme et en 31,75 mm (également dénommé 1 pouce x ou 1.25x) pour les autres.

Cette seconde forme permet de régler plus facilement le cadrage de l'appareil en rotation, mais il peut être source de vignetage dans certaines configurations (voir le chapitre 3).



Boîtier reflex Canon équipé de sa bague T2, accompagné de bagues pour reflex Olympus et Nikon.



Webcam dotée de son adaptateur en coulant 31,75 mm. Privilégiez les adaptateurs tels que celui-ci, autorisant le vissage d'un filtre à son extrémité.



## Une notion de base : le rapport F/D

Le rapport  $F/D$  d'un instrument est une notion très utilisée en astrophotographie. Il n'est autre que le rapport entre la longueur focale de l'instrument ( $F$ ) et son diamètre optique ( $D$ ). Par exemple, une lunette de 100 mm de diamètre et de 1 000 mm de focale présente un rapport  $F/D$  de 10. En photographie courante, il est souvent appelé « ouverture » ou « diaphragme » et prend des valeurs telles que 2, 2,8, 4, 5,6 et ainsi de suite. Mais attention, en astronomie le terme « ouverture » est souvent employé pour désigner le diamètre optique de l'instrument. Le rapport  $F/D$  ne peut pas toujours se déduire facilement des dimensions apparentes de l'instrument ou de l'objectif, en particulier dans les cas suivants :

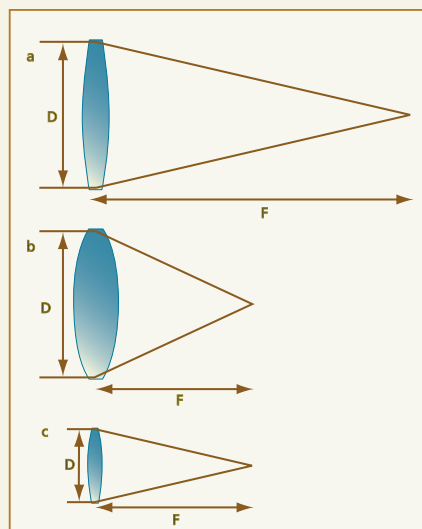
- les télescopes de la famille Cassegrain (par exemple les Schmidt-Cassegrain ou les Maksutov-Cassegrain) ont une focale bien plus grande que la longueur de leur tube ne le laisse supposer, grâce à un faisceau lumineux replié et à un miroir secondaire faisant office d'amplificateur de focale ;
- à cause d'une formule optique complexe, les objectifs photographiques grand angle ont un diamètre optique bien plus élevé que le calcul ne le laisse supposer ; par exemple, la dimension de la lentille frontale d'un objectif de 28 mm à  $F/D$  2,8 est très supérieure à 10 mm.

En outre, les compléments optiques tels que les lentilles de Barlow et les réducteurs de focale, dont nous parlerons dans la suite de ce chapitre, modifient la forme du cône de rayons lumineux et, par conséquent, changent le rapport  $F/D$  final.

Le rapport  $F/D$  des instruments astronomiques courants se présente comme suit :

- 5 à 10 pour les lunettes ;
- 3 à 8 pour les Newton et les Schmidt-Newton ;
- 10 pour les Schmidt-Cassegrain ;
- 10 à 15 pour les Maksutov-Cassegrain.

À l'inverse des objectifs photographiques, les instruments astronomiques ne comportent pas de diaphragme. Ils sont en effet conçus pour travailler à pleine ouverture, ce qui permet de collecter le maximum de lumière et de bénéficier du maximum de pouvoir séparateur (voir chapitre 5).



Les instruments « a » et « b » ont le même diamètre, mais « b » a une focale (et par conséquent un rapport  $F/D$ ) plus petit que celle de « a ». L'instrument « c » a la même focale que « b » mais son diamètre est plus faible, ce qui lui donne un rapport  $F/D$  plus grand, équivalent à celui de « a ».

## Montage avec système grandissant

Pour la photographie des planètes, il est indispensable d'agrandir la focale de l'instrument : au foyer, l'image de la planète serait trop petite pour permettre l'enregistrement de fins détails. Pour ce faire, il suffit d'interposer un des accessoires utilisés habituellement en observation visuelle : un oculaire ou une lentille de Barlow.

La lentille de Barlow est un dispositif optique divergent dont le but premier est d'augmenter le grossissement donné par un oculaire. Son usage est très courant en astrophotographie pour amplifier la focale de l'instrument. Le facteur d'amplification d'une Barlow – aussi appelé « grandissement » – est toujours inscrit sur son tube. C'est ainsi qu'une Barlow de grandissement « 2 fois » (2x) double le grossissement fourni par un oculaire placé à sa suite. Placée cette fois directement devant l'appareil, sans oculaire, cette Barlow va se comporter de la même manière et amplifier la focale de l'instrument ainsi que son rapport  $F/D$  dans les mêmes proportions.

Légère complication, le grandissement est variable et dépend de la distance (le tirage) entre la lentille et le capteur. C'est ainsi que lorsque le tirage augmente de manière importante, une Barlow 2x peut passer à un grandissement de 2,5 fois, 3 fois, et ainsi de suite. Une Barlow 2x travaille dans de bonnes conditions optiques jusqu'à environ 3 à 4 fois de grandissement. Les bonnes lentilles de Barlow achromatiques sont une excellente solution pour augmenter la focale de l'instrument sans dégrader la qualité de l'image. Seuls les capteurs de grande taille (24 x 36 mm) pourront nécessiter une Barlow de coulant 50,8 mm, les autres pourront se contenter d'une Barlow de coulant 31,75 mm.

Il existe deux manières d'adapter une lentille de Barlow devant l'appareil. Si ce dernier s'adapte sur l'instrument par l'intermédiaire d'une bague mâle en coulant 31,75 mm, on peut intercaler une Barlow entre les deux. Mais si c'est une bague T2 qui est utilisée, il faudra employer un adaptateur spécial, en y glissant la Barlow ou, plus exactement, la partie de son tube qui comporte les lentilles et qu'on aura pris soin de dévisser.



Montage d'une lentille de Barlow devant une webcam.



Une lentille de Barlow peut généralement se séparer en deux éléments : la partie optique contenant les lentilles et la partie recevant l'oculaire.



Deux adaptateurs à tirage variable pouvant recevoir un oculaire ou la partie optique d'une lentille de Barlow.

Attention : tous les modèles d'oculaire ne sont pas utilisables dans cette configuration, car leur encombrement peut être incompatible avec la dimension du logement intérieur du tube destiné à les recevoir.

Lorsque des grossissements supérieurs à 4 ou 5 fois sont recherchés, on pourra employer soit deux lentilles de Barlow montées en série (dans ce cas, leurs grossissements se multiplient), soit un oculaire en le détournant de son usage habituel pour le faire travailler en projection. Là encore, le grossissement de l'image dépend du tirage entre cet oculaire et le capteur. La formule de calcul est légèrement différente de celle qui s'applique à une lentille de Barlow (voir plus bas). L'adaptation d'un oculaire se fait par l'intermédiaire de la bague dans laquelle on peut insérer une lentille de Barlow. Les oculaires de type orthoscopique ou Plössl I sont tout à fait utilisables en projection.

### Grandissement ou grossissement ?

*Le grossissement est une notion qui n'a de sens qu'en observation visuelle. Il représente le rapport d'angles apparents entre l'angle sous lequel est observé l'objet à travers l'instrument et l'angle sous lequel il apparaît à l'œil nu. C'est ainsi qu'un télescope qui grossit 50 fois permet d'observer la Lune sous un angle apparent de 25°, contre 1/2° à l'œil nu : notre satellite naturel apparaît 50 fois plus grand (ou plus « gros », d'où le terme de grossissement) dans le télescope. De même, une paire de jumelles 7 x 40 grossit 7 fois : les objets y sont vus 7 fois plus grands qu'à l'œil nu, comme s'ils étaient placés 7 fois plus près de l'observateur.*

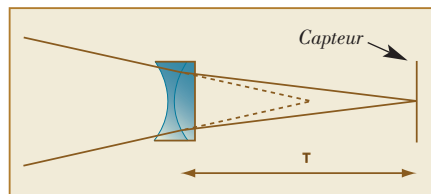
*Le grandissement est une notion attachée à un complément optique ; il représente le facteur d'amplification de focale qu'apporte ce complément. Évidemment, en amplifiant la focale il amplifie aussi la taille linéaire (sur le capteur) des objets photographiés. C'est ainsi qu'un système grandissant 3 fois installé sur un instrument d'un mètre de focale permet d'obtenir une image identique à celle que donnerait un instrument de 3 mètres de focale. On peut dire qu'un doubleur de focale, accessoire bien connu en photographie courante, est un système dont le grandissement est de 2 fois.*

### Grandissement d'une lentille de Barlow

Calculer le grandissement effectif  $G$  d'une lentille de Barlow nécessite deux paramètres : la focale  $F$  de la lentille et le tirage  $T$  entre cette lentille et le capteur.  $G$  s'en déduit par la formule suivante (par convention dans cette formule,  $F$  est prise positive bien que la lentille de Barlow soit un système optique divergent qui, en toute rigueur, est doté d'une focale de signe négatif) :

$$G = 1 + \frac{T}{F}$$

Par exemple, une lentille de Barlow de focale - 100 mm installée à 150 mm du capteur travaille à un grandissement de  $(1 + 150 / 100) = 2,5$  fois.



Une lentille de Barlow amplifie la focale de l'instrument et recule son foyer.

La focale de la plupart des lentilles de Barlow du marché se situe entre 60 mm et 130 mm. Mais la focale d'une lentille de Barlow n'est jamais indiquée par son constructeur ! Comment la déterminer ? La méthode la plus simple est empirique : on réalise une image d'un objet céleste (par exemple une planète) avec et sans la lentille, en

prenant soin de noter le tirage employé lorsque la lentille est en place. Puis on calcule le rapport de taille de l'astre entre les deux images, qui n'est autre que le grandissement  $G$ . Bien sûr, cette mesure de rapport de taille peut se faire en mesurant la dimension de l'objet en pixels, ce qui est très facile avec une image numérique. La formule ci-dessous nous permet de trouver la focale de la Barlow :

$$F = \frac{T}{G-1}$$

Par exemple, sans Barlow, Jupiter fait 50 pixels sur l'image, alors qu'avec la Barlow en place et un tirage de 90 mm, elle mesure 125 pixels. On peut en déduire que  $G$  vaut 2,5 fois et que  $F$  vaut environ 60 mm.

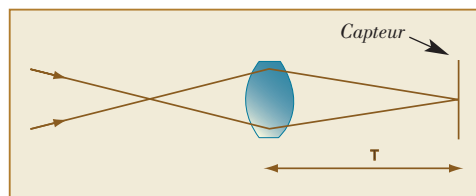
Attention : les Barlow Powermate de la marque Televue, dont la conception est plus élaborée que celle d'une Barlow classique, ne suivent pas les formules précédentes. Le site de leur constructeur comporte des courbes indiquant le grandissement effectif en fonction du tirage.

### Grandissement d'un oculaire utilisé en projection

Calculer le grandissement effectif  $G$  d'un oculaire nécessite deux paramètres : la focale  $F$  de l'oculaire (toujours gravée sur son corps) et le tirage  $T$  entre cet oculaire et le capteur.  $G$  s'en déduit par la formule suivante :

$$G = \frac{T}{F} - 1$$

Par exemple, un oculaire de 15 mm de focale installé à 90 mm du capteur travaille à un grandissement de  $(90/15 - 1) = 5$  fois.



Un oculaire utilisé en projection amplifie la focale de l'instrument.

### Montage avec système réducteur

À l'inverse, la photographie du ciel profond nécessite parfois de diminuer la focale de l'instrument, notamment pour agrandir le champ photographié et raccourcir le temps de pose (nous reverrons son intérêt au chapitre 7). On utilisera alors un accessoire qui n'est guère employé qu'en photographie, nommé « réducteur de focale ». Comme pour les dispositifs vus précédemment, on le placera devant l'appareil à l'aide des bagues adéquates. Il fonctionne comme une lentille de Barlow, à ceci près qu'il s'agit cette fois non plus d'un système optique divergent mais convergent. Son grandissement étant inférieur à 1, la focale de l'instrument s'en trouve réduite et non agrandie.

L'utilisation d'un réducteur de focale est plus délicate que celle d'une Barlow, en premier lieu parce qu'il ne travaille correctement que dans une plage restreinte de réduction, celle pour laquelle il a été conçu. En dehors de cette plage, des aberrations dégradant l'image peuvent apparaître. Si le tirage est trop grand, il se peut même que la mise au point ne soit plus du tout possible !

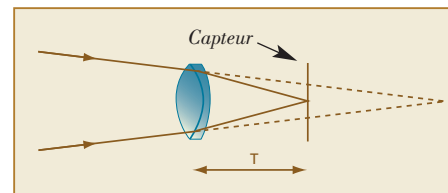
Un réducteur de focale décale le foyer de l'instrument vers l'avant, c'est la raison pour laquelle on ne peut généralement pas l'utiliser avec un télescope de Newton. A contrario, c'est un complément souvent utilisé avec les télescopes de type Schmidt-Cassegrain dont le système de mise au point permet de placer le foyer très en arrière,



et c'est aussi avec ces télescopes qu'il est le plus utile étant donné leur grande longueur focale. Un réducteur-correcteur à quatre lentilles de coefficient 0,63 est ainsi proposé par les marques Meade et Celestron, spécialement pour leurs Schmidt-Cassegrain. Leur champ exploitable correspond à un cercle de 20 à 25 mm de diamètre au foyer : au-delà, les aberrations et le vignetage deviennent rédhibitoires. Leur distance focale est d'environ 240 mm et le tirage nominal environ 90 mm.

Les marques Meade et Optec proposent également des réducteurs de focale de coefficient 0,33 à 0,5 qui sont compatibles avec des capteurs jusqu'à environ 15 mm de côté. Des réducteurs de focale dédiés sont proposés pour certaines lunettes et certains télescopes de la famille Cassegrain.

À gauche,  
réducteur de focale  
pour webcam.  
À droite,  
réducteur dédié pour  
Schmidt-Cassegrain.

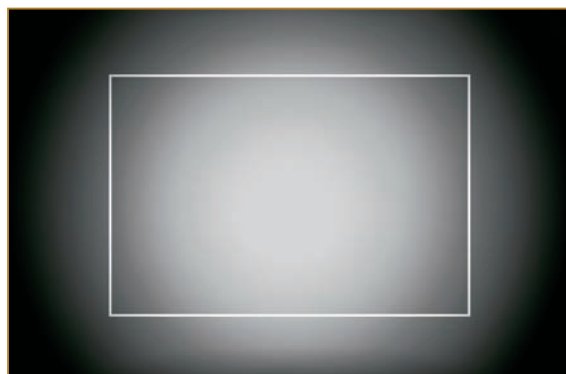
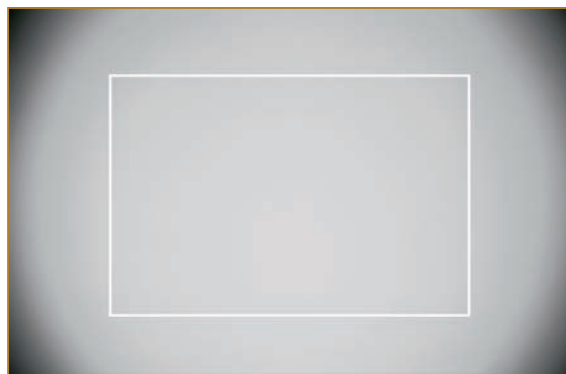


Un réducteur de focale évasé le cône de lumière et rapproche le foyer.

Comment déterminer la focale d'un réducteur ? La méthode la plus simple consiste à prendre le réducteur dans la main, à le tourner vers le Soleil ou la Lune et à mesurer à quelle distance du réducteur se forme une image nette de l'astre.

## Montage afocal

Nous avons passé en revue les différentes manières d'adapter un appareil sur un instrument, mais il reste un cas épineux : l'APN à objectif non interchangeable. La seule solution est d'utiliser un oculaire. Mais ici, plus question d'ajuster le tirage : l'objectif doit être placé aussi près que possible de l'oculaire, comme un œil. Les revendeurs de matériel astronomique proposent diverses solutions d'adaptation selon l'appareil. À cause de leur poids et surtout de leur volumineux objectif, les appareils de type bridge ne sont généralement pas compatibles avec ce montage.



Deux PLU réalisées avec un reflex format 24x36 sur un Schmidt-Cassegrain ; en haut sans réducteur de focale, en bas avec. Le rectangle blanc correspond au champ d'un reflex APS-C.

### Rapport de réduction d'un réducteur de focale

Calculer le rapport de réduction effectif  $R$  d'un réducteur de focale nécessite deux paramètres : la focale  $F$  de ce réducteur et le tirage  $T$  entre lui et le capteur.  $R$  s'en déduit par la formule suivante :

$$R = 1 - \frac{T}{F}$$

Par exemple, un réducteur de 230 mm de focale installé à 90 mm du capteur travaille à un rapport de réduction de  $(1 - 90 / 230) = 0,61$  fois.



Montage d'un APN à objectif non interchangeable derrière un oculaire, à gauche via l'écrou de fixation de l'appareil sur trépied, par le biais d'un support réglable ; à droite par une bague venant se fixer sur l'oculaire et sur l'objectif de l'appareil.

L'ajustement du zoom permet de faire varier le champ et la taille de l'objet photographié. Le calcul de la focale équivalente est simple : il suffit de multiplier la focale de l'objectif de l'appareil par le grossissement visuel de l'oculaire. Par exemple : un oculaire de 20 mm sur une lunette de 600 mm de focale procure un grossissement de 30 fois ; si un appareil, dont la focale de zoom est réglée sur 50 mm, est installé derrière cet oculaire, tout se passe comme si sa focale était de 1 500 mm.

L'autofocus de l'appareil peut être employé à condition que l'objet photographié soit de luminosité et de dimension suffisantes : utile pour la Lune ou le Soleil, l'autofocus avoue souvent ses limites avec les étoiles sur lesquelles il « n'accroche » pas toujours. Il faut également prendre la précaution de dégrossir la focalisation avec l'œil à l'oculaire avant la mise en place de l'appareil, faute de quoi, même avec l'autofocus, tout ou partie la photographie restera floue.

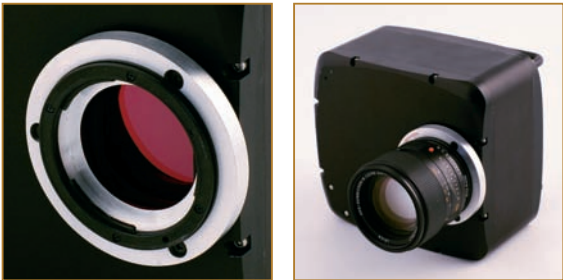


Le grandissement et le champ dépendent du réglage du zoom de l'appareil (à gauche : position grand-angle ; à droite : position téléobjectif). À courte focale, le champ de l'appareil peut être plus grand que le champ apparent de l'oculaire ; dans ce cas, la périphérie de l'image est noire, il y a vignettage par le diaphragme de champ de l'oculaire.

Montages particuliers sur un objectif photographique

Montage d'une webcam ou d'une caméra CCD

Le montage d'une webcam ou d'une caméra CCD derrière un objectif photographique est tout à fait envisageable, sous réserve de disposer de la bague d'adaptation adéquate que l'on sera souvent contraint de faire fabriquer. À noter cependant que quelques rares objectifs (c'est le cas du Canon 300 mm F/2,8 dans ses versions récentes) disposent, comme les autres, d'une bague de mise au point manuelle, mais le mécanisme n'est actif que lorsque l'objectif est électriquement alimenté par un boîtier de la marque. Un tel objectif n'est donc pas utilisable couplé à une webcam ou à une caméra CCD. En outre, certains objectifs tels que les Canon récents ne disposent pas de bague de réglage du diaphragme puisque celui-ci se règle directement à partir du boîtier. Lorsqu'on souhaite diaphragmer un tel objectif pour améliorer ses performances, il est possible de placer un cache percé d'un trou de la dimension adéquate à l'avant de l'objectif, mais cette solution ne fonctionne qu'avec les téléobjectifs, pas avec les objectifs grands-angles.



Cette bague, constituée d'une baïonnette femelle récupérée sur un boîtier photo hors d'usage et d'une partie fabriquée par un artisan mécanicien, permet d'adapter un objectif photographique sur la caméra CCD.



Ce petit repère sur le boîtier reflex indique la position du plan du capteur.

La seule difficulté consiste à calculer précisément l'épaisseur de la bague afin de rendre la mise au point possible : au foyer d'un objectif photographique, la plage de mise au point n'excède pas quelques millimètres. Sur certains boîtiers reflex, un repère signale la position du plan du capteur. Le tableau indique, pour les marques les plus répandues, la distance entre la face avant de la baïonnette du boîtier et le plan focal.

Tirage pour les principales marques de boîtiers reflex.

Distance (mm)	Marque
40,5	Konica F
42,0	Canon FD
43,5	Minolta MD
44	Canon EOS
45,5	Contax RTS, Pentax, Petri, Ricoh, Yashica FR/FX
46	Olympus OM, Contarex
46,5	Nikon
47	Leica R

Montage d'un objectif sur un boîtier d'une autre marque

On peut trouver sur Internet – ou faire fabriquer – des bagues permettant d'adapter un objectif d'une marque donnée sur un boîtier reflex d'une autre marque. Cela peut être intéressant pour utiliser un objectif ancien de bonne qualité, récupéré ou acheté d'occasion à prix modique. Évidemment, les automatismes (exposition, autofocus) sont généralement perdus mais c'est sans importance en astronomie. Cependant, il faut que la distance entre l'arrière de l'objectif et son plan focal soit compatible avec la distance entre l'avant du boîtier et son capteur, en tenant compte de l'épaisseur de la bague. On peut déduire du tableau précédent qu'il n'est pas possible de monter un ancien objectif Canon FD sur un boîtier récent Canon EOS avec une simple bague d'adaptation, pour cause de mise au point infaisable. En revanche, il est possible de monter un objectif Nikon sur ce boîtier, moyennant une bague d'adaptation dont l'épaisseur n'excède pas 3 mm.



Bague installée sur un reflex Canon et permettant l'installation d'objectifs Nikon.



# Calculer le champ et l'échantillonnage

En photographie courante, il est bien connu qu'augmenter la focale de l'objectif permet d'agrandir les objets au détriment du champ de prise de vue qui rétrécit. Il en va de même avec un instrument astronomique. Mais une planète ne se photographie pas du tout à la même focale qu'une nébuleuse ou une galaxie : la notion d'échantillonnage nous aidera à déterminer la taille de l'astre sur le capteur et la focale optimale pour le photographeur.

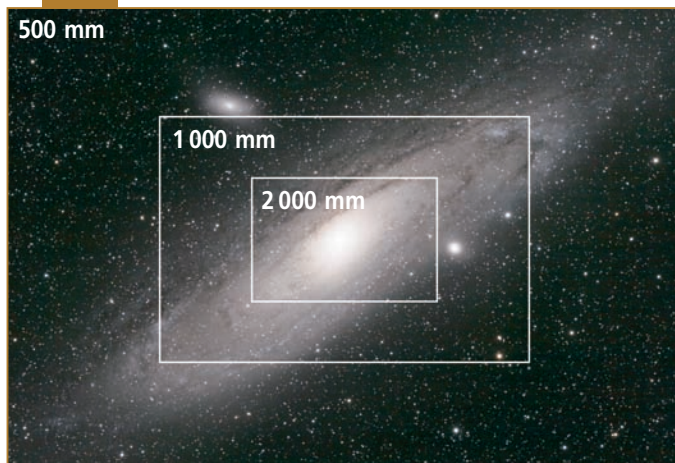
## Calculer le champ

Le champ de prise de vue (CHP) ne dépend que de deux paramètres : la focale F de l'instrument et la dimension D (longueur, largeur ou diagonale) du capteur, exprimées dans la même unité. Bien sûr, la focale à considérer est la focale résultante de l'instrument, en tenant compte de la présence éventuelle d'une Barlow, d'un oculaire de projection ou d'un réducteur de focale. La formule approchée suivante fournit le champ en degrés et convient pour les focales supérieures à 50 mm :

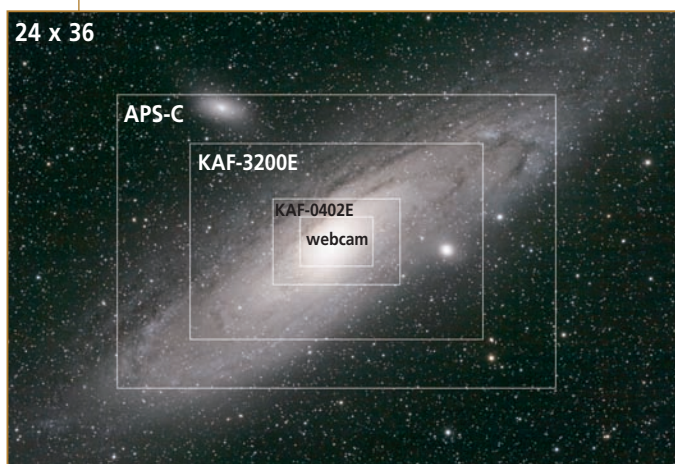
$$CHP = 57,3 \times \frac{D}{F}$$

Par exemple, un capteur de 15 mm installé au foyer d'un instrument de 1 mètre de focale (soit 1 000 mm) couvre un champ de  $57,3 \times 15/1\,000 = 0,86^\circ = 51'$ .

Le champ de l'appareil dépend de la focale de l'instrument ou de l'objectif, ici différentes focales avec un appareil numérique à capteur APS-C sur la galaxie M31 qui est l'un des plus grands objets du ciel profond.



Le champ de l'appareil dépend de la taille du capteur, ici différents capteurs avec un instrument de 1 mètre de focale sur M31.



Le tableau suivant donne le champ couvert sur le petit et le grand côté du capteur pour quelques focales et quelques capteurs courants.

Champ (petit côté et grand côté) pour différents capteurs et focales.

CAPTEUR	Focale en mm							
	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
2,8 x 3,7 mm (type 1/4")	3,2° 4,2°	1,6° 2,1°	48' 1,0°	19' 25'	9,6' 12'	4,8' 6,3'	1,9' 2,5'	1' 1,2'
3,6 x 4,9 mm (type 1/3")	4,1° 5,6°	2,0° 2,8°	1,0° 1,4°	24' 33'	12' 16'	6,1' 8,4'	2,4' 3,3'	1,2' 1,6'
4,8 x 6,5 mm (type 1/2", KAF-0400)	5,5° 7,4°	2,7° 3,7°	1,3° 1,8°	33' 44'	16' 22'	8,2' 11'	3,3' 4,4'	1,6' 2,2'
6,7 x 9,0 mm (type 2/3")	7,6° 10°	3,8° 5,1°	1,9° 2,5°	46' 1,0°	23' 30'	11' 15'	4,6' 6,1'	2,3' 3,0'
10 x 15 mm (KAF-1600/3200)	11° 17°	5,7° 8,6°	2,8° 4,3°	1,1° 1,7°	34' 51'	17' 25'	6,8' 10'	3,4' 5,1'
16 x 23 mm (reflex APS)	18° 26°	9,1° 13°	4,5° 6,5°	1,8° 2,6°	55' 1,3°	27' 39'	11' 15'	5,5' 7,9'
24 x 36 mm (Full Frame)	27° 41°	13° 20°	6,8° 10°	2,7° 4,1°	1,3° 2,0°	41' 1,0°	16' 24'	8,2' 12'

La focale maximale F permettant de photographier un objet de dimension angulaire A (en degrés) se calcule facilement à partir de la formule précédente :

$$F = 57,3 \times \frac{D}{A}$$

Par exemple, pour photographier en entier la Pleine Lune, dont le diamètre moyen est de  $0,53^\circ$ , sur un capteur dont le petit côté mesure 15 mm, il faut une focale inférieure à  $(57,3 \times 15/0,53) = 1\,600$  mm. En pratique, compte tenu des marges de centrage nécessaires, dans cette situation il ne faut pas excéder 1 300 mm de focale.

## Calculer l'échantillonnage et la taille des objets

L'échantillonnage représente le champ vu par un photosite du capteur. Comme nous le verrons aux chapitres 5 et 7, il est très important de faire travailler l'instrument à un échantillonnage adapté à l'astre à photographier. Étant donné que les dimensions des photosites sont habituellement exprimées en microns et la focale des instruments en mm, la formule suivante fournit directement l'échantillonnage en secondes d'arc ( $1^\circ = 60' = 3\,600''$ ) par photosite :

$$E = 206 \times \frac{P}{F}$$

Par exemple, un photosite de 8 microns placé au foyer d'un instrument de 500 mm de focale travaille à un échantillonnage de  $(206 \times 8/500) = 3,3''$  par photosite.

La taille en pixels d'un objet céleste s'en déduit aisément en divisant la dimension angulaire de cet astre par l'échantillonnage. Par exemple, lorsque le diamètre du globe de la planète Jupiter mesure  $40''$ , cet échantillonnage à  $3,3''$  par photosite conduit à une taille de 12 pixels sur le capteur (ce qui, en l'occurrence, est trop petit : il faudra allonger la focale).

Un raisonnement inverse permet de déterminer facilement la taille angulaire d'un objet céleste à partir de sa dimension en pixels et de l'échantillonnage. Il est tout aussi aisé de déterminer la focale d'un instrument, si l'on connaît la taille des photosites du capteur et les dimensions (angulaire et en pixels) d'un objet céleste que l'on a photographié.

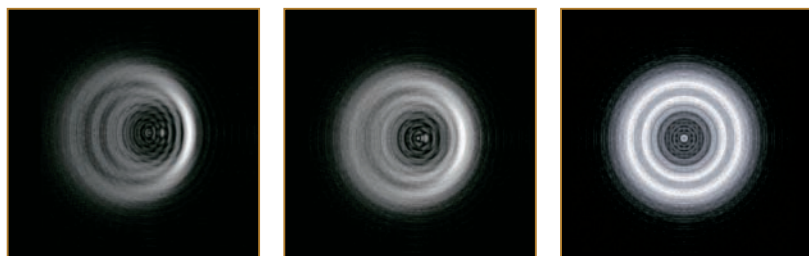
# Le réglage optique des instruments

Les instruments astronomiques sont toujours composés de plusieurs éléments optiques, miroirs ou lentilles. Lors de la conception d'une formule optique, l'opticien considère naturellement que tous ces éléments sont bien alignés, non seulement entre eux mais également avec le tube et le porte-oculaire de l'instrument. Dans la réalité, les inévitables petites imperfections de fabrication, ainsi que les flexions et jeux mécaniques font que ce positionnement n'est jamais parfait. Or, si l'alignement permanent de pièces optiques de petite dimension (moins de 100 mm de diamètre), telles que celles qui équipent les objectifs photographiques et les petites lunettes, est assez aisé, il n'en est plus de même avec des pièces de plus grande taille : tous les instruments d'un diamètre supérieur à 150 mm, aussi bonne que soit leur qualité de fabrication mécanique, sont équipés de vis qui permettent le réglage (ou collimation) d'un ou deux de leurs éléments optiques. C'est seulement à ce prix qu'il sera possible de tirer la quintessence de pièces optiques qui, ne l'oublions pas, sont polies à la précision astronomique, soit à une petite fraction de micron près : elle méritent un ajustement précis !

La collimation d'un instrument n'a rien de spécifiquement photographique, mais elle est tout aussi capitale qu'en observation visuelle et aucun traitement d'image, aussi sophistiqué soit-il, ne saurait rattraper les dégâts causés par un défaut d'alignement optique. Avec un peu d'habitude, la collimation est une opération simple et routinière. Ne pas l'effectuer reviendrait à utiliser une voiture sans jamais contrôler la pression des pneus ou le niveau d'huile !

La collimation d'un télescope s'effectue traditionnellement en observant, à grossissement plus ou moins élevé, une étoile (haute dans le ciel pour minimiser la turbulence) et à agir sur les vis de collimation pour rendre la figure symétrique. On peut distinguer deux niveaux de réglage.

- En grossissant 1 à 1,5 fois environ le diamètre de l'instrument (environ 200 fois pour un 150 mm) et en défocalisant légèrement l'étoile, le disque lumineux se dote d'anneaux plus ou moins brillants et contrastés. Le réglage consiste à obtenir une figure bien centrée et symétrique, un peu comme une cible de fléchettes.



Collimation niveau 1 : de gauche à droite, les figures sont de plus en plus symétriques.

- En augmentant le grossissement (2 à 3 fois le diamètre de l'instrument) et en faisant cette fois une bonne mise au point, c'est la figure d'Airy qui est observée (voir chapitre 5). Un instrument fortement dérégulé montre une figure très dissymétrique avec une queue : la coma (voir chapitre 7). En revanche, si le premier anneau est complet et uniforme, le réglage est optimal.



Collimation niveau 2 : la figure d'Airy, de plus en plus symétrique, de gauche à droite.

## Conseils pour un réglage optimal

Avec un peu d'expérience, il est tout à fait possible de réaliser la collimation directement au niveau 2, mais si la turbulence agite et déforme trop la figure d'Airy, il faudra se rabattre sur le niveau 1. Le simple centrage de l'ombre du miroir secondaire sur la figure défocalisée est préconisé par certains manuels d'utilisation de télescopes, mais cette méthode est très peu précise et à réserver au réglage initial d'un instrument qui n'a jamais été collimaté ; même après cette opération, l'instrument peut encore perdre plus de la moitié de ses capacités de résolution : qui voudrait d'une automobile qui ne fonctionne qu'à la moitié de sa puissance ? Le niveau 1 offre une qualité de réglage bien plus satisfaisante mais ce n'est qu'au niveau 2 qu'on peut avoir l'assurance que l'instrument fonctionne à plus de 90 % de ses capacités.

La correspondance entre l'orientation de la dissymétrie de l'image et la ou les vis sur lesquelles agir peut varier selon l'instrument, elle est à déterminer par essais lors du premier réglage. Les vis de réglage doivent être serrées avec modération, aucune vis ne devant être forcée ou complètement desserrée. Les rotations imprimées à ces vis doivent être de faible amplitude : un instrument fortement dérégulé peut nécessiter un demi-tour sur une des vis, mais le réglage fin s'effectue par de très petites fractions de tour. Chaque fois qu'un réglage est effectué, l'étoile de contrôle, qui s'est déplacée dans le champ de l'oculaire doit être soigneusement recentrée.

## Quel réglage pour quel instrument ?

Les opérations décrites ci-dessus correspondent au réglage du miroir secondaire sur un Schmidt-Cassegrain ou un Maksutov-Cassegrain. Les Schmidt-Cassegrain présentent certains avantages, notamment la compacité et un coût de réalisation industriel raisonnable, mais l'observateur et l'astrophotographe doivent être conscients que les tolérances de collimation de ces instruments sont, et de loin, les plus étroites de toutes les formules optiques courantes. La qualité du réglage se joue à une toute petite fraction de tour de vis et la netteté de l'image s'effondre si l'instrument n'est pas collimaté soigneusement, le réglage effectué en usine ne tenant en général pas très longtemps. Pour ma part, je vérifie la collimation de mon Schmidt-Cassegrain après chaque transport et il n'est pas rare qu'une retouche soit nécessaire, ce qui ne prend que quelques instants. La photographie se faisant sans renvoi coudé, il est préférable de collimater de la même manière, même si cela est moins confortable.



Les télescopes de type Maksutov-Cassegrain à miroir secondaire séparé (Intes) se règlent de la même manière, en agissant sur les vis de réglage du miroir secondaire. En général leur collimation tient très bien car la tolérance de leur formule optique est grande.

Sur un Newton, le réglage décrit ci-dessus correspond à celui du miroir primaire. Il faut, au préalable, avoir réglé le miroir secondaire ; cette opération, qui se fait de jour, est décrite sur de nombreux sites web.

Le barillet d'une lunette dont le diamètre excède 100 à 130 mm dispose généralement de vis de collimation. Même si les lunettes sont très tolérantes à un défaut d'alignement, il est bon ne pas faire preuve d'excès de confiance et de les contrôler de temps à autre : le nombre de lunettes dérégées est plus important qu'on ne le croit ! Lorsque l'utilisateur ne parvient pas à un réglage satisfaisant, c'est que les lentilles ont bougé les unes par rapport aux autres dans leur barillet ; dans ce cas, l'instrument doit être retourné au fournisseur.

Il est possible d'utiliser des substituts à une étoile réelle :

- une étoile artificielle réalisée à partir du reflet d'une lampe puissante sur une bille métallique située à plusieurs dizaines de mètres de l'instrument ; l'inconvénient de cette méthode est que le réglage est effectué télescope à l'horizontale, ce qui ne correspond pas à son usage astronomique ;
- un laser de collimation pour Newton inséré dans le porte-oculaire et dont le faisceau lumineux va se refléter plusieurs fois sur les miroirs. Cette méthode nécessite une parfaite perpendicularité du porte-oculaire par rapport au tube optique.

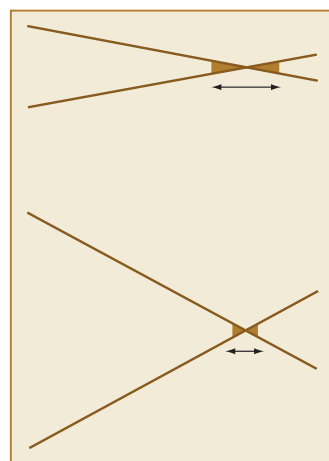
Dans tous les cas, il est vivement conseillé de vérifier le réglage sur une étoile réelle qui reste le moyen le plus précis, le plus sûr... et le moins coûteux.

## La mise au point

Mettre au point (on dit aussi « focaliser ») consiste à placer le capteur numérique au foyer de l'instrument, c'est-à-dire à l'endroit où convergent tous les rayons lumineux issus d'un même point du ciel. La photographie exige une mise au point précise car, à l'inverse de l'œil humain en observation visuelle, un appareil ne dispose d'aucune capacité d'accommodation ! Habitué que nous sommes à laisser faire l'autofocus de nos appareils pour nos photographies diurnes, on pourrait supposer que la mise au point en photographie astronomique n'est qu'une formalité. Il n'en est rien : la mise au point est, au contraire, une des principales difficultés auxquelles se heurte l'astrophotographe qui peut passer de nombreuses minutes à chercher la meilleure mise au point... sans jamais être tout à fait sûr qu'il l'a bien trouvée. Quelques aides ne seront pas superflues pour nous aider à réaliser des images bien nettes.

## La tolérance de mise au point

Heureusement, il n'y a pas qu'une seule position du système de mise au point pour laquelle l'image serait nette, toutes les autres positions conduisant à des images floues. Il existe en réalité un intervalle à l'intérieur duquel la mise au point peut être considérée comme satisfaisante. La longueur de cette plage de netteté dépend principalement de deux paramètres : le rapport F/D de l'instrument et l'ampleur du défaut de netteté toléré sur l'image. La dimension des photosites influe également : la plage est un peu plus étendue pour de grands photosites que pour des petits.



*Il existe une plage de netteté à l'intérieur de laquelle la mise au point peut être considérée comme satisfaisante. Plus le rapport F/D est petit, c'est-à-dire plus le cône de rayons lumineux est évasé, plus cette plage est réduite.*

Supposons que notre instrument soit optiquement parfait. Au foyer, tous les rayons lumineux convergent en ayant parcouru exactement la même distance

depuis leur source cosmique. On dit aussi que leurs chemins optiques sont égaux, ou encore qu'ils arrivent au foyer « en phase ». Mais lorsque la mise au point n'est pas bonne, ces rayons lumineux ont suivi des chemins de longueur légèrement différente (voir encadré). Ce qu'il faut retenir de la formule de calcul de cet écart de chemin est qu'il est proportionnel au carré du rapport F/D : au foyer, un instrument à F/D 5 est quatre fois moins tolérant qu'un instrument à F/D 10 et 16 fois moins qu'un instrument à F/D 20. Le tableau de la page suivante donne, pour le vert, la longueur de la demie plage de tolérance en fonction du rapport F/D et de la précision fixée.

### Calculer la plage de tolérance de mise au point

*Le défaut de mise au point peut se mesurer en différence de chemin maximale entre les différents rayons atteignant le plan focal, exprimée en fraction de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière reçue. La formule ci-dessous donne, en fonction du rapport F/D et de la différence de marche maximale ( $\Delta\lambda$ ), la longueur L de la demie plage de tolérance (dans la même unité que  $\Delta\lambda$ ):*

$$L = \pm 8(F/D)^2 \Delta\lambda$$

*Par exemple, pour une erreur de  $1/4 \lambda$  dans le vert ( $\lambda = 0,56 \mu\text{m}$ ) à F/D 10, L vaut  $\pm 0,1 \text{ mm}$ .*

*Pour la photographie planétaire, on considère qu'une mise au point est très bonne à  $1/8 \lambda$ , correcte à  $1/4 \lambda$ , médiocre à  $1/2 \lambda$  et mauvaise au-delà de  $1 \lambda$ . Pour le ciel profond, un peu plus tolérant à cause de l'échantillonnage moindre et de la contribution de la turbulence et des défauts de suivi, on considère que cette tolérance peut être doublée.*

*La collimation d'un Schmidt-Cassegrain ou d'un Maksutov-Cassegrain à miroir secondaire séparé se fait par son miroir secondaire (en haut), tandis que celle des lunettes s'effectue à l'aide des vis situées sur le barillet avant (en bas).*



Tolérance approximative de mise au point en fonction du rapport F/D et de la différence de marche, pour la photographie du ciel profond. Pour celle des planètes, les valeurs indiquées peuvent être divisées par 2.

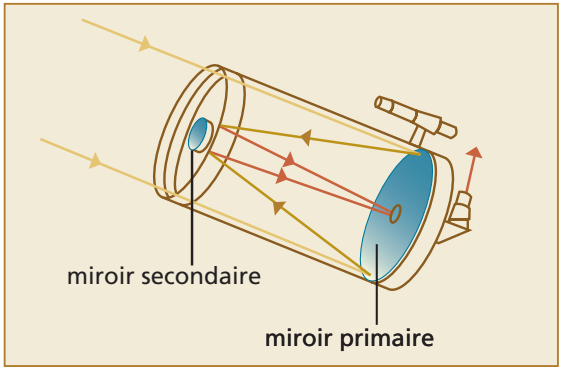
Rapport F/D	Précision		
	Très bonne	Correcte	Médiocre
2	$\pm 0,004$ mm	$\pm 0,008$ mm	$\pm 0,018$ mm
4	$\pm 0,018$ mm	$\pm 0,04$ mm	$\pm 0,08$ mm
6	$\pm 0,04$ mm	$\pm 0,08$ mm	$\pm 0,16$ mm
8	$\pm 0,08$ mm	$\pm 0,14$ mm	$\pm 0,3$ mm
10	$\pm 0,12$ mm	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,4$ mm
15	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,5$ mm	$\pm 1$ mm
30	$\pm 1$ mm	$\pm 2$ mm	$\pm 4$ mm

La mise au point est-elle la même pour tous les astres ?

Certains astrophotographes se demandent si, lorsqu'ils font la mise au point sur une étoile située à des centaines d'années-lumière de la Terre, cette mise au point est encore valable pour la Lune située à « seulement » 380 000 km de nous. Un calcul optique simple nous indique qu'au foyer d'un instrument de 1 m de focale, la différence de mise au point entre la Lune et un astre situé à l'infini est de l'ordre du milliardième de mm. C'est-à-dire une quantité absolument impossible à mesurer et totalement négligeable : tous les objets astronomiques, y compris la Lune, sont tellement éloignés qu'ils peuvent être considérés comme étant situés à l'infini. Il en va de même pour le centre de la Lune et son limbe qui, même s'ils sont situés à des distances légèrement différentes de l'observateur, n'en réclament pas moins la même mise au point : aucun risque d'avoir le centre du disque lunaire ou solaire net et son bord flou. Si c'est le cas, il ne s'agit pas d'une question de distance mais de couverture de champ (voir chapitre 7).

Les systèmes de mise au point

Deux types de mécanismes de mise au point se partagent la quasi-totalité des instruments d'amateur : d'une part la crémaillère dont sont dotés les lunettes et les télescopes de Newton (telles que les montrent les photographies du chapitre 7), et d'autre part la mise au point par déplacement du miroir primaire, qui équipe les Schmidt-Cassegrain ainsi que d'autres instruments de la famille Cassegrain. Ce second système se présente sous la forme d'une molette rotative émergeant de la face arrière du tube de l'instrument, couplée à un mécanisme interne à l'instrument et destiné à faire avancer ou reculer le miroir primaire, ce qui fait varier la position du foyer de l'instrument : ce n'est pas l'appareil qui est mobile pour aller chercher le foyer, mais l'inverse.



Ce système présente l'avantage d'offrir une très grande course de mise au point à l'arrière de l'instrument, au contraire des instruments disposant d'une crémaillère dont la plage de mise au point est limitée à sa course mécanique. En effet, le déplacement du miroir primaire est amplifié par le miroir secondaire convexe. Ainsi, sur les Schmidt-Cassegrain, le facteur de grandissement de ce miroir est généralement de 5, ce qui implique que le mouvement du miroir primaire est amplifié d'un facteur 25 ( $5^2$ ) : un déplacement de 1 mm de ce miroir est transformé en décalage du foyer de 25 mm à la sortie de l'instrument. Toutes sortes d'accessoires peuvent être installés sans risque de ne pouvoir faire la mise au point : réducteurs de focale, flip-mirror, têtes binoculaires, etc. De plus, la fixation des accessoires et de l'appareil à l'arrière de l'instrument se faisant sur une partie fixe, celle-ci ne risque pas de fléchir sous leur poids comme le font parfois les crémaillères peu solides des instruments d'entrée de gamme.

Cependant, ce système ne présente pas que des avantages. Ces mêmes Schmidt-Cassegrain souffrent de *shifting* : le jeu mécanique du système de translation du miroir primaire provoque un décalage de l'image dans le champ lorsque la rotation de la molette de mise au point est inversée. Ce décalage est très variable d'un instrument à l'autre et atteint, dans les cas extrêmes, plusieurs minutes d'arc entre les deux positions de l'image, ce qui peut perturber le centrage d'une planète sur le petit capteur d'une webcam.

Nous avons examiné au paragraphe précédent la relation entre tolérance de mise au point et rapport F/D. Lorsque nous voulons calculer la tolérance de positionnement d'un élément mécanique de mise au point, c'est le rapport F/D au niveau de cet élément qu'il faut considérer dans notre calcul. Ainsi, sur un télescope de Newton ou sur une lunette, c'est le rapport F/D du miroir primaire ou des lentilles qui entre en jeu, la présence éventuelle d'un système grandissant ou réducteur de focale n'intervenant pas puisque ce système est placé derrière la crémaillère. La précision mécanique de mise au point pour un système à déplacement du miroir primaire doit être calculée à partir du rapport F/D de ce miroir, qui vaut 2 pour les Schmidt-Cassegrain. Le tableau précédent montre qu'une bonne mise au point nécessite alors un positionnement du miroir primaire à une précision n'excédant pas quelques millièmes de mm, ce qui correspond à un positionnement de la molette de mise au point meilleur que 1/300 de tour ! Des constructeurs indépendants proposent, pour ces télescopes, de solides crémaillères de type Crayford, manuelles ou motorisées, améliorant la précision et la facilité de mise au point. Un moteur de mise au point, souvent proposé en option, peut aider à éviter les vibrations de l'instrument lors de la mise au point. Mais il faut qu'il soit précis et surtout pas trop rapide, faute de quoi il sera difficile de s'arrêter sur la position recherchée.



Une crémaillère additionnelle pour Schmidt-Cassegrain ou Maksutov-Cassegrain, utilisée pour affiner la mise au point qui aura été préalablement dégrossie avec le système par déplacement du miroir primaire.



Le vernier des distances d'un objectif photographique n'est pas toujours assez précis pour permettre une bonne mise au point.

Éclaté d'un télescope de type Schmidt-Cassegrain. La mise au point s'effectue par déplacement du miroir primaire. Ce miroir est à F/D 2 et le miroir secondaire convexe amplifie ce rapport F/D (comme le ferait une lentille de Barlow) d'un facteur 5 pour aboutir à un rapport F/D final de 10.

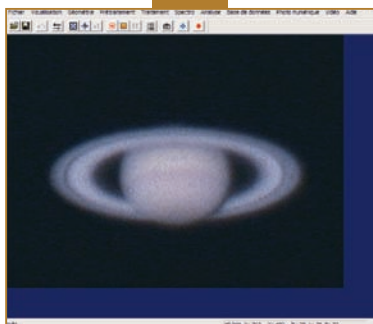


## Techniques et aides à la mise au point

Une webcam fournit une image en continu sur l'écran de l'ordinateur, permettant une mise au point sur les objets brillants (Soleil, Lune, planète) quasiment en temps réel comme en observation visuelle. Quant aux reflex numériques, leur viseur permet évidemment

d'effectuer la mise au point directement sur l'image télescopique, mais compte tenu de l'orientation de l'appareil, cela se fait souvent dans une position inconfortable pour l'amateur. Même si le réglage dioptrique de leur oculaire est soigneusement positionné à la vue du photographe, la mise au point au travers du verre de visée dépoli des boîtiers reflex n'est pas toujours une partie de plaisir pour une planète peu lumineuse telle que Saturne ou aux détails peu contrastés telle que Jupiter, sans parler des objets du ciel profond qui sont trop diffus ou trop faibles pour juger d'une bonne mise au point.

Avec une webcam,  
le contrôle de la mise  
au point s'effectue  
directement sur l'image  
vue à l'écran.



### La mise au point sur une étoile

On est souvent amené à se tourner vers les étoiles qui sont des cibles idéales car ce sont des sources de lumière ponctuelles mais, même dans ce cas, la finesse de l'étoile est très difficile à apprécier sur le dépoli. Diverses astuces plus ou moins efficaces ont été imaginées pour aider à la mise au point. La méthode des aigrettes s'appuie sur deux fils fins (fil de pêche) placés à angle droit devant l'ouverture de l'instrument. Lorsque celui-ci vise une étoile très brillante, des aigrettes de diffraction se forment, dessinant une croix autour de l'image de l'étoile. Ces aigrettes sont d'autant plus brillantes, fines et longues que la mise au point est bonne.



Des amateurs utilisent une autre méthode : un cache percé de deux trous diamétralement opposés est placé devant l'ouverture de l'instrument. Tant que la mise au point n'est pas bonne, les deux trous forment d'une étoile deux images séparées, ces images se rapprochant et fusionnant lorsque la mise au point s'améliore (cette méthode est parfois appelée « masque de Hartmann » mais le terme est impropre car un véritable masque de Hartmann est un cache percé de multiples trous et destiné à des mesures de qualité optique). L'expérience montre que la précision de cette méthode est faible, notablement inférieure à celle des aigrettes.

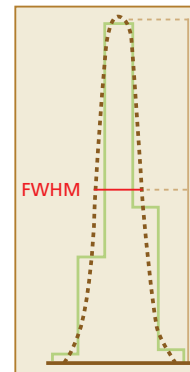
### APN et autofocus

Lorsqu'un APN est utilisé avec son objectif, l'autofocus peut être mis en œuvre sur la Lune ou sur une étoile brillante bien centrée dans le viseur. Mais ne vous fiez pas aveuglément à cet automatisme, certains appareils semblent satisfaits de leur mise au point... ce qui n'est pas toujours votre cas lorsque vous regardez ensuite l'image agrandie sur l'écran de l'APN ou de l'ordinateur !

Avec un APN, une autre méthode consiste à prendre plusieurs photographies de quelques secondes de pose en décalant légèrement la mise au point, puis à examiner la finesse des étoiles en agrandissant l'image au maximum sur l'écran de l'APN. Par nature, un reflex n'affiche pas sur son écran LCD l'image recueillie par le capteur en temps réel puisque celui-ci, masqué par le miroir et par l'obturateur, ne reçoit aucune lumière. Néanmoins, certains reflex (à ce jour seuls le Canon 20Da dont nous reparlerons au chapitre 7 et l'Olympus E330) comportent un mode d'affichage en temps réel pendant une durée de 30 secondes sur l'écran LCD avec possibilité de zoom, ce qui constitue une solution intéressante pour réaliser une bonne mise au point en astrophotographie.

Le cas des caméras CCD est différent de celui des APN. Étant dépourvues de viseur, il est nécessaire de faire des images successives de l'objet en vérifiant et en retouchant la mise au point entre chaque image. Heureusement, les logiciels d'acquisition permettent de lancer un fenêtrage en boucle continue sur une petite portion du capteur contenant une étoile, avec des poses de quelques dixièmes de seconde. Le logiciel analyse l'étoile à chaque image et indique l'intensité du pixel le plus brillant, valeur qu'il faut chercher à maximiser. Mieux : de nombreux logiciels d'acquisition sont capables de calculer, à partir de la forme de l'image de l'étoile, sa largeur à mi-hauteur (en anglais FWHM : Full Width at Half Maximum), qu'il faut mini-

L'image d'une étoile occupe généralement  
plusieurs photosites (en vert).  
Elle peut se modéliser sous la forme  
d'une cloche plus ou moins fine  
(en pointillés) dont le logiciel peut  
calculer la valeur maximale ainsi  
que la largeur à mi-hauteur (FWHM).  
Meilleure est la mise au point,  
plus faible est la FWHM.



Deux fils fins provoquent sur une étoile brillante l'apparition  
d'aigrettes de diffraction qui s'affinent et s'allongent à mesure que  
la mise au point s'améliore (de gauche à droite).

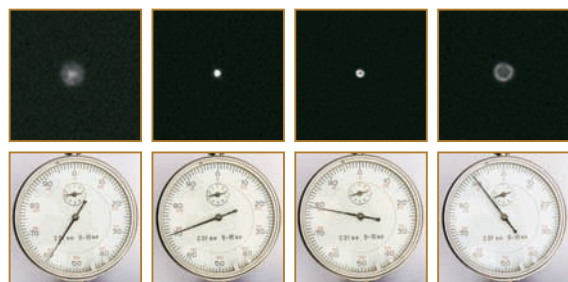
miser. Cette seconde mesure est plus fiable que la première car moins sensible à la turbulence. De l'avis de nombreux amateurs, la FWHM est le critère de mise au point le plus précis. Aussi étonnant que cela puisse paraître, la FWHM ne dépend pas de la luminosité de l'étoile choisie (tant que celle-ci n'est pas saturée).

### Mesurer la position de mise au point

Quels que soient l'appareil et la méthode employés, il est intéressant de se doter d'un système permettant de mesurer la position d'un élément mobile lors de la mise au point. J'utilise depuis de nombreuses années un petit accessoire de mécanique dont je ne pourrais plus me passer : un comparateur. Il se présente sous forme d'un cadran circulaire comprenant une aiguille dont la rotation est provoquée par le mouvement d'un doigt. Il est installé sur une partie fixe de l'instrument, son doigt appuyant sur une partie mobile, ou vice-versa.

Pour ce faire, il peut être nécessaire de faire fabriquer une pièce d'adaptation ou d'utiliser un petit bras articulé.

Certaines crémaillères additionnelles sont dotées d'un vernier ou d'un système de mesure digital offrant les mêmes possibilités qu'un comparateur. Tous ces moyens de mesure présentent l'immense avantage de fournir à tout instant un repère de position du système de mise au point. Plusieurs valeurs de cette position peuvent ainsi être essayées et la meilleure d'entre elles retrouvée rapidement et précisément. Le photographe ne craint plus de vérifier et de retoucher la mise au point aussi souvent que nécessaire en cours de nuit, car il ne risque pas de perdre ses repères et de ne pas retrouver la mise au point initiale si celle-ci se révèle être finalement la meilleure.



Plusieurs images de la même étoile ont été effectuées à diverses positions de la crémaillère de mise au point. La référence fournie par le comparateur permet de retrouver instantanément la troisième position qui est la meilleure de la série.



Un comparateur gradué au 1/100 de mm, peu coûteux (moins de 20 €), convient à la plupart des situations.



À gauche : installation d'un comparateur sur une lunette. Une petite pièce en aluminium, placée sous le chercheur, supporte la tige de fixation du comparateur dont l'orientation est réglée au moyen d'une petite rotule. Le doigt appuie ici sur la partie mobile de la crémaillère, il aurait également pu être mis en contact avec l'appareil. À droite : le comparateur est tenu par un petit bras articulé et appuie sur l'appareil.



## L'oculaire parfocal

Une autre aide à la mise au point, particulièrement employée avec les webcams, est un oculaire placé par rapport à l'appareil en position parfocale, ce qui signifie que lorsque la mise au point est bonne visuellement à travers l'oculaire, elle l'est aussi après son remplacement par l'appareil. Pour ce faire, une bague de blocage, venant se placer sur le coulant mâle de l'oculaire, permet de replacer celui-ci toujours au même tirage dans le porte-oculaire. Évidemment, le réglage de la position de la bague est du ressort de l'astrophotographe qui doit :

- faire une mise au point soignée avec l'appareil ;
- le remplacer par l'oculaire et faire la mise au point visuellement en le faisant coulisser dans le porte-oculaire ;
- bloquer la bague en position sur le coulant de l'oculaire ;
- vérifier le positionnement de la bague par l'expérience inverse : refaire la mise au point avec l'oculaire et s'assurer qu'elle est correcte avec l'appareil.

L'oculaire utilisé doit fournir un grossissement suffisant pour permettre une appréciation correcte de la netteté de l'image et être de préférence réticulé afin de forcer l'œil à ne pas accommoder. Comme nous l'avons vu plus haut, la tolérance de positionnement de la bague dépend du rapport F/D au niveau de l'oculaire : d'environ 1 mm à F/D 30, elle descend à quelques centièmes de mm seulement à F/D 5 : le positionnement de la bague est donc bien plus facile en planétaire qu'en ciel profond. Bien sûr, le réglage ainsi réalisé n'est valable que pour un montage mécanique précis de l'appareil, en tenant compte de la présence éventuelle de filtres devant l'appareil (voir encadré).

Mais pourquoi faut-il vérifier régulièrement au cours de la nuit la mise au point ? Parce qu'il est fréquent que la température nocturne baisse au fil des heures. Conséquence : les tubes des instruments qui sont généralement en aluminium se rétractent. Cela provoque

un décalage de mise au point dont l'effet est parfois visible sur la finesse des images en moins d'une demi-heure. La dilatation des lentilles ou des miroirs peut également jouer un rôle dans le décalage de la mise au point. La plupart du temps, une mise au point effectuée en début de nuit et non retouchée conduit à des images floues quelques heures plus tard. Constatant que la position de mise au point variait souvent linéairement avec la température, certains fabricants proposent aujourd'hui des systèmes de mise au point motorisés réglant eux-mêmes la mise au point en fonction de la température instrumentale, qu'ils savent mesurer. Évidemment, ils sont relativement coûteux et doivent au préalable être étalonnés à diverses températures, cet étalonnage n'étant valable que pour un montage optique et mécanique précis.



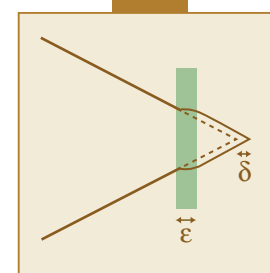
La bague de blocage, placée sur le coulant de l'oculaire, permet de replacer celui-ci dans une position où la mise au point visuelle et la mise au point pour la webcam sont identiques.

## Un filtre décale-t-il la mise au point ?

Un filtre placé devant un instrument astronomique (par exemple un filtre solaire) ou devant un objectif ne modifie pas la mise au point. En revanche, s'il est placé après la sortie de l'instrument, juste devant l'appareil, il recule le foyer et modifie par conséquent la mise au point. Le décalage du foyer vaut :

$$\delta = \epsilon \frac{n-1}{n}$$

où  $\epsilon$  est l'épaisseur du filtre et  $n$  l'indice de réfraction du matériau qui le constitue. L'indice de réfraction du verre utilisé pour les filtres valant approximativement 1,5, on peut déduire de la formule ci-dessus qu'un filtre recule le foyer d'une distance voisine du tiers de son épaisseur. Par exemple, un filtre en verre de 3 mm d'épaisseur recule le foyer d'environ 1 mm.



Un filtre placé devant l'appareil recule le foyer de l'instrument.





## Les planètes et la Lune

Huit planètes cohabitent avec la Terre dans le Système Solaire. Toutes sont photographiables par un amateur, mais trois d'entre elles se distinguent en offrant des vues détaillées : Mars, Jupiter et Saturne. Sans compter notre satellite, la Lune, dont la photographie présente beaucoup de similitudes avec celle de ces planètes.

*Grande, lumineuse et fourmillant de détails contrastés,  
la Lune est une bonne cible pour débuter en astrophotographie.*





Les planètes sont des objets relativement lumineux qu'il est tout à fait possible de photographier depuis un centre-ville ou en présence de la Lune. Mais elles sont de petite dimension angulaire : aucune ne dépasse la minute d'arc. Pour pouvoir enregistrer des détails à la surface des plus majestueuses d'entre elles, l'instrument doit être capable de voir sa focale portée à plusieurs mètres ; plus question d'utiliser l'objectif photographique avec lequel nous photographions les constellations ou de larges nébuleuses : sa focale n'est pas suffisamment grande, son diamètre non plus. Place donc aux instruments astronomiques.

Le terme « haute résolution » est parfois employé pour désigner la photographie des planètes car c'est le domaine de la photographie astronomique où l'on cherche à pousser l'instrumentation dans ses derniers retranchements, le plus près possible de ses capacités ultimes de résolution. Une très bonne photographie planétaire n'est jamais le fruit du hasard : qualité optique, collimation du télescope, échantillonnage adéquat, mise au point soignée, traitement judicieux et... clémence de l'atmosphère sont quelques ingrédients essentiels à l'obtention d'une belle photographie de Mars, Jupiter ou Saturne. Dans ce domaine peut-être plus que dans tout autre, la persévérance et la rigueur sont de règle !

## Instruments et résolution

Tous les astronomes amateurs le savent bien, une des caractéristiques fondamentales des instruments astronomiques est leur diamètre optique. C'est d'ailleurs par cette information, et non par la focale, qu'ils les désignent en général : « j'ai une lunette de 60 mm », « j'utilise un télescope de 200 », etc. C'est le diamètre qui détermine naturellement la quantité de lumière collectée, si utile en ciel profond. Mais il détermine aussi la quantité de détails visibles. En effet, si l'image, donnée par un instrument astronomique, d'une source lumineuse ponctuelle telle qu'une étoile était elle-même un point sans dimension mesurable, il suffirait d'agrandir indéfiniment l'image donnée par le premier instrument venu pour détecter toujours plus de détails. Malheureusement, la Nature en a décidé autrement : au foyer de notre instrument, l'image d'une étoile se présente sous la forme d'un petit disque lumineux (ou « faux disque ») concentrant la majeure partie de l'énergie lumineuse, entouré d'anneaux d'intensité rapidement décroissante. Ce phénomène est dû à la diffraction de la lumière et a pour conséquence de rendre plus ou moins flous et dilués les bords d'une planète ou des détails planétaires. Plus ces détails sont fins et peu contrastés, plus il est difficile pour un instrument d'en donner une image nette et distincte ; en dessous d'une certaine limite, leur détection n'est plus possible.

Le diamètre angulaire  $d$  du faux disque (en secondes d'arc) est proportionnel à la longueur d'onde  $\lambda$  (en microns) et inversement proportionnel au diamètre optique  $D$  de l'instrument (en mm) :

$$d = 500 \frac{\lambda}{D}$$

Par exemple, un instrument de 100 mm de diamètre donne dans le vert (longueur d'onde 0,56  $\mu\text{m}$ ) un faux disque de 2,8" de diamètre. La principale conséquence de cette propriété est qu'un instrument est capable – en théorie – de montrer des détails d'autant plus fins et nombreux que son diamètre est grand.



Image de Saturne obtenue en 2003 avec un télescope de 305 mm de diamètre et une webcam. Grâce à des conditions de turbulence excellentes et à un angle d'ouverture maximal des anneaux, elle montre aux extrémités des anses des anneaux la division d'Encke qui est une réplique miniature de la division de Cassini. Sa largeur angulaire n'est que de 0,05" mais sa forme et son contraste favorisent sa détection ; il n'aurait pas été possible de détecter une tache circulaire et peu contrastée aussi petite à la surface de la planète.

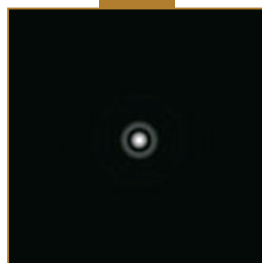
## Où sont les limites de résolution ?

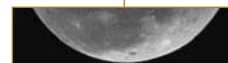
Les publicités et notices d'utilisation des télescopes du commerce mentionnent une information appelée « pouvoir séparateur ». Ce nombre, exprimé en secondes d'arc, se calcule simplement par la formule  $120/D$ , où  $D$  est le diamètre de l'instrument en mm. Par exemple, le pouvoir séparateur d'un télescope de 120 mm de diamètre est de 1".

Ce nombre ne représente pas, comme on le croit souvent, la dimension du plus petit détail détectable dans un instrument donné : si c'était le cas, comment serait-il possible de distinguer la division de Cassini, dont la largeur est de 0,7", dans une lunette de 60 mm dont le pouvoir séparateur n'est pourtant que de 2" ? En réalité, la formule ci-dessus ne s'applique pas à la détection d'un détail isolé mais à la séparation d'une étoile double, ce qui est un problème très différent. Détecter un détail isolé et séparer deux détails sont deux capacités distinctes, de plus elles dépendent non seulement du diamètre de l'instrument mais également de la forme et du contraste des détails considérés. Une image de ciel profond comporte des « détails » (les étoiles) dont la dimension angulaire est inférieure au millième de seconde d'arc, mais ce chiffre n'est en aucun cas une indication de la qualité de l'image en termes de netteté.

Il ne faudrait cependant pas en déduire qu'un instrument est capable de montrer des détails aussi petits que l'on veut et que tout ce qui apparaît dans une image est nécessairement réel. Il ne faut jamais oublier que l'image donnée par un instrument n'est pas la réalité mais une transformation de celle-ci, que la diffraction (et d'autres causes que nous verrons par la suite) rend d'autant moins fidèle que les détails sont fins et peu contrastés. En d'autres termes, un instrument est un filtre qui dégrade l'information, et cela d'autant plus

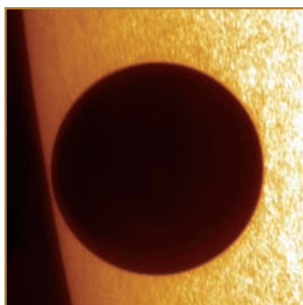
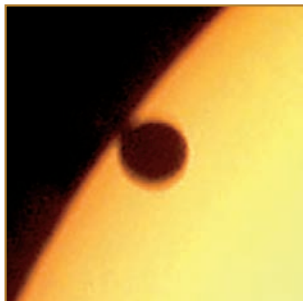
La célèbre figure d'Airy. Pour l'observer distinctement, il faut grossir au moins deux fois le diamètre de l'instrument en mm (par exemple au moins 200 fois pour un instrument de 100 mm). Le nombre d'anneaux visibles dépend, entre autres facteurs, de la magnitude de l'étoile.





que cette information est subtile. L'effet de « goutte noire » observé et photographié lors des transits de Vénus devant le Soleil est une des meilleures illustrations de la prudence dont il faut toujours faire preuve devant une image. Et, lorsqu'un doute surgit, la comparaison avec des images très détaillées, prises avec des instruments professionnels ou des sondes spatiales, n'est jamais inutile !

*Aux siècles passés, l'effet de « goutte noire » observé lors des transits de Vénus devant le Soleil a longtemps été sujet à controverse (en haut). Pour certains, il s'agissait d'un phénomène réel dû à l'atmosphère de Vénus. Pour d'autres, c'était une simple conséquence des défauts des instruments, notamment la diffraction et le chromatisme. Nous savons aujourd'hui que ce sont les seconds qui avaient raison : des images très détaillées, prises par de grands télescopes professionnels tels que le télescope solaire suédois de 1 mètre de diamètre installé aux îles Canaries (en bas), ne montrent aucunement cet effet. Photographies Marko Myllyniemi et Institute for Solar Physics (Royal Swedish Academy of Sciences).*



### Interférométrie optique et amateurs

L'interférométrie optique consiste à faire fusionner les faisceaux lumineux issus de plusieurs télescopes (au moins deux), afin d'améliorer la résolution des images. Simple dans le principe, cette technique est terriblement complexe à mettre en œuvre : il faut que les chemins optiques suivis par les faisceaux restent égaux à moins de 1/10 de micron près, et cela malgré le fait qu'ils varient en permanence à cause de la rotation de la Terre. Les solutions mises en place sur quelques grands télescopes professionnels, aux limites de la technologie actuelle, sont pratiquement hors de portée de l'amateur.

De plus, contrairement à la vision simplificatrice qu'on nous en présente parfois, le couplage de deux télescopes ne donne pas une image ayant la même résolution que celle fournie par un instrument géant dont le diamètre serait égal à la distance les séparant. En réalité, l'image recueillie est identique à celle fournie par un seul des deux télescopes, à ceci près que cette image est striée de très fines franges d'interférences que de puissants ordinateurs doivent digérer afin d'en déduire une information exploitable par les équipes scientifiques.

Notons enfin que l'interférométrie en lumière visible ne peut pas se faire a posteriori par combinaison d'images numériques prises avec plusieurs télescopes. Pour des raisons dont la description dépasse le cadre de cet ouvrage, il faut impérativement que ce soit les faisceaux lumineux issus des télescopes qui soient combinés, et cela avant d'atteindre le capteur.

## Les instruments pour la photographie planétaire

L'instrument parfait et universel n'existe pas, ni en théorie ni en pratique. On pourrait consacrer des centaines de pages à décrire dans le détail toutes les propriétés et aberrations caractérisant chaque formule optique tant celles-ci sont nombreuses et variées. Des formules comme celles des télescopes de Newton et de Cassegrain ont été conçues pour donner une excellente qualité d'image sur l'axe optique, c'est-à-dire au centre du champ. Ce qui est tout à fait suffisant en photographie planétaire, compte tenu de la petite dimension angulaire des planètes : ici, nul besoin d'un instrument disposant d'une large couverture de champ comme en ciel profond. Quelques indications (on trouvera des photographies de ces différents types d'instruments au chapitre 7) :

- l'instrument ayant le meilleur rapport performances/diamètre est une lunette apochromatique (voir plus loin) ou un télescope de Cassegrain optimisé pour le planétaire ;
- l'instrument ayant le meilleur rapport performances/prix est le télescope de Newton, en particulier lorsqu'il est de fabrication personnelle ;
- l'instrument ayant le meilleur rapport performances/encombrement est le Schmidt-Cassegrain ou le Maksutov-Cassegrain.

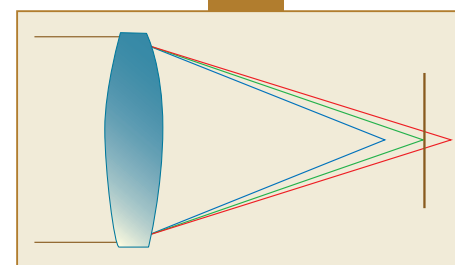
À diamètre fixé, la qualité optique est, de loin, le critère le plus important car la finesse et le contraste de l'image en dépendent étroitement. En revanche, la focale de l'instrument n'a pas d'importance car, quelle qu'elle soit, il faudra l'amplifier à l'aide de lentilles de Barlow ou d'oculaires de projection. Autrement dit, le rapport F/D n'est pas un critère de choix pour un instrument planétaire : les instruments à petit rapport F/D peuvent donner d'aussi bonnes photographies planétaires que ceux à grand rapport F/D.

En photographie planétaire, la course au diamètre n'est pas toujours la meilleure solution : mieux vaut un instrument de taille raisonnable mais de bonne qualité et bien maîtrisé qu'un mastodonte impossible à dompter et qui, à cause de la turbulence atmosphérique, n'aura que très rarement un bon rendement. L'expérience montre que l'instrument idéal est finalement celui qui vous convient, que vous utiliserez le plus souvent et que vous connaissez bien !

Deux caractéristiques sont souvent citées comme importantes pour la qualité d'image : le chromatisme (ou aberration chromatique) sur les lunettes et l'obstruction centrale sur les télescopes.

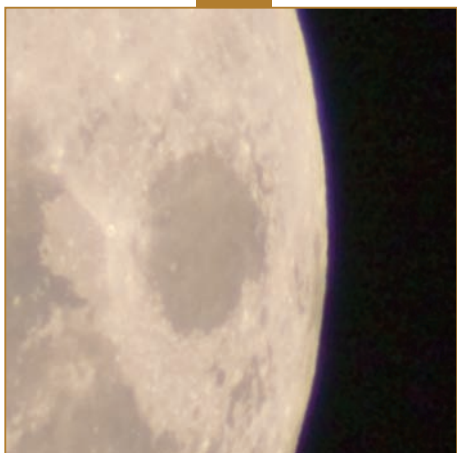
### L'aberration chromatique

Une lentille simple de forme convenable est capable de faire converger les rayons lumineux issus d'une étoile en un seul point du foyer, mais seulement pour une seule longueur d'onde (couleur). Les autres radiations convergent en d'autres endroits situés en avant ou en arrière car l'indice de réfraction du verre varie selon la longueur d'onde. Lorsque la mise au point est bonne pour une couleur, par exemple le vert, l'image est entourée d'une auréole colorée composée de violet, de bleu et de rouge ; cette auréole détruit le contraste et la netteté de l'image. La lunette de Galilée, dont l'objectif était composé d'une seule lentille, donnait une image bien plus mauvaise que les lunettes d'entrée de gamme actuelles ! Il a fallu attendre l'invention de l'objectif achromatique, composé de deux lentilles d'indices de réfraction différents, pour obtenir une correction plus satisfaisante. Cependant, le terme



*Une lentille simple présente un point de convergence des rayons différent selon la longueur d'onde.*





Portion d'une image de Lune prise avec un appareil numérique sur une lunette achromatique. Le liseré pourpre entourant le limbe est dû à l'aberration chromatique de la lunette.

achromatique est trompeur car il peut laisser penser que l'aberration a été totalement éliminée ; en réalité, un objectif achromatique permet à deux longueurs d'onde de converger au même point, en général dans le bleu et le rouge, le vert restant confiné dans des limites raisonnables. Mais le décalage du foyer est de plus en plus prononcé à mesure que l'on s'éloigne vers le rouge profond et le violet : une diffusion de lumière violette ou pourpre est souvent visible sur les objets brillants (étoile, limbe lunaire). L'aberration chromatique devient plus sensible à mesure que le diamètre de la lunette augmente (à rapport F/D égal) ou que son rapport F/D diminue (à diamètre égal). Afin de minimiser ce

défaut, les lunettes achromatiques présentent donc habituellement des rapports F/D relativement élevés, de l'ordre de 9 à 15.

À l'autre bout de la gamme des réfracteurs sont proposées des lunettes qualifiées d'apochromatiques et dont les objectifs sont composés de deux ou trois lentilles dont certaines sont réalisées à partir de verres spéciaux. Les meilleures lunettes offrent une correction chromatique telle que la dégradation de l'image est imperceptible en observation visuelle et négligeable en photographie, et cela du violet jusqu'à l'infrarouge. Avec l'amélioration de la correction chromatique, les rapports F/D ont pu être ramenés entre 5 et 8 sans que le chromatisme ne redevienne sensible. Les verres spéciaux les plus utilisés sont les verres ED (Extra-low Dispersion) et un cristal de fluorite (ou fluorine) de calcium, ils sont coûteux et donc réservés aux instruments de moyenne et de haut de gamme. Pour compliquer les choses, une jungle de termes techniques – qui n'ont pas toujours le même sens selon le constructeur – est apparue : semi-apochromat, apochromat, ortho-apochromat, neo-apochromat, super-apochromat, etc. De plus, selon le type de verre ED employé, le nombre de lentilles et la formule optique, les performances pourront varier sensiblement d'un modèle à l'autre.

L'œil étant moins sensible au bleu et au rouge qu'au vert, un objectif achromatique qui donne satisfaction en observation visuelle peut causer des surprises en photographie, compte tenu de la sensibilité des appareils dans ces couleurs et même, pour les appareils monochromes, dans l'infrarouge proche. En cas d'aberration chromatique importante dans l'infrarouge, il faudra employer un filtre nommé « anti-infrarouge » (ou IRB : InfraRouge Blocking). En outre, on trouve dans le commerce des filtres sous des dénominations telles que Contrast Booster, Fringe Killer ou Minus Violet. Ils sont destinés aux lunettes achromatiques, leur principe est d'éliminer les longueurs d'onde gênantes, notamment le violet voire une partie du bleu. Ils donnent donc en général une couleur jaune aux objets observés. Utiles sur les lunettes achromatiques, surtout celles à court rapport F/D, ils n'améliorent en aucun cas le contraste sur une lunette apochromatique (ni sur un télescope, naturellement).

## L'obstruction centrale

Sur un télescope, le miroir secondaire masque la partie centrale du faisceau lumineux recueilli par l'instrument, ce qui provoque non seulement une perte de lumière mais aussi et surtout une perte de contraste, par effet de diffraction. On exprime généralement l'obstruction par le rapport entre le diamètre du support du miroir secondaire et celui du diamètre optique de l'instrument (mais certains constructeurs la calculent en pourcentage de surface masquée... ce qui permet d'afficher des chiffres en apparence plus favorables). Par exemple, pour un télescope de 200 mm dont le support du miroir

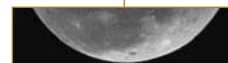
secondaire a un diamètre de 60 mm, l'obstruction vaut 30 %. Elle occasionne une perte de lumière de seulement 9 %, mais son effet est plus important sur le contraste puisque la perte peut atteindre, à certaines échelles de détails planétaires, 30 à 35 %. Sur ces détails, notre instrument de 200 mm présente donc un contraste équivalent à celui d'un instrument non obstrué d'environ 130 mm, tout en conservant cependant les capacités de résolution d'un instrument de 200 mm. Le tableau ci-dessous présente, pour quelques valeurs courantes d'obstruction, la perte de lumière et la perte de contraste maximale. Sur les télescopes de Newton et de Cassegrain, la diminution du contraste provoquée par les branches de l'araignée supportant le miroir secondaire est négligeable.



Images de Saturne traitées de manière classique (compositage et masque flou), obtenues avec une lunette apochromatique de 150 mm de diamètre et une webcam. Des disques en papier placés à l'avant de l'instrument simulent diverses obstructions, respectivement 0 %, 20 %, 35 % et 50 % (de haut en bas).

Valeur de la perte de lumière et de la perte maximale de contraste pour quelques valeurs courantes d'obstruction.

Obstruction	Perte de lumière	Perte de contraste maximale
15 %	2 %	10 %
25 %	6 %	25 %
35 %	12 %	40 %
45 %	20 %	60 %



Dans l'idéal, tous les instruments planétaires seraient des lunettes apochromatiques. Mais l'encombrement et surtout le coût de ces instruments sont rapidement prohibitifs dès que leur diamètre dépasse 100 à 130 mm. Un télescope de bonne qualité optique, de diamètre largement supérieur, présentera quant à lui un bien meilleur rapport performances/coût, le supplément de contraste dû au surcroît de diamètre faisant plus que compenser sa diminution due à l'obstruction. En particulier, un Cassegrain classique ou un Newton soigneusement fabriqué et relativement peu obstrué (autour de 20 %) peut être un redoutable outil pour l'amateur souhaitant se spécialiser dans la photographie planétaire. Cependant, même les Schmidt-Cassegrain ou les Maksutov-Cassegrain, ordinairement plus obstrués, ont largement démontré leur capacité à obtenir de bonnes images planétaires. Une faible obstruction n'est pas une garantie d'obtention d'images extraordinaires car elle est rarement le principal facteur limitatif des photos planétaires d'amateurs.

## La collimation

Nous avons décrit la méthode de collimation des instruments les plus courants au chapitre 4. Un dérèglement peut être considéré comme une aberration au même titre qu'un défaut de fabrication d'une pièce optique. Pour la photographie des planètes, une décollimation est particulièrement dommageable, elle est capable d'annihiler la qualité optique intrinsèque d'un instrument. Un télescope qui n'est jamais contrôlé ayant très peu de chances de se trouver réglé par le simple effet de la providence, la négligence sur ce point va rarement de pair avec l'obtention de bonnes photographies : le photographe planétaire est dans la même situation que le violoniste qui doit accorder son instrument avant de jouer, sous peine de surprises très désagréables !

La collimation est d'autant plus délicate que la turbulence atmosphérique est forte. En cas d'agitation atmosphérique importante, ne vous acharnez pas sur le réglage ; de toute façon, une telle nuit n'est pas très propice à la photographie des planètes !

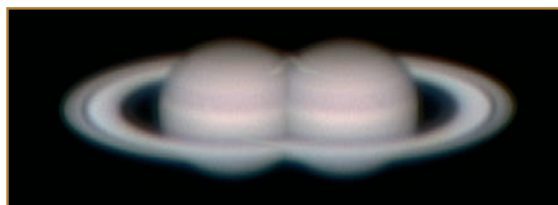
## Montures et suivi

Nous examinerons en détail les points relatifs aux différents types de montures et à leur mise en station au chapitre 7, car c'est lors des longues poses que ces points sont les plus critiques. Il nous faut cependant examiner les aptitudes à la photographie planétaire des différents types de montures : monture fixe, monture équatoriale et monture altazimutale.

### Monture fixe

Par monture fixe, nous entendons trépied photographique ou tout instrument non motorisé (par exemple un télescope en monture Dobson). À cause de la rotation de la Terre sur elle-même, le mouvement apparent des planètes est d'environ 15" par seconde de temps, soit presque le diamètre du globe de la planète Saturne ! Ce mouvement rapide impose deux contraintes qui rendent délicate la photographie planétaire avec monture fixe.

1. Le temps de pose doit être suffisamment court pour que le bougé de la planète durant la pose n'occasionne pas de perte sensible de résolution. Par exemple, pour un temps de pose de 1/10 s, le bougé est de 1,5", ce qui représente déjà le double de la largeur de la division de Cassini dans les anneaux de Saturne.
2. L'instrument doit être sans cesse recentré sur la planète car celle-ci sort très rapidement du champ de l'appareil. Par exemple, avec un instrument de 3 m de focale, une planète traverse le capteur d'une webcam en moins de 20 s. Pour un APN reflex sur le même instrument, ce temps est d'environ 2 minutes.



*Le mouvement apparent de Saturne dû à la rotation de la Terre, sur un intervalle d'une seconde seulement.*

En pratique, seule la photographie avec un APN et une focale pas trop longue peut être tentée, tout en restant conscient que la tâche sera malaisée et qu'il sera pratiquement impossible d'obtenir des résultats photographiques à la hauteur de ce que l'instrument offre en visuel.

### Monture équatoriale motorisée

La monture équatoriale motorisée, dont nous parlerons plus en détail au chapitre 7, est une solution mécaniquement simple et efficace pour le suivi photographique des astres. La photographie planétaire ne réclame pas un alignement polaire aussi précis que la photographie du ciel profond ; compte tenu des poses courtes, une légère dérive de la planète est sans conséquence. Pour les planètes, une motorisation en ascension droite suffit, la motorisation en déclinaison est un confort pour le centrage de la planète mais n'est pas absolument indispensable.

### Monture altazimutale motorisée

Une monture altazimutale est une monture dont les axes de rotation sont vertical pour l'un (altitude) et horizontal pour l'autre (azimut). Si elle est informatisée, elle sait, par pointage d'une ou plusieurs étoiles, se situer dans l'espace et actionner ses deux moteurs à la vitesse adéquate.

Un suivi effectué en mode altazimutal est tout à fait satisfaisant pour l'observation visuelle où l'on demande simplement que l'objet reste visible dans le champ de l'oculaire. Mais en photographie se manifeste l'inconvénient principal de ce système, la rotation de champ : l'objet semble tourner sur lui-même au fil de la nuit. Si l'on utilise un APN et que l'on ne prend qu'une seule photographie de la planète, tout va bien. Mais si l'on doit, comme c'est la règle avec une webcam, composer de nombreuses images, il faut que la rotation de champ n'ait pas eu le temps de se manifester de manière sensible entre la première et la dernière image de la série. En effet, s'il est facile de recentrer entre elles des images planétaires qui n'ont subi que des décalages horizontaux et verticaux, il est quasiment impossible de le faire lorsqu'elles ont de surcroît tourné les unes par rapport aux autres. Avec une webcam, il faudra donc limiter la durée des séquences de prise de vue et s'assurer que la rotation de champ entre la première et la dernière image sélectionnées dans la séquence n'occasionne pas de dégradation de la netteté de l'image. La rotation de champ varie selon la position de la planète dans le ciel (voir encadré page suivante) et, malheureusement, tous les facteurs se conjuguent pour compliquer la photographie planétaire puisque la rotation de champ :

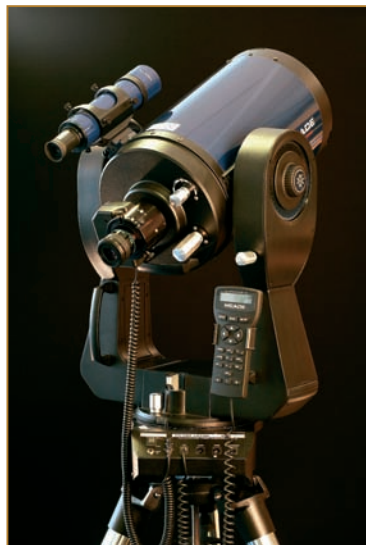


*Une monture altazimutale non motorisable peut convenir pour la photographie de quartiers de Lune mais n'est pas idéale pour celle des planètes.*



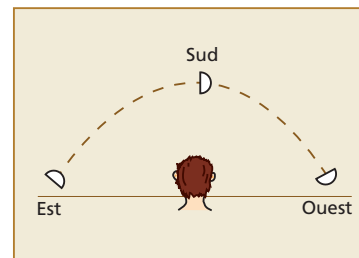
*Une monture équatoriale motorisable. En l'absence de moteur, à cause des vibrations et des irrégularités produites, les mouvements manuels peuvent seulement être employés pour recentrer la planète et non pour assurer son suivi continu.*





Les instruments tels que les Nexstar de Celestron ou les Autostar et LX de Meade (ci-dessus) sont équipés d'une monture altazimutale motorisée.

- augmente à mesure qu'on s'approche du zénith ;
- est maximale lorsque la planète culmine au méridien ;
- est nulle lorsque la planète est située exactement dans la direction de l'est ou de l'ouest, ce qui est de peu d'utilité pour les habitants des régions tempérées car à ce moment la planète est toujours très près de l'horizon.



Si l'on considère l'être humain comme un système altazimutal, le phénomène de rotation de champ est facile à appréhender en regardant successivement la Lune à son lever, à son passage au méridien et à son coucher.

### La rotation de champ en altazimutal

L'ampleur de la rotation de champ dépend de plusieurs paramètres, et en particulier de la position de l'objet dans le ciel du lieu d'observation : sa hauteur  $H$  au-dessus de l'horizon et son azimut  $A$  (compté à partir du nord, en tournant vers l'est). La rotation de champ  $R$  (en degrés) entre deux instants séparés par la durée  $T$  (en minutes) vaut :

$$R = 1/4 T \frac{\cos L \cos A}{\cos H}$$

où  $L$  est la latitude du lieu d'observation. Par exemple, si Jupiter passe au méridien ( $A = 180^\circ$ ) à une hauteur de  $50^\circ$  vue depuis un lieu de  $45^\circ$  de latitude, la rotation du globe pendant une minute à ce moment vaut  $-0,28^\circ$  (une valeur négative signifie que la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre). À une distance  $d$  (en secondes d'arc ou en pixels) du centre de la planète, le bougé  $B$  vaut (dans la même unité que  $d$ ) :

$$B = \pi \frac{dR}{180}$$

Par exemple, une rotation de  $0,28^\circ$  en périphérie du disque de Jupiter, dont le rayon mesure environ  $23''$ , cause un bougé de  $0,11''$ . Ce bougé est à comparer à l'échantillonnage choisi, il faut qu'il lui soit inférieur.

La combinaison des deux formules précédentes donne le temps maximal  $T$  (en minutes) en fonction du bougé maximal admissible :

$$T = 230 \frac{B \cos H}{d \cos L \cos A}$$

## L'atmosphère

Demandez aux astrophotographes planétaires quel est leur pire ennemi. Ils vous répondront sans hésiter : la turbulence atmosphérique. L'atmosphère terrestre est en constante agitation et le brassage de masses d'air à différentes températures provoque des déviations sans cesse variables des rayons lumineux. Sur une étoile vue à l'œil nu, cette perturbation se manifeste par sa scintillation. Au télescope, à fort grossissement, cette étoile est altérée de différentes manières :

- elle est agitée de tremblements erratiques et rapides ;
- sa figure d'Airy devient floue, déformée et étalée, elle n'est plus reconnaissable ou seulement de manière fugitive.

Dans la pratique, selon les circonstances du moment, l'un ou l'autre de ces effets pourra être prépondérant et les distorsions pourront être plutôt lentes ou plutôt rapides. À conditions atmosphériques égales, l'effet est perçu différemment en fonction du diamètre de l'instrument. Plaçons-nous dans un site courant d'amateur, non sélectionné pour ses qualités de stabilité atmosphérique. Dans un instrument de diamètre inférieur à 100 mm, la figure d'Airy est fréquemment visible, même si elle est plus ou moins agitée. En revanche, dans un instrument de 300 mm ou plus, observer une belle figure d'Airy stable est un rare privilège dont vous ne pourrez bénéficier que quelques nuits par an : souvent, la figure d'Airy sera étalée, agitée de soubresauts voire méconnaissable. À cause de la turbulence, le rendement de l'instrument, c'est-à-dire le rapport entre ses perfor-

mances réelles et ses performances théoriques, diminue à mesure que son diamètre augmente (voir encadré). C'est la raison pour laquelle on a coutume de dire qu'un diamètre de 200 mm à 250 mm est un bon compromis pour le planétaire car il offre un rendement intéressant sur un pourcentage de nuits encore acceptable.

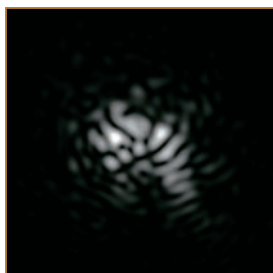
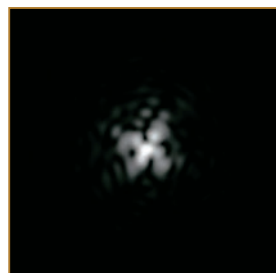
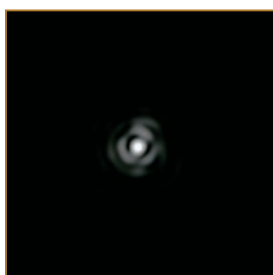
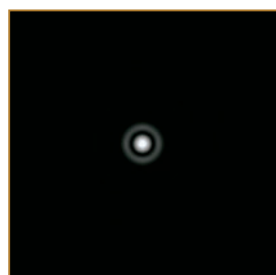
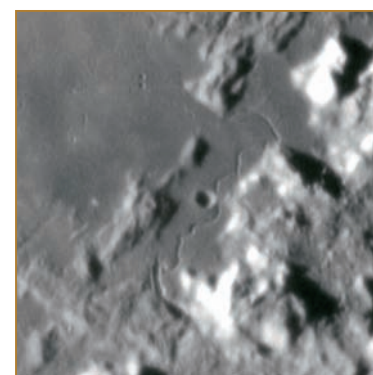
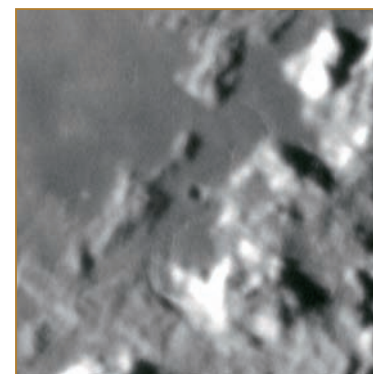


Figure d'Airy vue par turbulence croissante. Au-delà de la deuxième figure, la collimation devient plus délicate et les performances de l'instrument sont fortement dégradées.



Ces deux portions d'images centrées sur Rima Hadley, extraites de la même séquence vidéo, illustrent les variations erratiques de turbulence pouvant survenir en l'espace d'une fraction de seconde.



La turbulence atmosphérique est un phénomène fantasque et largement imprévisible. Des variations très sensibles peuvent se produire en quelques instants. Une nuit peut commencer médiocre et finir fructueuse, ou l'inverse. Les nuits d'hiver claires, froides et sèches ne sont pas forcément propices à une bonne stabilité d'image : transparence rime parfois avec turbulence ! Les veteux ciels de traîne ne sont pas propices non plus. À l'inverse, les nuits sans vent, humides et brumeuses, chez moi plus fréquentes en automne, sont parfois étonnamment stables. Je me souviens d'une nuit magique d'avril 1995 où Mars était figée dans l'oculaire de mon 250 mm : nous étions enveloppés dans une fine couche de brouillard et le télescope ruisselait d'humidité. Autre idée reçue : les sites d'altitude seraient systématiquement favorisés. Là encore, ne confondons pas transparence et turbulence. Si l'observatoire du Pic-du-Midi offre régulièrement de très bonnes conditions, c'est surtout grâce à sa topologie particulière : il s'agit d'un pic isolé, plus haut que les sommets environnants, sur lequel l'air arrive régulièrement en écoulement laminaire. La situation est la même sur le plateau chilien du VLT lorsque le vent vient du Pacifique ou sur certaines îles volcaniques telles que Hawaï ou Les Canaries. Les régions à relief tourmenté et a fortiori les flancs de montagne ou les fonds de vallée peuvent se révéler extrêmement médiocres sur le plan de la turbulence, inférieurs à certains sites situés en bord de mer. C'est ainsi que d'excellentes images ont pu être obtenues dans des sites côtiers, par exemple à La Hague (pointe du Cotentin), au Texas (Houston), en Floride ou à Tahiti. Réservez les nuits les plus turbulentes à la photographie du ciel profond... ou aux essais de matériel : si vous ne vous êtes pas familiarisé avec son maniement avant le jour magique où la turbulence est nulle, vous risquez de ne pas en profiter comme vous l'espérez.

### Diaphragmer son télescope en cas de turbulence ?

*Certains amateurs conseillent de diminuer l'ouverture du télescope, en plaçant un diaphragme à l'avant, pour obtenir de meilleures images lorsque la turbulence est importante. Lorsqu'un diaphragme permet effectivement d'améliorer la qualité de l'image, c'est que l'instrument souffre d'un défaut tel qu'une qualité optique défectueuse ou un dérèglement. Dans le cas contraire, la pleine ouverture ne peut donner une image inférieure à celle de l'ouverture réduite même si, en présence d'une forte turbulence, la différence entre les deux est imperceptible. Cependant, la pleine ouverture conserve l'avantage car elle reprend le dessus dans les trous de turbulence fugitifs. De plus, elle collecte plus de lumière et permet, à focale égale, des temps de pose plus courts.*

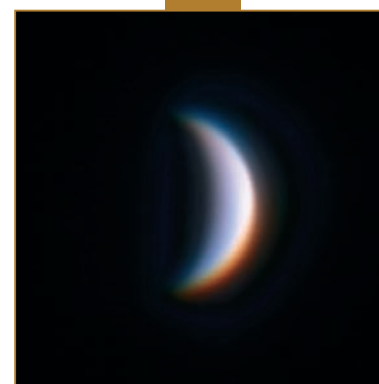
Les effets de la turbulence varient selon la position de la planète au-dessus de l'horizon. Plus elle en est proche, plus l'épaisseur de la couche d'air perturbée à traverser est grande, et plus l'image est dégradée. Ainsi, par rapport au zénith, la longueur du trajet à travers l'atmosphère est doublée pour une hauteur de 30° au-dessus de l'horizon, elle est quadruplée pour une hauteur de 15°. C'est la raison pour laquelle les heures entourant la culmination des planètes (passage au méridien) sont privilégiées par les astrophotographes planétaires. Pour une planète de déclinaison  $\delta$ , la hauteur au passage au méridien d'un lieu de latitude  $L$  vaut  $(90^\circ - L + \delta)$ . Une déclinaison positive est donc favorable aux observateurs de l'hémisphère nord puisque la planète grimpe plus haut dans le ciel et reste plus longtemps à hauteur convenable.

### La dispersion atmosphérique

*Une faible hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon a une autre conséquence néfaste que la turbulence, cette fois due à la dispersion atmosphérique. L'atmosphère agit un peu à la manière d'un prisme, elle dévie les rayons lumineux dans le sens vertical. Cet effet, baptisé réfraction atmosphérique, varie malheureusement selon la longueur d'onde : les rayons bleus sont plus fortement déviés que les rouges. Cela se traduit, sur une planète ou une étoile proche de l'horizon, par un*

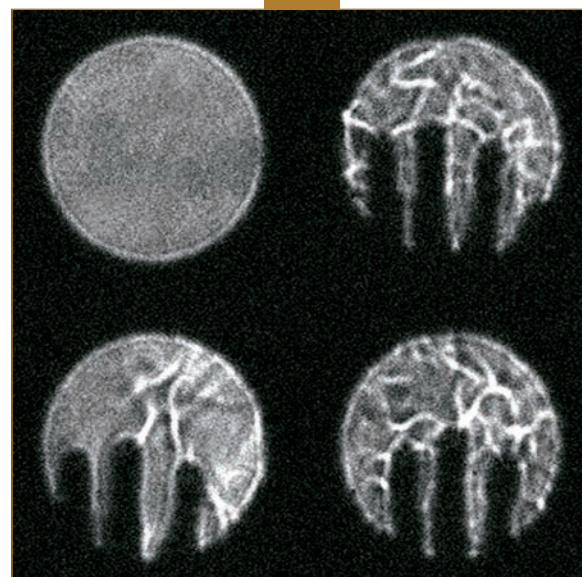
*liseré bleuâtre sur la partie supérieure de l'image (vers le zénith) et un liseré rougeâtre sur la partie inférieure (vers l'horizon). L'écart entre les rayons bleus et rouges atteint 1/2'' à 50° au-dessus de l'horizon, 1'' à 30°, 2'' à 15° et 3'' à 10°. Lorsque les images d'une planète basse sur l'horizon ont été réalisées avec un capteur couleur et montrent un décalage, il est toujours possible de décaler les couches rouge, verte et bleue au traitement pour les ramener en coïncidence.*

La turbulence atmosphérique prend son origine dans la circulation des masses d'air à plus ou moins haute altitude. Mais il existe d'autres causes de turbulence, en particulier certains phénomènes locaux. Par exemple, votre ligne de visée ne doit pas passer au-dessus d'une cheminée ou d'une automobile dont le moteur est encore chaud. Il faut également empêcher des personnes de se placer devant votre instrument. Évitez à tout prix d'observer l'hiver à travers une fenêtre ouverte, les échanges d'air détruiraient une bonne partie de la netteté de l'image (quant à observer à travers une fenêtre fermée, n'y pensez même pas : une vitre ordinaire n'a pas les qualités de polissage requises pour l'optique astronomique, elle est bien pire que le plus médiocre instrument astronomique que vous pourriez trouver !). Quant aux coupoles astronomiques hémisphériques, malgré leur esthétique indéniable, ce ne sont pas toujours des solutions idéales sur le plan thermique car la chaleur emmagasinée durant la journée ou celle dégagée par les astronomes et leurs ordinateurs s'échappe par la trappe. Un abri s'ouvrant largement, tel qu'un abri à toit roulant, est préférable.



*Vénus était très basse sur l'horizon lorsque cette image a été réalisée à l'aide d'une webcam couleur sur une lunette. La dispersion atmosphérique décale les couleurs selon la verticale du lieu d'observation : suivant les orientations du capteur et de l'instrument par rapport à l'horizon, ce décalage peut prendre sur l'image des orientations diverses.*

Troisième cause de turbulence : l'instrument lui-même. Lorsque celui-ci n'est pas en équilibre thermique avec son environnement, des mouvements de masses d'air à différentes températures se produisent et dégradent la netteté des images ; une différence de 1°C à 2°C suffit à provoquer un effet perceptible ! En outre, lorsque les miroirs ne sont pas en équilibre thermique, ils se déforment et donnent naissance à des aberrations optiques. De ce point de vue, les lunettes sont légèrement favorisées car les déformations des lentilles dégradent moins les images que les déformations des miroirs, de plus le faisceau lumineux ne traverse l'air enfermé dans leur tube qu'une seule fois, contre deux ou trois fois pour les télescopes. L'expérience montre que laisser l'instrument une heure à l'extérieur avant de l'utiliser est souvent très bénéfique. L'hiver, lorsqu'il sort d'un logement chauffé, deux heures ne sont pas superflues. En revanche, un instrument laissé dans un véhicule au Soleil ne parviendra peut-être pas à atteindre l'équilibre thermique, même au bout de plusieurs heures.



*Le corps humain est un redoutable radiateur, comme en témoignent les veines d'air chaud issues de la chaleur dégagée par une main placée devant l'ouverture de l'instrument.*

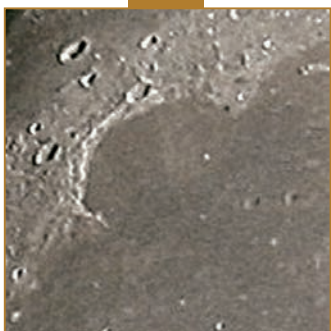


## Appareils et réglages

Il est possible de prendre des images des planètes avec n'importe quel type d'appareil, notamment avec un APN. Le nombre de photosites n'est pas un critère de choix : la plus grande des planètes, Jupiter, peut se contenter de moins d'un demi-million de photosites. Un grand nombre de photosites ne sert donc strictement à rien, sauf à noyer la planète dans une grande image presque toute noire. La balance des blancs doit être réglée sur « lumière du jour » : laisser la

balance des blancs en « automatique » vous conduirait à des couleurs imprévisibles, l'appareil étant généralement incapable de trouver une référence de blanc correcte dans l'image. Mais, en mode RAW, ce réglage n'a pas d'influence directe sur l'image lors de son enregistrement. L'appareil placé en mode d'exposition manuel (en astronomie, méfiez-vous toujours des automatismes !), le temps de pose doit être ajusté pour obtenir une image suffisamment lumineuse sans pour autant présenter de zone surexposée. Sur les objets brillants tels que les planètes, le Soleil et la Lune, il est préférable, si les conditions le permettent, de placer l'appareil sur le réglage de la sensibilité la plus basse. Cela permet d'utiliser un temps de pose plus long et ainsi d'améliorer le rapport signal sur bruit (voir chapitre 3).

*Nous avons vu au chapitre 3 qu'en planétaire le bruit dominant était généralement le bruit de photons. Ainsi que les montrent ces portions d'images lunaires prises avec un APN respectivement à 100 ISO (1/250 s) et 800 ISO (1/2 000 s) et traitées par masque flou, c'est l'image prise au réglage de sensibilité le plus bas qui présente le meilleur rapport signal sur bruit, car elle a recueilli huit fois plus de photons.*



Un APN à objectif non interchangeable peut être utilisé à condition de l'adapter en montage afocal, c'est-à-dire que l'avant de son objectif est positionné juste derrière un oculaire, comme le serait votre œil (voir chapitre 4). L'image sera plus ou moins agrandie selon les focales respectives de cet oculaire et du zoom de l'appareil.

Les APN reflex sont plus pratiques à adapter sur un instrument astronomique, que ce soit au foyer ou derrière un système grandissant (lentille de Barlow ou oculaire de projection) mais, pour la photographie des planètes et de la Lune, ils présentent un inconvénient redouté des astrophotographes depuis des décennies : le mouvement du miroir reflex de visée (et, dans une moindre mesure, de l'obturateur à rideaux) provoque des vibrations qui, compte tenu des très longues focales utilisées, peuvent rendre les images floues, même sur un télescope massif. Sur certains modèles de reflex, une fonction de relevage préalable du miroir est prévue pour les longs téléobjectifs : n'hésitez pas à utiliser cette fonction avec un instrument astronomique pour minimiser les vibrations de l'appareil à la prise de vue. En cas de vibration avérée, la solution de l'occultation manuelle peut être envisagée : un cache est tenu à la main devant l'instrument, l'appareil est mis en pose pendant quelques secondes et, lorsque les vibrations sont amorties, l'obturation est effectuée manuellement en retirant le cache pendant le temps voulu. L'inconvénient principal de cette méthode est que le temps de pose ne peut pas descendre en dessous de 1/2 s, ce qui peut obliger à interposer un filtre pour diminuer la luminosité et ce qui laisse à la turbulence le loisir de brouiller l'image. En effet, il faut que toute l'ouverture de l'instrument soit dégagée pendant que la lumière y pénètre, ce qui n'est pas possible si le mouvement du cache est très rapide.

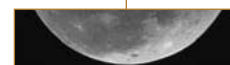
Mais ce sont les webcams, et plus généralement tout appareil permettant la prise de séquences vidéo, qui présentent, et de très loin, les meilleures performances lorsqu'il s'agit d'obtenir les images les plus détaillées possible des planètes ou de la Lune. Pourtant, ces petits appareils peu coûteux ne partent pas gagnants, ils semblent a priori moins performants que les APN et les caméras CCD dont les images sont moins bruitées. Et, de fait, en l'absence d'atmosphère, ce sont ces derniers qui seraient probablement les plus efficaces. Mais l'ennemi principal du photographe planétaire, la turbulence, change complètement la donne. Les études scientifiques de ce phénomène complexe ont depuis longtemps montré qu'en présence de turbulence atmosphérique, la qualité de l'image donnée par un instrument varie de manière extrêmement rapide et peut s'améliorer pendant de très brefs instants. La manière la plus efficace de profiter de ces instants fugitifs et imprévisibles est de prendre des images en continu, c'est précisément ce que fait tout système vidéo. À la cadence lente de prise de vue des APN et des caméras CCD, la probabilité de tomber dans un trou de turbulence, qui ne dure souvent qu'une fraction de seconde, est bien plus faible. De plus, une webcam ne comporte aucun obturateur mobile, source de vibrations. Bien sûr, plus la turbulence est forte et plus le taux de bonnes images est faible. En outre, lorsque les images sont déformées, il sera difficile de les composer car elles ne coïncideront pas bien sur toute leur étendue. Autrement dit, si la vidéo ne permet pas d'annuler la turbulence, elle permet de tirer le meilleur parti des conditions du moment. Si la turbulence est telle que les images sont floues en permanence, même la vidéo ne pourra plus rien pour vous !

Revers de la médaille, à cause du bruit élevé et de la compression des images vidéo issues d'une webcam, il est presque impossible de se contenter d'une seule image. Pour obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant, autorisant l'application de traitement d'amplification des détails (voir plus loin), il nous faudra composer des dizaines, voire des centaines d'images. Heureusement, à une cadence de prise de vue de 5 ou 10 images par seconde, des centaines d'images peuvent être obtenues en peu de temps. En outre, l'expérience a montré de grandes disparités de qualité d'image entre différents modèles de webcams ou de caméras vidéo, même entre des modèles en apparence proches (par exemple, certaines marques proposent deux modèles de webcams ne différant que par leur capteur, CCD ou CMOS, et difficilement différenciables à l'achat autrement que par leur référence de fabrication). Je vous conseille donc de prendre conseil auprès d'autres amateurs déjà équipés avant tout achat.

Pour les planètes, le faible nombre de photosites du capteur d'une webcam n'est absolument pas un handicap. En effet, même à une focale de 10 m (ce qui est déjà beaucoup), Jupiter, la planète qui présente le plus grand diamètre apparent, tient en entier sur le capteur.

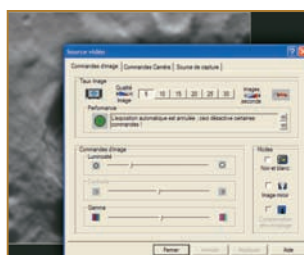
L'objectif de la webcam doit être retiré et celle-ci placée derrière un système grandissant, tel que décrit au chapitre 4, afin de parvenir à un échantillonnage satisfaisant (voir plus loin). Les acquisitions de vidéos webcam peuvent se faire à l'aide du programme de contrôle fourni avec la webcam, ou mieux, à l'aide de logiciels astronomiques tels qu'Iris, Prism, Astrosnap ou Registax. Comme pour un APN, le pilote d'une webcam comporte plusieurs paramètres de réglage. Voici les plus courants :

- taille d'image : choisir la plus haute sans interpolation, c'est-à-dire 640 x 480 pour les webcams existant actuellement (2005) ;
- exposition : passer en manuel, faute de quoi la planète risque d'être complètement surexposée ;
- vitesse d'exposition (en mode d'exposition manuel) : équivalent au réglage du même nom sur un APN ;
- gain (en mode d'exposition manuel) : équivalent au réglage de sensibilité sur un APN, amplifie le signal mais également le bruit ;

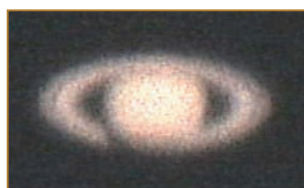


cependant, des amateurs ont noté qu'en gain très faible, des artefacts (isophotes) pouvaient apparaître sur l'image finale traitée ;

- **taux (nombre d'images par seconde) :** une valeur élevée permet d'acquérir plus d'images en un temps donné mais, en débit USB1, la plus forte compression des données peut en dégrader la qualité et il est conseillé de s'en tenir à 5 à 15 images par seconde ;
- **luminosité et contraste :** équivalents aux traitements d'image du même nom dans les logiciels de retouche ; les régler pour obtenir un fond d'image gris très foncé mais pas complètement noir et une planète bien contrastée, assez brillante mais sans saturation ;
- **mode noir et blanc :** lorsqu'il est activé, ce mode moyenne les couches rouge, verte et bleue et n'est donc à utiliser que lorsque la couleur n'est pas utile (Lune ou Soleil) et seulement si la qualité de l'image donnée par l'instrument n'est pas inférieure dans une des couleurs par rapport aux autres ; dans le cas contraire, il est toujours possible de rester en mode couleur et de sélectionner la couche verte au traitement.



*Les logiciels astronomiques tels que AstroSnap ou Iris prennent en charge le pilotage des webcams les plus courantes et permettent d'effectuer tous les réglages par l'intermédiaire de leur panneau de commande.*



*Les réglages de la webcam doivent être soigneusement ajustés afin de profiter au mieux des 8 bits et de ne pas perdre d'information.*



*En haut, la planète est surexposée (ce qui peut se produire lorsque le réglage d'exposition est laissé sur « automatique »). En dessous, elle est sous-exposée.*



*En dessous encore, les hautes lumières sont correctement exposées mais pas les basses lumières, ce qui se traduit par la perte du limbe de la planète.*

*En bas, les réglages sont corrects. Notez le bruit caractéristique d'une image issue d'une vidéo webcam.*

Le principe est similaire pour les petites caméras vidéo analogiques connectées à un boîtier d'acquisition vidéo. De même, il est tout à fait possible d'utiliser un caméscope numérique en lieu et place d'une webcam. L'idéal est que son objectif soit amovible, mais cette caractéristique est réservée aux modèles les plus coûteux. Dans le cas

contraire, on réalisera un montage afocal, comme pour un APN à objectif non amovible.

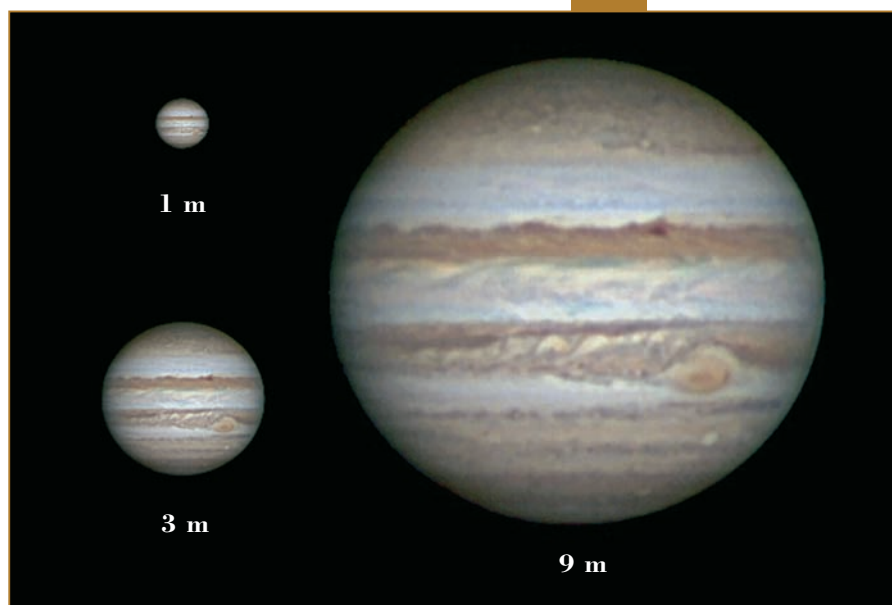
Le volume de disque dur occupé par une vidéo webcam est conséquent : plusieurs centaines de mégaoctets par minute, une soirée d'acquisition se chiffre souvent en gigaoctets ! Un disque dur externe de grande capacité est souvent bien utile.

## Focale et échantillonnage

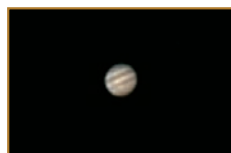
Les planètes sont des objets célestes dont la taille angulaire est relativement petite puisque aucune d'entre elles ne montre un diamètre apparent dépassant la minute d'arc. Si l'on place une webcam au foyer d'un instrument de 500 mm de focale, la planète Jupiter n'y occupera qu'une vingtaine de pixels, ce qui est peu pour capter des détails : l'image est dite « sous-échantillonnée ». Le photographe planétaire sera donc amené à augmenter la focale de son instrument à l'aide des dispositifs vus au chapitre 4, lentille de Barlow ou oculaire utilisé en projection. L'expérience montre que si l'on augmente graduellement la focale de l'instrument, vient un moment où ce n'est plus la taille des pixels qui limite la finesse de l'image, c'est la diffraction instrumentale. Au-delà de cette limite, l'allongement de la focale ne sert plus à rien car on n'agrandit plus que du flou ; il se révèle même néfaste car cela assombrit l'image et induit une augmentation de temps de pose. L'image est alors qualifiée de sur-échantillonnée.

Le pouvoir séparateur, dont nous avons donné la définition dans l'encadré en début de chapitre, va nous aider à déterminer l'échantillonnage adéquat (rappelons que l'échantillonnage représente le champ sur le ciel vu par un pixel ; la formule de calcul de l'échantillonnage se trouve au chapitre 4). La théorie et la pratique montrent qu'une valeur approximativement égale à la moitié du pouvoir séparateur permet d'enregistrer une bonne quantité d'informations. Par exemple, pour un télescope de 200 mm de diamètre, de pouvoir séparateur stellaire 0,6", le calcul donne un échantillonnage d'environ 0,3" par pixel. Pour une webcam dont les pixels font 5,6  $\mu\text{m}$ , la focale correspondante est d'environ 4000 mm, soit un rapport F/D de 20. Il est possible de monter un peu plus haut (F/D 25 à 30) mais cela ne sera rentable que si des conditions propices sont réunies : instrument de bonne qualité, correctement réglé et en bon équilibre thermique, mise au point réalisée avec soin, turbulence faible, etc.

*Taille relative de Jupiter sur le capteur VGA Sony ICX-098AL de la PhilipsToUcam Pro à différentes focales. Ces photos ont été obtenues avec un télescope de 305 mm et une webcam, et traitées par compositage et masque flou.*







Ces trois images de Jupiter ont été réalisées à l'aide d'une webcam sur une lunette de 106 mm de diamètre, respectivement à F/D 5, 13 et 26. À F/D 5, la quantité de détails est limitée par l'échantillonnage, alors qu'à F/D 26 ce sont les facteurs tels que l'allongement du temps de pose, la turbulence, la diffraction instrumentale, la mise au point voire la qualité optique ou la collimation qui deviennent prépondérants.



Ces portions fortement agrandies de photographies lunaires brutes, prises avec le même instrument, attestent du fait qu'un capteur monochrome (à gauche) peut offrir une meilleure finesse d'image qu'un capteur couleur (à droite), malgré un échantillonnage un peu plus grand (photosites de  $9\mu\text{m}$  pour la caméra CCD contre  $8\mu\text{m}$  pour l'APN). De surcroît, il a nécessité ici un temps de pose plus court (1/500 s contre 1/125 s).

## La prise de vue

Ce soir le ciel est dégagé et une planète n'attend plus que vous la photographiez. Votre instrument prend le frais à l'extérieur, balcon ou jardin, depuis au moins une heure. Une séance d'acquisition se déroule typiquement selon la séquence suivante :

- installation et alignement polaire approximatif (chapitre 7) de l'instrument ;
- contrôle et affinage de la collimation (chapitre 4), surtout s'il s'agit d'un télescope transportable et en particulier pour les télescopes de type Schmidt-Cassegrain et Newton ;

- réalisation des images de prétraitement (chapitre 3). Compte tenu des temps de pose courts, un noir n'est pas nécessaire. Le vignettage étant imperceptible compte tenu du petit champ visé et de la présence de systèmes grandissants, la PLU est essentiellement destinée à éliminer les ombres des poussières. Une PLU se réalise selon l'une des techniques décrites au chapitre 3, complétée par une image d'offset si nécessaire. Si votre capteur est suffisamment propre, ou si vous avez pris soin de placer la planète dans une partie de l'image exempte de poussières, vous pouvez décider de vous passer de PLU et de prétraitement. Mais, dans ce cas, subsiste la différence de sensibilité entre photosites ; même s'il ne s'agit pas d'un bruit en tant que tel, elle pourra avoir pour conséquence de faire paraître les images un peu plus bruitées qu'elles ne le sont, ce qui obligera finalement à composer un peu plus d'images.

### Une aide au centrage : le flip-mirror

De nombreux photographes planétaires utilisent, en complément de leur webcam, un dispositif nommé flip-mirror (ou miroir basculant), directement inspiré du mécanisme de visée du reflex : pour la visée et le centrage, un miroir renvoie l'image vers un oculaire situé sur la partie supérieure du flip-mirror. Pour la prise de vue, le miroir bascule (vers le haut ou vers le bas selon le modèle) et laisse le faisceau lumineux atteindre l'appareil situé à l'arrière. Le flip-mirror doit être placé juste devant la webcam, après la Barlow ou l'oculaire de projection. Bien sûr, il rallonge le tirage et ce supplément doit être pris en compte pour le calcul du grandissement (voir chapitre 4). Il permet de centrer la planète sans avoir à retirer la webcam. Le flip-mirror peut également être utilisé pour dégrossir la mise au point, à partir du moment où l'oculaire est placé dans une position telle que le faisceau lumineux parcourt à peu près la même distance lorsqu'il atteint le diaphragme de champ de l'oculaire que lorsqu'il atteint le capteur de la webcam.

- installation de l'appareil numérique ou de la webcam derrière un système grandissant (Barlow ou oculaire) destiné à fournir un échantillonnage approprié ;
- centrage de la planète sur le capteur grâce à l'image vue à l'écran de l'ordinateur (webcam), dans le viseur (reflex) ou à l'aide d'un flip-mirror (voir encadré) ;
- mise au point (chapitre 4) sur la planète elle-même ou sur une étoile et réglage des paramètres de l'appareil ;
- prise des images ou des séquences vidéo, en n'oubliant pas de vérifier et de retoucher la mise au point de temps à autre ;



À droite, le miroir du flip-mirror est positionné à  $45^\circ$  et dirige la lumière vers l'oculaire. À gauche, il s'efface pour laisser la lumière atteindre l'appareil.



# Le traitement des images

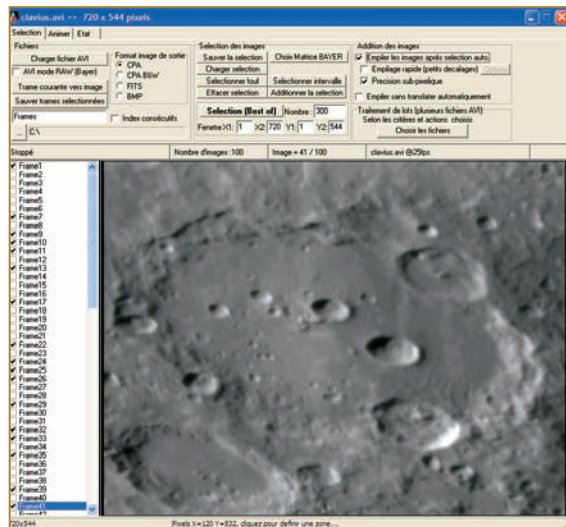
Une fois les acquisitions réalisées, le traitement des images planétaires se déroule toujours selon la séquence qui suit. Les traitements décrits peuvent être pris en charge par l'un ou l'autre des logiciels astronomiques cités.

## L'orientation des images planétaires

*Dans l'espace, il n'y a ni haut ni bas. Vous êtes donc libre d'orienter vos images planétaires comme bon vous semble, nord en haut ou nord en bas. Évitez tout de même les effets miroir, qui se produisent par exemple si votre webcam est placée derrière un renvoi coudé, car il n'y aurait plus de correspondance avec la réalité physique de l'objet : par exemple, sur Jupiter, un cyclone se mettrait à ressembler à un anticyclone. Cependant, des conventions existent. L'usage scientifique veut que les planètes soient représentées avec le sud en haut de l'image (si cette convention vous paraît curieuse, pensez à un astronome habitant l'hémisphère sud : lui la trouvera tout à fait logique). Si vous n'avez pas une bonne raison de faire l'inverse, suivez cette convention. Les planétologues amateurs ou professionnels qui examineront peut-être votre image vous en seront reconnaissants.*

## Sélection des meilleures images

Parmi les nombreux logiciels de traitement astronomique capables d'ouvrir et de visualiser un fichier vidéo AVI, on peut citer Iris, Prism, Astroart, Registax et Astrosnap, ces derniers étant plus particulièrement conçus pour le traitement d'image webcam.



La fenêtre de traitement vidéo de Prism rassemble les fonctions essentielles : sélection automatique ou manuelle des meilleures images, recentrage et compositage des images sélectionnées.

Lorsqu'une caméra vidéo analogique ou un caméscope numérique a été utilisé, le fichier vidéo obtenu doit être converti au préalable en AVI afin d'être digéré par les logiciels de traitement astronomique. De nombreux utilitaires et freeware disponibles sur Internet permettent de convertir en AVI des vidéos en format MPEG ou DV.

Une fois le fichier AVI ouvert, on peut faire la sélection des meilleures images et leur sauvegarde en tant qu'images individuelles en format FITS. Tous les logiciels cités plus haut offrent la possibilité de cocher chaque image pour la sélectionner, puis ils sauvegardent l'ensemble des images en leur donnant un nom composé d'un préfixe au choix de l'utilisateur auquel s'ajoute le numéro d'ordre de l'image (par exemple jup1, jup2, jup3, etc.). Mais les logiciels cités ci-dessus sont capables de trier les images par ordre de qualité. Ce tri automatique, basé sur des critères de finesse d'image, fournit généralement des résultats tout à fait satisfaisants.

À ce stade, l'astrophotographe va inmanquablement se demander combien d'images il doit sélectionner pour compositage. Ainsi que nous l'avons vu au chapitre 3, le compositage d'images a pour objectif d'améliorer le rapport signal/bruit, ce qui est indispensable pour des images issues d'une webcam. Tout dépend donc du rapport signal/bruit des images brutes (qui, lui-même, dépend d'une foule de paramètres : rapport F/D, réglages, luminosité de l'objet photographié, etc.) et de la force des traitements après compositage. Dans certains cas, 50 images pourront suffire, alors que dans d'autres situations, 500 images ne seront pas superflues. Seule l'expérience permet d'évaluer a priori le nombre d'images approximatif à sélectionner en fonction des conditions du moment, le verdict étant bien sûr fourni par le résultat : si l'image finale est bruitée, c'est que trop peu d'images ont été composées... ou que le traitement appliqué après compositage est trop fort !

Pour les images issues d'un APN, vous pouvez sélectionner une ou plusieurs images en visualisant et en comparant les images brutes les unes aux autres.

Une autre question fréquente est : pour les planètes Mars, Jupiter et Saturne, quel est le laps de temps maximal entre la première et la dernière image sélectionnées, au-delà duquel la rotation de la planète sur elle-même va commencer à se faire sentir ? Naturellement, plus les conditions instrumentales et atmosphériques permettent d'enregistrer de détails, plus la durée doit être courte. Pour une planète de diamètre apparent  $D$  (en secondes d'arc) et de période de rotation  $T$  (en minutes), le bougé  $B$  (en secondes d'arc) au centre du disque pendant la durée  $\Delta$  (en minutes) vaut :

$$B = \pi \frac{D \Delta}{T}$$

Jupiter est la planète la plus contraignante de ce point de vue et la limite de temps peut descendre sous la minute pour des images extrêmement détaillées prises avec des instruments de 250 mm et au-delà. Pour Mars, dont le diamètre moyen aux oppositions est de 20" et la période de rotation de 24 h 40 min, la formule ci-dessus montre que la limite de temps est 5 à 6 fois plus longue que pour Jupiter. Le cas de Saturne est un peu particulier. S'il n'y a pas de tempête saisonnière à sa surface, cette planète (ainsi que ses anneaux) présente une symétrie de révolution et les images prises sur toute une nuit peuvent être composées. Dans le cas contraire, compte tenu de son diamètre apparent (20") et de sa période de rotation (une dizaine d'heures), la limite de temps est 2,5 fois plus longue que pour Jupiter. Quant à Vénus, la rotation de son système nuageux s'effectuant en une centaine d'heures, le laps de temps disponible est bien plus long puisqu'il se chiffre en heures.

Valeurs de bougé au centre du globe pour les planètes principales, en fonction de leur diamètre apparent et de la durée.

Durée	Mars 10"	Mars 15"	Mars 20"	Mars 25"	Jupiter 45"	Saturne 20"
1 min	0,02"	0,03"	0,04"	0,05"	0,2"	0,1"
2 min	0,04"	0,06"	0,08"	0,1"	0,5"	0,2"
4 min	0,08"	0,1"	0,2"	0,2"	0,9"	0,4"
8 min	0,2"	0,2"	0,3"	0,4"	1,9"	0,8"
16 min	0,3"	0,5"	0,7"	0,8"	3,8"	1,6"
32 min	0,7"	1,0"	1,3"	1,7"	7,5"	3,3"



## Prétraitements

Si vous avez réalisé des images de prétraitement (PLU et éventuellement offset), il suffit d'indiquer au logiciel astronomique le nom de la série d'images à prétraiter (issue de la sélection que vous venez d'effectuer) et le nom des images de prétraitement. Il en résultera une nouvelle série d'images, celle des images prétraitées.

## Recentrage et compositage des images

Il n'est absolument pas nécessaire que la planète soit restée rigoureusement au même emplacement sur le capteur pendant toute la prise de vue. Heureusement du reste, car c'est impossible compte tenu de la turbulence et des inévitables imprécisions de suivi ! Il est même préférable qu'elle ait bougé un peu entre les différentes images à composer car cela permet de lisser les défauts tels que des pixels défectueux ou des ombres de poussières résiduelles, ces défauts ne se retrouvant pas au même emplacement une fois le recentrage effectué sur le disque de la planète.

Là encore, les logiciels de traitement astronomique marquent leur supériorité. Ils savent recentrer automatiquement un lot d'images planétaires (webcam ou APN) en prenant comme référence la première image de la série. Grâce à des algorithmes de corrélation d'images, ce recentrage s'effectue même à une fraction de pixel près.

Le compositage des images recentrées s'effectue ensuite par addition, médiane ou sigma-clipping (chapitre 3). Les images webcam n'étant codées que sur 8 bits, la médiane n'est pas l'algorithme le mieux adapté car la dynamique reste sur 8 bits, ce qui est insuffisant pour les traitements qui suivent. On lui préférera la somme ou le sigma-clipping, mais si le nombre d'images composées dépasse 150, il faudra s'assurer que la dynamique de l'image finale n'excède pas les 15 ou 16 bits de capacité (soit des niveaux respectivement de 32 767 ou 65 535) du logiciel de traitement.

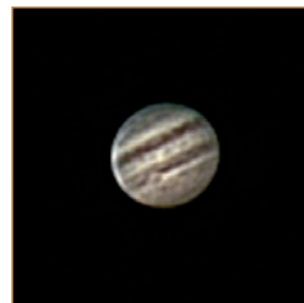
Si vous avez utilisé un APN et que vous n'avez sélectionné qu'une seule image, il n'y a évidemment aucun compositage à réaliser.

## Amplification des détails

Une fois prétraitées et composées, les images planétaires font habituellement l'objet de traitements visant à accroître la visibilité des fins détails. Les dénominations des fonctions varient selon le logiciel : accentuation, filtre passe-haut, masque flou... Les algorithmes peuvent différer mais tous ces traitements présentent plusieurs points communs :

*En haut à gauche, une image prétraitée unique, en haut à droite un compositage de 300 images sélectionnées. À ce stade, la différence n'est pas toujours flagrante, surtout si l'astre est brillant (Lune) ; elle le devient après application d'un masque flou (images inférieures) : le bruit est trop important si une seule image est utilisée et la Tache Rouge n'y est pas visible, contrairement à l'image compositée.*

- ils accroissent le contraste des fins détails (en jouant sur les hautes fréquences spatiales de l'image, d'où la dénomination générale de filtre passe-haut) ;
- ils amplifient le bruit, généralement prépondérant dans les hautes fréquences, et par conséquent dégradent le rapport signal/bruit. C'est la raison pour laquelle il est indispensable, notamment en webcam, de composer de nombreuses images ;
- ils provoquent des effets de « rebond ». C'est ainsi qu'une ombre d'un satellite de Jupiter peut s'entourer d'une auréole claire, la brillante calotte polaire martienne d'un liseré sombre. Cet effet peut affecter les anneaux de Saturne et plus généralement toute démarcation abrupte entre une zone claire et une zone sombre.



*L'effet de rebond dû à un masque flou excessif se présente sous la forme d'un liseré clair longeant le bord gauche de la planète.*

Le filtre le plus utilisé est le masque flou. Il comporte deux paramètres : le degré de flou et le facteur d'amplification.

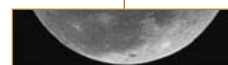
Pour savoir régler ces paramètres, il faut comprendre le principe de fonctionnement et les différentes étapes de ce traitement, même si les logiciels les prennent en charge de manière transparente pour l'utilisateur, en une seule passe :

1. l'image de départ est rendue floue à l'aide d'un filtre passe-bas ; ce filtre est une gaussienne (courbe en cloche) dont il faut choisir la largeur (sigma ou rayon selon le logiciel : c'est le premier paramètre du masque flou), ce qui détermine l'échelle des détails concernés : une petite valeur correspond aux détails les plus fins, une valeur plus grande touche également les détails un peu moins fins, et ainsi de suite ; les valeurs les plus couramment utilisées sont situées entre 1 et 2,5 ;
2. cette image floue est soustraite de l'image originale afin d'isoler les fins détails et eux seuls ;
3. le résultat de cette soustraction est multiplié par un coefficient (gain ou intensité selon le logiciel : c'est le second paramètre du masque flou) servant à ajuster la force du traitement ;
4. il est additionné avec l'image de départ.



*Le premier paramètre du masque flou est la largeur de la gaussienne (ici  $\sigma$  vaut 1 et 3) et permet de faire varier l'échelle des détails amplifiés.*





*Le second paramètre du masque flou est le coefficient multiplicateur (dans cet exemple, il vaut respectivement 3, 8 et 20). Une valeur plus élevée amplifie plus fortement les détails mais aussi le bruit et provoque l'apparition d'artefacts et de rebonds (notamment à l'emplacement où l'ombre de la planète se projette sur l'anneau).*

Même si les images brutes de webcam semblent peu bruitées, vous devinez maintenant l'intérêt du compositage : il est indispensable d'améliorer le rapport signal sur bruit avant de le dégrader par des filtres tels que le masque flou. Par exemple, un masque flou de coefficient 5 (ou 500 %) amplifie le bruit d'un facteur 5 environ : il faudra composer au moins 25 images pour compenser cette dégradation. Certains logiciels dotent le masque flou d'un troisième paramètre (Seuil dans Photoshop, Écrêtage dans Paint Shop Pro) permettant d'indiquer au logiciel de ne pas appliquer le traitement sur les zones de l'image présentant des variations d'intensité très faibles (inférieures au seuil), en partant du principe que ces zones sont des à-plats et que ces variations ne sont que du bruit qu'il est inutile d'amplifier.

Les logiciels de traitement astronomique offrent un autre traitement très performant pour les planètes : les ondelettes. Il agit comme un masque flou mais offre la possibilité de jouer plus précisément sur les différentes échelles de détails. Le principe est le suivant : l'image est décomposée en plusieurs sous-images (appelées « plans ») qui représentent chacune une échelle de détails c'est-à-dire une plage de fréquences spatiales, des plus hautes fréquences aux plus basses. Chacun de ces plans peut être amplifié, voire supprimé. Par exemple, le premier plan, celui qui correspond aux plus hautes fréquences, ne contient parfois que du bruit, dans ce cas il est néfaste de l'amplifier et il vaut mieux lui appliquer un coefficient nul. Le plan suivant sera amplifié d'un coefficient au choix de l'utilisateur, par exemple 4, et ainsi de suite.



Lorsque cela est possible, il est préférable d'appliquer un masque flou sur une image en 16 bits car ces traitements amplifient les petites variations d'intensité. Pour le traitement par ondelettes, il est impératif que l'image soit en 16 bits.

D'autres traitements font appel à des algorithmes encore plus élaborés : restauration d'image de type Van Cittert, Lucy-Richardson, maximum d'entropie, etc. Ils n'ont cependant pas fait preuve d'une supériorité significative par rapport au masque flou ou aux ondelettes ; il n'est donc pas indispensable de s'y attarder, vous pouvez les expérimenter si vous le souhaitez. Ils présentent les mêmes inconvénients : amplification du bruit et apparition d'artefacts.

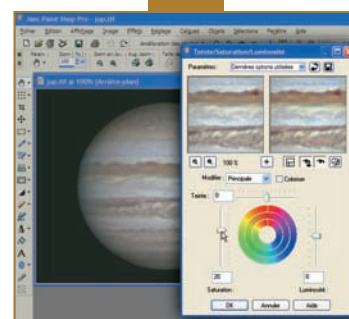
## Réglage des couleurs

Si votre appareil a été réglé en lumière du jour, les couleurs que vous obtiendrez devraient être approximativement équilibrées. Mais vous pourrez être amené à retoucher leur équilibre pour blanchir la calotte polaire de Mars ou les anneaux de Saturne. Si vous avez pris vos images avec un capteur monochrome associé à un jeu de filtres colorés, il vous faudra régler manuellement le coefficient à appliquer à chaque couche au moment de leur combinaison, comme décrit au chapitre 7.

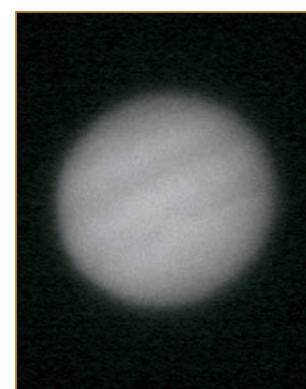
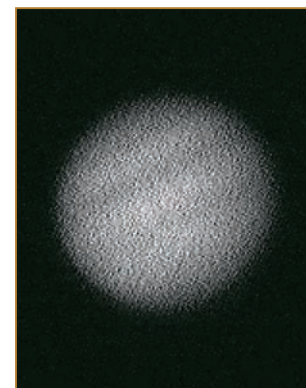
Un autre réglage possible des couleurs est leur niveau de saturation. Si vous avez observé Jupiter et Saturne dans un instrument, vous aurez remarqué que les teintes de leurs bandes de nuages sont douces, pastels même, bien loin des images aux couleurs exacerbées et saturées qu'on trouve parfois dans la presse astronomique. Ainsi, la Grande Tache Rouge de Jupiter apparaît pâle et sa couleur rose-orangé est quelque peu variable au cours du temps.

Même si vous essayez d'effectuer ces réglages pour obtenir une image la plus proche possible de ce que vous voyez à l'oculaire, n'espérez pas une fidélité parfaite des couleurs. L'œil est un très mauvais juge de l'équilibre des couleurs : une feuille blanche placée sous l'éclairage d'une lampe à incandescence vous semble toujours blanche, alors qu'en photographie sans flash elle apparaît clairement orangée. De toute façon, les courbes de sensibilité de l'œil et des détecteurs numériques dans chaque couleur ne sont pas identiques. La diversité des images d'amateur en est la preuve : vous aurez bien du mal à trouver deux photographies de Jupiter présentant exactement la même gamme de coloris !

*Le réglage de saturation des couleurs (ici dans Paint Shop Pro) permet d'accentuer la coloration des images : à utiliser avec modération !*

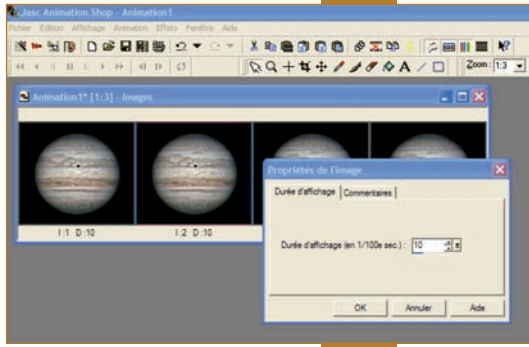


*Les quatre premiers plans d'ondelettes. Le premier plan peut contenir les plus fins détails mais il contient aussi généralement beaucoup de bruit. Au fur et à mesure des plans, l'échelle des détails devient plus grossière. Dans l'image d'origine, chaque plan a un coefficient égal à 1. En pratique, on ne touche qu'aux coefficients des deux ou trois premiers plans.*



*Images de Jupiter obtenues avec une webcam, en mode normal (en haut) et en mode RAW (en bas) – voir chapitre 2. La seconde image est moins bruitée car non accentuée par la webcam. Un traitement de type masque flou plus poussé peut être appliqué avant que le bruit ou les artefacts n'apparaissent.*





De nombreux shareware et freeware permettent de construire des GIF animés ; le logiciel Paint Shop Pro est accompagné d'un logiciel complémentaire, baptisé Animation Shop, capable de réaliser un .gif animé à partir d'une série d'images, en offrant la possibilité de régler de nombreux paramètres tels que le nombre de couleurs ou la durée d'affichage de chaque image.

## Animations

Il est assez simple, à partir d'une série d'images numériques réalisées à quelques minutes d'intervalle, de réaliser une petite animation de la rotation d'une planète sur elle-même. Chaque image (qui peut elle-même résulter d'un compositage d'images prises dans un court intervalle de temps, comme nous venons de le voir), est recentrée par rapport à la première de la série, de la même manière que pour un compositage. Lorsque la luminosité de l'objet varie d'une image à l'autre, ce qui peut se produire par exemple si la transparence atmosphérique n'est pas demeurée constante ou si de la

condensation s'est déposée petit à petit sur les miroirs ou les lentilles, il est utile d'ajuster la luminosité de chaque image par rapport à la précédente car l'œil détecte très bien ces variations. Il est également important que les images ne comportent pas de bruit sensible car celui-ci se présenterait, dans l'animation, sous la forme d'un fourmillement très désagréable.

C'est ainsi que certains amateurs ont pu réaliser des animations d'une rotation presque complète de Jupiter (soit une dizaine d'heures) pendant une longue nuit d'hiver, à raison d'une image toutes les 10 minutes environ. Le mouvement de ses satellites galiléens, le passage de l'ombre de l'un d'eux sur le globe de la planète ou sa disparition dans l'ombre de celui-ci peuvent également donner lieu à des animations spectaculaires autant que pédagogiques.

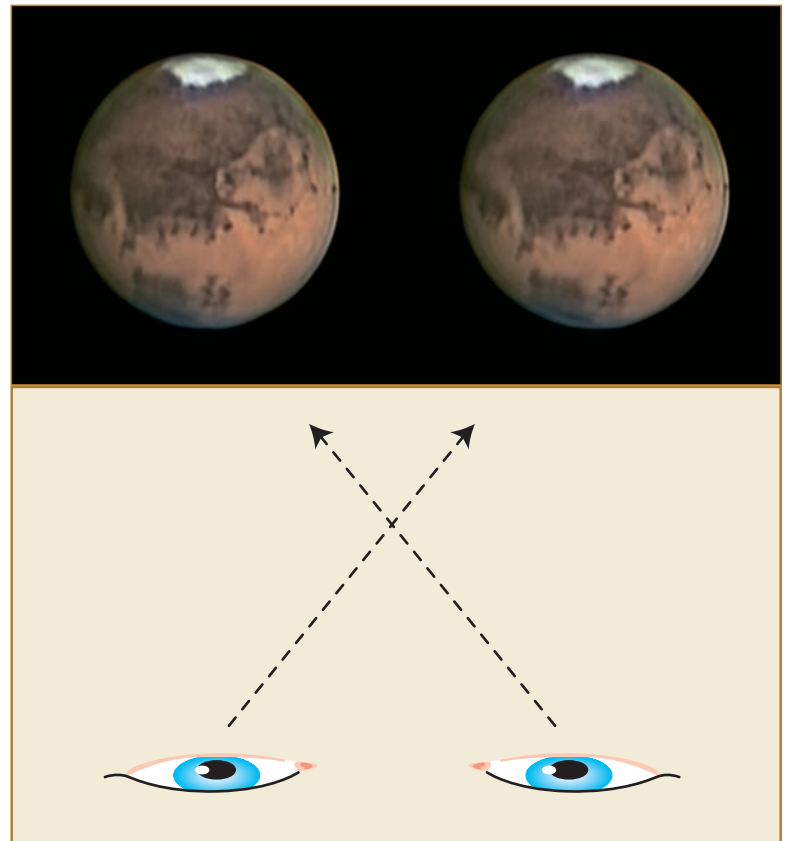
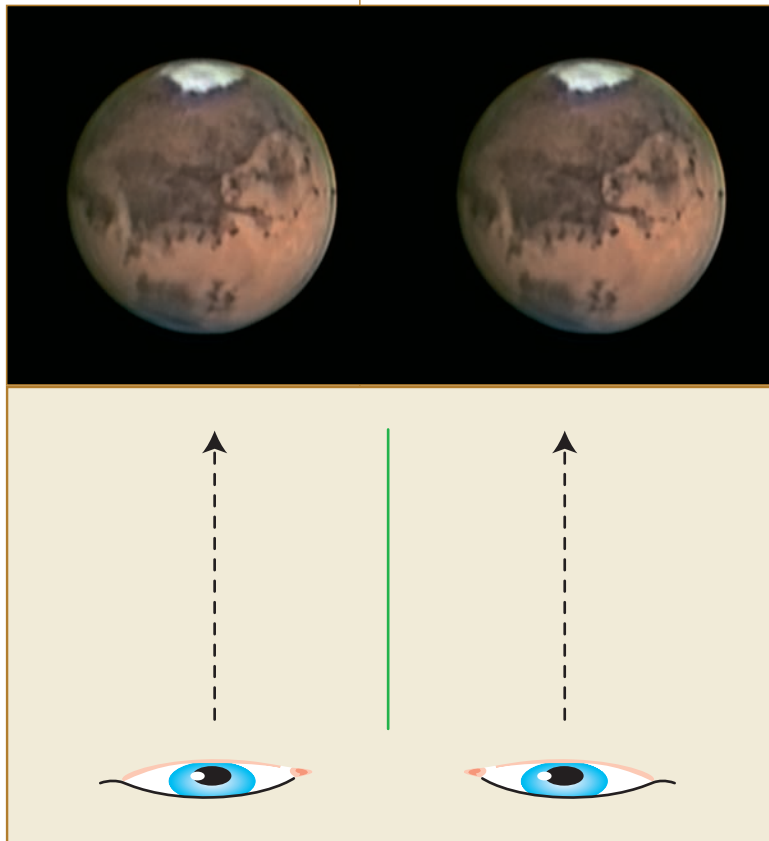
Le format habituel pour les animations contenant quelques images ou quelques dizaines d'images est le GIF animé. Un fichier dans ce format peut être placé sur un site web mais attention : la taille du fichier est naturellement proportionnelle aux dimensions et au nombre d'images individuelles qu'il contient.

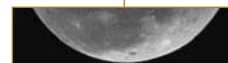
## Images en stéréo

Les objets de la vie courante, ceux qui sont situés à moins de quelques mètres de nos yeux, sont perçus en relief, c'est-à-dire que le cerveau, à partir des images légèrement différentes recueillies par chacun de nos yeux, est capable d'en reconstituer, au moins partiellement, la troisième dimension. C'est ainsi que la forme sphérique d'un globe terrestre placé à quelques pas est clairement reconnaissable. Mais la Lune (et a fortiori tous les autres astres) est située bien trop loin pour que nous la percevions autrement que sous la forme d'un disque plat. Au télescope, nous la devinons sphérique parce que nous savons qu'elle l'est et parce que l'effet de perspective, qui aplatit les cratères situés près du limbe, nous le suggère. Pour que nous percevions réellement sa forme sphérique, nos yeux devraient être écartés de plusieurs milliers de km, et même plusieurs millions de km pour Jupiter.

En photographie stéréoscopique terrestre, l'appareil est déplacé entre les deux prises de vue qui fournissent les images permettant de reconstituer ultérieurement la perspective. À défaut de pouvoir déplacer notre télescope de millions de kilomètres en un instant pour tourner autour de Jupiter ou de Mars, nous pouvons attendre tout simplement que cette planète ait tourné sur elle-même pour nous offrir les deux visions légèrement décalées dont nous avons besoin. Il faut bien choisir son intervalle de temps entre les deux prises, pour que la planète ait tourné de quelques degrés sur elle-même. Si le temps est trop court, la rotation n'est pas assez perceptible ; s'il est trop long, l'effet de relief est trop prononcé et semble irréaliste. Pour Jupiter, cet intervalle est de 10 à 15 minutes, alors que pour Mars il faut compter sur 20 à 40 minutes.

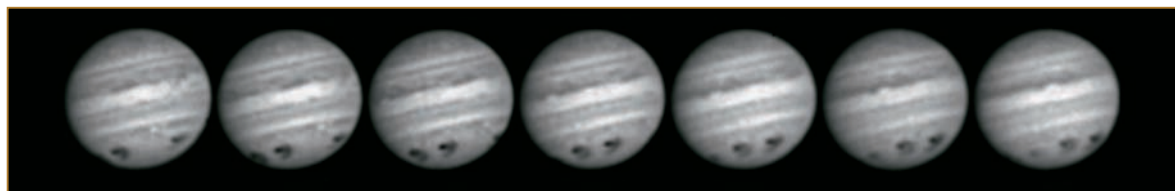
À gauche, méthode de fusion parallèle : forcez chaque œil à regarder l'image qui se trouve en face de lui, en utilisant un écran de séparation si nécessaire (feuille de papier, en vert). À droite, méthode de fusion croisée : louchez pour forcer chaque œil à regarder l'image opposée.





La méthode la plus simple permettant de donner une vision en relief et en couleurs consiste tout simplement à juxtaposer les deux images à l'écran et à obliger notre vision à les faire fusionner pour ne plus en percevoir qu'une seule. Pour ce faire, deux techniques sont possibles, chacun pouvant préférer l'une ou l'autre. Si vous placez les images l'une par rapport à l'autre dans un ordre naturel, c'est-à-dire l'image destinée à l'œil gauche à gauche et l'image destinée à l'œil droit à droite, il vous faudra forcer chaque œil à regarder l'image qui lui est attribuée, et seulement celle-là. La difficulté est d'obliger les yeux à rester parallèles, comme si vous regardiez à l'infini, alors qu'ils font la mise au point sur l'écran, ce qui n'est pas leur

comportement naturel. Pour cela, vous pouvez vous aider d'une feuille en papier, placée depuis votre nez jusqu'à l'écran et dont le rôle est d'empêcher chaque œil de se laisser distraire par l'image destinée à l'autre. L'autre possibilité consiste à permuter les images à l'écran et à les faire fusionner en louchant (fusion croisée). Si vous vous fixez sur une des deux techniques et que les images sont permutées par erreur, le relief vous apparaîtra inversé : un globe planétaire est alors vu en creux. Comme pour une animation, il est recommandé d'utiliser des images peu bruitées, car toute différence entre les deux images à fusionner autre que la rotation du globe se traduit par une sensation visuelle très désagréable.



*En fusion croisée, vous verrez sur six disques joviens en relief les impacts du crash des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 (juillet 1994). Images réalisées depuis l'observatoire du Pic du Midi à l'aide d'une caméra CCD monochrome sur une lunette de 130 mm. Images Christian Buil et Thierry Legault.*

## À quoi sert le traitement d'image ?

Certains amateurs prétendent que la qualité optique de l'instrument est moins importante en photographie qu'un visuel. S'il est vrai que le traitement d'image offre de nombreuses possibilités d'ajustement de contraste et d'amplification des détails, dans la réalité les phénomènes de bruit et d'artefacts contrecarrent cette vision trop idyllique pour être juste. L'expérience montre que la meilleure image finale est toujours celle qui est issue des meilleures images brutes. Aussi indispensable que soit le traitement d'image et aussi spectaculaire que puisse apparaître la différence entre les images brutes et l'image finale, ne nous méprenons pas : le traitement d'image n'est qu'un maillon de la chaîne qui conduit à une bonne photographie. Il est destiné à extraire le potentiel des images brutes et non à compenser les défauts optiques ou les erreurs de manipulation, encore moins à réinventer les informations qui n'ont pas été enregistrées. La qualité d'une image se construit à l'acquisition ; elle se révèle au traitement. Traiter une image, c'est mettre en évidence certaines informations... au détriment d'autres informations qui sont dégradées : on ne peut donc pas traiter une image indéfiniment. Ne vous fiez pas aux séries télévisées où vous voyez des « experts » déterminer la couleur des yeux d'un malfaiteur à partir d'une vidéo floue (et en noir et blanc...) prise avec une caméra de surveillance et sur laquelle on devine à peine son visage : c'est du cinéma.

À cet égard, le cas du télescope spatial Hubble (HST) est exemplaire. Les premiers résultats reçus du HST après sa mise en orbite ne correspondaient absolument pas aux performances attendues. Le contraste des images était très faible et les étoiles étaient auréolées d'un halo de lumière diffuse. Les investigations ont rapidement permis de comprendre l'origine du défaut : le miroir primaire souffre d'un défaut de forme (aberration de sphéricité) extrêmement prononcé. Les simulations des effets de ce défaut de fabrication montrent que les performances de cette optique en termes de contraste et de résolution s'effondrent d'un facteur 5 à 10. Ce que confirment les résultats : les images planétaires réalisées pendant les premières années de l'utilisation du HST sont à la portée d'un amateur équipé d'un bon télescope de 250 mm de diamètre et d'une webcam. Et cela malgré l'effort important déployé par les équipes d'ingénieurs et de chercheurs de la NASA pour développer des algorithmes de restauration d'image qui n'ont finalement permis de rattraper qu'une toute petite partie de la dégradation des images, et cela au prix d'une amplification importante du bruit. L'installation, en 1993, d'une optique correctrice à l'intérieur du HST a démontré que cette solution, bien que plus coûteuse, était infiniment meilleure : les

images planétaires actuelles du HST n'ont plus rien de commun avec ses premières images, tant sur le plan de la résolution que du rapport signal/bruit, elles sont désormais totalement hors de portée de l'amateur le mieux équipé. Les techniques d'optique adaptative et d'interférométrie déployées sur les grands télescopes professionnels concourent au même objectif : améliorer l'image avant qu'elle n'atteigne le capteur. Après, il est trop tard...

### Le piège du surtraitement

On dit souvent que la meilleure compétence en matière de traitement d'image n'est pas d'en connaître par cœur les infinies possibilités, elle est de comprendre les avantages et les inconvénients des plus utiles d'entre eux afin de les utiliser à bon escient et sans tomber dans le surtraitement. On peut qualifier la photographie des planètes de photographie de l'extrême : les focales utilisées sont très grandes, les planètes petites, peu lumineuses et en mouvement continu. L'image obtenue est un objet fragile qui demande à être manié avec précaution !

La tentation peut être grande d'augmenter indéfiniment la puissance des traitements de type accentuation ou d'en empiler plusieurs à la suite (après tout cela ne coûte que quelques clics de souris...). Mais si l'image n'est pas satisfaisante après un compositage et un masque flou modéré, inutile de s'acharner et de chercher à faire dire à l'image plus qu'elle ne le peut ; il est à craindre que ce ne soit pas le traitement qui soit en cause mais la prise de vue : turbulence, défaut de réglage ou de mise au point, optique défectueuse, échantillonnage inadapté, etc.

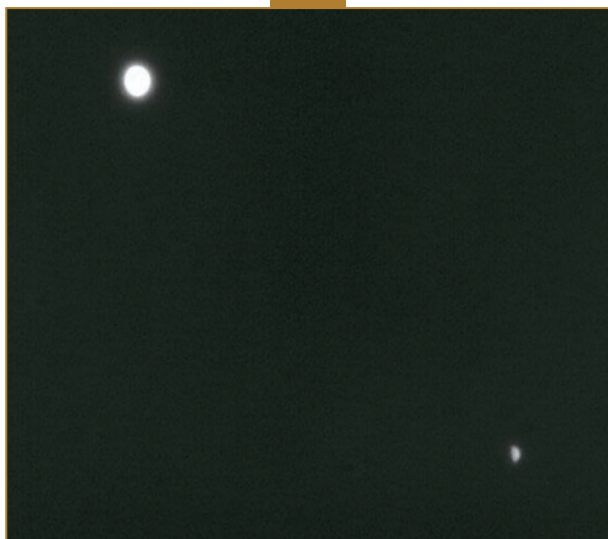
Cependant, il peut être licite de surtraiter une image s'il s'agit de mettre en évidence un détail peu contrasté ; les astronomes professionnels le font parfois. Mais il faut alors prendre les précautions suivantes :

1. s'assurer que le détail qui apparaît est bien réel et n'est pas un artefact ;
2. avertir les spectateurs de cette image que tout ce qui s'y trouve n'est pas réel et qu'elle a été surtraîtée dans le but de mieux faire apparaître un détail particulier qu'on prendra soin de souligner.

Le fait qu'un détail présent dans l'image ressemble à un véritable détail n'est pas une preuve absolue de sa réalité : on voit régulièrement de fausses divisions sur des images surtraîtées des anneaux de Saturne ! Quant à la granulation solaire, elle ressemble énormément au bruit (à moins que ce ne soit le contraire...).



# Les planètes et leurs satellites



Le rapprochement apparent exceptionnel de Vénus et de Mercure du 27 juin 2005, photographié en plein jour à l'aide d'une caméra vidéo monochrome et d'un filtre rouge sur un télescope de 180 mm. Les phases des deux planètes qui étaient situées à moins de 3 minutes d'arc l'une de l'autre sont facilement visibles, en quartier pour Mercure et gibbeuse pour Vénus.

## Mercure

Mercure est la planète la plus proche du Soleil. Elle ne possède pas d'atmosphère et sa surface est très semblable à celle de la Lune. Son orbite est dite intérieure à celle de la Terre, ce qui signifie que cette planète présente des phases comme la Lune.

Son écart angulaire avec le Soleil (élongation solaire) ne dépassant jamais 28°, Mercure est toujours plus ou moins noyée dans les lueurs du levant ou du couchant. Mais il est possible de la photographier en plein jour, de la même manière que Vénus (voir ci-dessous).

C'est lors des élongations maxi-

males que l'astrophotographe a le plus de chances d'arriver à la repérer. Elle se présente alors sous la forme d'un minuscule premier ou dernier quartier. Malgré le petit diamètre apparent de la planète (7" seulement aux élongations), si l'échantillonnage est suffisant il n'est pas trop difficile de faire apparaître cette phase sur les images. Par contre, enregistrer quelques détails de la surface est un véritable challenge pour les amateurs équipés d'instruments performants et situés dans un site privilégié où la turbulence diurne est faible.

## Vénus

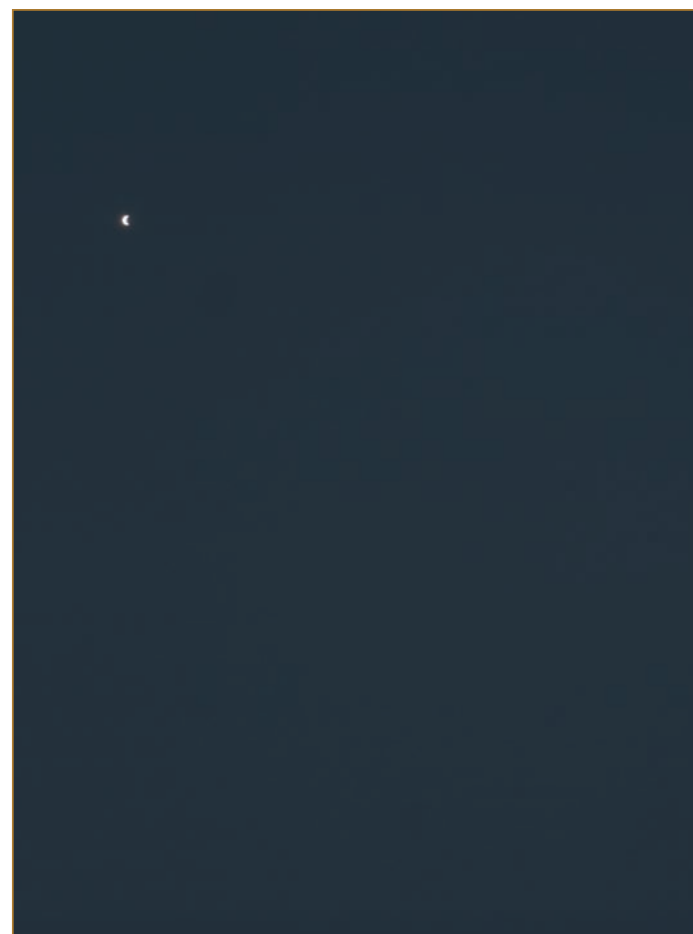
Tout comme Mercure, Vénus est une planète intérieure. Mais sa photographie présente des difficultés moindres car son élongation maximale peut atteindre 47°, elle est donc à ce moment très facilement repérable au crépuscule (le matin ou le soir selon qu'il s'agit d'une

élongation orientale ou occidentale) puisque c'est l'objet le plus brillant du ciel. De plus, son diamètre apparent varie entre des valeurs confortables, de 10" à 60" environ (valeurs respectives des conjonctions supérieures et inférieures) et avoisine 24" au moment des élongations maximales.

Vénus peut être observée et même photographiée pratiquement tous les jours car elle est facilement visible en plein jour dans un instrument astronomique. Son repérage peut s'effectuer par un système de pointage automatique (GOTO) ou par différentiel de coordonnées équatoriales par rapport au Soleil. On peut s'aider, comme pour Mercure, d'un filtre jaune, orange ou rouge qui atténuera la luminosité du fond de ciel bleu. Lors d'une observation diurne de Vénus ou de Mercure, il est impératif de veiller à ce que la lumière solaire n'entre jamais directement dans l'instrument et que, pour le pointage du Soleil, un filtre approprié soit employé (voir chapitre 6).

Il est facile de photographier les phases de Vénus, discernables sur des images prises dès 500 mm de focale. Les temps de pose sont courts car la planète présente un albedo extrêmement élevé. Mais aucun détail de surface ne peut être enregistré, et pour cause : cette planète est entourée d'une atmosphère très dense et totalement opaque. Les « cornes » de Vénus, observées peu avant et après la conjonction inférieure, témoignent de sa présence. À l'oculaire, elle apparaît donc d'un blanc intense, sans détail visible. Il existe toutefois un moyen de photographier les grandes structures des nuages de la haute atmosphère vénusienne : utiliser un filtre violet, ou mieux, ultra-violet (UV), c'est-à-dire transparent aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm. C'est d'ailleurs de cette manière qu'a été déterminée depuis l'Afrique par l'amateur français Charles Boyer, dans les années 1950, la période de rotation de l'atmosphère, qui est de 4 jours. Les capteurs couleur ne sont pas adaptés à ce type de photographie puisque les filtres qui recouvrent leurs photosites sont opaques aux UV. Par contre, la plupart des capteurs monochromes présentent une sensibilité dans l'UV, faible mais suffisante vu la brillance de la planète. Cependant, compte tenu du faible contraste des structures nuageuses, même dans l'UV, les détecter n'est pas une partie de plaisir ! Autre obstacle potentiel : les verres utilisés dans certaines lentilles (objectifs de lunettes, lentilles de Barlow, oculaires) ou lames de fermeture (Schmidt-Cassegrain, Maksutov-Cassegrain) peuvent être peu transparents aux UV et assombrir fortement l'image, sans compter l'altération de l'image occasionnée par un éventuel chromatisme.

Le rapprochement de la Lune et de Vénus du 21 mai 2004, photographié avec une lunette de 500 mm de focale et un APN reflex.



Vénus photographiée 37 heures avant le transit solaire du 8 juin 2004, alors qu'elle se trouvait à 2° du Soleil. Les effets de diffusion et de réfraction de la lumière solaire par l'atmosphère de Vénus permettent de discerner la quasi-totalité de sa circonférence.



Photographier Vénus en lumière UV (ici avec une lunette de 130 mm et une webcam dotée d'un capteur monochrome et d'un filtre UV) permet de mettre en évidence les grandes structures nuageuses de sa haute atmosphère.



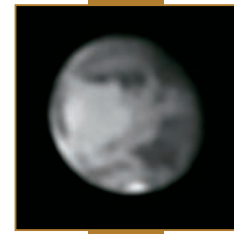
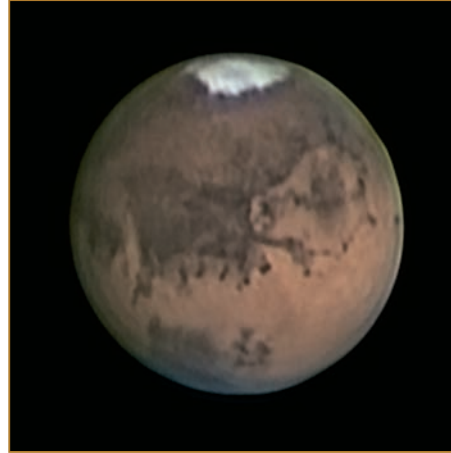


## Mars

La planète rouge est une des planètes de prédilection des amateurs. C'est une planète extérieure, ses phases sont donc peu prononcées, tout au plus peut-on noter un aspect gibbeux lors des quadratures. Son observation et sa photographie s'effectuent plus facilement dans les quelques semaines avant et après une opposition martienne, circonstances qui reviennent tous les deux ans et deux mois. À cause de l'ellipticité prononcée de son orbite, elle présente à l'opposition un diamètre apparent pouvant varier pratiquement du simple au double : de 14" pour les oppositions défavorables à 25" pour les oppositions les plus favorables.

Grâce à son atmosphère très ténue, Mars montre facilement ses détails de surface. L'une ou l'autre des calottes polaires, petite tache blanche contrastant avec l'ocre du reste du globe, est assez facile à capter, tout comme les grandes structures telles que Syrtis Major. Les amateurs persévérants, équipés d'instruments de plus de 200 mm et situés dans un bon site, sont désormais capables, avec une webcam ou une caméra vidéo, de détecter de nombreux petits détails de la surface martienne ou même le plus grand volcan connu du système Solaire, Olympus Mons. Seules les tempêtes de sable qui sévissent parfois et sont capables de recouvrir une bonne partie de la surface de Mars d'un voile masquant tout détail sont susceptibles de gêner le photographe martien.

*Le diamètre de Mars à l'opposition peut varier de 13" à 25", comme en attestent ces images prises respectivement lors des oppositions de 1995 (caméra CCD et télescope de 250 mm) et 2003 (caméra vidéo et télescope de 305 mm).*



## Jupiter

La planète géante du Système solaire présente, aux oppositions, un diamètre apparent conséquent, dépassant 45". Ses bandes de nuages principales sont faciles à enregistrer, même avec un instrument de diamètre modeste. La Grande Tache Rouge est également relativement facile à photographier... quand elle est visible. En effet, compte tenu de la rotation rapide du globe (9 h 56 min), elle n'est bien visible que sur une durée d'environ 2 heures à chaque rotation. Des ouvrages d'éphémérides ou des sites Web fournissent ses heures de transit. Comme pour Mars, les amateurs persévérants et bien équipés

sont capables d'obtenir des images contenant une très grande quantité d'informations : bandes nuageuses très fines, petits cyclones, festons, etc. Ces détails étant peu contrastés, tout défaut instrumental affectant le contraste est particulièrement dommageable pour la photographie de cette planète, comme pour Mars.



*Pour des raisons de contraste, s'il est très difficile de distinguer un des satellites galiléens de Jupiter (ici Io) lorsqu'il se profile devant le disque jovien, photographier son ombre ne présente pas de difficulté car elle est très contrastée.*



## Saturne

*Ce petit point brillant sur le disque du Saturne est une des rares et fugitives tempêtes visibles avec des instruments d'amateur.*

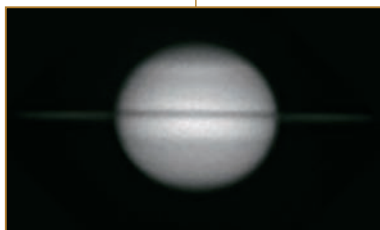


Les anneaux de la planète Saturne, peut-être la plus belle planète du Système Solaire, sont très faciles à photographier, leur contraste étant élevé et leur diamètre apparent appréciable (plus de 40" à l'opposition). Du moins lorsque leur inclinaison n'est pas trop défavorable car, lorsque la Terre passe dans leur plan (tous les 15 ans), leur minceur extrême les rend invisibles. La division de Cassini qui sépare l'anneau A du B, est également relativement facile à photographier aux anses des anneaux et même sur toute la périphérie des anneaux lorsque ceux-ci se présentent sous un angle favorable. La division d'Encke, d'une largeur 14 fois inférieure à celle de Cassini, est beaucoup plus difficile : elle n'est accessible qu'aux bons instruments de plus de 200 mm de diamètre et dans des conditions excellentes de turbulence et d'inclinaison des anneaux. Le globe de la planète présente, comme Jupiter, des bandes nuageuses mais elles sont

moins tourmentées. De temps à autre, de petites tempêtes rompent la régularité apparente des bandes mais elles ne sont pas aisées à photographier, compte tenu de leur petite dimension apparente et de leur faible contraste. L'équilibrage des couleurs est facilité par le fait que les anneaux sont blancs et peuvent servir de référence de couleur.

*Tous les quinze ans, comme ici en 1995, la Terre passe dans le plan des anneaux de Saturne qui sont si minces qu'ils disparaissent quelque temps à notre vue.*

*Ce n'est qu'à ces périodes que l'on peut voir Titan, le plus grand satellite de Saturne, projeter son ombre sur le disque saturnien.*



## Uranus et Neptune

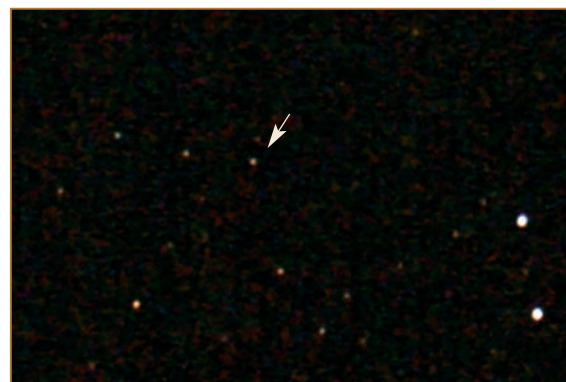
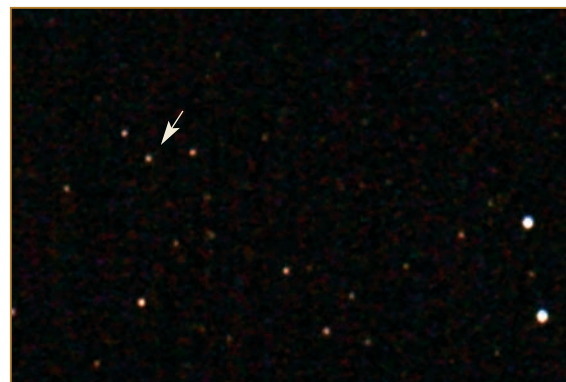
Avec ces deux planètes, nous approchons des confins du Système Solaire. Leur luminosité faible (Uranus est à peine visible à l'œil nu dans un ciel bien noir) et leur petit diamètre apparent (respectivement 3,7" et 2,3") les rend beaucoup moins prolifiques en détails que les précédentes. S'il est encore possible de mettre en évidence assez aisément leur aspect non stellaire ou leur légère coloration, enregistrer quelques détails de surface sur Uranus est probablement aux limites des possibilités des amateurs très bien équipés.



*Compositage d'images vidéo d'Uranus prises avec un télescope de 305 mm à F/D 20.*

## Pluton

La magnitude faible de cette petite planète très lointaine la classe dans la catégorie des astéroïdes : une pose de quelques secondes à quelques dizaines de secondes, selon l'instrument et l'appareil utilisé, est nécessaire pour la détecter. Une monture offrant un bon suivi est donc préférable (voir chapitre 7). De plus, son diamètre apparent (environ 0,2") interdit à l'amateur tout espoir de la percevoir autrement que sous un aspect stellaire.



*Une fois que la position approximative de Pluton a été repérée à l'aide d'un logiciel de type planétarium, le meilleur moyen de l'identifier sur les photographies est de s'assurer qu'elle s'est bien déplacée par rapport aux étoiles qui l'entourent grâce à des images prises à quelques jours d'intervalle. Sur ces portions de compositages de dix poses de 30 s prises avec une lunette de 130 mm et un APN reflex, Pluton s'est déplacée de 1,5' par rapport aux étoiles en l'espace de 24 heures.*

## Les satellites des planètes

De nombreux logiciels de type « planétarium » sont capables de calculer la position des satellites naturels des différentes planètes qui en possèdent et aident ainsi à déterminer les moments où l'écart angulaire avec leur planète est le plus grand. Les satellites brillants tels que les quatre satellites galiléens de Jupiter ou Titan sont accessibles aux webcams, pour les autres un APN ou une caméra CCD se révèle nécessaire car les poses excèdent une seconde.

Aucun satellite n'orbite autour de Mercure et de Vénus. Mars possède deux très petits satellites, Phobos et Deimos, leur magnitude se situe entre 10 et 15 selon la distance de Mars à la Terre. Ils ne seraient pas très difficiles à photographier en quelques dizaines de secondes de pose sans la présence de Mars à proximité, considérablement plus brillante (plus de 200 000 fois !) et dont la surexposition, nécessaire pour faire apparaître les satellites, génère un large halo de lumière



diffuse. Tout l'art consiste donc à ajuster les paramètres (échantillonnage, temps de pose...) afin de ne pas noyer les satellites, surtout Phobos dont l'orbite est très basse, dans le halo de leur planète mère. Un filtre bleu peut aider à diminuer le halo de la planète rouge, au prix d'une augmentation du temps de pose nécessaire à l'apparition des satellites. Il est indispensable de s'aider d'un logiciel indiquant la position des satellites afin de profiter de leurs instants de plus grande élongation.



*Les quatre satellites galiléens de Jupiter photographiés avec un APN et une petite lunette.*

Les quatre satellites principaux de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto) sont bien plus faciles à photographier puisque le temps de pose est voisin de celui employé pour leur planète mère. Dans de très bonnes conditions et avec un instrument de qualité et suffisamment puissant, il est possible de détecter quelques taches à la surface sur Ganymède dont le diamètre apparent est de 1,7". Avec des objets d'un tel diamètre, le nombre de pixels couverts est très faible et il convient d'être très prudent quant à la réalité des détails que montrent les images, en particulier si elles ont été prises avec une webcam couleur. En effet, avec ces appareils, les différences de réponse entre photosites voisins peuvent conduire à du bruit plus ou moins coloré et les traitements d'accentuation internes sont capables d'amplifier ces artefacts. Jupiter possède de nombreux autres satellites mais leur faible magnitude nécessite un temps de pose plus long.



*Ganymède photographié avec un télescope de 305 mm et une caméra CCD. La tache sombre en haut à gauche du disque est Galileo Regio, la plus grande zone sombre à la surface de Ganymède.*

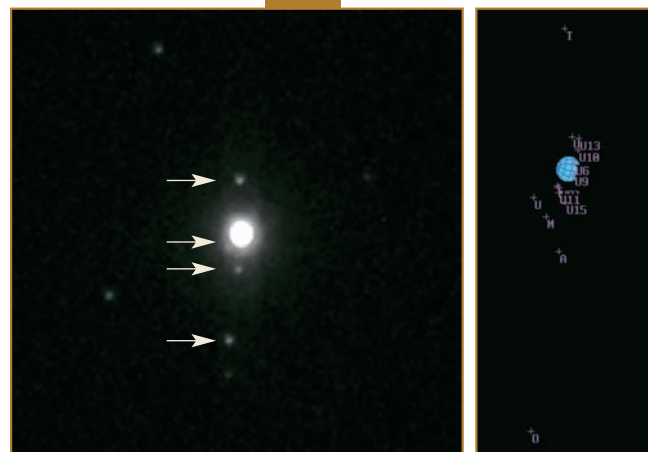
De temps en temps, l'un ou l'autre des satellites de Jupiter projette une petite ombre circulaire sur le disque de la planète. Ces ombres sont faciles à photographier car leur contraste est très élevé. Il n'en va pas de même lorsque c'est le satellite lui-même qui passe devant le globe jovien : l'albedo des deux astres (c'est-à-dire le pourcentage de lumière réfléchi par leur surface) étant très proche, ils se confondent et le satellite est difficilement identifiable. Pour ce faire, il faut bénéficier de conditions de prise de vue excellentes et d'un instrument très performant.

Plusieurs satellites de Saturne sont faciles à photographier, en particulier le plus brillant d'entre eux, Titan, mais sans qu'on puisse espérer enregistrer des détails de surface, d'une part parce que son diamètre apparent est très petit (moins de 1"), d'autre part parce que sa surface est masquée par une atmosphère opaque et uniforme.

Uranus et Neptune possèdent également plusieurs satellites, la magnitude des plus brillants est voisine de celle de Pluton (magnitude 14 à 15). La seule difficulté réside, comme pour Mars mais dans une moindre mesure, à isoler les satellites du halo produit par la surex-

position de la planète. Quant à Charon, satellite de Pluton, compte tenu de sa très faible magnitude (19) et de sa proximité à Pluton (1" d'écart au mieux), sa photographie avec des moyens d'amateur est probablement au-delà du faisable. Lorsque les poses atteignent plusieurs dizaines de secondes, un prétraitement à l'aide d'un noir peut se révéler nécessaire.

*Sur cette pose CCD de 10 s au foyer d'un télescope de 305 mm de diamètre à F/D 10, les positions des quatre plus brillants satellites d'Uranus (de haut en bas : Titania, Umbriel, Ariel et Obéron) sont conformes à celles prévues par le logiciel Guide.*



## La photographie de la Lune

La photographie de la Lune présente de nombreuses similarités avec celle des planètes, mais aussi quelques spécificités.

### La Lune en gros plan

Les photographies à haute résolution d'éléments du relief lunaire tels que les cratères, les montagnes, les plaines, les failles ou les dômes se réalisent d'une manière similaire à celle des planètes. Les webcams et autres caméras vidéo sont tout aussi efficaces pour traquer les plus petits cratères et les plus petites failles en profitant des trous de turbulence. Les focales et par conséquent les systèmes grandisants à employer sont également identiques. Naturellement, pour un échantillonnage donné, le nombre de photosites détermine le champ couvert qui représente, avec les webcams, une toute petite partie de la surface lunaire. Comme en visuel, la région à privilégier est celle du terminateur, là où les ombres sont les plus marquées et rendent les accidents du relief bien plus évidents.

Comme pour les planètes, les images issues de webcams ou de caméras vidéo nécessitent d'être composites, afin d'améliorer le rapport signal sur bruit avant d'appliquer un traitement de type masque flou. Mais la turbulence, en déformant chaque image de manière différente, fait qu'elles ne sont pas toujours exactement superposables, ce qui altère un peu la résolution de l'image finale. Un laps de temps de plusieurs minutes est disponible pour les prises de vue d'une même région car les variations d'éclairage sont relativement lentes. Cependant, les ombres peuvent évoluer assez rapidement sur une zone située très près du terminateur. Des animations, réalisées à partir d'images prises à quelques minutes d'intervalle sur une période





*Ces mosaïques de gros plans lunaires obtenues en vidéo à l'aide d'un télescope de 305 mm de diamètre nécessitent d'excellentes conditions de turbulence et un instrument de bonne qualité optique et bien réglé.*

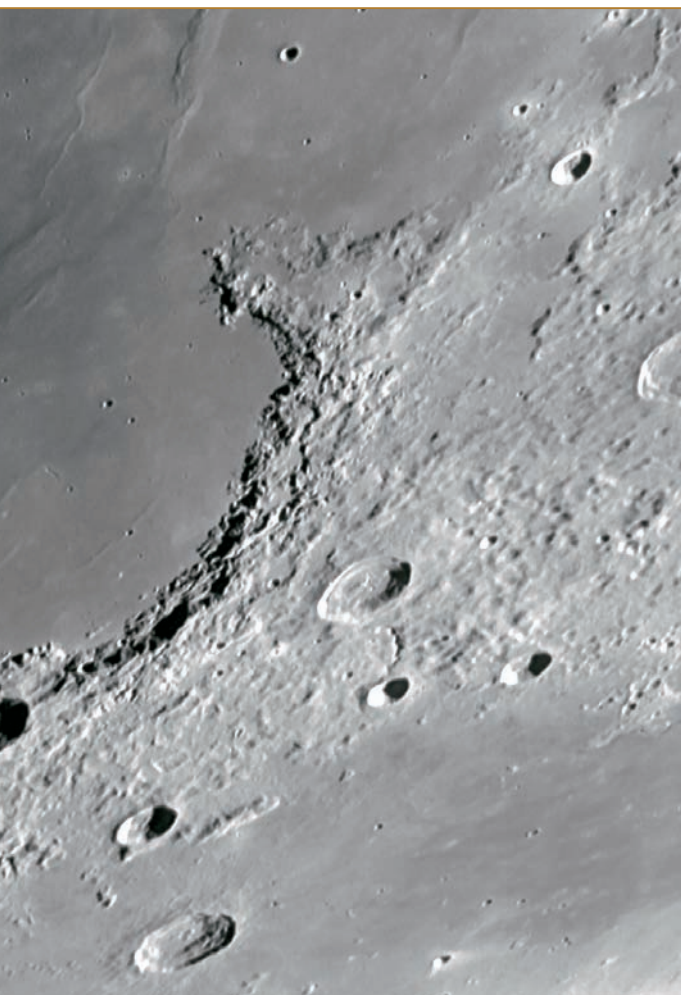
de plusieurs heures, permettent d'ailleurs de mettre en évidence le lever ou le coucher du Soleil de manière très spectaculaire.

Au terminateur, le contraste du relief lunaire est bien plus marqué que pour les planètes. Ainsi, les bords de cratères faisant face au Soleil sont souvent très brillants et, si l'on veut qu'ils ne soient pas sur-exposés, il faudra réduire le temps de pose ou le gain. Dans ce cas, on devra ensuite composer un peu plus d'images et éventuellement appliquer un léger traitement de type ajustement de courbes ou DDP (voir chapitre 7) pour rehausser les basses lumières.

## Le mouvement propre lunaire

Il faut toutefois tenir compte d'une particularité : le mouvement propre de la Lune. En effet, la Lune tourne autour de la Terre ; ce faisant, elle présente par rapport aux étoiles un mouvement propre la faisant reculer petit à petit vers l'est. C'est la raison pour laquelle elle se lève en moyenne une cinquantaine de minutes plus tard chaque jour. Son mouvement sur la voûte céleste est en moyenne 3,5 % plus lent que celui des étoiles. Ce qui peut sembler négligeable, mais cela représente tout de même un peu plus de 1/2" par seconde de temps, soit 30" par minute. Sur une vidéo webcam obtenue avec 5 m de focale, ce mouvement propre est bien visible puis-





qu'un objet traverse le champ de la webcam en 5 minutes environ si le suivi de l'instrument s'effectue à la vitesse sidérale et non lunaire. Si l'on ne veut pas que le champ de l'image compositée se réduise comme peau de chagrin, il faut effectuer de petits rattrapages très fréquents pendant l'acquisition, ou mieux, utiliser une monture disposant de la vitesse lunaire. L'idéal est même une monture informatisée sachant calculer le mouvement propre correspondant à l'instant de prise de vue car il possède deux composantes variables au cours du temps, l'une en ascension droite et l'autre en déclinaison. Cette seconde composante n'est pas toujours négligeable puisqu'elle peut représenter presque 50 % du mouvement propre total.

## La Lune en entier

La photographie de la Lune en entier nécessite naturellement une focale plus courte que pour les gros plans. Compte tenu des temps de pose relativement brefs, la photographie de la Lune en entier avec un instrument sur monture non motorisée est envisageable, moyennant un moindre confort pour le centrage.

En orientant judicieusement l'appareil, une Lune en croissant ou en quartier pourra être calée sur le grand côté du capteur ; une Lune gibbeuse ou pleine devra se contenter du petit côté. Le tableau suivant indique, pour quelques dimensions courantes de capteurs, la focale maximale permettant de cadrer la Lune en entier. Les webcams sont fortement pénalisées par leur petit nombre de pixels qui limite énormément la quantité de détails disponibles lorsque le cadrage englobe le disque lunaire entier ; on leur préférera donc un APN.

*Croissant de Lune âgé de trois jours.*



Lorsque la Lune est en croissant ou en quartier, elle peut être cadrée le long du grand côté du capteur. Mais lorsqu'elle est Pleine ou pour une lumière cendrée ou une éclipse de Lune, c'est le petit côté du capteur qui est à prendre en compte.



Quelques focales pour la photographie de la Lune en entier, en fonction de dimensions courantes de capteurs. Les chiffres tiennent compte d'une marge de 20 % pour le cadrage. On remarquera qu'une webcam (1<sup>re</sup> ligne) nécessite un téléobjectif et non un instrument astronomique.

Grand côté du capteur	Lune en croissant ou en quartier	Lune gibbeuse, Pleine Lune, lumière cendrée, éclipse de Lune
3,7 mm	330 mm	220 mm
7 mm	600 mm	400 mm
10 mm	900 mm	600 mm
15 mm	1300 mm	900 mm
23 mm	2000 mm	1350 mm
36 mm	3200 mm	2100 mm

Une photographie de la Lune entière peut être obtenue à plus longue focale que celle indiquée dans le tableau, à condition de la réaliser par mosaïque, technique abordée au chapitre 7. La principale difficulté se situe à la prise de vue : il faut s'assurer que des champs adjacents présentent bien des zones communes et qu'aucune région de la Lune n'a été omise. Certains amateurs ont même réalisé le travail

de fournir de construire une très grande image de quartier à partir de dizaines de champs d'images webcam obtenues à longue focale.

Les petits croissants et les Lunes gibbeuses ne présentent pas de variation importante de luminosité entre leurs différentes régions, ils peuvent donc être visualisés tels quels. Mais la région du terminateur d'un quartier est sensiblement moins lumineuse que la région opposée et les techniques d'ajustement de courbes et de DDP, que nous décrirons au chapitre 7 pour l'harmonisation des objets du ciel profond (qui présentent souvent des variations de lumière bien plus importantes), sont tout à fait appropriées aux quartiers lunaires. À la prise de vue, le temps de pose doit être ajusté de telle manière que les zones les plus brillantes de la Lune ne soient pas surexposées.

## La lumière cendrée

La lumière cendrée se photographie lorsque la Lune est en croissant, de préférence entre le 2<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> jour avant ou après la Nouvelle Lune. La partie éclairée par la Terre est plus de cent fois moins lumineuse que le croissant : sur une photographie prise avec un appareil 8 bits, si le croissant est correctement exposé, sans saturation, la partie cendrée ne montera pas plus haut que les 3 ou 4 premiers niveaux de gris. En mode RAW, le nombre de niveaux de gris occupés sera plus élevé mais cette partie sera tout de même très sombre et bruitée. La solution la plus simple est de surexposer le croissant en choisissant un temps de pose plusieurs dizaines de fois plus long. Essayez plusieurs temps de pose croissants, choisissez celui où le terminateur montre un aspect découpé et pas trop surexposé et, au traitement, jouez sur les courbes pour rehausser un peu la luminosité de la partie cendrée. Pour améliorer le rapport signal sur bruit, composez plusieurs images de même temps de pose.

Naturellement, c'est la colonne de droite du tableau ci-contre qui est à prendre en compte pour le cadrage en entier de la lumière cendrée.

Si la visualisation est réglée pour le terminateur, la région opposée risque d'apparaître surexposée (à gauche). Inversement, si c'est cette région qui est privilégiée, le terminateur va s'assombrir (au centre). Un ajustement des courbes ou un traitement de type DDP permet d'harmoniser les lumières (à droite).







*La lumière cendrée agrémentée de quelques étoiles, photographiée avec une lunette de 1 000 mm de focale et un APN reflex (pose de 4 s à 800 ISO : une pose de plus longue durée aurait été rendue légèrement floue par le mouvement propre de la Lune qui n'était pas corrigé par la monture utilisée ici). Le croissant, surexposé, est inmanquablement entouré d'une auréole de lumière diffusée par l'atmosphère et l'instrument.*

## Les éclipses de Lune

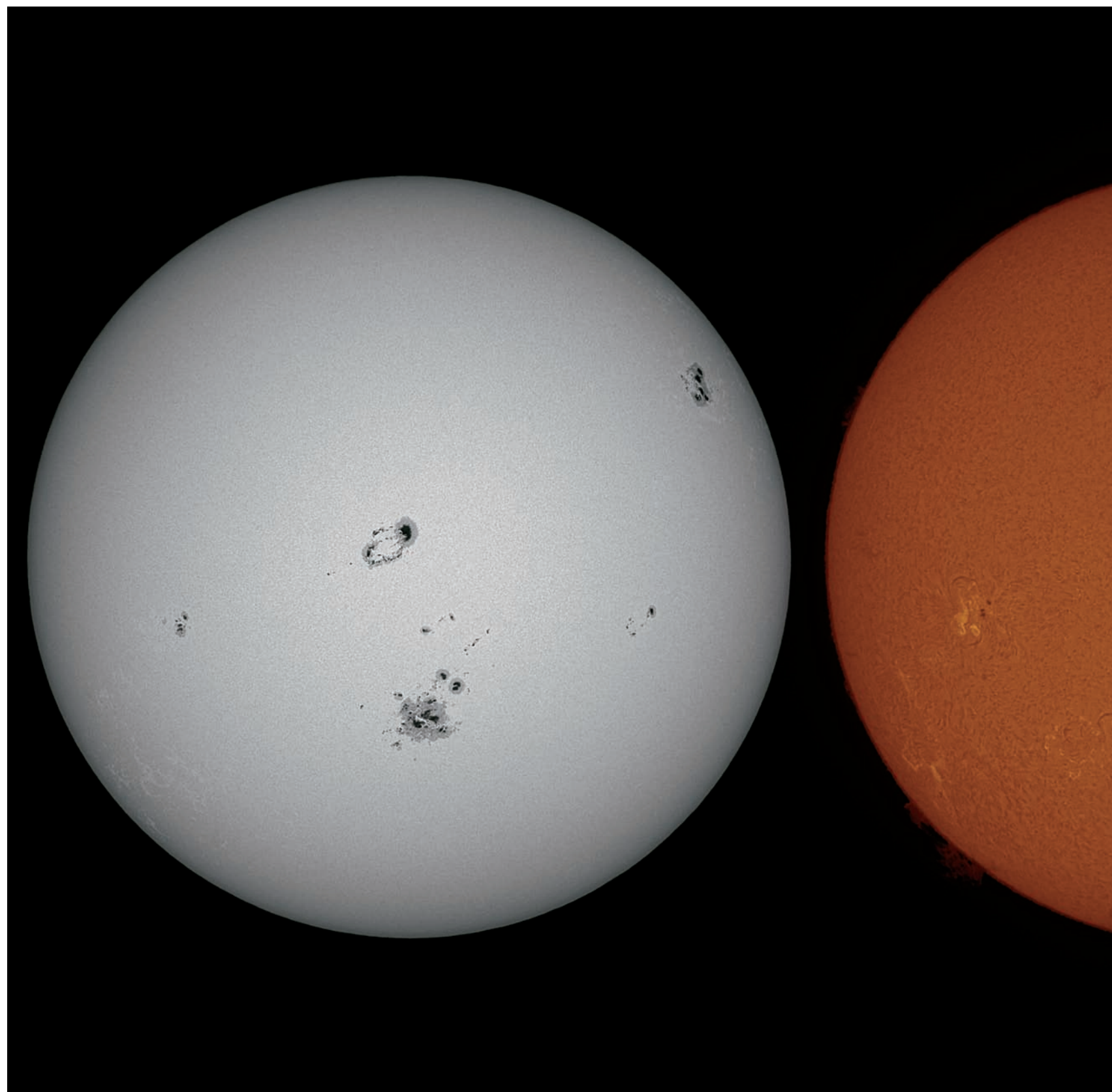
Il se produit une éclipse de Lune lorsque l'ombre de la Terre masque partiellement ou totalement la Lune. La partie masquée n'est plus éclairée que par les rayons lumineux déviés par l'atmosphère terrestre, d'où sa couleur rougeâtre (voir photos de couverture). Sa luminosité peut varier sensiblement d'une éclipse à l'autre, en fonction de la configuration de l'éclipse et des conditions atmosphériques, mais la situation est encore plus draconienne que pour la lumière cendrée, puisqu'on peut estimer le rapport de luminosité entre la Pleine Lune et la Lune totalement éclipse à environ... 10 000 ! C'est dire s'il est impossible d'obtenir sur la même photographie, lorsque l'éclipse est partielle, des détails à la fois dans la partie éclairée et dans la partie masquée : il faudra choisir entre un temps de pose court ne montrant pas la partie éclipse et un temps de pose beaucoup plus long surexposant énormément la partie éclairée. Ici aussi, la colonne de droite du tableau précédent permet de connaître la focale maximale en fonction des dimensions du capteur.

## Les occultations lunaires

De temps à autre, la Lune masque une des planètes principales ou une étoile brillante. Celle-ci disparaît du côté est, qui est le côté sombre ou brillant selon que l'on se trouve respectivement avant ou après la Pleine Lune, et réapparaît quelques dizaines de minutes plus tard du côté ouest. Lorsque la planète se trouve du côté sombre, il suffit de régler le temps de pose pour qu'elle soit correctement exposée. Du côté éclairé, c'est parfois un peu plus délicat car la différence de luminosité entre la Lune et la planète peut être non négligeable, notamment s'il s'agit d'une planète peu lumineuse occultée aux environs de la Pleine Lune. Dans ce cas, on sera amené à surexposer quelque peu la Lune pour que la planète présente une luminosité satisfaisante. Naturellement, ces occultations peuvent donner lieu à de spectaculaires animations réalisées à partir d'images prises à quelques secondes d'intervalle.



*La planète géante Saturne (en haut de l'image sur le bord du croissant) paraît bien petite en comparaison de la Lune lors de cette occultation. APN à objectif non interchangeable en montage afocal sur un télescope de 180 mm.*

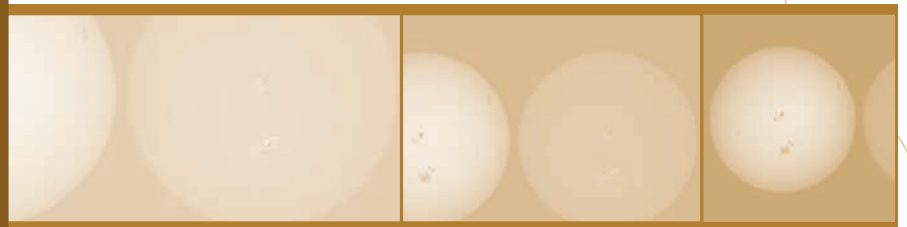
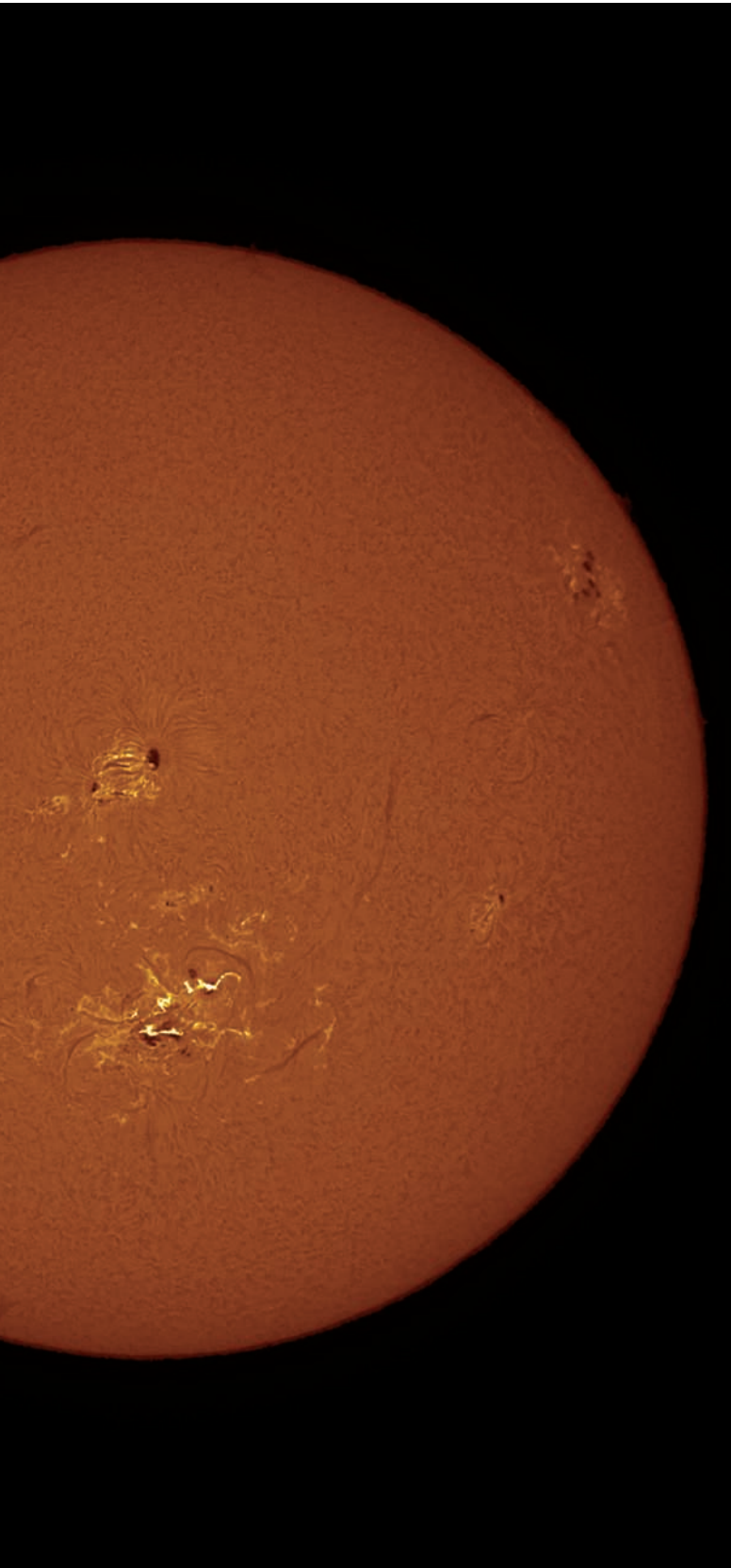




# Le Soleil

Dans notre Galaxie, le Soleil est une étoile très ordinaire. Mais elle est 300 000 fois plus proche de la Terre que l'étoile la plus proche du Système Solaire. Et, pour nous, cela change tout : c'est la seule sur laquelle nous puissions observer et photographier une foule de détails toujours changeants.

*À gauche, le Soleil en lumière blanche. On y reconnaît, au milieu de la granulation, les taches constituées – pour les plus grandes d'entre elles – par une ombre et une pénombre. Quelques facules sont visibles autour du groupe de taches du bord droit. À droite, une photographie réalisée quelques instants plus tard en lumière  $H\alpha$ . Une brillante éruption se produit dans un centre actif.*



Les astronomes sont d'incorrigibles insatisfaits : ils se plaignent sans cesse du peu de lumière que leur envoient les astres, et c'est la raison pour laquelle ils affectionnent les instruments de grand diamètre. Sauf avec le Soleil, auquel ils reprochent... d'être trop, beaucoup trop lumineux. Non sans raison : c'est en effet le seul astre qui soit potentiellement dangereux et qui nécessite que son flux lumineux soit diminué d'un facteur 100 000 environ. Ce que font très bien les filtres solaires proposés de nos jours aux amateurs.

On peut les classer en deux types : les filtres pour la lumière blanche et les filtres H $\alpha$ . Les premiers permettent d'observer la surface visible du Soleil, celle qui nous éclaire, avec ses célèbres taches. Les seconds, dont le nom provient du rayonnement rouge qu'ils isolent, le H $\alpha$ , offrent des vues spectaculaires des non moins célèbres protubérances et des manifestations violentes de l'activité solaire que sont les éruptions. Ils sont plus rares car plus coûteux que les premiers, mais quiconque a observé une fois dans sa vie le Soleil en H $\alpha$  ne l'oubliera pas de sitôt ! Que ce soit pour des vues globales ou pour des gros plans, la photographie du Soleil avec l'un ou l'autre de ces types de filtres diffère peu de celle des planètes et de la Lune, nous allons nous concentrer sur leurs principales différences.

## Le Soleil en lumière blanche

C'est la couche du Soleil nommée « photosphère » qui nous éclaire, c'est aussi celle que nous observons à l'aide des filtres solaires décrits ci-dessous. Sa température est de 5 500° C et aucune variation de couleur n'y est discernable. Elle est constituée par une granulation formée de cellules de convection de chaleur communément appelées « grains de riz », leur taille individuelle étant de l'ordre de 1 000 km, soit 1" environ. Leur durée de vie est de quelques minutes seulement.

La photosphère comporte également les célèbres taches qui apparaissent et disparaissent au gré des caprices de l'activité solaire et qui nous semblent sombres par effet de contraste car leur température est inférieure d'environ 2 000° C à celle de la photosphère. Les groupes de taches constituent ce qu'on appelle des « centres actifs », les mouvements de matière y sont soumis aux caprices du champ magnétique solaire qui y est très intense et très complexe. Des facules, petites zones un peu plus brillantes car plus chaudes que le reste de la photosphère, sont parfois bien visibles près du limbe.

### On ne badine pas avec le Soleil !

*Les bricolages improvisés tels qu'un verre fumé à la bougie ou un morceau de négatif voilé (sans parler de lunettes de Soleil !) sont à proscrire absolument, qu'ils soient placés à l'avant ou à l'arrière de l'instrument ou même devant l'œil nu. Même si l'éclat du Soleil semble correctement atténué par ces dispositifs de fortune, les invisibles mais redoutables rayonnements infrarouge et ultraviolet causeraient des dommages oculaires irréversibles à court ou à long terme. Ajoutons que la rétine n'est pas sujette à la douleur et qu'il est donc impossible de se rendre compte à temps qu'une lésion est en train de se produire. Même les petits filtres « Sun » à visser sur l'oculaire et qui accompagnent parfois le matériel d'entrée de gamme sont à jeter sans regret : ils peuvent éclater brusquement au bout de quelques secondes. J'en ai fait l'expérience lorsque j'étais enfant, par chance je n'avais pas l'œil à l'oculaire à cet instant. Naturellement, la photographie présente des risques moindres mais il faut bien mettre de temps en temps l'œil à l'oculaire ou derrière le viseur de l'appareil pour centrer l'image et faire la mise au point...*

être observé et photographié pendant de longues heures en toute sécurité. Ils doivent bien sûr être utilisés conformément aux consignes de leur fabricant et leur maniement ne doit être réalisé que par une personne connaissant ces consignes. Un instrument solaire doit être surveillé en permanence par son propriétaire, surtout s'il y des enfants ou des néophytes susceptibles d'y toucher aux alentours. Le chercheur de l'instrument doit être obturé afin qu'il ne prenne l'envie à personne d'y mettre l'œil ; le centrage du Soleil dans l'instrument se fera à partir de l'ombre projetée sur le sol.

### Le filtre à l'ouverture

On trouve deux types de filtres à installer à l'entrée de l'instrument : le filtre en verre et le filtre souple.

Le premier est constitué d'une lame de verre à faces planes et parallèles, sur lesquelles a été appliqué un dépôt métallique uniforme ne laissant passer qu'une toute petite fraction de la lumière solaire. Ce filtre est monté dans un support circulaire permettant de l'installer sur l'avant de l'instrument, il faut donc préciser à la commande à quel modèle de lunette ou de télescope il est destiné. Rien ne doit entrer en contact avec sa surface, afin de ne pas risquer d'endommager son traitement métallique. Aussi étrange que cela puisse paraître, la fabrication, à la précision requise en optique astronomique, d'une lame de verre à faces planes est bien plus difficile (et donc plus coûteuse) que celle d'un miroir primaire de Newton de même diamètre. Ajoutez à cela le fait qu'un traitement de surface destiné à transmettre une toute petite quantité de lumière de manière uniforme est également plus délicat à réaliser qu'un traitement simplement réfléchissant sur un miroir, et vous aurez compris pourquoi les modèles de haute qualité sont onéreux.



*Filtre en verre dans son support. Pour les petits instruments, le filtre recouvre toute l'ouverture ; pour les gros instruments de type Schmidt-Cassegrain, on trouve également des filtres de plus petit diamètre en montage excentré.*

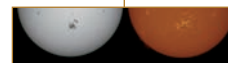
### Le filtrage

On a coutume de dire qu'un astronome qui observerait le Soleil sans moyen de filtrage approprié ne le ferait que deux fois dans sa vie : une fois avec l'œil droit, une fois avec l'œil gauche. Un instrument de 100 mm de diamètre collecte environ mille fois plus de lumière que l'œil nu : de quoi mettre facilement le feu à une brindille placée en son foyer (terme tout à fait approprié en la circonstance...).

Heureusement, les fabricants de matériel astronomique proposent toute une batterie de moyens de filtrage sûrs, adaptés à toutes les bourses et tous les instruments. Moyennant ces accessoires, le Soleil peut

Le premier filtre souple à faire son apparition fut une feuille métallique extrêmement mince appelée « Mylar », de même type que celle utilisée dans les couvertures de survie. D'autres feuilles sont apparues ensuite, comme le polymère noir qui est à utiliser uniquement pour de faibles grossissements à cause de sa qualité optique limitée. La feuille Astrosolar de Baader ressemble au Mylar mais présente une qualité optique supérieure à celle des autres feuilles et même de la plupart des filtres en verre, donnant une image solaire plus nette et contrastée où, par exemple, la granulation est plus facilement visible. Son rapport performance/prix est inégal. Il s'achète en feuilles rectangulaires dans lesquelles il faut découper, avec des ciseaux, un morceau de la dimension voulue qui sera installé, sans le tendre et en évitant les pliures, dans une petite monture en carton selon les instructions du fabricant. S'il est manipulé avec soin, il n'est pas spécialement fragile : j'en utilise pour différents instruments, ils ont été montés il y a déjà plusieurs années et sont toujours opérationnels.





*Feuille d'Astrosolar, à découper et à monter dans un support cartonné.*

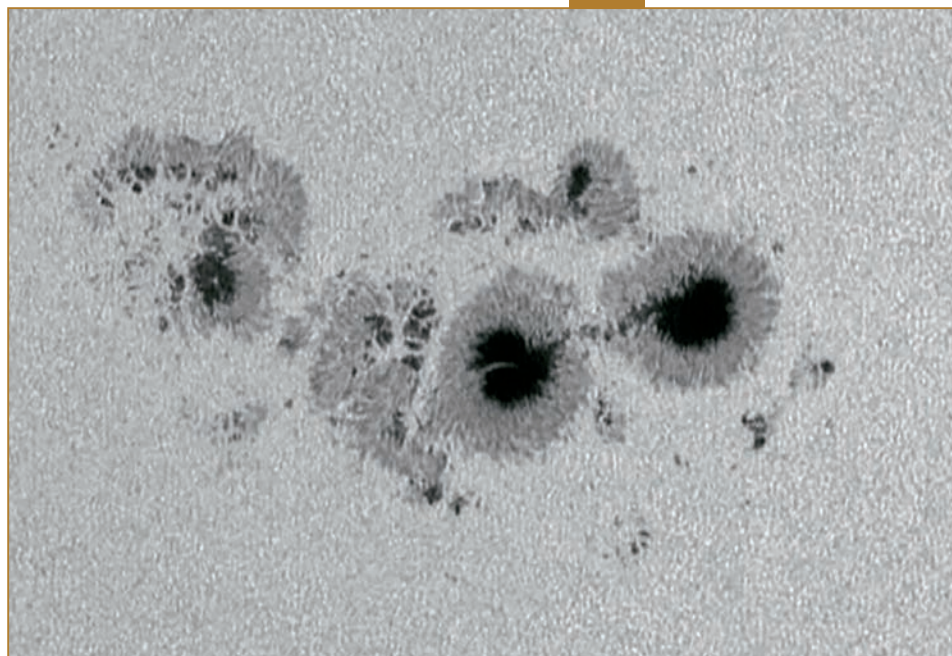
## L'hélioscope

Cet accessoire n'est pas nouveau : je me souviens d'en avoir utilisé un dans les années 1970 sur ma première petite lunette. Mais celui que j'utilise aujourd'hui n'a plus grand-chose à voir avec ceux de l'époque : il est mieux fini mais aussi plus lourd et plus volumineux (plus cher aussi : il faut compter plusieurs centaines d'euros). Il s'adapte sur l'instrument par un coulant mâle 50,8 mm (2 pouces), comme un renvoi coudé de ce diamètre. À sa sortie peut s'insérer soit un oculaire en coulant 31,75 mm ou 50,8 mm pour l'observation visuelle, soit un appareil pour la photographie, accompagné si nécessaire d'une lentille de Barlow destinée à agrandir l'image (voir chapitre 4).

Il comporte un prisme en verre installé selon un angle tel qu'il se produit une réflexion vitreuse sur une de ses faces, réduisant la quantité de lumière transmise à l'oculaire à environ 3 % ; le reste de la lumière solaire est évacué par une ouverture située sous l'hélioscope. Mais 3 % c'est encore beaucoup trop éblouissant : il faut affaiblir l'image d'un facteur 1 000 à 10 000. À cet effet, un jeu de filtres neutres de différentes densités, devant être installés devant l'appareil ou l'oculaire et pouvant être superposés, est fourni avec l'hélioscope.

La qualité d'image fournie par les meilleurs hélioscopes est encore supérieure à celle de l'Astrosolar : l'image est plus contrastée car la lumière diffusée est moindre. Mais ils ne sont adaptables que sur les

*Un hélioscope comporte un prisme à réflexion vitreuse et un jeu de filtres destinés à atténuer la lumière transmise à l'oculaire ou à l'appareil.*



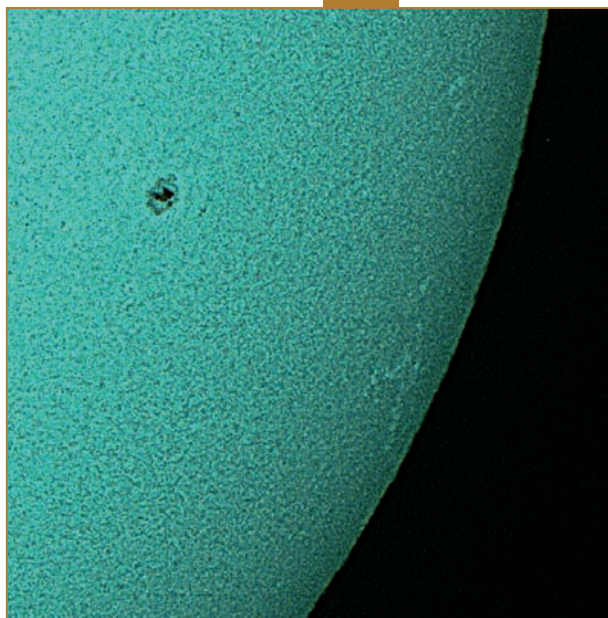
*Taches solaires photographiées avec une caméra vidéo et un filtre souple sur un télescope Maksutov-Cassegrain de 180 mm de diamètre.*

lunettes, toute utilisation sur un télescope est à proscrire. En effet, au contraire des filtres à l'ouverture, l'hélioscope est un système qui élimine la majeure partie de la lumière solaire après qu'elle a traversé tout l'instrument : le miroir secondaire d'un télescope risquerait d'être endommagé car il recueille toute la lumière concentrée par le miroir primaire. Avec une lunette, aucun risque que la lumière solaire n'échauffe une quelconque partie de l'instrument puisqu'elle ne fait que le traverser pour être finalement évacuée sous l'hélioscope.

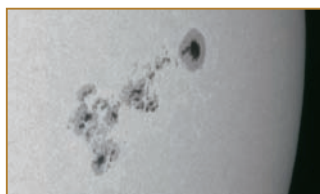
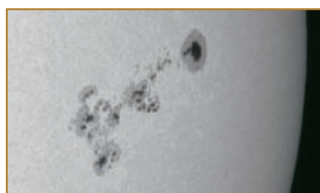
Un hélioscope provoque une inversion de l'image par effet miroir, il faudra donc effectuer l'opération inverse au traitement.

## Chromatisme et filtrage complémentaire

*Les lunettes achromatiques peuvent donner de très bons résultats en photographie solaire. En effet, la lumière ne manquant pas, nous pouvons éliminer le chromatisme résiduel de ces instruments à l'aide d'un filtrage additionnel (de plus, il semble que la réduction de la plage de longueur d'onde contribue à diminuer un peu les effets de la turbulence). La meilleure solution est l'utilisation d'un filtre vert à bande passante plus ou moins étroite, entre 100 et 10 nm (nous parlerons en détail des filtres à bande étroite au chapitre 7 car ils sont très utiles pour la photographie des nébuleuses). Naturellement, il s'utilise en complément des moyens de filtrage décrits ci-dessus ; sur un hélioscope, il peut remplacer un des filtres neutres additionnels. Certains amateurs utilisent des filtres à bande très étroite en complément de la version « photo » du film Astrosolar. Cette feuille est en effet proposée en deux versions : la version « visuelle », qui est destinée à l'observation à l'oculaire mais qui convient très bien aussi à la photographie, atténuant la lumière d'un facteur 100 000 (densité 5), et la version « photo », permettant des temps de pose extrêmement courts car elle n'atténue la lumière que d'un facteur 6 000 (densité 3,8). Elle doit être utilisée avec précaution, en s'assurant que l'indispensable filtre visuel complémentaire (filtre neutre de forte densité ou filtre à bande très étroite) élimine bien les infrarouges et les ultraviolets. Une alternative à l'utilisation d'un filtre vert est tout simplement l'extraction, au traitement, de la couche verte d'images prises avec un capteur couleur.*



Deux indices montrent que cette image a été surtraitée : comme le montre la photographie de la page 78, la granulation solaire doit s'estomper en s'approchant du limbe, par effet de perspective ; ce n'est pas le cas ici, preuve qu'il s'agit, au moins en partie, de bruit ; le liseré clair est le signe d'un effet de rebond dû au traitement (voir chapitre 5).



Ces deux images brutes sont parmi les plus nettes de la série dont elles sont extraites, mais la soustraction de l'une à l'autre (après recalage) met en évidence leur déformation relative due à la turbulence.



## Appareils, prise de vue et traitement

Une fois la question du filtrage résolue, peu de choses différencient la photographie solaire de celle des planètes et de la Lune. Les mêmes recettes fonctionnent en effet : vidéo pour l'obtention de la meilleure résolution et traitement par compositage puis masque flou ou ondelettes. Mais n'ayez pas la main trop lourde : rien ne ressemble plus à la granulation solaire que le bruit induit par un masque flou trop poussé ! Les photographies du Soleil en entier pourront se faire, comme pour la Lune, à l'APN ou à la caméra CCD en suivant les indications de focale du tableau de la page 76 (colonne de droite). Un appareil monochrome est tout à fait suffisant. Avec un capteur couleur, si le filtre présente une dominante colorée, il est préférable de ne pas passer l'appareil

en mode noir et blanc mais d'extraire, au traitement, la couche colorée correspondante. Avec le Soleil la lumière ne manque pas, on peut donc régler l'APN en faible sensibilité et la webcam en faible gain, ce qui procure un meilleur rapport signal sur bruit.

### Le problème de la turbulence diurne

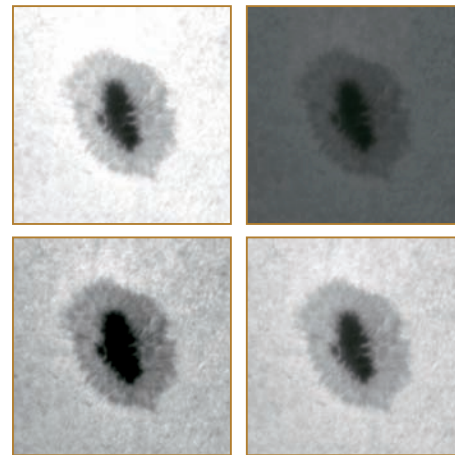
Il faut cependant tenir compte d'un handicap supplémentaire : la turbulence diurne est, en moyenne, plus importante que la turbulence nocturne, à cause du chauffage du sol par le Soleil. À tel point qu'il est très difficile de bénéficier régulièrement du plein potentiel d'un instrument de plus de 100 mm de diamètre : un télescope de grand diamètre, surtout s'il demande à être fréquemment collimaté (ce qui n'est guère facile de jour !) n'est donc pas la solution idéale pour le Soleil. En outre, alors que pour la photographie des planètes nous privilégions le moment où celles-ci sont hautes dans le ciel pour que leur faisceau lumineux traverse une moindre épaisseur d'atmosphère, cette tactique n'est pas toujours la plus payante pour le Soleil, surtout en été, lorsque celui-ci culmine très haut et chauffe énormément le sol. Les chances d'obtenir de bonnes images sont alors plus élevées en début ou en milieu de matinée. Mais ce ne sont que des probabilités : la turbulence reste imprévisible !

Avec un APN ou une caméra CCD, l'expérience montre qu'en présence de turbulence, une image sur vingt à trente sort du lot : n'hésitez donc pas à faire des séries de plusieurs dizaines d'images et à sélectionner la meilleure ensuite. Avec une webcam ou une caméra vidéo, il faut naturellement extraire de la vidéo les meilleures images à composer mais la turbulence vient compliquer la tâche : même si chacune d'elles est nette, les images sélectionnées sont souvent déformées, si bien qu'elles ne se superposent pas parfaitement.

Lors des prises en vue en webcam, il est préférable de régler les paramètres de telle manière que l'ombre des taches ne soit pas totalement noire, afin de ne pas risquer de perdre d'information et de voir apparaître des transitions disgracieuses entre cette ombre et la pénombre qui l'entoure. Le niveau de noir des taches sera ensuite finement réglé au traitement.

### L'orientation des images solaires

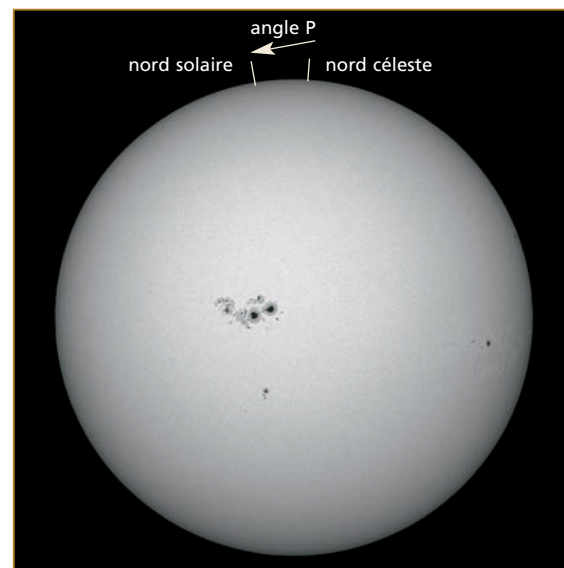
Lorsque l'instrument est installé sur une monture équatoriale, il est facile d'orienter l'appareil de telle manière que les côtés de l'image soient parallèles aux axes de la monture (ascension droite et déclinaison).



En webcam, des réglages appropriés de vitesse d'obturation, de luminosité et de gain permettent de profiter au mieux et sans perte d'information des 8 bits de dynamique des images de la séquence vidéo. De gauche à droite et de haut en bas : image trop claire (surexposition) ; image trop sombre ; ombre de tache trop sombre ; réglages corrects (aucune perte dans les basses et les hautes lumières).

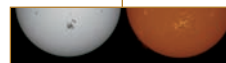
En effet, ce qui veut dire que l'image sera orientée selon les axes célestes (axe des pôles et équateur célestes). Mais elle ne sera pas orientée en concordance avec l'axe de rotation et l'équateur du Soleil. En effet, il faut tenir compte de deux facteurs : l'inclinaison de l'équateur solaire par rapport à l'écliptique et celle de l'écliptique par rapport à l'équateur céleste. L'angle entre l'axe des pôles solaires et l'axe des pôles terrestres varie ainsi au cours de l'année entre  $-26^\circ$  et  $+26^\circ$  environ. Cet angle est fourni, pour une date donnée, par les ouvrages d'éphémérides, par des sites spécialisés ou par certains programmes de type planétarium sous la dénomination « angle P ». Par convention, il est positif lorsque le pôle nord solaire est tourné vers l'est.

Si l'on souhaite orienter ses images selon les axes solaires, le plus simple est d'orienter l'appareil selon les axes célestes (nord en haut de l'image) et, au traitement, de faire tourner l'image d'un angle égal à l'angle P. Si l'instrument est sur monture altazimutale, il faut tenir compte, en supplément, de l'angle que fait l'équateur céleste avec l'horizon à l'instant de prise de vue.



Cette image a été obtenue en orientant l'appareil selon les axes célestes. À l'instant de prise de vue, l'angle P valait  $+6,9^\circ$ .



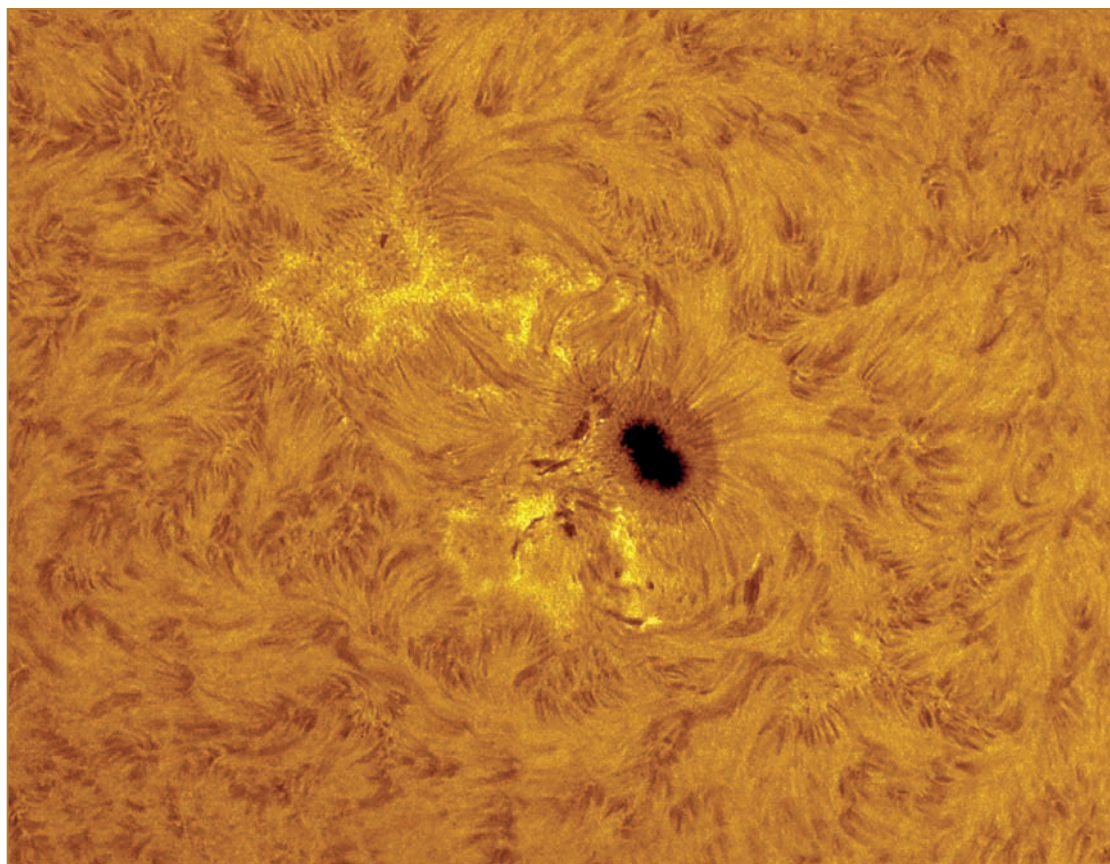
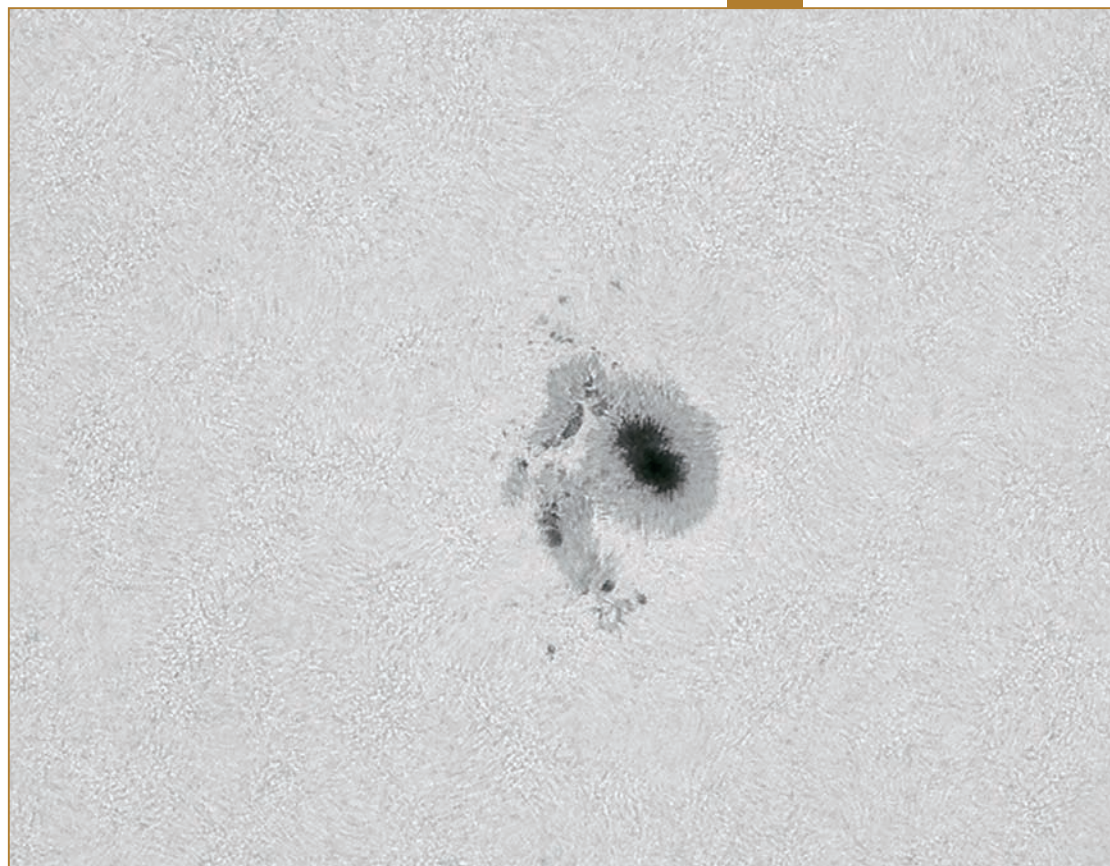


## Le Soleil en $H\alpha$

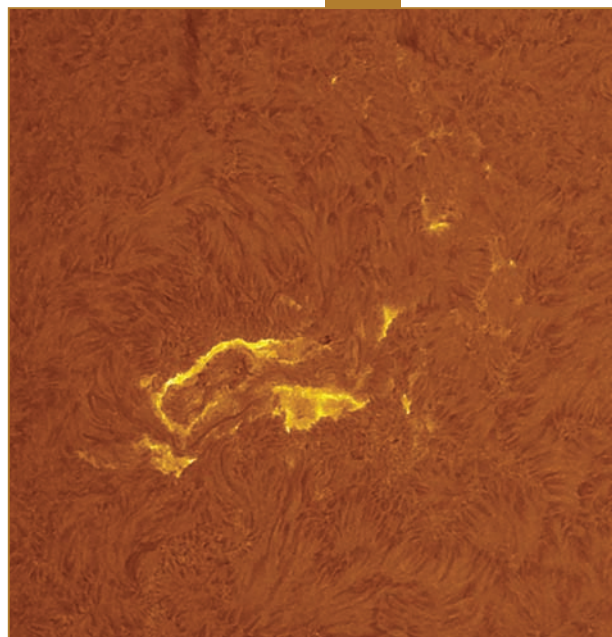
Nous verrons au chapitre 7 que la lumière appelée «  $H\alpha$  », émise par l'hydrogène dans le rouge, à la longueur d'onde de 656,3 nm, tient une place unique en photographie des nébuleuses.

Pour le Soleil aussi, ce rayonnement est de toute première importance. Il donne accès à la chromosphère, la couche de l'atmosphère solaire située juste au-dessus de la photosphère. Elle est très mince : 2 500 km d'épaisseur seulement. Les centres actifs y sont encore visibles, le façonnement des mouvements de matière par les champs magnétiques y étant particulièrement spectaculaire. De temps à autre, une éruption, phénomène de libération violente d'une quantité colossale d'énergie, survient dans un centre actif sous la forme de filaments très brillants ; sa durée de vie dépasse rarement quelques dizaines de minutes.

*Gros plan sur des centres actifs, à droite en lumière blanche et en dessous en  $H\alpha$ . Ces centres apparaissent considérablement plus étendus en  $H\alpha$ .*







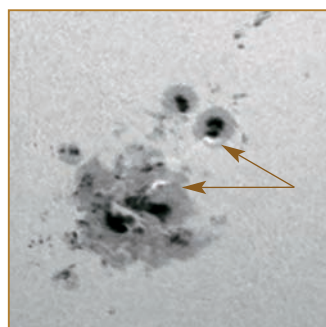
Le rayonnement  $H\alpha$  donne également accès aux célèbres protubérances. On peut en dégager deux types principaux :

- les protubérances quiescentes, largement majoritaires, sont des condensations de matière solaire plus dense et plus froide que l'atmosphère solaire dans laquelle elles baignent (la couronne) ; relativement stables, elles peuvent perdurer des jours, voire des semaines, puis disparaître brusquement ;
- les protubérances éruptives sont des éjections violentes de matière naissant d'éruptions. Elles sont plus brillantes que les protubérances quiescentes, leur durée est brève (de quelques minutes à quelques heures) et leur évolution très rapide, à tel point que des changements de morphologie peuvent parfois être notés en l'espace de quelques secondes.

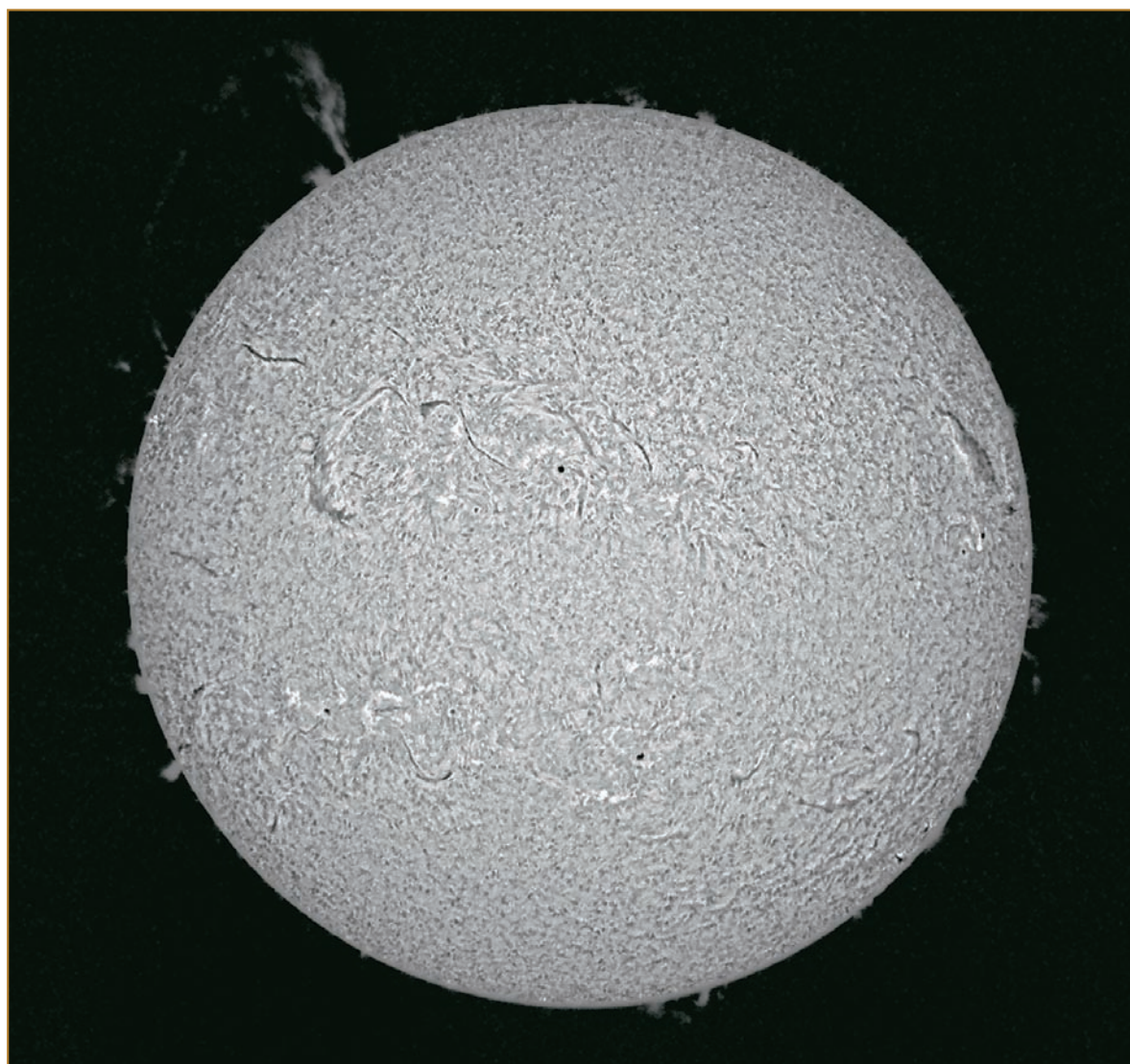
On trouve également des protubérances dites « actives », semblables aux quiescentes mais présentant des mouvements de matière plus rapides. Les protubérances quiescentes absorbent et rediffusent la lumière solaire. Elles apparaissent brillantes quand elles sont vues de profil, superposées au fond de ciel. Mais lorsqu'elles sont vues de dessus, superposées au disque solaire, elles apparaissent sombres, on les appelle alors « filaments ».

Le nombre de centres actifs, d'éruptions et de protubérances est, en moyenne, plus élevé en période de maximum d'activité solaire, tous les onze ans. Mais, en plus de dix ans d'observation solaire en  $H\alpha$ , pas une seule fois n'ai-je pu contempler au moins quelques petites protubérances, sans compter d'extraordinaires éruptions survenant même en période de minimum d'activité.

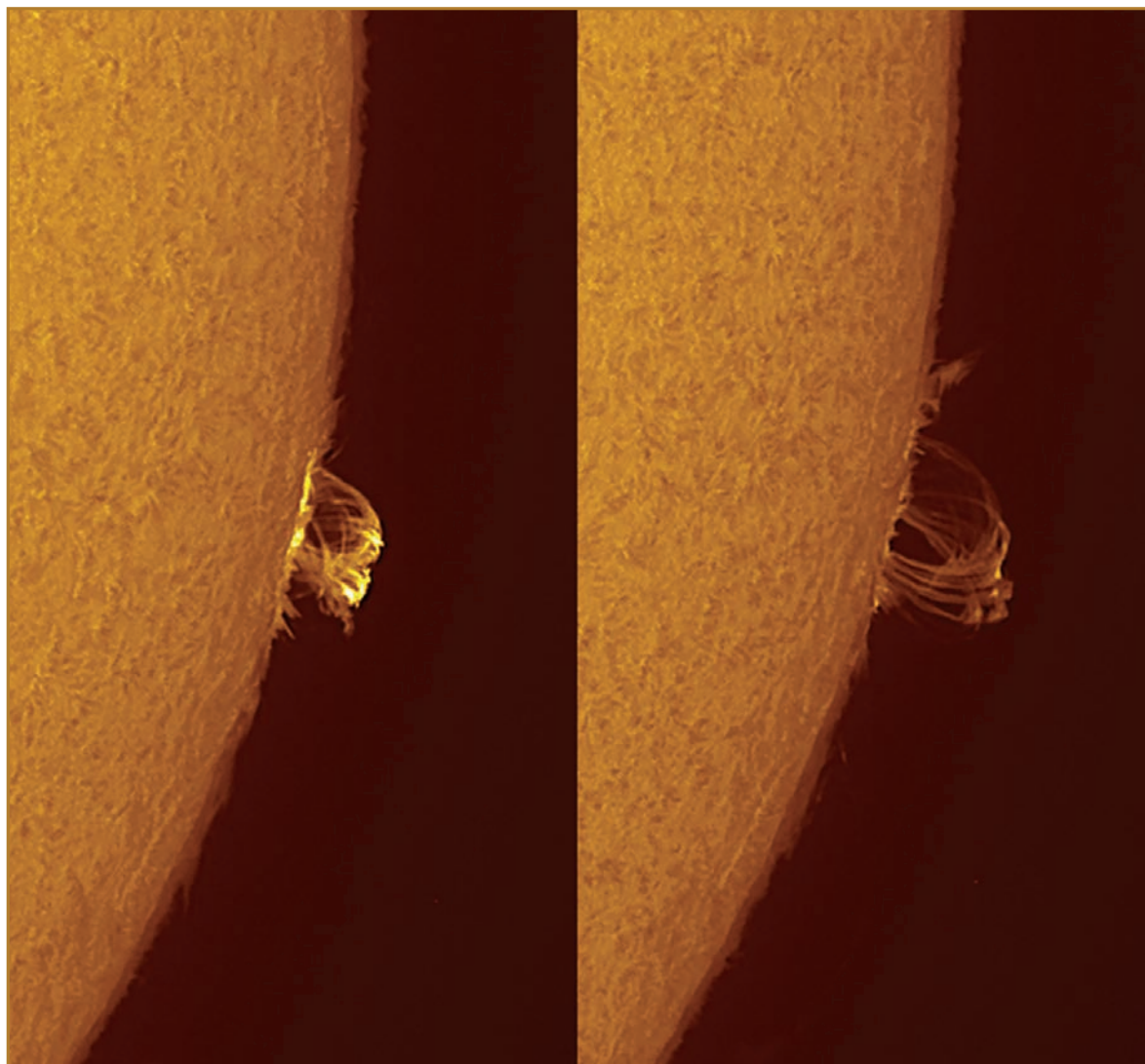
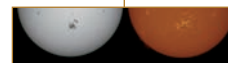
*Une grande protubérance quiescente s'élève à 250 000 km au-dessus de la chromosphère.*



*En haut, une éruption se répand sur plus de 200 000 km. Ci-dessus, l'éruption visible sur la photographie de la page 78 était également discernable en lumière blanche, ce qui est très rare.*







*Les boucles de champ magnétique sont bien mises en évidence par cette protubérance éruptive à évolution rapide. La fine frange visible au bord du Soleil n'est autre que la chromosphère vue en épaisseur.*

## Le filtre interférentiel $H\alpha$

Comme pour la lumière blanche, il faut éliminer la quasi totalité de la lumière solaire. Mais, en  $H\alpha$ , on ne filtre pas toutes les longueurs d'onde de manière uniforme ; on les élimine toutes sauf celle qui correspond à la raie  $H\alpha$ . Les dispositifs de filtrage sont donc totalement différents, bien plus complexes à fabriquer et donc plus coûteux.

Nous parlerons au chapitre 7 des filtres  $H\alpha$  permettant de photographier les nébuleuses dans ce rayonnement. Leur bande passante se situe entre 5 et 20 nm. Mais l'accès à la chromosphère et aux protubérances nécessite un filtre dont la bande passante est plusieurs dizaines de fois plus étroite, de l'ordre de 0,1 nm. Pour ces filtres, les constructeurs parlent même en Angströms (Å), 1 Å équivalant à 1/10 nm. Autrement dit, un filtre  $H\alpha$  pour le ciel profond et un filtre  $H\alpha$  pour le Soleil sont très différents, ils ne sont pas interchangeables.

La bande passante des filtres disponibles dans le commerce se situe entre 1,5 Å et 0,5 Å ; plus elle est étroite, plus le filtre est coûteux. Au-dessus de 1 Å, les protubérances sont bien visibles au limbe solaire, lorsqu'elles se détachent sur le fond de ciel. En revanche, la fine structure chromosphérique est peu ou pas discernable, elle ne

le devient qu'au-dessous de 1 Å. Au fur et à mesure que la largeur de bande passante diminue, cette structure chromosphérique et ses structures magnétiques sont de plus en plus contrastées, donnant de magnifiques vues des centres actifs. Les protubérances restent encore bien visibles, même si elles perdent un peu de luminosité.

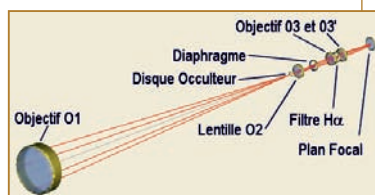
Tous les filtres du commerce se composent de deux éléments indissociables et vendus simultanément, l'un à mettre à l'entrée de l'instrument et d'un diamètre habituellement compris entre 40 mm et 90 mm, et l'autre à sa sortie, juste devant l'oculaire ou l'appareil. Ils s'adaptent sur la plupart des instruments, sauf sur les télescopes de Newton car la mise au point n'y est plus faisable.

Il existe deux procédés technologiques quelque peu différents mais ils donnent des vues tout à fait similaires. Pour celui des filtres de marque Coronado, c'est l'élément avant qui est le plus sophistiqué et le plus coûteux. Pour celui des autres fabricants (Daystar, qui fut longtemps le seul fabricant de filtres interférentiels  $H\alpha$  pour amateurs et qui a aujourd'hui cessé son activité, Solar Spectrum, Thousand Oaks, Lumicon), c'est l'élément arrière et le rapport F/D au niveau de cet élément doit alors être compris entre 20 et 30.

La position de la bande passante varie selon la température ambiante : pour compenser cet effet, la solution adoptée le plus cou-



En haut et au centre, deux dispositifs à installer sur instrument astronomique (respectivement de marque Thousand Oaks et Coronado, ce dernier étant ici monté sur une lunette). En bas, un instrument autonome pour l'observation du Soleil en  $H\alpha$ , le PST de Coronado.



Un coronagraph procure des vues lumineuses et contrastées des protubérances. Documents Sylvain & André Rondi.

ramment par les fabricants consiste en un système d'inclinaison du filtre à l'aide d'une petite molette. Une autre solution est de maintenir le filtre à température constante à l'aide d'un thermostat. Si les filtres  $H\alpha$  sont stockés à l'abri de l'humidité, leur durée de vie est supérieure à dix ans.

D'autres dispositifs sont destinés à l'observation du Soleil en  $H\alpha$  ou dans d'autres raies : le coronographe, le filtre Calcium K et le spectrohélographe. Ils sont peu répandus et leur mise en œuvre est relativement délicate.

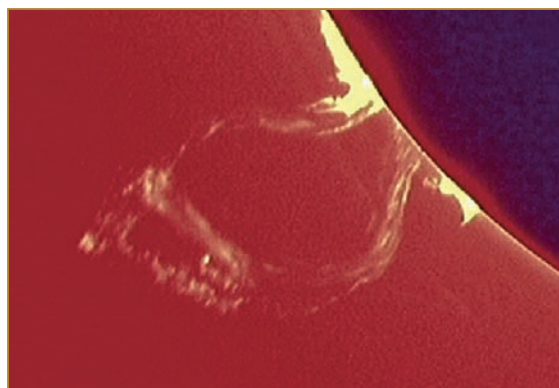
## Le coronographe

Nous avons vu que la réduction de la bande passante d'un filtre  $H\alpha$ , si elle permettait d'améliorer la vision de la chromosphère, provoquait une légère atténuation de la luminosité des protubérances. En effet, certaines parties de protubérance pouvant être animées de vitesses radiales importantes, la longueur d'onde de leur rayonnement est décalée (par effet Doppler-Fizeau) et peut sortir de la bande passante du filtre si celle-ci est très étroite. D'où l'idée d'utiliser un filtre de bande passante bien plus large, entre 4 Å et 20 Å, dont l'autre avantage est d'être nettement moins coûteux. Mais, avec un tel filtre, le disque solaire devient très éblouissant et doit impérativement être masqué.

Un coronographe est donc un instrument exclusivement dédié au Soleil, renfermant, en plus du filtre  $H\alpha$ , plusieurs lentilles et un petit cône métallique destiné à masquer très précisément le disque solaire. Il est mal nommé : il ne permet pas d'observer la couronne (sauf la basse couronne depuis des sites d'altitude privilégiés) mais les protubérances. Le coronographe fut, en fait, le premier instrument à permettre l'observation des protubérances, avant que la technologie ne permette la fabrication en série de filtres  $H\alpha$  à bande très étroite.

Les coronographes soigneusement fabriqués par des artisans ou par des amateurs expérimentés donnent des images de protubérances très lumineuses et contrastées.

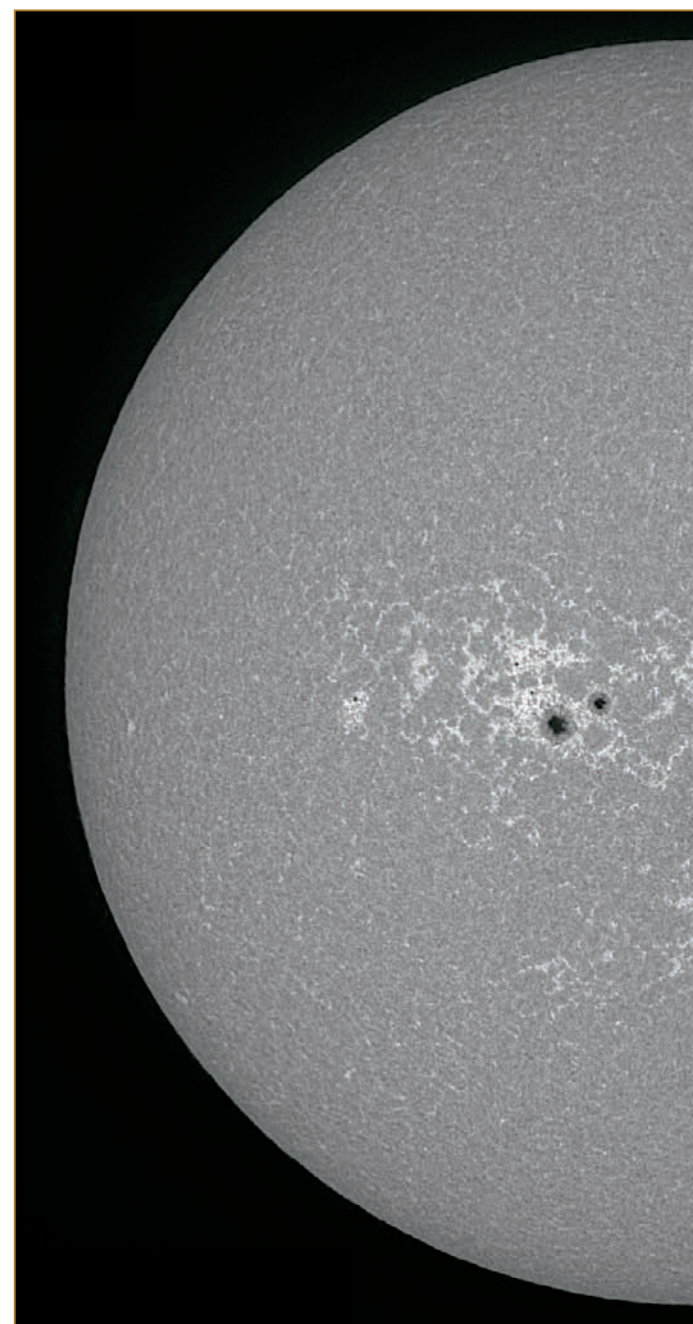
Le disque solaire devant être masqué continuellement, ces instruments réclament impérativement une monture équatoriale mise en station avec grande précision. Ils sont également moins tolérants que les filtres interférentiels  $H\alpha$  : alors que ceux-ci peuvent se contenter d'un ciel un peu brumeux ou même très légèrement voilé, le coronographe nécessite un ciel très transparent et qui soit bleu même à proximité du Soleil.



## Le filtre Calcium K

Il n'y a pas que la raie  $H\alpha$  qui soit intéressante sur le Soleil. Il y a aussi la raie K du Calcium, dans l'ultraviolet à 393,3 nm. Elle permet d'observer la région intermédiaire entre la photosphère et la chromosphère. Les filtres Calcium K sont destinés à mettre en évidence les zones actives et, lorsqu'il s'en produit, des éruptions. Mais ces filtres sont à l'heure actuelle très peu répandus chez les amateurs car ils sont pratiquement opaques à la lumière visible et ne sont donc pas utilisables pour l'observation visuelle. Ils nécessitent un appareil à capteur monochrome.

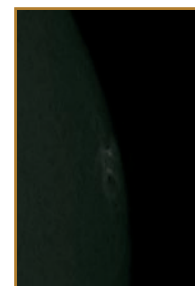
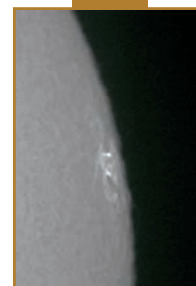
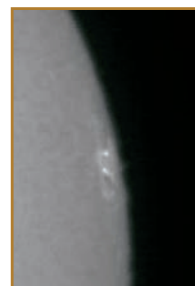
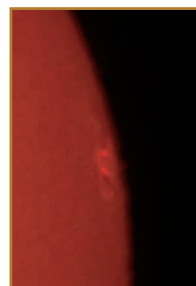
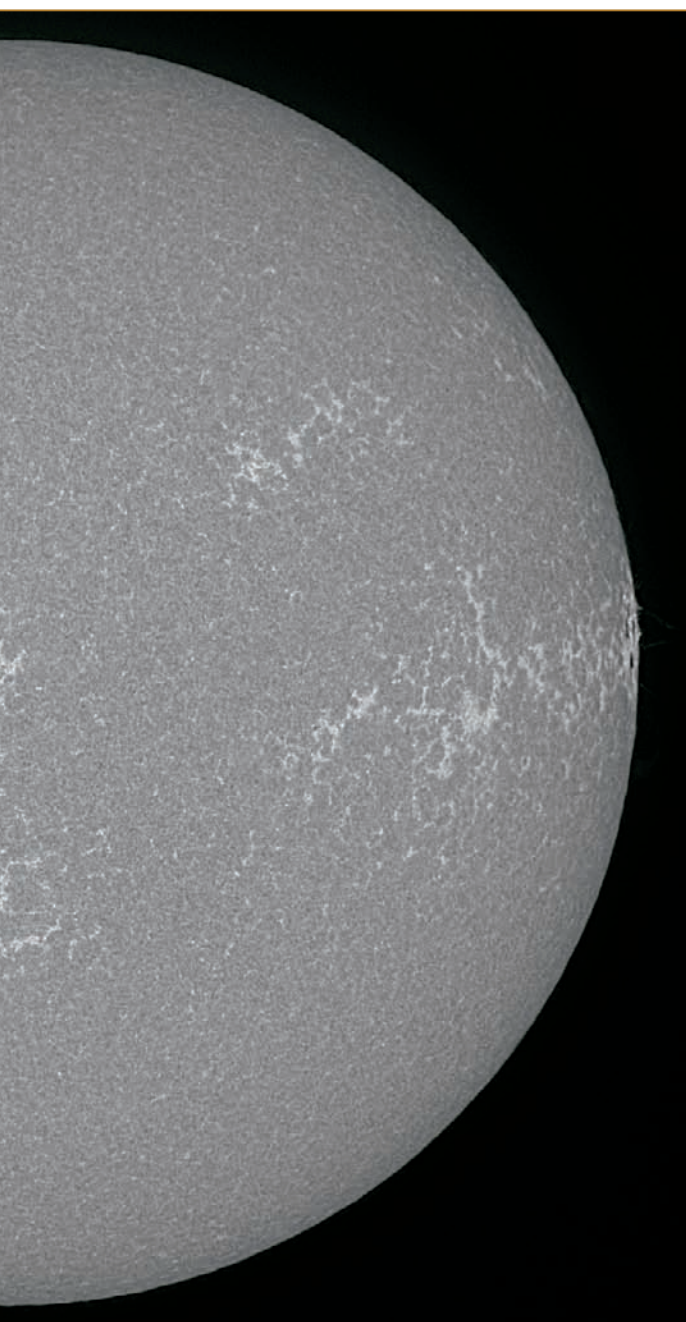
Ci-dessous, image obtenue avec une lunette de 55 mm de diamètre équipée d'un filtre Calcium K de 3 Å et une caméra CCD. Photographie Christian Viladrich.



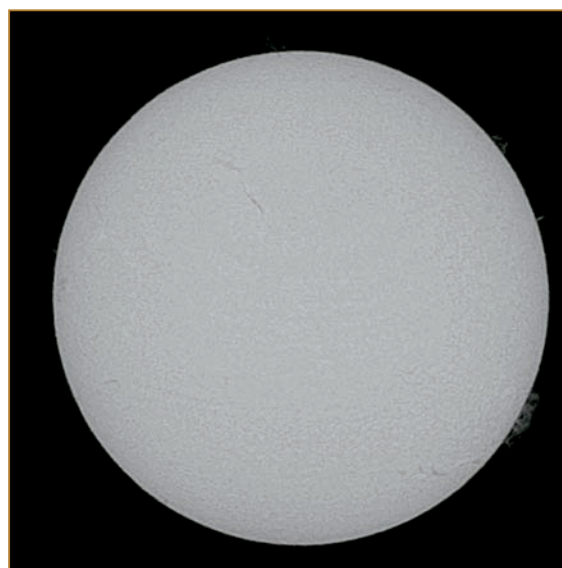


## Appareils, prise de vue et traitement

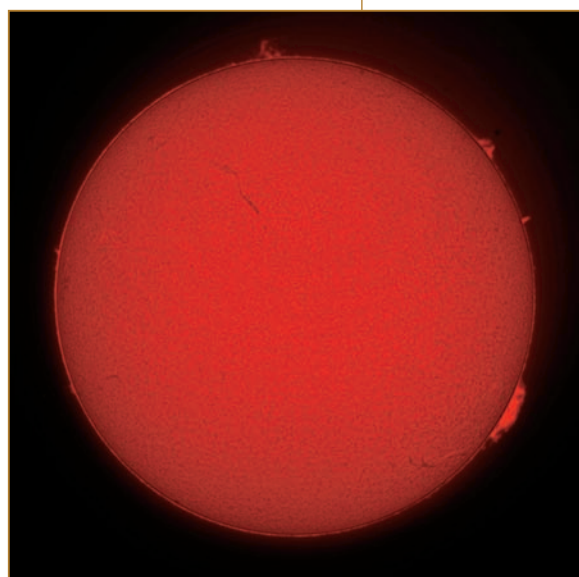
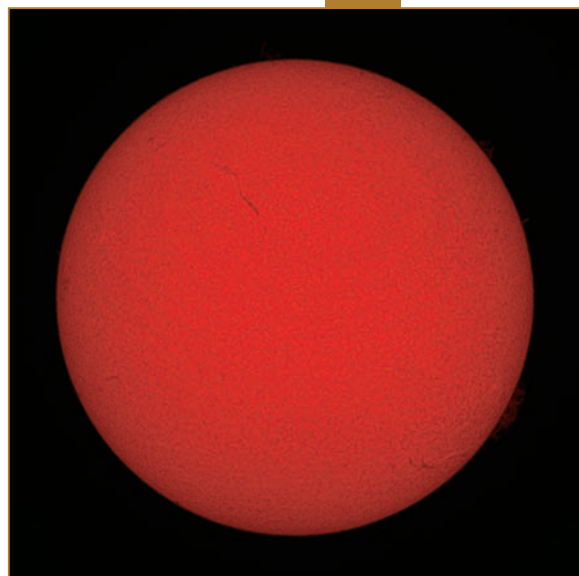
Comme pour les nébuleuses (voir chapitre 7), la lumière H $\alpha$  du Soleil est handicapante pour les capteurs couleur. En effet, seul un photosite sur quatre la perçoit. De plus, il s'agit d'un rouge profond auquel ils sont généralement peu sensibles. On peut considérer qu'un capteur couleur recueille environ vingt fois moins de lumière H $\alpha$  qu'un capteur monochrome ! Il en résulte une perte de résolution importante et, à temps de pose égal, un déficit considérable en rapport signal sur bruit. L'amateur souhaitant suivre l'activité solaire et réaliser régulièrement des photographies en H $\alpha$  a tout intérêt à se procurer un appareil à capteur monochrome. Néanmoins, des photographies occasionnelles peuvent être obtenues à l'aide d'un appareil à capteur couleur.



De gauche à droite : image extraite d'une vidéo obtenue avec une webcam à capteur couleur ; couche rouge extraite de l'image précédente ; image extraite d'une vidéo obtenue avec la même webcam mais dotée d'un capteur monochrome : le contraste et la résolution sont plus élevés, avec en prime un temps de pose divisé par quatre. À droite, le réglage de la webcam couleur a été positionné sur « noir et blanc » : l'image est très sombre et peu contrastée, ce qui s'explique par le fait que la couche rouge a été moyennée avec les couches bleue et verte sur lesquelles... il n'y a rien.



Comme le montrent ces couches rouges issues d'un APN reflex, sur le Soleil aussi le format RAW (en haut) est à préférer au format JPEG (en bas) pour lequel le contraste des détails du disque est très réduit. La compression de l'image JPEG affecte en premier lieu la composante couleur d'une image (sa chrominance, voir chapitre 7) et se révèle particulièrement destructrice en H $\alpha$ .



## Disque ou protubérances ?

Il faut tenir compte du fait qu'au travers d'un filtre  $H\alpha$ , les protubérances quiescentes sont nettement moins intenses que le disque. Si l'on cherche seulement à mettre en évidence une belle protubérance, il suffit de régler le temps de pose pour celle-ci, quitte à surexposer le disque. Ou, si le temps de pose a été réglé pour le disque, de jouer sur les niveaux de l'image pour rehausser cette protubérance.

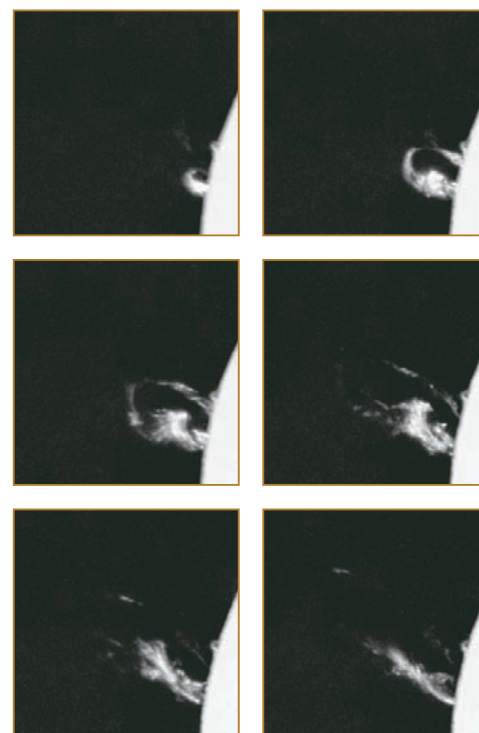
Mais si on veut obtenir une image où apparaissent à la fois le disque et les protubérances, il va falloir traiter les images différemment. Une première méthode consiste à sélectionner la zone extérieure au disque solaire, ce qui est très simple avec les logiciels de retouche et leurs fonctions de sélection par plage de couleurs, pour rehausser sa luminosité en jouant sur les courbes ou les niveaux. Une autre solution consiste à agir sur les basses lumières avec la fonction Tons Foncés/Tons Clairs de Photoshop. On peut également combiner, à l'aide de sélections et de calques, deux photographies de temps de pose différents. Le principe général est de copier l'image des protubérances en tant que calque par-dessus l'image du disque et d'effacer, à l'aide de l'outil gomme ou des fonctions de sélection par plage de couleurs, la partie centrale surexposée du calque supérieur. La principale difficulté consiste à obtenir une transition entre le disque et la zone externe qui ne semble pas trop artificielle.

*En haut, le temps de pose a été réglé pour le disque : les protubérances sont difficilement visibles. Au centre, il a été quadruplé : les protubérances sont bien visibles mais le disque est surexposé. Dans Photoshop, la seconde image a été copiée en calque sur la première, puis le disque surexposé a été effacé à l'aide de l'outil Gomme circulaire (en lui donnant un diamètre égal à celui du disque solaire). Avec un APN, il est possible de réaliser cette composition à partir d'une unique photographie exposée pour les protubérances, en utilisant la couche verte de l'image (qui recueille un peu de  $H\alpha$  tout en bénéficiant d'une meilleure résolution) en tant qu'image du disque.*

## Colorisation des images et animations

Les photographies obtenues avec un capteur monochrome sont naturellement en noir et blanc ; elles peuvent le rester, c'est d'ailleurs de cette manière que les détails sont le mieux perçus à l'écran. Mais de nombreux amateurs préfèrent, pour des raisons esthétiques, coloriser les images. La méthode est simple : dans un logiciel de retouche, passer l'image en mode « 16 millions de couleurs » et jouer sur les courbes de chacune des couches RVB. La logique voudrait que la teinte choisie soit le rouge pur, mais son rendu sur un écran d'ordinateur ou sur une imprimante n'est pas très satisfaisant. Une teinte plus ou moins orangée, virant éventuellement au blanc pour les détails très brillants, est souvent recherchée. Pour ce faire, il faut écraser presque complètement la courbe du bleu et écraser plus ou moins fortement la courbe du vert. Les photos des pages 83 et 85 ont été colorisées de cette manière.

Le Soleil en  $H\alpha$  est certainement l'astre de prédilection pour la réalisation d'animations (sujet que nous avons abordé au chapitre précédent). Pour les phénomènes rapides tels que les éruptions et les protubérances éruptives, il est conseillé de ne pas dépasser la minute entre deux images successives si l'on veut obtenir une bonne fluidité de mouvement. Pour les protubérances quiescentes, plus lentes, un intervalle de plusieurs minutes est généralement suffisant.

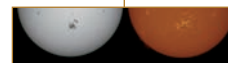


Quelques images d'une protubérance éruptive très rapide extraites d'une animation, prises à quatre minutes d'intervalle.

## Les PLU solaires

La réalisation de PLU solaires (voir chapitre 3) fait partie des particularités de la photographie du Soleil. En cas d'emploi d'un filtre à l'ouverture, celui-ci peut être retiré de l'instrument préalablement pointé vers un nuage ou vers un mur blanc. Mais un hélioscope ou un filtre  $H\alpha$  rend les choses plus délicates car il n'est pas question de le retirer pour la PLU. Une solution couramment adoptée est de défocaliser fortement l'instrument et de viser le centre du disque solaire. Si l'appareil est une webcam ou une caméra vidéo, on pourra surcroît faire bouger très légèrement l'instrument pendant la prise de la séquence de PLU.





# Les éclipses de Soleil

Que ce soit en lumière blanche ou en  $H\alpha$ , une éclipse partielle de Soleil se photographie exactement comme un Soleil non éclipsé. Il en va de même pour les éclipses annulaires qui ne sont, après tout, que des éclipses partielles un peu particulières. Naturellement, les phases partielles d'une éclipse totale entrent également dans cette catégorie.

Le cas de la phase de totalité d'une éclipse totale est bien différent. Durant cette phase, le disque solaire est entièrement masqué par la Lune et seule la couronne solaire est visible, généralement accompagnée de quelques protubérances roses. Si l'un des filtres décrits ci-dessus a été utilisé pour l'observation de la phase partielle de l'éclipse, il doit être retiré au début de la phase de totalité car la lumière n'est plus dangereuse ni même éblouissante (prévoyez une lampe frontale !).

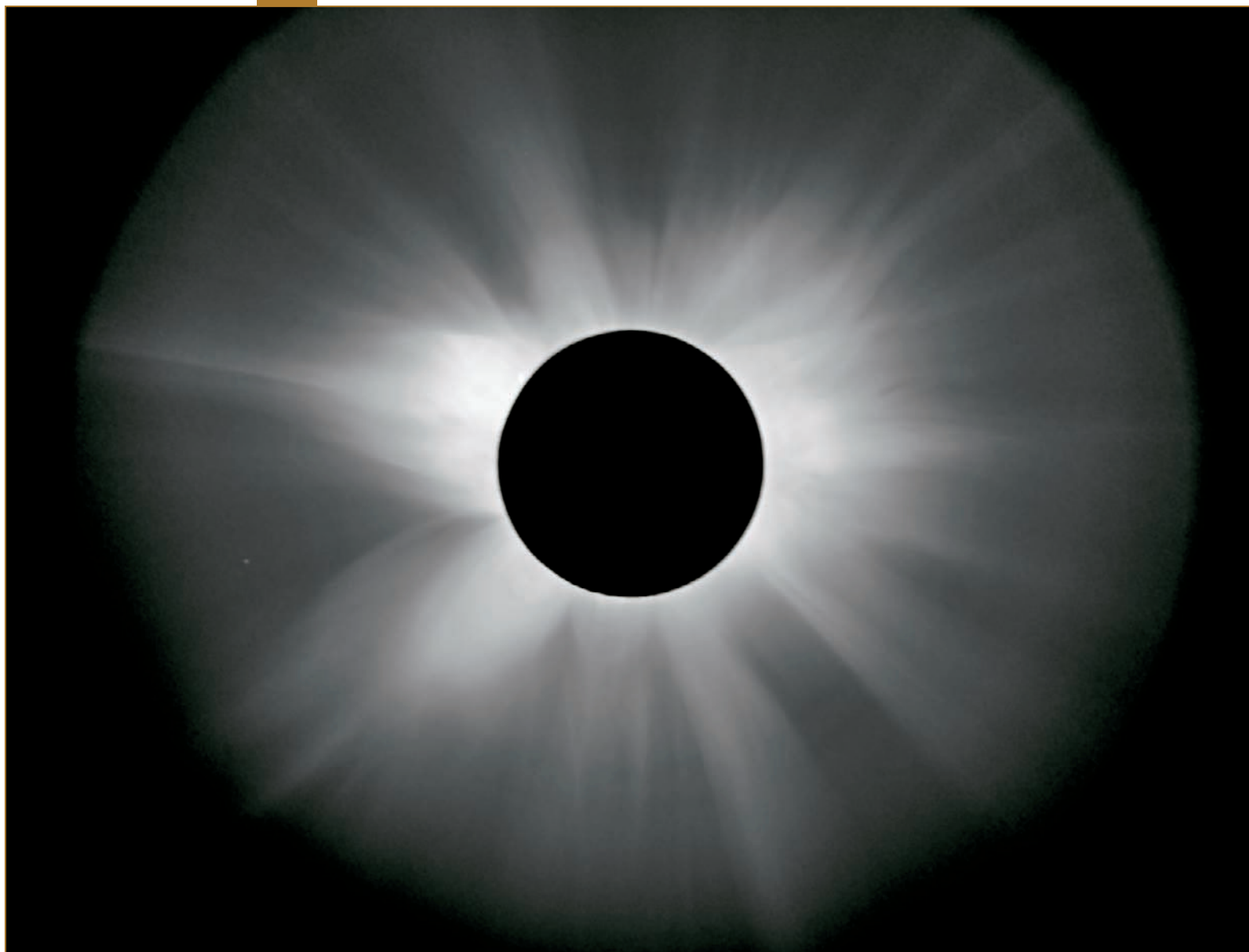
En pratique, les phases partielles doivent donc être photographiées avec un filtre à l'ouverture car celui-ci peut être rapidement retiré en début de totalité et remplacé en fin de totalité sans modification de la mise au point de l'instrument, ce qui n'est pas le cas des hélioscopes et des filtres  $H\alpha$ . En cas d'utilisation d'une monture équatoriale (voir chapitre suivant), on l'aura de préférence mise en station la nuit précédente afin de ne pas avoir à se préoccuper du recadrage régulier du Soleil dû à un alignement polaire approximatif effectué de jour à la boussole.

Naturellement, pendant la phase de totalité c'est la couronne qui retient toute notre attention : une éclipse totale est la seule véritable occasion de l'observer et de la photographier. La focale de l'instrument indiquée dans la colonne de droite du tableau de la page 76 doit être divisée par un facteur 2 à 4 pour permettre un cadrage plus large englobant la couronne. Les webcams ne sont pas bien adaptées à cause de leur petit nombre de photosites, on leur préférera un APN, si possible en mode RAW, ou une caméra CCD si son temps de lecture n'est pas trop long car, lors d'une éclipse, le temps est compté !

*Une éclipse annulaire (ici celle du 3 octobre 2005 photographiée depuis l'Espagne à l'aide d'un hélioscope) n'est qu'un cas particulier d'éclipse partielle. À l'instant précis du troisième contact, une dépression du relief lunaire laisse entrevoir un très fin arc solaire.*



*Un temps de pose court, voisin de celui utilisé pour photographier la Pleine Lune avec le même montage photographique, permet de mettre en évidence (à gauche) la basse couronne, les protubérances et, au moment où les derniers rayons du Soleil disparaissent, les éblouissants grains de Bailey et une partie de la chromosphère (à droite). Éclipse totale du 29 mars 2006 (Égypte).*



*L'éclipse totale du 21 juin 2001 observée depuis l'Angola, photographiée avec un APN à 2 millions de pixels en montage afocal derrière une lunette de 70 mm de diamètre. Sept images de la couronne ont été obtenues avec des temps de pose croissants. Elles ont été recentrées et superposées en sélectionnant sur chaque image la partie de la couronne bien exposée et en combinant ces différentes parties avec des transitions graduelles.*

La photographie de la couronne est extrêmement délicate car ses structures sont très ténues et, surtout, elle présente une variation colossale de luminosité au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bord solaire : sa luminosité est comparable à celle de la Pleine Lune à proximité immédiate du bord solaire, mais elle décroît très vite pour diminuer d'un facteur 100 à 1 000 un diamètre solaire (30') plus loin. La couronne solaire est l'objet céleste qui présente les écarts de luminosité les plus importants, et obtenir une image de la couronne qui évoque ce que nous voyons en l'observant en direct n'est pas facile ! Une image unique ne peut pas montrer l'ensemble de la couronne, il faut en réaliser plusieurs en faisant varier le temps de pose progressivement ; chaque image comportera ainsi une partie bien exposée de la couronne. Elles seront ensuite combinées dans un lo-

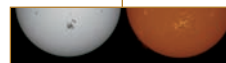
giciel de retouche à l'aide de calques, selon la méthode décrite plus haut pour la composition d'images du disque solaire et des protubérances photographiées en H $\alpha$ .

### Préparez vos prises de vue !

*Une éclipse totale ne dure que quelques minutes et se déroule dans une ambiance d'émotion et de fébrilité extrêmes ; vos prises de vue, pour avoir une chance d'aboutir, doivent avoir été soigneusement répétées à l'avance (par exemple sur la Pleine Lune) et doivent être simplifiées et automatisées au maximum afin de vous laisser quelques instants de pure contemplation visuelle.*

*D'une manière générale, pour tout événement rare tel qu'une éclipse, une occultation de planète ou une pluie d'étoiles filantes, faites des essais préalables dans des conditions aussi proches que possible de l'événement. J'en ai fait la malheureuse expérience à plusieurs reprises : astrophotographie et improvisation font rarement bon ménage !*

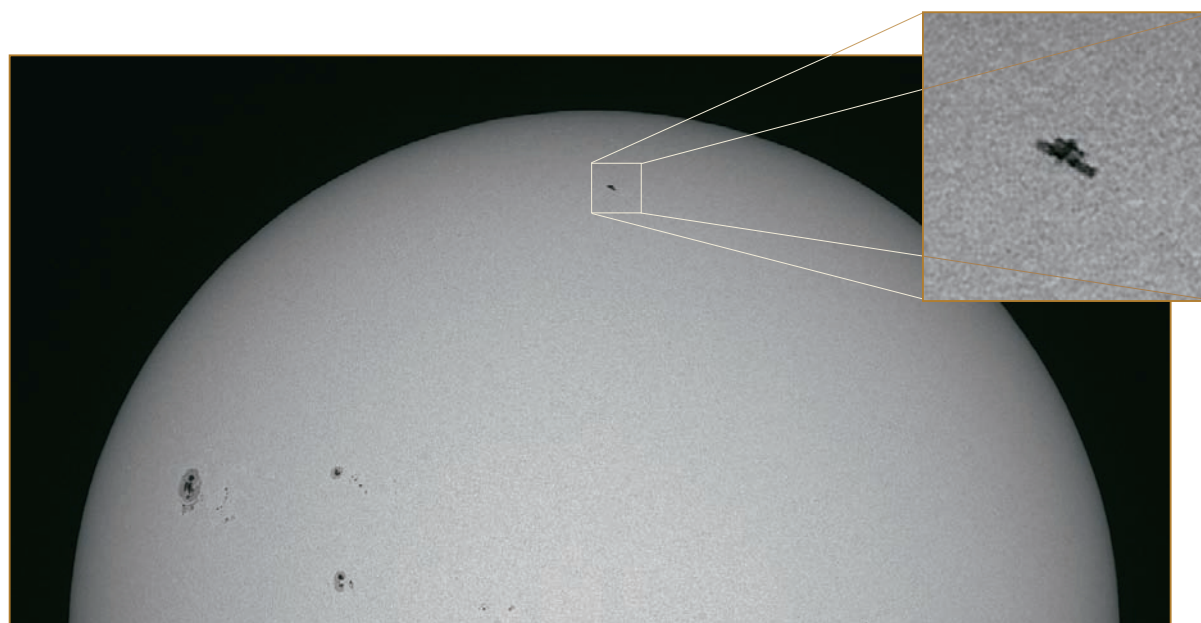
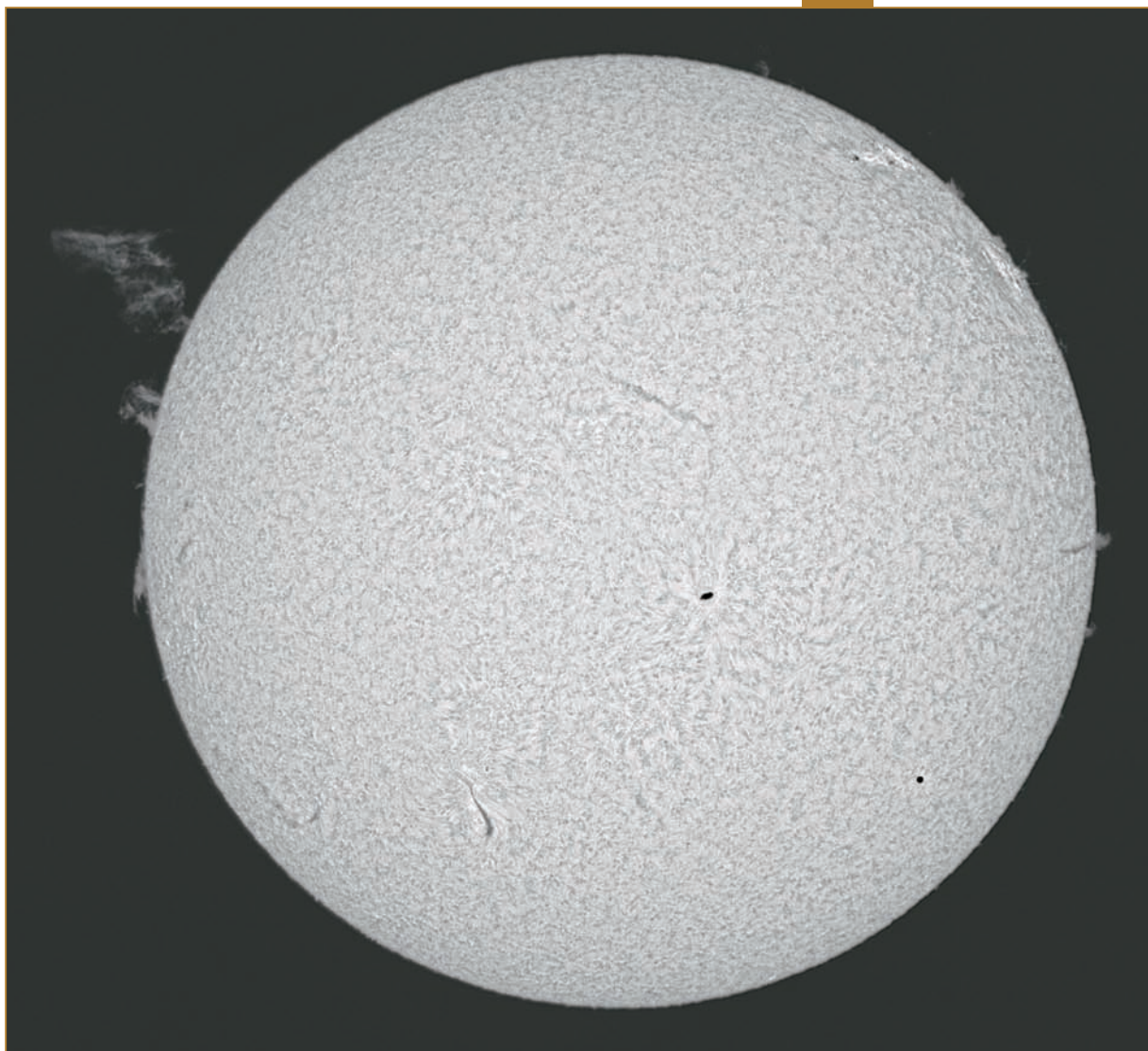




## Les transits

Parmi les planètes, seules Mercure et Vénus sont susceptibles de passer devant le disque solaire. Un transit dure plusieurs heures : le temps est donc moins compté que pour une éclipse totale mais, comme pour ces dernières, la zone de visibilité ne couvre pas forcément votre lieu de résidence. Leur photographie ne présente pas de spécificité par rapport à la photographie solaire habituelle. Ici aussi, de spectaculaires animations peuvent être réalisées.

*Transit de Mercure  
du 20 mai 2001,  
photographié en H $\alpha$ .  
La petite planète est  
visible sous la forme  
d'une minuscule  
tache noire en bas  
à droite du disque solaire.  
Il y a, en moyenne,  
13 transits de Mercure  
par siècle.*



*Il n'y pas que Mercure et Vénus  
qui peuvent transiter devant le Soleil,  
il y aussi l'ISS (Station spatiale  
internationale). Son envergure  
d'une centaine de mètres lui donne  
une dimension angulaire de 10"  
à 50" selon sa distance à l'observateur.  
La durée du transit ne dépassant pas  
deux secondes, le moyen le plus sûr  
de le photographier est de réaliser une  
vidéo autour de l'instant du transit.  
L'ISS a ici été figée grâce à une pose  
de 1/6 000 s avec un APN reflex  
sur une lunette de 2 000 mm de focale  
équipée d'un hélioscope.  
Des sites Internet savent prédire  
les dates et heures de transit  
devant le Soleil ou la Lune  
pour un lieu donné.*







## Le ciel profond

Sont regroupés sous le terme « ciel profond » tous les objets ou groupes d'objets autres que la Lune, le Soleil et les planètes : constellations, amas d'étoiles, nébuleuses, galaxies. Nous y inclurons aussi les comètes et les astéroïdes car ces objets, même s'ils font partie du Système solaire, se photographient de la même manière que les nébuleuses ou les étoiles.

*C'est le rayonnement de l'hydrogène ( $H\alpha$  et, dans une moindre mesure,  $H\beta$ ) qui donne à cette région des nébuleuses North-America et Pélican, dans la constellation du Cygne, sa teinte orangée caractéristique. Photographie obtenue avec une caméra CCD grand format sur une lunette de 530 mm de focale.*



## Les instruments pour la photographie du ciel profond

Les critères de choix d'un instrument destiné au ciel profond, de même que les qualités qui lui sont demandées, ne sont pas exactement les mêmes que ceux requis pour la photographie planétaire. Une des raisons principales est que les objets de ciel profond sont beaucoup moins lumineux que les planètes et qu'ils nécessitent des temps de pose compris entre plusieurs dizaines de secondes et plusieurs dizaines de minutes, voire plusieurs heures pour des objets très faibles. De plus, certains d'entre eux sont de petite dimension angulaire (inférieure à la minute d'arc) tandis que d'autres présentent une envergure de plusieurs degrés, sans compter les constellations dont les dimensions se mesurent en dizaines de degrés.

### Rapport F/D et focale

En photographie planétaire, nous agrandissons la focale de l'instrument pour bénéficier de toutes ses capacités de résolution. En ciel profond, la démarche consiste plutôt à choisir les objets photogra-

*Les photographies des astres présentées dans les livres ne rendent pas toujours bien compte de la différence de taille angulaire entre une planète et les objets de ciel profond les plus couramment photographiés. Malgré sa netteté apparente, cette image de M33 obtenue à l'aide d'un instrument de 750 mm de focale présente une résolution angulaire bien plus faible que celle de l'image de Jupiter page 63, ainsi que le démontre leur comparaison à la même échelle. Il faut toujours distinguer la finesse apparente d'une image (ce que certains appellent son « piqué ») de sa finesse réelle en termes de résolution angulaire.*

La caractéristique commune à tous les objets de ciel profond est leur faible luminosité en comparaison de celle des planètes principales et de la Lune. Une pose de quelques secondes montre les galaxies telles qu'elles sont observables dans un instrument d'amateur : sous la forme de taches floues sans bras spiraux visibles. Pour enregistrer ceux-ci, un temps de pose de plusieurs dizaines de secondes à plusieurs dizaines de minutes est nécessaire.

Cette propriété a d'importantes conséquences sur l'équipement employé et la manière de l'utiliser. Par exemple, l'astrophotographe de ciel profond affectionne particulièrement les instruments et les objectifs à petit rapport F/D, ainsi que ceux offrant une bonne qualité d'image sur tout le champ couvert par le capteur. Il préfère les appareils les plus sensibles et recherche les lieux éloignés de toute lumière parasite. La monture équatoriale est aussi un sujet d'attention extrêmement important : elle doit être stable, facile à aligner précisément sur le pôle céleste et elle doit procurer une bonne qualité de suivi. Dans certains cas, l'astrophotographe sera contraint d'effectuer un guidage, c'est-à-dire de corriger le suivi en temps réel pendant les poses : en numérique, grâce à une meilleure sensibilité due en particulier à l'absence de défaut de réciprocity qui affecte le film argentique, les poses peuvent être plus courtes mais, revers de la médaille, un petit écart de suivi est bien plus rapidement enregistré sur l'image.







phés en fonction de la focale de l'instrument dont on dispose, c'est-à-dire, de manière très schématique : Voie Lactée et constellations pour les objectifs photo ; amas ouverts, nébuleuses, grandes galaxies et groupes de galaxies pour les téléobjectifs et les instruments astronomiques de courte focale ; galaxies individuelles, amas globulaires et nébuleuses planétaires pour les focales plus longues.

Autrement dit, l'instrument universel permettant de photographier tous les objets de ciel profond n'existe pas : lors du choix d'un instrument destiné à ce type de photographie, comme lors du choix d'un objectif en photographie courante, la catégorie d'astre doit être prise en considération afin d'en déduire la focale appropriée. Par exemple, une lunette de 500 mm de focale équipée d'un reflex couvrira la plupart des grandes nébuleuses diffuses mais donnera des nébuleuses planétaires et des petites galaxies une image de petite taille. Dans ce cas, on peut imaginer d'allonger la focale de l'instrument, mais cette solution présente un inconvénient important qui la rend pratiquement inapplicable : le rapport F/D augmente, ce qui est particulièrement défavorable pour le temps de pose si l'on veut conserver un bon rapport signal sur bruit. En effet, sur un astre donné, doubler le rapport F/D oblige à quadrupler le temps de pose. Sauf cas exceptionnel, on ne photographie pas les objets de ciel profond à un rapport F/D de 15 ou 20 : les systèmes grandissants (oculaires et lentilles de Barlow), pourtant si utiles en planétaire, ne sont pratiquement jamais employés en ciel profond ! Pour pouvoir travailler à focale importante tout en conservant un rapport F/D raisonnable, il faut se tourner vers un instrument de plus grand diamètre qui sera peut-être plus coûteux, sûrement plus encombrant et nécessitant une monture plus conséquente. En revanche, un tel instrument pourra donner une image plus détaillée des nébuleuses planétaires et des galaxies mais son champ sera trop réduit pour embrasser les grandes nébuleuses diffuses.

Le cas des étoiles est différent de celui des autres astres de ciel profond (nébuleuses et galaxies). Même les plus grands télescopes terrestres ne peuvent en montrer des détails de surface, la dimension angulaire de ces astres étant infinitésimale. Allonger la focale de l'instrument ne permet donc pas d'en obtenir plus de détails, sauf s'il s'agit de séparer les étoiles du cœur d'un amas globulaire. Pour une étoile, tant que son image s'étale sur un petit nombre de pixels, le paramètre primordial n'est pas le rapport F/D mais le diamètre de l'instrument. On peut considérer en première approximation qu'augmenter le diamètre de l'instrument de 60 % permet, à appareil et temps de pose égaux, de gagner une magnitude. La détermination théorique de la magnitude stellaire limite pour une configuration donnée n'est pas simple car elle dépend d'une foule de paramètres, dont entre autres : l'ouverture de l'instrument, la sensibilité spectrale et le rendement quantique du capteur, le bruit de lecture, la présence éventuelle de filtres, la pollution lumineuse, la finesse des images. Vous pouvez considérer, à titre d'ordre de grandeur, qu'un télescope de 200 mm utilisé avec une caméra CCD monochrome permet, dans un ciel non pollué, d'atteindre la magnitude 19 à 20 sur les étoiles en une dizaine de minutes. En raison de son capteur couleur, diminuez ce nombre d'une à deux magnitudes s'il s'agit d'un APN. Diminuez-le de plusieurs magnitudes en ciel urbain.

D'autres raisons sont susceptibles de nous inciter à travailler avec une focale pas trop longue. À commencer par la précision du suivi des astres : s'il n'est pas très difficile d'obtenir un excellent suivi avec un téléobjectif de 200 mm installé sur une monture équatoriale, il en est tout autrement avec un télescope de 2 m de focale ! Nous verrons par la suite que les exigences de suivi, et par conséquent les contraintes techniques qui en découlent, croissent en effet rapidement avec la focale de l'instrument.

Une autre raison a trait à la turbulence. Dès lors que les poses excèdent le dixième de seconde, ce qui est bien sûr toujours le cas en ciel profond, il n'est plus possible de figer partiellement les images et de bénéficier de trous de turbulence comme en photographie pla-

nétaire. En longue pose, l'agitation de l'image est intégrée et donne des étoiles dont la largeur sur la photographie est, la plupart du temps, de plus de 2", soit une dimension nettement supérieure à celle de la figure d'Airy. Lorsque l'agitation est importante, agrandir l'image en augmentant la focale conduit à agrandir le flou dû à la turbulence, sans gain significatif sur la quantité de détails enregistrés. À longue focale, même si la mise au point et le suivi sont maîtrisés, nous retrouvons la limitation à laquelle nous nous heurtons en planétaire : la turbulence.

Pour toutes ces raisons, on ne peut s'aventurer dans la photographie du ciel profond à un échantillonnage plus fin que 1" / pixel que si l'équipement, le site et l'expérience de l'amateur le permettent : plus la focale est longue, plus le champ se rétrécit, plus la turbulence dégrade le piqué des images et plus le suivi est délicat et nécessite des matériels et techniques appropriés (dont nous parlerons plus loin dans ce chapitre). La photographie du ciel profond à une focale supérieure à environ 2 m est très exigeante et peut même se révéler décourageante pour les amateurs qui souhaitent se faire plaisir sans trop de complications.

Malgré le fait que les qualités requises en photographie du ciel profond et en photographie planétaire ne soient pas exactement les mêmes, de nombreux instruments sont capables de faire les deux. Il faut cependant garder à l'esprit que l'instrument universel n'existe pas et que chaque type d'instrument est plus ou moins bien adapté à l'une ou à l'autre. Les astronomes amateurs qui souhaitent obtenir les meilleures performances dans tous les domaines – et qui peuvent se le permettre financièrement – utilisent la plupart du temps plusieurs instruments complémentaires, à l'image du passionné de photographie qui dispose de plusieurs objectifs pour son reflex.

### La qualité mécanique

*Que l'instrument soit destiné à la photographie planétaire ou de ciel profond, sa qualité de fabrication mécanique, terme sous lequel il faut inclure aussi bien la qualité des matériaux utilisés (métal ou plastique) que la précision d'usinage et d'assemblage, est un critère de choix important. Par exemple, lorsqu'il s'agit de supporter une caméra CCD de 1 à 2 kg ou des accessoires tels qu'un réducteur de focale ou un diviseur optique, la crémaillère d'une lunette ou d'un Newton se doit d'avoir à la fois la solidité et la douceur nécessaires pour atteindre et maintenir sans fléchir une mise au point précise à quelques centièmes de mm.*

## La couverture de champ

Un objet de ciel profond peut occuper une partie importante du champ photographié. De plus, il est toujours entouré d'étoiles réparties sur l'ensemble de la photographie. C'est la raison pour laquelle il est primordial que l'image fournie par l'instrument soit homogène sur tout le capteur, ce qui ne facilite pas la tâche des concepteurs optiques, surtout lorsque le rapport F/D est petit et le capteur grand. La plupart du temps, les étoiles se déforment, s'empâtent ou s'affaiblissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre du champ, les principaux symptômes étant :

- la coma : les étoiles deviennent asymétriques et ressemblent à de petites comètes (d'où le terme coma), elles se voient dotées d'une petite queue radiale, dirigée vers l'extérieur ou vers le centre de la photographie. Cet effet est très semblable à celui que nous avons pu constater en observant une étoile à fort grossissement vue à travers un télescope déréglé (page 41) ; dans les cas extrêmes, la coma donne à l'image un effet « Guerre des Étoiles » où toutes les étoiles semblent s'éloigner du centre du champ dans un mouvement de fuite ;

*L'astigmatisme déforme les étoiles et peut, selon le cas, leur donner une forme allongée ou en croix.*



- l'astigmatisme : les étoiles sont déformées (ovalisées ou déformées en une figure complexe comme une croix) ;
- la courbure de champ : l'ensemble des points où l'image est la plus nette n'est pas un plan mais une petite portion de sphère. Lorsque la mise au point est faite au centre du champ, la périphérie de l'image est plus ou moins floue car elle souffre d'un défaut de mise au point, et réciproquement (voir encadré) ;
- le vignetage, phénomène décrit en détail en annexe 4.

## La courbure de champ

Le paramètre caractérisant la courbure de champ d'un instrument est le rayon  $R$  de la sphère supportant les points où l'image est la plus nette. À une distance  $d$  de l'axe optique, le décalage de mise au point  $\epsilon$  vaut :

$$\epsilon = \frac{d^2}{2R}$$

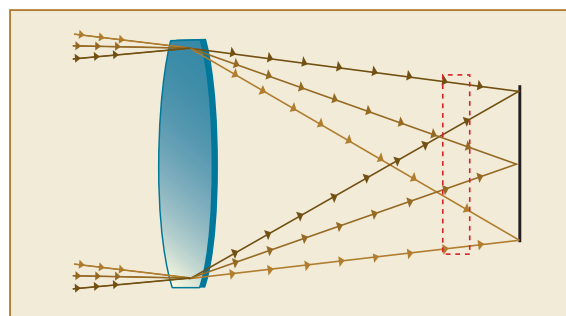
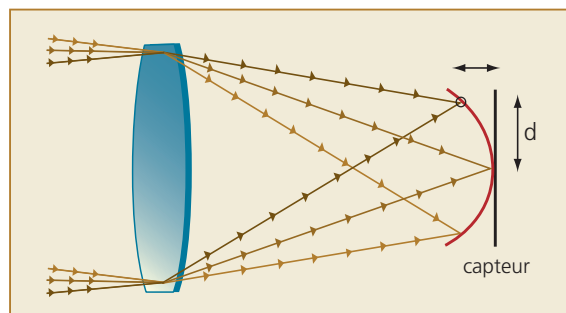
$\epsilon$  est proportionnel au carré de  $d$  : les effets de la courbure de champ sont presque cent fois plus prononcés dans les coins d'un capteur 24 x 36 que dans ceux du capteur d'une webcam !

À partir du moment où vous connaissez la valeur de  $R$  (propre à chaque type d'instrument), vous pouvez calculer  $\epsilon$  à la périphérie du capteur que vous utili-

sez, et comparer la valeur obtenue à la tolérance de mise au point indiquée par le tableau du chapitre 4 afin de savoir si cette valeur est négligeable ou non.

Par exemple, vous utilisez un reflex numérique format APS-C (15 x 22,5 mm) avec un télescope de Newton de 800 mm de focale (pour un Newton,  $R$  est égal à la focale). Le coin du capteur est situé à 13,5 mm du centre

(la moitié de la longueur de la diagonale), ce qui donne  $\epsilon = 13,5^2 / 1600 = 0,1$  mm. Si ce télescope est à  $F/D$  5, cet écart de mise au point correspond à environ  $1\lambda$  (voir le paragraphe sur la mise au point au chapitre 4).



Le rayon de courbure de champ  $R$  est le rayon de la sphère qui supporte les points où l'image est la plus nette. Plus  $R$  est petit, plus le champ est courbe. Il existe des compléments optiques capables d'aplanir le champ (en bas).

En pratique, ces aberrations sont souvent combinées mais, selon la formule optique considérée, l'une ou l'autre est prépondérante. Il est difficile de définir une limite précise au-delà de laquelle un de ces défauts passerait d'acceptable à rédhibitoire, car cette limite dépend, entre autres paramètres, de la tolérance que vous vous fixez sur la dégradation des étoiles en bord de champ, de l'agrandissement que vous faites subir à votre image à l'écran et de la finesse globale de

l'image (qui elle-même dépend de la qualité du suivi, de la précision de mise au point, etc.). Il va de soi que si l'objet intéressant occupe seulement la partie centrale de l'image, vous pouvez être moins exigeant que si vous voulez obtenir un champ homogène jusque dans les coins du capteur.

On dit d'un instrument qui offre une image homogène et peu affectée par les défauts précités qu'il présente une bonne couverture de champ. Tous les instruments astronomiques sont capables de fournir une image correcte sur le petit capteur d'une webcam... mais bien peu s'accommoderont pleinement d'un grand capteur 24 x 36 ! Certains constructeurs annoncent la dimension du champ exploitable de leurs instruments. Mais attention, certains sont plus optimistes que d'autres et surtout, lorsque aucune valeur n'est précisée, c'est le signe que les performances ne sont peut-être pas les meilleures...

## Les objectifs photographiques

Les objectifs photographiques, bien que généralement conçus pour couvrir le format 24 x 36, présentent un mélange plus ou moins prononcé de coma et d'astigmatisme en bord d'image, dégradation que l'on peut atténuer en diaphragmant l'objectif au prix, cela va se soi, d'une perte de lumière. Une dégradation en bord de champ d'objets ponctuels tels que les étoiles saute aux yeux, alors qu'en photographie diurne elle peut passer inaperçue : la photographie de champs d'étoiles est une épreuve toujours impitoyable pour un objectif photographique et parfois décevante pour son propriétaire. Ne vous attendez pas à obtenir des images d'étoiles parfaitement homogènes sur tout le champ d'un APN, car pratiquement aucun objectif n'en est capable à pleine ouverture. Si la différence entre le centre du champ et la périphérie est minime, vous avez entre les mains un excellent objectif.

Le chromatisme, dont nous avons vu les effets au chapitre 5, se manifeste de manière similaire en ciel profond et en planétaire : le contraste diminue, les étoiles peuvent être entourées d'une auréole de lumière diffuse ou d'un liseré coloré. Le chromatisme d'un objectif photographique utilisé à pleine ouverture ou d'une lunette achromatique se manifeste de manière particulièrement prononcée sur les étoiles brillantes : elles sont saturées et le halo bleu-violet qui les entoure devient alors bien visible.



Diaphragmer un objectif (ici de  $F/2$  à  $F/5,6$ ) permet d'affiner les étoiles du centre de la photographie (images supérieures, de gauche à droite). Mais c'est sur les étoiles situées en périphérie de champ que l'amélioration est la plus spectaculaire (images centrales). En outre, un objectif utilisé à pleine ouverture, même s'il est de haut de gamme, affuble les étoiles brillantes d'un liseré chromatique bleu (ligne inférieure) qui disparaît généralement lorsqu'il est fermé d'un diaphragme (ici de  $F/2$  à  $F/2,8$ ).

Les objectifs hauts de gamme sont, en principe, mieux corrigés, mais on peut avoir d'heureuses surprises avec certains objectifs moins coûteux, surtout dans les focales fixes qui, même si elles sont moins à la mode que les zooms, présentent souvent une couverture de champ plus homogène à ouverture égale. Pour ma part, je ne possède pratiquement plus que des objectifs à focale fixe.



En astrophotographie de ciel profond, oubliez les stabilisateurs d'image dont sont dotés certains objectifs, ils ne vous seront d'aucune utilité.

## Le télescope de Newton

Hors axe optique, le télescope de Newton souffre principalement de coma. On trouve aussi un peu de courbure de champ (le rayon de courbure est égal à la focale du miroir primaire) et, loin de l'axe, de l'astigmatisme, mais c'est bien la coma qui domine. À une distance donnée de l'axe optique, la coma est inversement proportionnelle au carré du rapport F/D du télescope. Ce qui signifie que les Newton ouverts à F/D 3 à 4 donnent en leur foyer une image nette sur quelques millimètres à peine (voir encadré). À 10 mm de l'axe optique d'un Newton de 200 mm à F/D 4, la longueur de la queue de coma avoisine 30" !



Le correcteur le plus utilisé chez les amateurs est le Televue Paracorr, destiné aux Newton entre F/D 3 et F/D 8. Il comporte quatre lentilles et couvre au foyer un champ de 20 à 25 mm de diamètre.

### La coma du Newton

La longueur  $L$  de la queue de coma peut s'exprimer en fonction du rapport F/D de l'instrument et de la distance  $d$  à l'axe optique :

$$L = \frac{3d}{16(F/D)^2}$$

Par exemple, à 5 mm de l'axe optique sur un Newton à F/D 5, la queue de coma mesure environ 0,04 mm : si les pixels font 7 microns, une étoile brillante se trouve étalée sur environ 5 pixels.

Avec ce type de télescope très ouvert, un correcteur de champ, dont le rôle est en premier lieu d'atténuer la coma, se révèle indispensable. Il existe deux grands types de correcteur pour Newton :

- le correcteur de Ross, composé de deux lentilles, donne des résultats satisfaisants même s'il empâte un peu le centre de l'image ;
- le correcteur de Wynne, composé de 3 ou 4 lentilles, présente des performances un peu meilleures mais il est plus coûteux.

Un correcteur est optimisé pour une distance donnée entre ses lentilles et le capteur, il convient donc de suivre scrupuleusement les recommandations du constructeur sur ce sujet. La courbure de champ dépendant de la focale et la coma du rapport F/D, un correcteur est toujours calculé pour un Newton de diamètre et de focale donnés, mais certaines tolérances font que ses performances sont encore convenables sur un Newton de caractéristiques quelque peu différentes.

## Les lunettes astronomiques

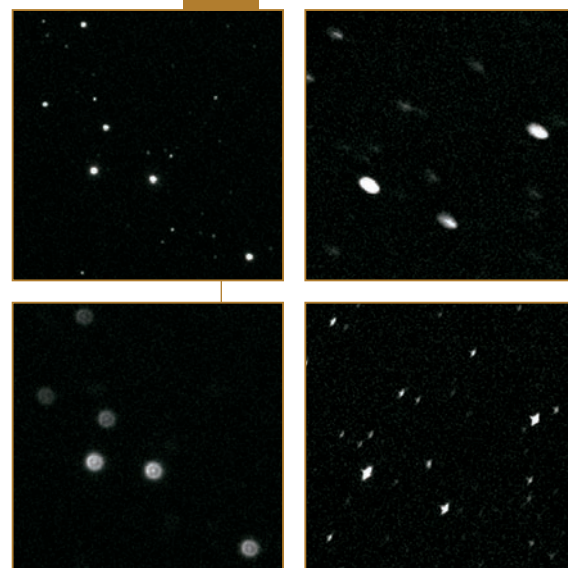
Au vu de ce qui précède, on pourrait penser que le télescope de Newton est particulièrement défavorisé. Mais c'est surtout parce que cet instrument est d'un rapport F/D souvent petit, ce qui accentue



Les fabricants de doublets et triplets haut de gamme tels que Astrophysics (en haut à gauche), TMB (en haut à droite) et Takahashi (en bas à gauche) proposent, en option, des correcteurs parfaitement adaptés à chacune de leurs lunettes, certains de ces correcteurs faisant également office de réducteur de focale. Televue (en bas à droite) propose des correcteurs-réducteurs pour les lunettes de focale 400-600 mm et 800-1000 mm.

les aberrations hors axe. Les lunettes, quant à elles, sont relativement bien corrigées de la coma, mais il subsiste de l'astigmatisme et, surtout, elles souffrent d'une importante courbure de champ : à focale égale, le rayon de courbure sur une lunette est 2,7 fois plus petit que sur un Newton (dans la formule de l'encadré sur la courbure de champ, prenez  $R = F/2,7$ ,  $F$  étant la focale de la lunette), et cela quel que soit leur type : doublet achromatique, doublet ou triplet apochromatique. Autrement dit, à une distance donnée de l'axe optique, le défaut de mise au point dû à la courbure de champ est identique sur une lunette de 500 mm de focale et sur un Newton de 1400 mm de focale. Si vous utilisez un APN reflex ou un grand capteur CCD sur une lunette, surtout si elle est de courte focale, vous aurez probablement intérêt à utiliser un correcteur. Il sera de conception différente de celui pour Newton puisque son rôle premier est d'aplanir le champ et non de corriger la coma. Seules certaines lunettes, telles que la FSQ-106 de Takahashi et la Televue NP101, sont conçues selon une formule optique plus complexe à quatre lentilles (Petzval) intégrant directement le correcteur de champ.

Portions d'images obtenues avec un capteur 24 x 36 sur une lunette de 470 mm de focale. La ligne supérieure correspond à une mise au point au centre de l'image : les étoiles situées au centre sont nettes (à gauche) mais la courbure de champ rend floues les étoiles situées en périphérie (à droite). La ligne inférieure correspond à une mise au point en périphérie : l'astigmatisme hors axe apparaît mais c'est surtout le centre qui est dégradé par le décalage de mise au point.



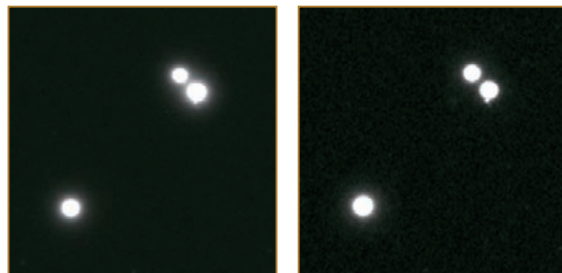


## Les aigrettes

Les aigrettes qui ornent les étoiles brillantes de certaines photographies ne sont pas réelles. Il s'agit d'un phénomène de diffraction de la lumière provoqué par les branches de l'araignée supportant le miroir secondaire des télescopes de type Newton ou Cassegrain. Une araignée à quatre branches provoque quatre aigrettes, tandis qu'une araignée à trois branches en crée six. Une photographie prise avec une lunette ne doit donc pas en montrer... à moins d'avoir ajouté, à l'avant de l'instrument, deux fils fins destinés à créer cet effet, de préférence en les alignant avec les axes du capteur. De l'épaisseur des fils dépendent la finesse et la longueur des aigrettes. Les multiples aigrettes parfois visibles sur des photographies prises avec des objectifs photographiques sont dues aux lames de leurs diaphragmes.



Les aigrettes ornent les étoiles brillantes de cette image du double amas ouvert de Persée a été obtenue en tendant deux fils fins à l'avant de l'instrument (lunette de 130 mm de diamètre et de 1 m de focale, appareil reflex format APS-C). Certains amateurs préfèrent les photographies sans aigrettes (image secondaire) : à vous de choisir...



Une lunette achromatique présente du chromatisme dans l'infrarouge, bien visible lorsqu'une caméra CCD monochrome est utilisée (à gauche). L'interposition d'un filtre anti-infrarouge réduit le halo diffus entourant les étoiles (à droite), au prix d'une perte de signal lumineuse qu'il faut compenser par un allongement du temps de pose.

## Les télescopes de la famille Cassegrain

Il existe plusieurs variantes de Cassegrain (télescope à miroir primaire concave et miroir secondaire convexe), chacune présentant des caractéristiques de couverture de champ différentes. Tous les télescopes de cette famille présentent des rapports F/D et des focales relativement élevés.

Le Cassegrain « classique » possède un miroir primaire parabolique comme le Newton (certains fabricants proposent d'ailleurs des instruments mixtes Cassegrain-Newton à miroir secondaire interchangeable) et un secondaire hyperbolique. Hors axe, il présente de la coma et de l'astigmatisme dans des quantités comparables à celles d'un Newton de même rapport F/D. Mais la courbure de champ est bien plus prononcée que sur les Newton et les lunettes (c'est d'ailleurs une propriété commune à tous les télescopes de la famille Cassegrain), son amplitude dépend des choix de conception de la formule optique.

Le Ritchey-Chrétien (RC) est une variante dont les deux miroirs sont hyperboliques, ce qui les rend bien plus difficiles à fabriquer et donc plus coûteux (le télescope spatial Hubble est de ce type). L'avantage de cette formule est l'élimination de la coma, seul un peu d'astigmatisme subsiste ainsi que la courbure de champ inhérente aux Cassegrain. Procurant un champ mieux corrigé que la plupart des autres formules de cette famille, ils sont particulièrement prisés pour la photographie de ciel profond avec des capteurs de grande taille. Certaines firmes nord-américaines telles que OGS et RCOS proposent des Ritchey-Chrétien de diamètre important (250 mm et plus) à F/D 8 ou 9, avec aplanisseur de champ.

Le Dall-Kirkham est une variante où le miroir primaire est elliptique et le secondaire sphérique. Plus facile à réaliser, il présente aussi une coma relativement prononcée, en plus de la courbure de champ propre aux Cassegrain. Seule la marque Takahashi propose des Dall-Kirkham sous l'appellation Mewlon avec, en option, des correcteurs-réducteurs qui diminuent la coma et réduisent le rapport F/D de 12 à 9,7.

Le Schmidt-Cassegrain (SC) est certainement la variante la plus répandue car la plus facile à fabriquer industriellement. Il présente de la coma, ainsi que de la courbure de champ, le rayon de courbure étant voisin de 10 % de la focale de l'instrument, soit environ 200 mm pour un Schmidt-Cassegrain de 200 mm de diamètre à F/D 10. Des réducteurs-correcteurs spécifiques à quatre lentilles sont proposés pour ces télescopes, ramenant le rapport F/D à 6,3 au lieu de 10. Mais la portion du plan focal utilisable diminue (c'est une propriété commune à tous les réducteurs de focale : on ne peut pas gagner sur tous les tableaux !), elle n'excède pas un cercle de 25 mm de diamètre car, au-delà de cette limite, le vignettage et les aberrations deviennent trop prononcés. Il ne sont donc pas compatibles avec un capteur 24 x 36 mais conviennent aux APN à capteur APS-C, à la plupart des caméras CCD et aux webcams. Un réducteur diminuant le rapport F/D à 3,3 est également proposé, mais la taille maximale des capteurs compatibles s'établit dans ce cas à une douzaine de millimètres tout au plus.





Le Maksutov-Cassegrain, quant à lui, comporte une lame optique épaisse et courbe (baptisée ménisque) à l'avant. Il en existe deux types : le Gregory, dont le miroir secondaire n'est autre que la portion centrale arrière du ménisque qui a été aluminée, et le Rumak, plus répandu, à miroir secondaire indépendant comme sur un Schmidt-Cassegrain. Le Rumak offre une couverture de champ remarquable avec très peu de coma et d'astigmatisme, et une courbure de champ modérée pour un Cassegrain (mais toujours plus forte que pour un Newton de même focale). Des réducteurs de focale sont également proposés pour ces instruments. Le Maksutov-Newton est une variante dans laquelle le miroir secondaire Cassegrain a été remplacé par un miroir plan, comme sur un Newton. Il présente l'avantage d'un rapport F/D court avec une coma nettement inférieure à celle d'un Newton de même rapport F/D.

### Les astrographes

Certaines lunettes apochromatiques dotées d'aplanisseurs de champ de grand diamètre couvrent des surfaces allant du 24 x 36 à des formats argentiques comme le 6 x 6 cm et sont qualifiées d'astrographes. Se placent également dans cette catégorie des instruments spécifiquement conçus pour la photographie du ciel profond tels que le BRC-250 (variante de Ritchey-Chrétien à F/D 5) de Takahashi et la série des Epsilon du même fabricant (variante de télescope de Newton à F/D 2,8 à 3,3 dotée d'un miroir primaire hyperbolique et d'un correcteur de champ à quatre lentilles). Quant à la célèbre chambre de Schmidt, l'astrographe par excellence, elle est malheureusement spécifiquement argentique puisqu'elle nécessite de découper un morceau de film à installer, en passant par une petite trappe, sur un support courbe placé à l'intérieur de l'instrument.

### Les autres formules optiques

L'ensemble des types d'instruments que nous venons d'énumérer représente la quasi totalité des instruments en usage chez les amateurs. Mais l'imagination des concepteurs optiques est sans limite et d'innombrables autres formules ont été inventées, combinant souvent lentilles et miroirs : Schmidt-Newton, Wright-Newton, Lurie-Houghton, Houghton-Cassegrain, Mangin, Sigler, Dall, Dilworth.... Chacun de ces instruments présente ses propres avantages et inconvénients. Ils sont trop peu répandus pour que nous les approfondissions dans un livre tel que celui-ci ; vous en trouverez une description détaillée dans *Telescope Optics, Evaluation and Design* (voir Bibliographie).



*Vu de l'extérieur, rien ne distingue un Cassegrain classique d'un Dall-Kirkham (en haut à gauche) ou d'un Ritchey-Chrétien (en haut à droite) : ce sont tous des télescopes à deux miroirs, mais leur couverture de champ n'est pas équivalente. Un Schmidt-Cassegrain (en bas à gauche) se distingue par son tube très court et sa lame de Schmidt. Un Maksutov-Cassegrain (en bas à droite) comporte un ménisque épais et très courbé.*



*Un autre exemple de cohabitation entre une nébuleuse par émission et un amas ouvert : NGC 7635 (Bubble Nebula, au centre) et M52. Comme les autres images de ciel profond de ce livre réalisées avec une caméra CCD, les traitements ont consisté en : prétraitement des images brutes, recentrage et compositage des images de luminance et RVB, retrait éventuel de gradient, DDP sur l'image de luminance, colorisation LRVB.*

## La collimation

Il pourrait sembler que la collimation de l'instrument, que nous avons décrite en détail au chapitre 4, est un peu moins critique en ciel profond qu'en planétaire. C'est vrai en partie seulement : si l'instrument n'a pas une bonne couverture de champ, le dérèglement se manifestera par le fait que l'image n'est pas symétrique : l'axe optique de l'instrument n'est plus au centre du capteur et les étoiles situées dans une certaine direction par rapport au centre de l'image seront plus dégradées par la coma, l'astigmatisme ou la courbure de champ. Avec un objectif photographique, un tel aspect dissymétrique de l'image est d'ailleurs le symptôme d'un mauvais alignement de lentilles lors de la fabrication ou d'un décentrage accidentel.

## Les montures

Nous aurions pu débiter ce chapitre par ce sujet, tant il est important en ciel profond où les exigences de stabilité (voir encadré) et de qualité de suivi n'ont plus rien de commun avec celles que nous avons en observation visuelle ou même en photographie planétaire. Lors du choix d'un instrument destiné à la photographie du ciel profond, au moins autant d'attention doit être consacrée à la monture qu'au tube optique : il n'est pas aberrant de dépenser autant, voire plus, pour une bonne monture que pour un tube optique. D'autant que certains constructeurs, afin d'offrir des instruments du plus grand diamètre possible au moindre coût, ont parfois tendance à proposer des montures sous-dimensionnées, un peu comme si l'on vous vendait une puissante moto dotée de roues de bicyclette !

### Montures et charge admissible

*Les constructeurs et les revendeurs indiquent, pour chacune des montures qu'ils proposent, sa charge maximale admissible. Mais il est impossible de définir une limite précise et chaque constructeur la calcule comme il l'entend : une monture annoncée pour 10 kg pourra se révéler plus stable qu'une monture annoncée pour 12 kg, tout simplement parce que le fabricant de la première est moins optimiste que celui de la seconde. Les chiffres annoncés sont souvent acceptables pour l'observation visuelle sans vent mais, pour la photographie, n'hésitez pas à diminuer ces chiffres par 30 à 50 %. Ce qui compte tout autant que le poids lui-même, c'est l'encombrement de la charge : à poids égal, la stabilité sera meilleure avec un tube optique compact qu'avec un tube optique très long. La solidité du pied (trépied ou colonne) compte également beaucoup. Enfin, n'oubliez pas d'inclure, dans le total de la charge, l'appareil et ses accessoires, ainsi qu'un éventuel instrument-guide et son système de fixation, etc.*

le mouvement apparent de la voûte céleste est incompatible avec les poses dépassant plusieurs secondes : une monture motorisée, au moins en ascension droite, est indispensable. Seule la photographie au grand-angle peut être tentée avec une monture non motorisée disposant de mouvements manuels, à condition d'actionner le mouvement d'ascension droite de manière la plus régulière possible et à la vitesse adéquate, en s'aidant d'un petit instrument guide visant une étoile (voir plus loin).

### Monture altazimutale motorisée

Avec ce type de monture subsiste, de manière encore plus cruciale qu'en planétaire, un inconvénient majeur : la rotation de champ. Il existe une solution pour l'éviter : équiper l'instrument d'un accessoire appelé « dérotateur ». Il s'agit d'un système rotatif motorisé installé entre l'appareil et le télescope. Ce dispositif est connecté au système de contrôle des mouvements du télescope et tourne à la

bonne vitesse, en fonction de la position de l'astre, pour compenser la rotation de champ. Cette solution a été adoptée sur beaucoup de grands télescopes professionnels modernes mais, sur ces instruments, elle est couplée à tous les asservissements et calculateurs nécessaires. Pour un amateur, cette solution est assez coûteuse et complexe, car trois moteurs (hauteur, azimut et dérotateur) sont en action simultanément, au lieu d'un seul (ascension droite) sur une

monture équatoriale. Au final donc, très peu d'amateurs utilisent pour l'instant cet accessoire.



*Une monture altazimutale motorisée n'est pas utilisable pour les longues poses nécessaires en ciel profond.*

### Monture équatoriale motorisée

La monture équatoriale motorisée est l'outil utilisé par la quasi-totalité des astrophotographes de ciel profond. Son principe est simple : un de ses axes est parallèle à l'axe des pôles terrestres, ce qui permet, moyennant un mouvement de rotation autour de cet axe, de compenser la rotation de la Terre. Il en existe plusieurs types, chacun présentant des avantages et des inconvénients.

#### La monture allemande

La monture allemande, baptisée ainsi grâce à l'allemand Fraunhofer qui l'a inventée il y a deux siècles, offre une bonne stabilité dès lors qu'elle est correctement dimensionnée par rapport à sa charge utile. En outre, elle présente deux avantages importants :

- son axe polaire est généralement creux et pourvu d'un viseur polaire permettant un alignement polaire rapide et relativement précis (nous examinerons les techniques d'alignement polaire un peu plus loin) ;
- lorsque le photographe possède plusieurs tubes optiques (par exemple une lunette courte pour la photographie à grand champ et un télescope pour la photographie des planètes), il peut les installer en alternance sur la même monture, voire côte à côte.



*Une monture équatoriale d'entrée de gamme est tout à fait suffisante pour réaliser des photographies à grand champ à l'aide d'un objectif grand angle, telles que celle de la page 40.*





### Le retournement au méridien

La monture allemande présente un inconvénient : dans certaines situations, au voisinage du passage au méridien, la monture doit être retournée, c'est-à-dire que l'instrument doit changer de côté afin qu'il ne bute pas sur le trépied ou la monture elle-même. Cela ne présente aucun inconvénient en observation visuelle, mais c'est difficilement faisable en photographie car il faudrait retrouver exactement le même cadrage, alors que l'image a tourné de 180°.

Selon la morphologie de l'instrument et la région du ciel visée, il est possible d'anticiper ou de dépasser le méridien d'une à deux heures, parfois beaucoup plus. Lorsqu'il y a risque d'arriver en bu-

tée alors que les poses ne sont pas terminées, le côté sur lequel est placé l'instrument doit être choisi judicieusement : à chaque fois que cela sera possible, on placera l'appareil du côté est (c'est-à-dire à gauche de la monture lorsqu'on regarde au sud) car, dans cette position, l'instrument pourra suivre l'objet longtemps après son passage au méridien. Si cela n'est pas possible, on pourra par précaution faire tourner manuellement la monture en ascension droite, et utiliser le cercle de coordonnées correspondant pour vérifier pendant combien de temps l'astre pourra être suivi : ce cercle étant gradué en heures, la correspondance avec le temps disponible est immédiate.



À gauche, l'instrument pointe un objet passant au méridien un peu au-dessus de l'horizon sud : le débattement de chaque côté du méridien est très grand.



À droite, il pointe un objet passant dans la région du zénith : l'extrémité de l'instrument peut toucher le trépied d'un côté ou de l'autre.

### La monture à fourche sur table équatoriale

La monture à fourche équipe essentiellement les télescopes de type Schmidt-Cassegrain. Lorsque l'instrument est posé à plat sur son socle, elle est en position altazimutale. Pour rendre cette monture équatoriale, il faut lui adjoindre un accessoire, proposé en option, dont l'inclinaison est réglable afin de rendre les bras de la fourche parallèles à l'axe de rotation de la Terre. Ceci a pour inconvénient de rendre l'instrument moins stable à cause du porte-à-faux. Les inconvénients et avantages de la monture à fourche sont les opposés de ceux des montures allemandes : d'un côté, pas de viseur polaire intégré facilitant la mise en station et tube optique non interchangeable ; de l'autre, pas de contrepoids alourdissant la charge et pas de contrainte de retournement au méridien.

*Une monture altazimutale inclinée à l'aide d'une table équatoriale se transforme en monture équatoriale.*



### Le Dobson sur table équatoriale

Le télescope de type Dobson est, à l'origine, un télescope de Newton à monture altazimutale manuelle. Il est tout à fait possible d'ajouter à un Dobson une motorisation pilotée par ordinateur, mais en photographie se pose toujours le problème de la rotation de champ. Il a été inventé pour ces télescopes un accessoire ingénieux baptisé table équatoriale. Celle-ci se présente sous la forme d'un double plateau motorisé et autonome sur lequel est posé l'instrument. Une fois alignée sur l'axe polaire selon une des méthodes décrites plus loin, elle permet au télescope de suivre les astres en mode équatorial et non plus altazimutal. Elle est donc bien adaptée à la photographie à longue pose, à condition que sa stabilité soit suffisante et qu'elle dispose de réglages fins de mise en station en azimut et en hauteur (voir plus loin).

Seul bémol, la durée de suivi en continu est limitée à une durée d'une heure environ ; à l'issue de cette période, si l'on souhaite faire des poses supplémentaires du même objet, il faut réinitialiser la table pour une autre période, ce qui ne prend que quelques secondes mais présente



Une table équatoriale pour télescope Dobson.

comme inconvénient la rotation subie par le champ photographié. On retrouve la rotation de champ du télescope altazimutal mais, au lieu que cette rotation soit lente et continue, elle se produit par à-coups lors de la réinitialisation de la table.

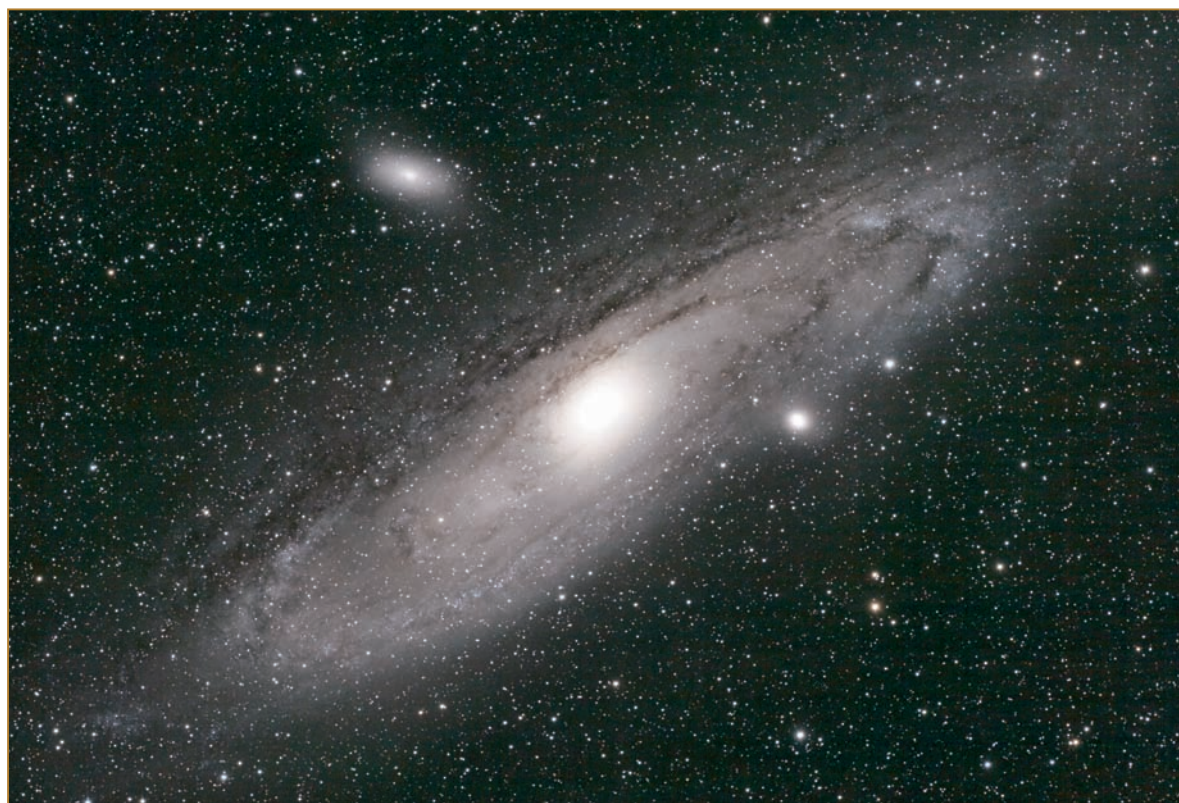
## L'alignement polaire

Les utilisateurs de monture équatoriale le savent : réaliser un alignement polaire consiste à faire coïncider l'axe polaire de la monture (c'est-à-dire son axe de rotation en ascension droite) avec l'axe de rotation de la Terre. La perfection n'étant pas de ce monde, il subsiste toujours une erreur d'alignement, plus ou moins importante selon la méthode employée. En observation astronomique visuelle, on peut se contenter d'un alignement sommaire en dirigeant au jugé l'axe polaire de la monture vers l'étoile polaire. Mais, en photographie du ciel profond, cette méthode est insuffisante. Même un alignement précis de l'axe de la monture sur l'étoile polaire elle-même n'est pas satisfaisant puisque cette étoile, certes bien pratique pour repérer la région polaire, n'en est pas moins située à environ  $3/4$  de degré du pôle réel, soit une fois

et demie la taille de la Pleine Lune. En longue pose, une erreur d'alignement polaire a deux conséquences néfastes : le champ dérive plus ou moins lentement et de la rotation de champ apparaît au fil du temps. Heureusement, la rotation de champ sur un équatorial imparfaitement aligné est très inférieure à celle d'un instrument altazimutal, mais elle n'est pas forcément négligeable sur une durée de plusieurs minutes. Si cette dérive est suffisamment lente pour ne pas être perçue pendant toute la durée d'une seule pose, tout va bien : un léger décalage au fil des poses est sans importance puisque le logiciel de traitement sait les recentrer les unes par rapport aux autres. Par contre, si la dérive oblige à diminuer la durée des poses par rapport à la durée souhaitée, l'astrophotographe aura intérêt à améliorer son alignement polaire.

Plusieurs méthodes, variant en précision et en commodité, permettent d'approcher ou d'affiner l'alignement polaire. On considère que, pour un instrument transportable, une erreur d'alignement polaire de l'ordre de  $2'$  à  $3'$  est excellente.

*La galaxie M31, photographiée avec une lunette de 530 mm de focale et un reflex format APS-C. Guidage réalisé à l'aide d'une caméra CCD sur un petit télescope monté en parallèle. Comme les autres images de ciel profond de ce livre réalisées avec un APN reflex, les traitements ont consisté en : prétraitement des images brutes (RAW) puis conversion en RVB, recentrage et compositage, retrait éventuel de gradient, DDP.*

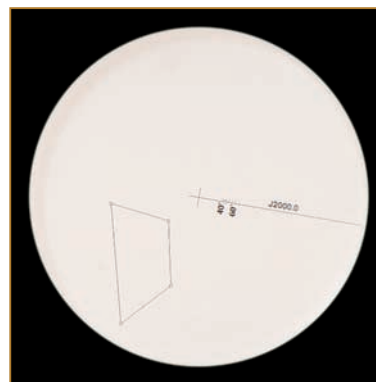






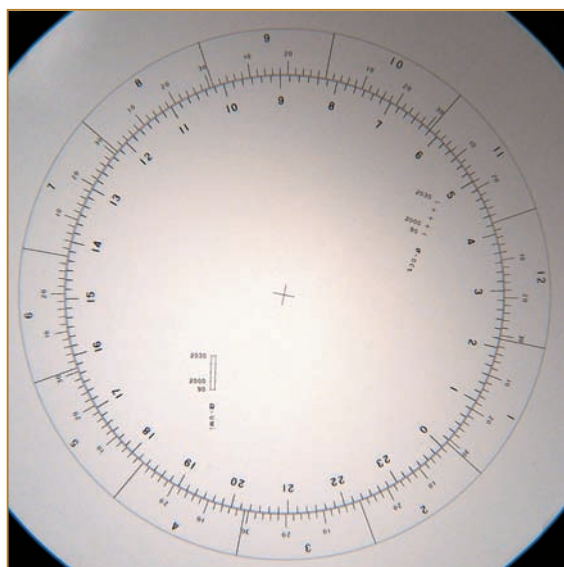
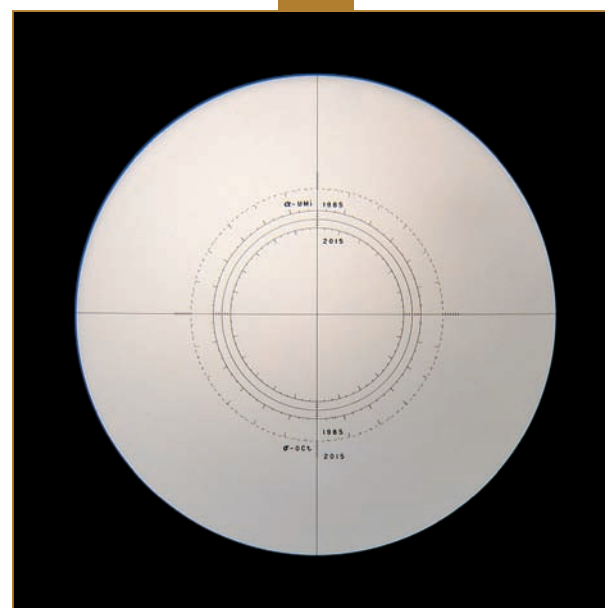
## Le viseur polaire

Un viseur polaire, sorte de petit chercheur couvrant un champ de quelques degrés et installé parallèlement à l'axe polaire de la monture, est certainement le moyen le plus pratique et le plus rapide de réaliser l'alignement polaire. La précision d'un très bon viseur polaire est de quelques minutes d'arc, mais tous n'offrent pas cette précision. La plupart des montures allemandes en comportent un, il peut être intégré à demeure à l'intérieur de l'axe de la monture (ce qui est préférable pour la précision du réglage) ou séparé et vissé à l'aide d'un support sur le corps de la monture. Il comporte un verre gravé montrant diverses figures permettant de centrer l'axe de la monture par rapport à l'étoile polaire et éventuellement à d'autres étoiles voisines. Certains repères sont multiples car ils correspondent à des plages d'années différentes. En effet, à cause de la lente dérive de l'axe polaire terrestre appelée « précession des équinoxes », la position du pôle céleste par rapport aux étoiles varie légèrement au fil des années. D'autres repères sont dessinés pour le positionnement par rapport aux étoiles proches du pôle sud céleste lorsque l'alignement polaire se fait depuis un lieu d'observation qui est situé dans l'hémisphère sud. Une fois l'alignement effectué à l'aide des réglages de hauteur et d'azimut, le centre du viseur polaire correspond, aux erreurs près, au pôle céleste réel.



*Viseurs polaires de type « calage sur étoiles » : des repères de centrage sont destinés à recevoir une ou plusieurs étoiles proches du pôle (dont l'étoile polaire). Il faut à la fois faire tourner le viseur ou la monture autour de l'axe polaire pour que l'orientation des repères corresponde à celle des étoiles ou des constellations environnantes et agir sur les réglages de hauteur et d'azimut de la monture. Ces viseurs sont moins précis que les autres présentés sur cette page.*

*Viseur polaire de type « heure sidérale » : l'étoile polaire doit être placée sur les grands cercles extérieurs, à une position qui dépend de la date, de l'heure et de la longitude du lieu d'observation. Cette position doit être calculée à l'aide d'un abaque fourni avec la monture ou par un petit logiciel dédié car elle nécessite la connaissance de l'heure sidérale.*



*Viseur polaire de type « date-heure ». Une fois les graduations de date et d'heure mises en coïncidence (grands cercles extérieurs), l'étoile polaire est placée dans le petit rectangle à une position correspondant à l'année d'observation.*

## L'alignement polaire informatisé

Certains systèmes informatisés pour monture allemande comportent une fonction d'alignement polaire par calcul et compensation d'erreur. Le principe est simple : l'utilisateur centre dans l'oculaire, les unes après les autres, une série d'étoiles brillantes réparties sur la voûte céleste. Au bout de 5 ou 6 étoiles, l'ordinateur est capable, par de complexes calculs trigonométriques, de déterminer précisément comment la monture est positionnée dans l'espace et sait en déduire l'erreur d'alignement polaire. À ce stade, c'est suffisant pour pointer divers objets en observation visuelle, mais pas en photographie à longue pose car la monture n'est pas encore alignée physiquement avec le pôle céleste. Pour ce faire, l'ordinateur pointe une dernière



*L'alignement polaire de la monture s'effectue en agissant sur les réglages fins de hauteur (à droite) et d'azimut (à gauche). Ceux-ci ne sont plus touchés par la suite. Sur de nombreuses montures, un vernier (ici un quart de cercle gradué de 2° en 2°) permet un positionnement approximatif selon la hauteur.*



Les systèmes Sphinx (ci-contre) et Gemini (ci-dessous, ici sur une monture Titan) permettent d'aligner la monture sur l'axe des pôles en modélisant sa position dans l'espace par pointage de plusieurs étoiles connues. On reconnaît, sur le panneau principal du Gemini, diverses connexions dont celle pour autoguideur.



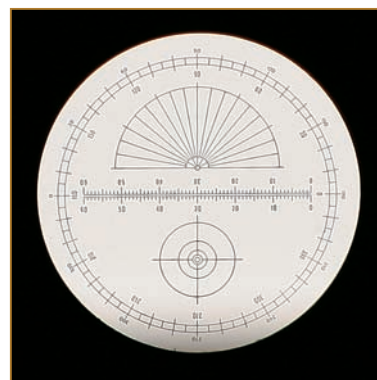
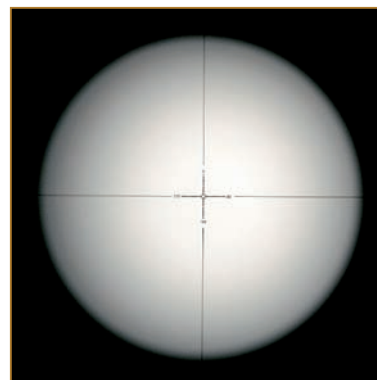
## Les méthodes d'affinage de l'alignement polaire

Lorsque l'alignement polaire de l'instrument par un des moyens cités précédemment se révèle insuffisamment précis, il existe deux méthodes d'affinage basées sur le fait que les dérives constatées à l'oculaire et l'erreur d'alignement polaire sont liées de manière logique, aussi bien en amplitude qu'en direction. Le principe général est d'observer la dérive d'une ou plusieurs étoiles pour en déduire les corrections à apporter sur les réglages d'alignement polaire de la monture. Ces méthodes prennent de quelques minutes à quelques dizaines de minutes, selon la précision souhaitée, et sont particulièrement adaptées à l'alignement polaire d'une monture demeurant à poste fixe. Il existe deux moyens d'examen des dérives :

- un oculaire réticulé (voir encadré), éventuellement couplé à une lentille de Barlow pour augmenter le grossissement ;
- un appareil, par exemple une webcam. Il faut que l'échantillonnage soit suffisamment fin pour bien apprécier les petites dérives observées sur l'écran de l'ordinateur. Certains logiciels de pilotage, tels que Prism ou Astrosnap, sont capables, à partir du moment où ils connaissent la valeur de l'échantillonnage, de transformer la mesure de dérive en correction d'alignement polaire. Cela permet d'accélérer l'alignement polaire en rendant les corrections moins subjectives.

### L'oculaire réticulé

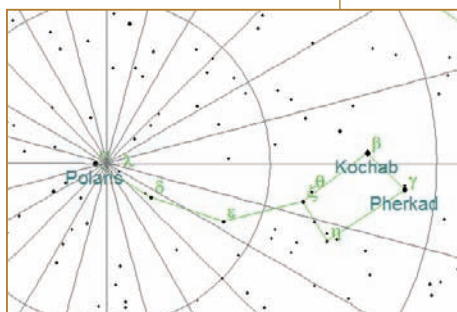
Un oculaire réticulé est un oculaire, généralement de focale assez courte pour procurer un grossissement important, et qui comporte un verre gravé de divers repères (les réticules) et le plus souvent éclairé. Ces repères permettent de contrôler finement les dérives d'une étoile pour contrôler la mise en station ou l'erreur périodique d'une monture ou encore pour assurer son guidage visuel.



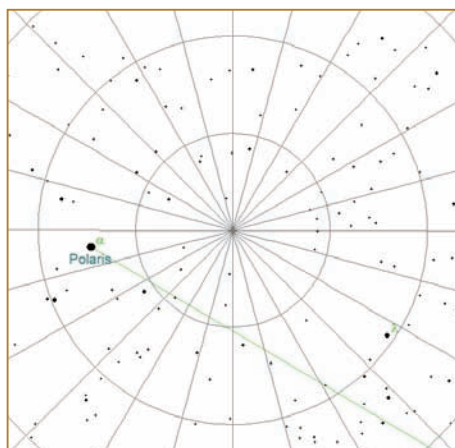
Certains oculaires réticulés comportent un repère simple : deux traits fins formant une croix, l'étoile devant être placée à leur intersection. D'autres comportent des figures ou des graduations pouvant être utilisées pour effectuer des mesures (par exemple d'erreur périodique).

## L'alignement au chercheur

À défaut de viseur polaire ou d'alignement informatisé, le chercheur de l'instrument permet d'obtenir un alignement polaire sommaire. Pour ce faire, on vise la région polaire en faisant coïncider, aussi précisément que possible, le centre du réticule du chercheur avec le pôle céleste. En faisant tourner l'instrument autour de l'axe polaire (c'est-à-dire en ascension droite), le réticule doit rester aligné sur le pôle ; si ce n'est pas le cas, c'est que le chercheur n'est pas bien aligné avec l'axe polaire de la monture. Le chercheur ne comportant ni repères de position ni graduations, il ne faut pas espérer un alignement aussi précis qu'avec un viseur polaire et les méthodes de Bigourdan et de King, que nous verrons plus loin, ne seront pas superflues pour l'affiner.



À gauche, position du pôle nord céleste par rapport aux étoiles de la Petite Ourse. À droite, zoom sur la région polaire ; les cercles de déclinaison sont espacés de 30'. Selon le moment d'observation, la carte doit être tournée pour correspondre à l'orientation réelle des constellations.







Après chaque correction effectuée sur la monture, l'étoile est recentrée et la dérive est contrôlée à nouveau jusqu'à ce qu'elle soit négligeable. Si la dérive change de sens, c'est que la correction a été trop forte. Je vous conseille de mettre au préalable votre monture bien horizontale à l'aide d'un niveau à bulle, afin que la correction effectuée sur chaque axe ne concerne que la hauteur ou l'azimut, et n'ait aucune incidence dans l'autre direction.

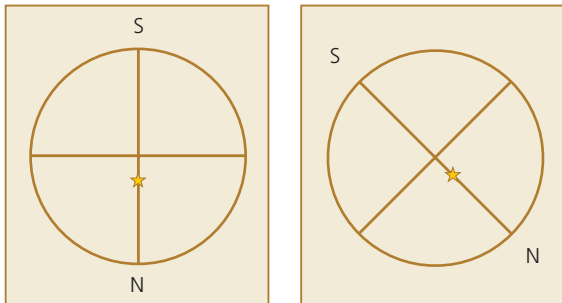
Attention aux directions telles que vues à l'oculaire : n'oubliez pas qu'un oculaire inséré directement dans le porte-oculaire, sans renvoi coudé, offre une vision totalement renversée par rapport à l'œil nu (c'est de cette manière que sont représentées les figures de la méthode de Bigourdan). Avec renvoi coudé, le haut et le bas de l'image sont permutés. À l'écran, une image donnée par un appareil inséré directement est droite, comme vue à l'œil nu. En cas de doute, vous pouvez exercer avec la main une légère pression sur le tube de votre instrument dans le sens nord-sud et en déduire la correspondance entre ces directions et la dérive de l'étoile telle qu'elle est vue dans l'oculaire ou à l'écran. Par exemple, si une pression faisant monter l'avant du tube permet de recentrer l'étoile, c'est que celle-ci dérivait vers le nord. Faites attention également à ne pas confondre les différents mouvements de la monture : le centrage de l'étoile guide s'effectue par les mouvements d'ascension droite et de déclinaison (ceux que vous utilisez habituellement pour l'observation), alors que l'alignement polaire se fait par ceux d'azimut et de hauteur.

### La méthode de Bigourdan

La méthode de Bigourdan s'effectue en deux étapes.

Étape 1 : une étoile, située près de l'intersection entre l'équateur céleste et le méridien du lieu, est soigneusement centrée sur le réticule. Les axes de ce dernier sont orientés nord-sud et est-ouest. La dérive de l'étoile sur quelques dizaines de secondes ou quelques minutes permet de déduire l'erreur d'alignement polaire en azimut. Une éventuelle dérive est-ouest n'est pas à prendre en compte, seule la dérive nord-sud est à considérer.

Étape 2 : une étoile, située dans la direction de l'est, entre 10° et 20° de l'horizon, est à son tour soigneusement centrée dans l'oculaire. La dérive permet cette fois de recalibrer la monture dans le sens vertical.



À gauche, Bigourdan étape 1 : si l'étoile dérive vers le nord (respectivement vers le sud), c'est que l'axe polaire de la monture vise trop à l'ouest (respectivement trop à l'est). À droite, Bigourdan étape 2 : si l'étoile située à l'est dérive vers le nord (respectivement vers le sud), c'est que l'axe polaire de la monture vise trop haut (respectivement trop bas) par rapport au pôle céleste. Il est tout à fait possible de prendre une étoile dans la direction de l'ouest, dans ce cas le raisonnement est inversé : une dérive vers le nord est synonyme d'axe polaire trop bas par rapport au pôle céleste.

Il est prudent, à l'issue de l'étape 2, de revenir à l'étape 1 afin de s'assurer que le réglage est toujours correct. Pour une précision maximale, on pourra même effectuer plusieurs allers-retours entre les deux étapes.

À noter un inconvénient de cette méthode : à l'étape 2, la réfraction atmosphérique provoque une dérive qui se mêle à celle due à l'erreur d'alignement polaire.

### La méthode de King

La méthode de King se base sur une seule étoile située très près du pôle céleste, par exemple l'étoile polaire. Les axes du réticule sont à orienter selon les directions zénith-horizon et est-ouest ; pour s'en assurer, on jouera sur les mouvements d'alignement polaire tout en vérifiant que l'étoile se déplace bien selon ces axes. La dérive selon chacun des axes est liée aux erreurs en hauteur et azimut par une rotation de 90° :

- si l'étoile dérive vers le zénith (respectivement vers l'horizon), c'est que l'axe polaire de la monture vise trop à l'est (respectivement trop à l'ouest) ;
- si l'étoile dérive vers l'ouest (respectivement vers l'est), c'est que l'axe polaire de la monture vise trop haut (respectivement trop bas) par rapport au pôle céleste.

On pourrait penser que les dérives sont bien plus faibles qu'avec la méthode de Bigourdan, à cause de la proximité du pôle et du très faible mouvement apparent du ciel de cette région. Il n'en est rien : pour une même erreur d'alignement polaire, la dérive est plus rapide avec King. C'est une des raisons pour lesquelles j'avoue préférer cette méthode. De plus, elle permet d'effectuer les corrections en azimut et en hauteur simultanément sans avoir à basculer d'une étoile à une autre ; le gain de temps est donc supérieur à 50 %. Enfin, elle n'est pas affectée par la dérive due à la réfraction atmosphérique. Cette méthode présente cependant une contrainte par rapport à Bigourdan : la vitesse de suivi de la monture doit être extrêmement proche de la vitesse sidérale, faute de quoi des dérives intempestives se produiront et empêcheront d'effectuer un bon alignement.

## Les erreurs de suivi

Imaginez-vous dans un train en mouvement. Vous pouvez sans difficulté observer les détails du paysage, même si le wagon vibre par les irrégularités de la voie, votre regard restant naturellement fixé sur ces détails. Si vous êtes particulièrement captivé par le paysage, vous pourriez même oublier que le train est en mouvement. De jour par temps ensoleillé, vous prendrez une photographie à main levée sans difficulté. Mais s'il fait nuit et que vous voulez prendre une photographie du paysage éclairé par la Lune, il va falloir poser plusieurs secondes, et, cette fois, les oscillations du wagon rendront votre image irrémédiablement floue et bougée. La situation est similaire en astrophotographie : même si vous considérez à juste titre que votre monture suit très bien pour l'observation visuelle, elle peut vous réserver de désagréables surprises en longue pose car les exigences de précision ne sont absolument pas les mêmes : la question du suivi est le souci numéro un en photographie du ciel profond. Dans certains cas, l'astrophotographe sera amené à effectuer du guidage, c'est-à-dire à corriger en temps réel les irrégularités de mouvement de la monture plutôt que de la laisser livrée à elle-même.

### L'erreur périodique

En astronomie, il n'y a pas que les pièces optiques qui réclament une grande précision de réalisation. La mécanique aussi doit être réalisée avec soin, en particulier les éléments qui concourent à l'entraînement de l'instrument en transmettant la rotation de l'axe du moteur à l'axe polaire de la monture. Les montures équatoriales du commerce sont généralement équipées d'une roue dentée de plus ou moins grand

diamètre, solidaire de l'axe polaire, sur laquelle vient tangenter une vis sans fin. Cette vis est entraînée en rotation par le moteur, avec éventuellement un ou plusieurs engrenages ou un ensemble d'engrenages entre les deux. Prenons une monture dotée d'une roue dentée de 100 mm de diamètre et supposons qu'un minuscule grain de sable de 1/100 de mm se glisse dans un de ses filets. Au moment où la vis tangente attaque ce filet, une irrégularité de mouvement de l'instrument va se produire, d'une amplitude de 40", soit le diamètre apparent de Jupiter ! Heureusement, la graisse présente dans

le mécanisme limite les à-coups mais cet exemple nous montre que pour obtenir une précision de suivi de 4", cette roue dentée et sa vis tangente devraient être réalisées avec une précision meilleure que le millième de mm !

Dans la pratique, les inévitables imperfections de réalisation de ces éléments mécaniques provoquent de continuelles irrégularités de suivi : l'objet semble lentement aller et venir autour d'une position moyenne, ce qui est bien visible lorsque cette position est repérée à l'aide d'un oculaire réticulé grossissant suffisamment. Ces irrégularités sont baptisées « erreur périodique », car elles se reproduisent plus ou moins à l'identique au bout d'un certain temps. En effet, les irrégularités de mouvement dues aux im-

perfections de la vis tangente vont revenir de manière identique lorsque celle-ci aura décrit, quelques minutes plus tard, exactement un tour sur elle-même, et il en va ainsi pour chacun des autres éléments mécaniques tels que les engrenages. Il faudrait donc plutôt parler des erreurs périodiques (au pluriel), car tous ces éléments ont des périodes de rotation différentes et les irrégularités de mouvement sont le résultat de la combinaison de toutes ces erreurs désynchronisées. La courbe qui les trace au cours du temps apparaît donc plus ou moins tourmentée (voir annexe 5). Cependant, il est souvent possible de repérer une périodicité dominante car l'un des éléments, en général la vis tangente, y contribue de manière prépondérante.

L'erreur varie selon le modèle de monture, aussi bien en période qu'en amplitude. Les montures équatoriales d'entrée de gamme peuvent présenter une erreur périodique d'une amplitude totale de 30" à 1' sur un tour de la vis tangente. C'est également souvent le cas des montures à fourche des modèles de Schmidt-Cassegrain non dotés du système PEC (voir plus loin). À l'inverse, les lourdes montures allemandes haut de gamme, telles que les Astrophysics, Losmandy ou Takahashi, présentent une erreur périodique entre 3" et 10" environ. Il est possible de descendre sous ces valeurs en réalisant un système d'entraînement par des solutions peu coûteuses mais encombrantes, de type secteur lisse, ce qu'ont fait certains amateurs adroits et bricoleurs. La fabrication de ce type d'entraînement est détaillée dans les livres et les sites décrivant la construction d'instruments par un amateur. Mais l'amplitude de l'erreur n'est pas le seul paramètre à considérer : la rapidité des oscillations autour de la position moyenne est tout aussi importante. Ainsi, une monture de 20" d'erreur sur 10 minutes avec des variations lentes peut être plus performante qu'une monture de 10" d'erreur sur 4 minutes avec de brusques sursauts, car la première supportera mieux des poses de deux à trois minutes que la seconde.

Certaines montures du commerce comportent un système électronique appelé « PEC » (pour *Periodic Error Correction*), destiné à mémoriser les erreurs et à les compenser. La mémorisation des erreurs se fait soit en usine, soit par suivi manuel effectué sur une étoile par l'utilisateur à l'aide d'un oculaire réticulé. Une fois ces erreurs enregistrées dans la mémoire de la monture, elles sont prises en compte

par le système de contrôle d'entraînement lors de l'envoi des impulsions au moteur, et la compensation est reproduite à l'identique à chaque tour de vis tangente. En pratique, le système PEC n'annule pas les erreurs périodiques ; il permet, dans de bonnes conditions (erreur essentiellement due à la vis tangente et mesure d'erreur effectuée soigneusement) de ramener une monture ayant une erreur périodique de plusieurs dizaines de secondes d'arc au niveau d'une monture de bonne qualité mécanique, soit entre 5" et 10" environ.

Une solution efficace pour réduire l'erreur périodique sur des montures d'entrée de gamme, adoptée avec succès par certains amateurs, est de se procurer chez un artisan mécanicien une vis tangente de très bonne finition et de remplacer la vis d'origine. Certains fournisseurs d'accessoires astronomiques proposent de telles vis pour quelques montures courantes du commerce.

Comme pour la collimation des miroirs d'un télescope, le réglage de certains éléments d'une monture équatoriale est primordial pour l'obtention des meilleurs résultats (voir annexe 5).

## Les autres erreurs

L'erreur périodique et les erreurs d'alignement polaire ne sont pas les seules causes des irrégularités de suivi en longue pose. Voici d'autres causes courantes :

- la dérive due à la réfraction atmosphérique : lorsque la hauteur de l'objet au-dessus de l'horizon varie, ce qui se produit lorsqu'il monte ou descend dans le ciel, l'amplitude de la réfraction qu'il subit varie également, ce qui occasionne une dérive dans le sens vertical (donc à la fois en ascension droite et en déclinaison) ; cet effet est surtout sensible lorsque le champ visé est proche de l'horizon ;
- la vitesse du moteur d'ascension droite, qui peut être très légèrement différente de la vitesse sidérale théorique ;
- les flexions mécaniques et les jeux de pièces mécaniques ou optiques ; citons notamment le jeu du support du miroir primaire des Schmidt-Cassegrain, occasionnant un phénomène bien connu de ses utilisateurs, le shifting, que nous avons évoqué au chapitre 4.

## Le guidage

Lorsque vous constatez des bougés que vous jugez inacceptables sur vos images, la première chose à faire est d'en déterminer l'origine pour appliquer le remède approprié. Par exemple, s'il s'agit d'un défaut d'alignement polaire, la solution est d'affiner celle-ci par la méthode de Bigourdan ou de King. Si vous constatez des irrégularités importantes de suivi, voire des à-coups, il est peut-être temps de vérifier et de contrôler le réglage du mécanisme d'entraînement de la monture (voir annexe 5). Mais si vous ne pouvez trouver de remède simple, il faudra songer au guidage. Le principe est simple : une étoile suffisamment brillante est choisie dans le champ photographié ou à proximité immédiate de celui-ci, et l'instrument est recalé de manière très fréquente sur cette étoile afin de compenser les dérives en quasi temps réel.

Cette technique suppose que le système de motorisation de la monture soit capable d'effectuer des ajustements très fins, de l'ordre de la seconde d'arc, et dispose donc de vitesses de rattrapage dites lentes : ce n'est pas avec les vitesses rapides servant au pointage et à la recherche des objets que vous pourrez effectuer les très petites corrections nécessaires (voir encadré) ! Toutes les montures de milieu et haut de gamme comportent au moins une vitesse de rattrapage lente, souvent appelée « vitesse photo ».



Le mécanisme d'entraînement classique des montures du commerce comporte un moteur entraînant, éventuellement via un train d'engrenages, une vis sans fin qui tangente une roue dentée.





Plusieurs solutions techniques s'offrent à vous, plus ou moins complexes ou coûteuses, examinons-les en détail.

### Vitesses de suivi et vitesses de rattrapage

*Ne confondez pas ces notions. La vitesse de suivi correspond à un mouvement uniforme de la monture dans sa poursuite d'un astre. La vitesse de base est bien sûr la vitesse sidérale, elle convient à tous les objets fixes sur la voûte céleste : étoiles, nébuleuses, galaxies, etc. De nombreuses montures proposent des vitesses adaptées à d'autres objets, par exemple la vitesse solaire ou lunaire, voire des vitesses programmables pour un objet à mouvement propre particulier, comme une comète ou un astéroïde.*

*Les vitesses de rattrapage correspondent aux corrections effectuées pendant un guidage photographique. On les exprime en fraction de la vitesse sidérale. Par exemple, une vitesse de rattrapage de 0,3 (ou 30 %) signifie que lorsque le rattrapage est actionné vers l'est, la monture ralentit à 70 % de la vitesse sidérale et qu'elle accélère à 130 % lors d'un rattrapage vers l'ouest.*

*Pour un suivi photographique précis, il est indispensable que la vitesse de rattrapage choisie soit inférieure à la vitesse sidérale. Cela permet à tous les éléments du mécanisme d'entraînement en ascension droite de fonctionner en permanence dans le même sens de rotation. Dans le cas contraire, un rattrapage vers l'est conduirait à inverser le sens de rotation et les jeux mécaniques, dont nous avons vu qu'ils étaient indispensables, et provoquerait des bougés rédhitoires à chaque inversion de sens.*

## Guidage parallèle

Le principe est simple : installer, parallèlement à l'instrument principal, un instrument (simple lunette achromatique ou petit télescope) servant exclusivement au guidage. La difficulté consiste à concilier deux contraintes contradictoires :

- obtenir un montage suffisamment rigide, afin d'éviter les flexions différentielles entre l'instrument principal et l'instrument-guide ;

- garder le loisir de dépointer légèrement ce dernier, afin de centrer une étoile de guidage suffisamment brillante tout en conservant le cadrage de l'instrument principal.

Une fixation de type écrou de trépied photographique ne suffit généralement pas. Imaginez en effet qu'une flexion de 1/10 de mm, à l'extrémité d'une lunette-guide de 500 mm de long fixée en son centre, se traduit par un dépointage de 80" ! Même une flexion de 1/100 de mm équivaut à 8", ce qui est du même ordre de grandeur que l'erreur périodique d'une bonne monture. Le système de fixation doit tenir l'instrument sur une bonne partie de sa longueur, soit à l'aide d'un collier ou d'une queue d'aronde si l'instrument est relativement court, soit à l'aide de deux anneaux bien écartés s'il s'agit d'une lunette longue. Afin de pouvoir légèrement dépointer, l'ensemble est monté sur une solide rotule orientable ou, dans le cas des anneaux, ceux-ci sont équipés de vis de réglage, comme pour un chercheur. Bien sûr, aucun maillon de la chaîne joignant l'instrument-guide à l'instrument principal ne doit être d'une rigidité très inférieure à celle des autres.

Le montage d'un instrument-guide en parallèle augmente significativement la charge de la monture et, dans certaines situations, cause des soucis d'équilibrage, par exemple avec les télescopes à fourche. On peut être conduit à ajouter des contrepoids, ce qui augmente encore la charge de la monture.

Lorsqu'un téléobjectif est monté en parallèle sur un instrument astronomique, celui-ci peut naturellement être employé pour le guidage.

## Guidage par diviseur optique

Le diviseur optique est un accessoire se plaçant juste devant l'appareil. Il comporte un petit prisme prélevant une partie du faisceau lumineux en périphérie de champ, hors du cadre de la photographie afin de ne pas provoquer d'ombre sur l'image. Ce prisme envoie la lumière ainsi prélevée vers un oculaire ou un appareil d'autoguidage (voir plus loin). Il permet d'utiliser des étoiles plus faibles que le guidage parallèle car il profite de toute la lumière collectée par l'instrument principal. Léger et exempt de flexions – contrairement au système parallèle –, il convient particulièrement aux instruments à grande focale. Il souffre toutefois d'un inconvénient pratique : la recherche et le centrage d'une étoile-guide sur le petit prisme sont parfois délicats. Il faut généralement faire tourner le diviseur autour de l'axe optique et dépointer légèrement l'instrument pour pouvoir trouver une étoile de guidage. La mise au point doit d'abord être réalisée pour l'appareil principal, puis elle est effectuée pour l'étoile de guidage en agissant sur la position de l'oculaire ou de l'appareil d'autoguidage. Quelques soucis de montage sont également susceptibles de survenir :

La recherche et le centrage d'une étoile-guide sur le petit prisme sont parfois délicats. Il faut généralement faire tourner le diviseur autour de l'axe optique et dépointer légèrement l'instrument pour pouvoir trouver une étoile de guidage. La mise au point doit d'abord être réalisée pour l'appareil principal, puis elle est effectuée pour l'étoile de guidage en agissant sur la position de l'oculaire ou de l'appareil d'autoguidage. Quelques soucis de montage sont également susceptibles de survenir :

- sur un Newton, l'augmentation de la distance entre le capteur et l'instrument peut rendre la mise au point impossible et nécessiter un diviseur particulier.
- si un réducteur de focale ou un correcteur de champ est utilisé, le diviseur optique peut compliquer le placement de cet accessoire à la bonne distance du capteur, à moins que le réducteur n'y soit incorporé.



*Le prisme excentré est bien visible sur cette photographie d'un diviseur optique installé sur un télescope de Newton et surmonté d'un oculaire réticulé.*



*Deux exemples d'installation d'un instrument-guide sur rotule orientable. Un petit télescope de type Maksutov est une solution intéressante car légère et compacte, donc moins sujette aux flexions.*



*Cette photographie de la région de la Licorne, obtenue avec un astrographe de 530 mm de focale à F/D 5 et une caméra CCD 24 x 36, couvre un champ de 2,6° sur 3,9°. Située en pleine Voie Lactée, cette région regorge d'amas ouverts et de nébuleuses par émission et obscures (dont la célèbre nébuleuse du Cône).*



## Guidage visuel et autoguidage

Une fois la solution choisie, guidage par instrument ou par diviseur optique, reste à déterminer si le guidage se fera visuellement ou grâce à un appareil dédié.

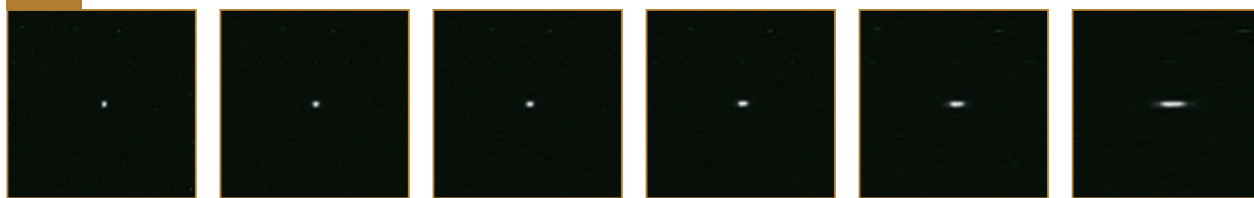
### Le guidage visuel

Le guidage visuel (ou manuel) nécessite un oculaire réticulé permettant un grossissement suffisant pour bien apprécier la plus petite dérive ayant un effet visible sur la photo. Pour une étoile de finesse moyenne (FWHM de 2 pixels), un bougé d'un demi-pixel se voit déjà relativement bien sur les images. Connaissant l'échantillonnage de l'image, vous pouvez en déduire facilement l'écart angulaire tolérable ; par exemple, à 1,5"/pixel, un demi-pixel correspond à 0,75". Pour que cet écart apparaisse à l'oculaire-guide sous un angle de 2', il faut grossir environ 150 fois. À vous de déterminer le grossissement qui vous convient : certains amateurs préfèrent guider avec un grossissement important afin de discerner plus aisément les dérives.

Il va sans dire qu'il est exclu de guider avec le chercheur de l'instrument : son grossissement est beaucoup trop faible.

Une fois l'étoile de guidage centrée sur le réticule, il vous faut orienter les axes de celui-ci afin qu'ils correspondent aux rattrapages en ascension droite et en déclinaison. Avec la raquette de commande de la monture en main, entraînez-vous quelques minutes pour bien appréhender les quatre directions (nord, sud, est, ouest) et les vitesses de rattrapage en actionnant chacun des boutons correspondants. Si vous pouvez régler la vitesse de rattrapage, choisissez une valeur telle que des petites corrections soient réalisables facilement, sans risque de dépasser la quantité nécessaire.

Guider visuellement pendant plusieurs dizaines de minutes est assez pénible, surtout s'il fait froid ou si l'étoile-guide est faible. La fatigue oculaire, l'assoupissement et l'engourdissement vous guettent, rendant les corrections plus lentes et moins précises et les erreurs plus fréquentes.



*La première image de cette série représente une étoile photographiée à un échantillonnage de 1"/pixel (par exemple, un appareil à photosites de 7 µm placé au foyer d'un instrument de 1 500 mm de focale). Sa largeur à mi-hauteur (voir chapitre 4) est de 1,75 pixel. Les images suivantes représentent des bougés croissants, respectivement 0,5", 1", 2", 4" et 8". À noter qu'un bougé de 0,5 pixel est déjà discernable sur une telle étoile.*



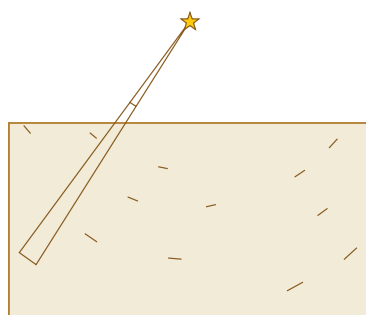
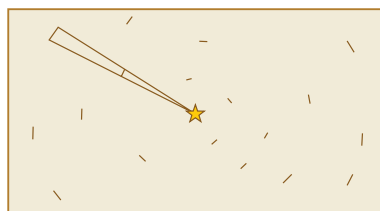


## L'autoguidage

L'autoguidage suit exactement le même principe que le guidage visuel, à ceci près que :

- un capteur, celui de l'appareil de guidage, prend le relais de votre œil et réalise en continu des poses courtes sur l'étoile-guide ;
- le logiciel de pilotage de l'appareil de guidage remplit le même rôle que votre cerveau : il analyse périodiquement la position de l'image de l'étoile sur le capteur, calcule la correction adéquate pour la recentrer et actionne les rattrapages de la monture.

S'il est bien utilisé, l'autoguidage est un moyen très puissant permettant d'obtenir des étoiles bien rondes qui contribuent à la finesse et à la beauté de la photographie. Il est plus précis, plus rapide et, bien sûr, plus reposant que le guidage visuel. Mais ce n'est pas la panacée qui prémunit contre les rafales de vent ou qui transforme une monture de piètre qualité, défectueuse ou mal réglée en monture au suivi parfait : il fonctionne d'autant mieux que la monture présente, à la base, un suivi de qualité. Il ne dispense pas non plus de réaliser un alignement polaire correct.



*Lorsque l'instrument reste pointé précisément sur une étoile-guide, que ce soit par guidage manuel ou par autoguidage, un défaut de mise en station se manifeste par une rotation de champ autour de cette étoile (en haut). L'amplitude du bougé étant proportionnelle à la distance angulaire à l'étoile-guide, si celle-ci est située en dehors du champ de la photographie comme c'est souvent le cas, la rotation est plus prononcée (en bas).*

Malgré son nom, l'appareil autoguideur ne fait pas tout lui-même : la phase d'initialisation nécessite votre intervention. Une étoile-guide doit d'abord être trouvée et soigneusement centrée, puis l'appareil de guidage est installé, de préférence en alignant les axes de son capteur avec ceux de la monture. La mise au point est effectuée et les réglages, notamment le temps de pose, sont choisis pour obtenir sur l'étoile-guide un signal correct mais sans saturation. Vient ensuite la phase dite « de calibration » : le logiciel de pilotage de l'appareil de guidage doit, comme vous-même en guidage visuel, apprendre dans quelle direction et à quelle vitesse se déplace l'étoile-guide sur le capteur quand chacun des quatre rattrapages est actionné. Pour cela, il actionne successivement ces rattrapages pendant quelques secondes et mesure de combien de pixels et dans quelle direction s'est déplacée l'étoile sur l'image. Ceci fait, il saura déterminer, par un calcul inverse très simple, la correction à apporter quand l'étoile dérive.

Une fois la phase d'initialisation terminée, l'autoguidage peut commencer et le même cycle se répète en boucle : prise d'image, calcul des erreurs et des corrections, action sur les rattrapages... et ainsi de suite, inlassablement. Les poses sur l'appareil principal peuvent alors commencer. Le temps de cycle varie habituellement de 0,5 s à quelques secondes, selon la luminosité de l'étoile-guide. Au-delà de quelques secondes, des bougés risquent d'apparaître car, entre deux corrections effectuées par l'autoguideur, la monture demeure évidemment livrée à elle-même.

Certains logiciels d'autoguidage proposent un réglage supplémentaire : le taux de correction des écarts, parfois appelé « agressivité ». Lorsqu'il détecte un écart, un système d'asservissement ne le rattrape jamais à 100 %. En effet, à cause des erreurs de mesure dues notamment au bruit et à la turbulence, on ne doit corriger qu'une fraction de l'écart, par exemple 50 % ou 70 %, sinon le système peut se mettre à osciller voire devenir instable : les erreurs augmentent au lieu de rester confinées. Mais si cette fraction est trop faible (par exemple 10 %), les corrections d'un écart risquent de demander trop d'itérations. Lorsque vous mettez en œuvre l'autoguidage, essayez plusieurs valeurs de ce paramètre d'agressivité afin de déterminer celle qui donne les écarts moyens les plus faibles.

## Les appareils pour l'autoguidage

Divers appareils peuvent être utilisés en tant qu'autoguideur :

- une caméra CCD spécialisée dans l'autoguidage, telle que la Meade XT201 ou les SBIG STV et ST4 (cette dernière n'est plus fabriquée mais on en trouve encore parfois en occasion) ; l'avantage de ces caméras est qu'elles possèdent des boutons et un afficheur, elles sont donc entièrement autonomes et ne nécessitent pas d'ordinateur ;
- une webcam : peu coûteuse, cette solution nécessite un logiciel de pilotage (tel qu'Astrosnap ou Iris) possédant une fonction d'autoguidage par webcam, ainsi que la fabrication d'un boîtier de connexion reliant votre ordinateur à la monture ; une webcam standard nécessite une étoile-guide plus brillante qu'une webcam modifiée longue pose (voir chapitre 2) ;
- une caméra CCD à double usage, permettant à la fois l'acquisition d'images et l'autoguidage en simultané ;

À ce jour, deux marques proposent de telles caméras à double usage :

- SBIG utilise un système à double capteur, bien visible sur la photographie du KAF-3200E page 18 : le capteur principal est utilisé pour l'acquisition des images tandis qu'un capteur plus petit, situé à ses côtés de manière à ce que la mise au point soit identique sur les deux capteurs, recueille la lumière d'une étoile-guide ;
- certains modèles Starlight Express tirent parti d'une propriété de capteurs interligne autorisant la récupération du contenu de la moitié d'un photosite tout en laissant la lumière s'accumuler sur l'autre moitié ; outre son coût réduit (un seul capteur pour l'acquisition et l'autoguidage), l'avantage de cette solution est de permettre de choisir l'étoile-guide sur toute la surface du capteur principal ; l'inconvénient est la perte de la moitié de la sensibilité : le temps de pose doit être doublé lorsque la fonction d'autoguidage est activée.



*La caméra CCD SBIG STV possède les fonctions d'imageur et d'autoguideur autonome.*

Précisons que :

- les caméras à double usage peuvent également être utilisées en autoguideur seul, en conjonction avec un APN ou une autre caméra CCD ;
- la présence d'un filtre diminue la lumière parvenant au capteur de guidage, ce qui oblige à allonger le temps de pose et donc à ralentir la cadence des corrections ; cet effet est particulièrement prononcé si le filtre est à bande étroite (voir plus loin).

La mise en œuvre de l'autoguidage nécessite une monture dotée d'une connexion pour autoguideur. Les connecteurs physiques (prises mâles et femelles) varient d'une monture à l'autre : chaque couple autoguideur-monture nécessite un câble adéquat, disponible en option ou à fabriquer soi-même à partir des informations recueillies dans les notices techniques des matériels. Mais il n'existe que deux types de connexion, c'est-à-dire deux manières pour l'autoguideur de transmettre les informations de commande de rattrapage à la monture.

1. Une liaison basée sur des informations numériques transmises par un protocole standard de communication entre un ordinateur et un télescope, le protocole LX200 : la commande d'un rattrapage est transmise sous forme d'un ordre logique indiquant la direction et l'amplitude de la correction à effectuer ; ce protocole a été inventé par la marque Meade mais d'autres constructeurs l'ont adopté, par exemple Astrophysics pour ses montures et Vixen pour son système Skysensor.
2. Une liaison analogique utilisant quatre connecteurs électriques, un par direction (est, ouest, sud, nord) ; la commande d'un rattrapage se fait en reliant une de ces liaisons à un cinquième connecteur (masse) pendant la durée adéquate ; les montures Takahashi sont de ce type.

De la même manière, un autoguideur peut être d'un type ou d'un autre : les caméras Meade sont compatibles du protocole LX200, tandis que les caméras SBIG utilisent la liaison analogique. Pour savoir de quel type est une monture ou un autoguideur, il suffit de consulter la documentation du constructeur ou de questionner le revendeur. Les logiciels comportant une fonction d'autoguidage par webcam (Iris, Astrosnap, etc.) sont généralement de type LX200. Si votre monture et votre autoguideur sont de même type, tout va bien : il vous suffit de vous procurer le câble adéquat. Dans le cas contraire, ils ne peuvent se comprendre. Mais si votre autoguideur est en LX200 et votre monture en analogique, vous pourrez vous procurer via Internet un petit boîtier d'adaptation capable d'interpréter les informations d'autoguidage du protocole LX200 et de les transformer, via des composants appelés « relais », en impulsions destinées à votre monture.

L'expérience montre qu'il est préférable que l'échantillonnage (voir chapitre 4) sur l'autoguideur soit inférieur au double de celui de l'appareil principal pour que la précision de mesure de la position de l'étoile-guide soit suffisante. Dans le cas contraire, il est toujours possible de placer une lentille de Barlow devant l'autoguideur.

### Le système SBIG AO

La firme SBIG, spécialisée dans la réalisation de caméras CCD pour amateurs, propose en option pour ses propres caméras CCD un système d'autoguidage rapide basé sur un dispositif placé un peu en avant du capteur et dont le rôle est de décaler légèrement l'image reçue par celui-ci pour corriger les défauts de suivi. Ce dispositif est actionné par de petits éléments piezo-électriques commandés par l'autoguidage et capables de fonctionner à une fréquence de plusieurs dizaines de hertz. Pour ce faire, deux solutions techniques ont été mises en œuvre :

- un miroir, installé dans un boîtier semblable à un renvoi coudé, peut s'incliner très légèrement dans toutes les directions (c'est le premier système proposé par SBIG, dès 1998) ;

- une lame de verre épaisse (6 mm) qui, lorsqu'elle est légèrement inclinée, provoque par réfraction un petit décalage latéral de l'image.

La solution à lame de verre présente un avantage : la distance entre le capteur et le porte-oculaire de l'instrument est bien moindre que pour le miroir, ce qui autorise son usage sur des instruments tels que les Newton ou certaines lunettes sur lesquels le système à miroir était inutilisable pour cause de foyer impossible à atteindre.

Ce principe présente de multiples avantages : il est léger, précis, rapide et, surtout, il évite de subir les inconvénients d'une monture peu fiable, en particulier concernant les jeux mécaniques, puisque l'autoguidage est autonome et n'agit pas sur la monture elle-même (néanmoins, lorsque les erreurs de suivi dépassent la plage de correction possible du miroir ou de la lame de verre, le dispositif d'autoguidage doit commander des rattrapages sur la monture).



*Le système SBIG AO : à gauche le modèle à miroir, à droite le modèle à lame de verre. Ce système ne fonctionne que lorsqu'il est couplé à une caméra de la même marque.*

### Faut-il absolument (auto)guider ?

Il n'est pas toujours indispensable de guider la monture. Les deux paramètres fondamentaux sont l'erreur périodique de la monture et l'échantillonnage. Considérons les deux situations suivantes.

1. Vous utilisez une monture dont l'erreur périodique est de 30" pour photographier le ciel à l'aide d'un objectif grand-angle de 24 mm de focale et d'un APN reflex.
2. Vous utilisez une monture dont l'erreur périodique est de 10" pour photographier le ciel avec un télescope de 2 m de focale et une caméra CCD dont les pixels font 6,8 µm.

Dans le premier cas, l'échantillonnage vaut 60", soit le double de l'erreur périodique : le guidage n'est pas une priorité. Dans le second cas, l'échantillonnage est 14 fois plus petit que l'erreur périodique : autrement dit, si vous laissez la monture livrée à elle-même pendant un tour de la vis sans fin, vous aurez un bougé d'au moins 14 pixels, le guidage s'impose donc.

Entre ces deux situations extrêmes, il est difficile de définir une limite précise au-delà de laquelle le guidage serait impératif. L'un des critères essentiels est la tolérance de bougé que vous vous fixez : certains amateurs s'accommodent d'un bougé de plusieurs pixels car à l'affichage, ils réduisent d'un facteur de 2 à 4 les dimensions de leurs images prises avec un APN ; d'autres amateurs souhaitent obtenir des étoiles absolument rondes sur une image visualisée à 100 % et ne tolèrent pas un bougé de plus d'un demi-pixel. Une chose est sûre : plus la focale de votre instrument est grande, plus les défauts de suivi risquent d'affecter vos images. Si vous souhaitez éviter les complications, tournez-vous vers les focales courtes. Évidemment, une focale courte ne permettra pas d'obtenir autant de détails qu'une focale longue et peut se révéler insuffisante sur des petites nébuleuses planétaires ou de petites galaxies, mais c'est le prix à payer pour la tranquillité !

Un conseil : effectuez vos premières prises de vue sans mettre en œuvre d'autoguidage. Si vous constatez des bougés sur des poses d'une à deux minutes, affinez votre mise en station et assurez-vous





que si des bougés subsistent, ils sont dus à l'erreur périodique en se manifestant uniquement en ascension droite. Vérifiez et réglez si nécessaire les jeux mécaniques de votre monture (voir Annexe 5). Si les bougés persistent, diminuez le temps de pose jusqu'à ce que vous jugiez acceptables. C'est une solution courante adoptée par les amateurs désirant éviter de mettre en œuvre une solution de guidage : raccourcir la durée de chaque pose à une fraction de tour de la vis sans fin, en général entre une dizaine de secondes et une minute. De cette manière, certaines images d'une série seront moins bougées que d'autres, car elles correspondent à des instants de la courbe d'erreur périodique où les variations sont plus lentes. Mais si cette solution conduit à des temps de pose vraiment trop courts, il vous faudra tout de même vous pencher sur une solution d'auto-guidage... ou envisager de changer de monture.

## Les objets du ciel profond

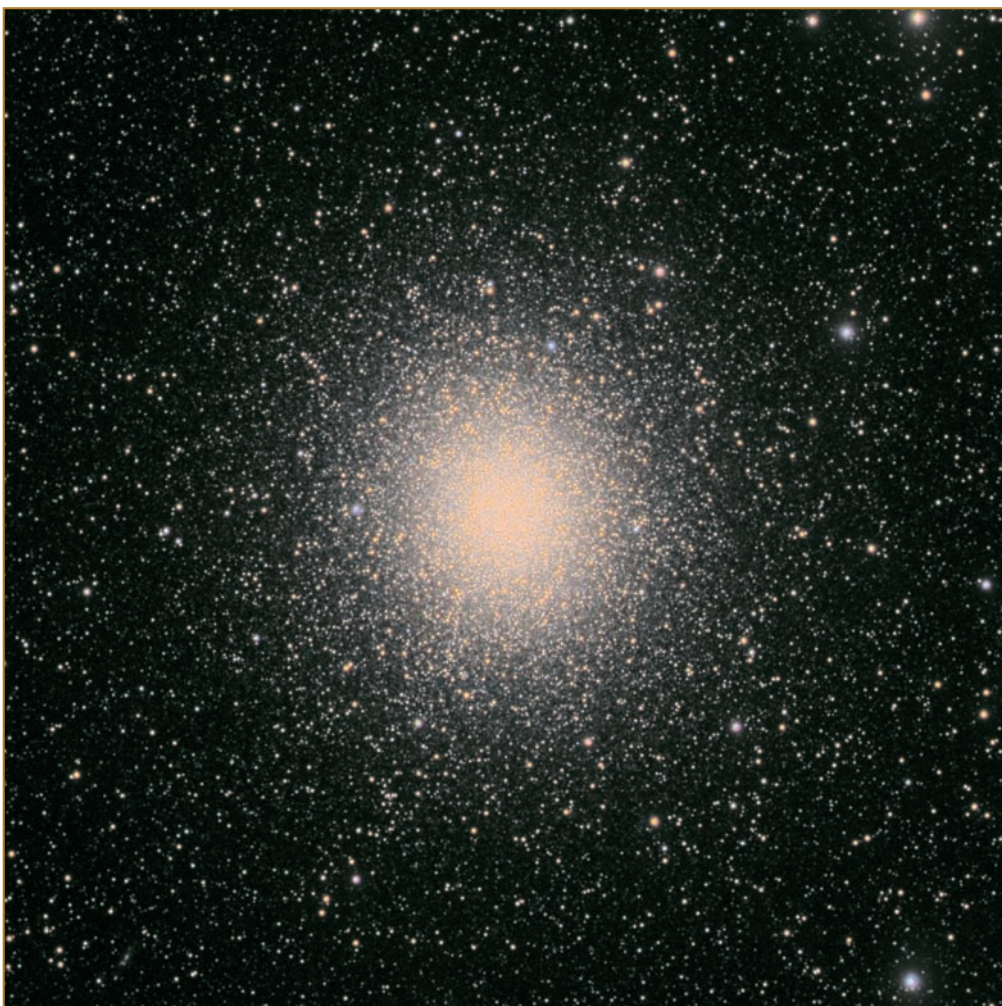
Sous le terme ciel profond sont regroupées plusieurs familles d'astres de nature, de dimensions et de morphologie extrêmement variées. Il nous faut accorder une attention toute particulière aux rayonnements lumineux qu'ils nous envoient car la manière de photographier ces astres et de traiter ensuite leurs photographies en dépend étroitement.

### Les étoiles

À l'image de notre Soleil, les étoiles présentent un spectre dit continu : toutes les longueurs d'onde de la lumière visible (autrement dit toutes les couleurs) sont présentes, dans des proportions variables selon la température de surface de l'étoile et sa composition. Les étoiles les plus massives et les plus chaudes apparaissent bleutées, alors que les petites étoiles plus froides sont rougeâtres et émettent peu dans le vert et très peu dans le bleu. Le Soleil est une étoile dont le rayonnement est blanc-jaune.

Les amas ouverts tels que l'amas double de Persée (photographie page 98), nombreux dans la Voie Lactée, comportent souvent des étoiles jeunes et massives. Leur dimension apparente est très variée, elle peut dépasser le degré d'envergure comme dans le cas des Pléiades ou des Hyades, célèbres amas ouverts de la constellation du Taureau.

Les amas globulaires sont très anciens et majoritairement constitués d'étoiles vieilles et jaunâtres car ces étoiles ont une durée de vie bien plus longue que celle des étoiles massives. Le voisinage de notre Galaxie en comporte plusieurs centaines. Les plus beaux d'entre eux sont situés dans l'hémisphère sud, à l'image d'Oméga du Centaure qui mesure environ 1° d'envergure et qui est visible à l'œil nu même lors de la Pleine Lune. Côté hémisphère nord, le plus photographié est M13 dans la constellation d'Hercule, il mesure une vingtaine de minutes d'arc. À noter que les amas globulaires entourant certaines galaxies telles que M31 (galaxie d'Andromède) ou M104 (galaxie du Sombrero dans la constellation de la Vierge) sont photographiables en longue pose sous forme de toutes petites taches.



*Les amas globulaires Oméga du Centaure (à gauche) et M13 (ci-dessus), imprimés à la même échelle et photographiés respectivement avec une caméra CCD et un APN sur des lunettes de 530 mm et 1 100 mm de focale.*





Sur les photographies du ciel prises avec un objectif photographique, les étoiles apparaissent généralement peu colorées et les constellations sont parfois difficilement reconnaissables. Pour y remédier, il existe plusieurs astuces, toutes basées sur le même principe : étaler leur lumière sur un plus grand nombre de photosites. Pour cette photographie de la constellation d'Orion, la partie comportant un verre anti-Newton d'un cache diapositive grand format (60 × 60 mm) a été placée devant l'objectif.

Albireo est une étoile double aisément accessible grâce à sa brillance et à son écartement, mais elle est également très photogénique car ses deux composantes sont bien colorées. Pose de 1 s avec un APN reflex sur une lunette de 800 mm de focale. Les étoiles doubles très serrées réclament quant à elles une technique proche de celle utilisée en planétaire : amplification de la focale et prise de vues en vidéo.



## Les nébuleuses diffuses

Les nébuleuses diffuses sont de grandes concentrations de gaz (principalement de l'hydrogène) et de poussière interstellaire. Ce sont les lieux de gestation des étoiles. À de rares exceptions près, toutes les nébuleuses photographiées par les amateurs appartiennent à notre Galaxie et sont donc plus nombreuses dans la Voie Lactée ou à proximité.

Pour la photographie, il nous faut les séparer en deux grandes catégories : les nébuleuses par réflexion et les nébuleuses par émission.

Les nébuleuses par réflexion sont éclairées par des étoiles qui y sont nées. Elles présentent donc un spectre continu, avec cependant une dominante bleue due à un mécanisme de diffusion de la lumière similaire à celui qui rend le ciel diurne bleu par diffusion de la lumière solaire par notre atmosphère. Les plus connues sont les nébulosités qui entourent les étoiles principales de l'amas des Pléiades et la nébuleuse NGC1975 qui vit dans l'ombre de sa grande sœur toute proche, la célèbre nébuleuse d'Orion M42.

Les nébuleuses par émission sont les plus nombreuses et ont un comportement lumineux radicalement différent. Leur matière est ex-

Les étoiles principales de l'amas ouvert des Pléiades sont entourées de nébuleuses par réflexion. Photographie réalisée avec un APN reflex format APS-C sur une lunette de 750 mm de focale.







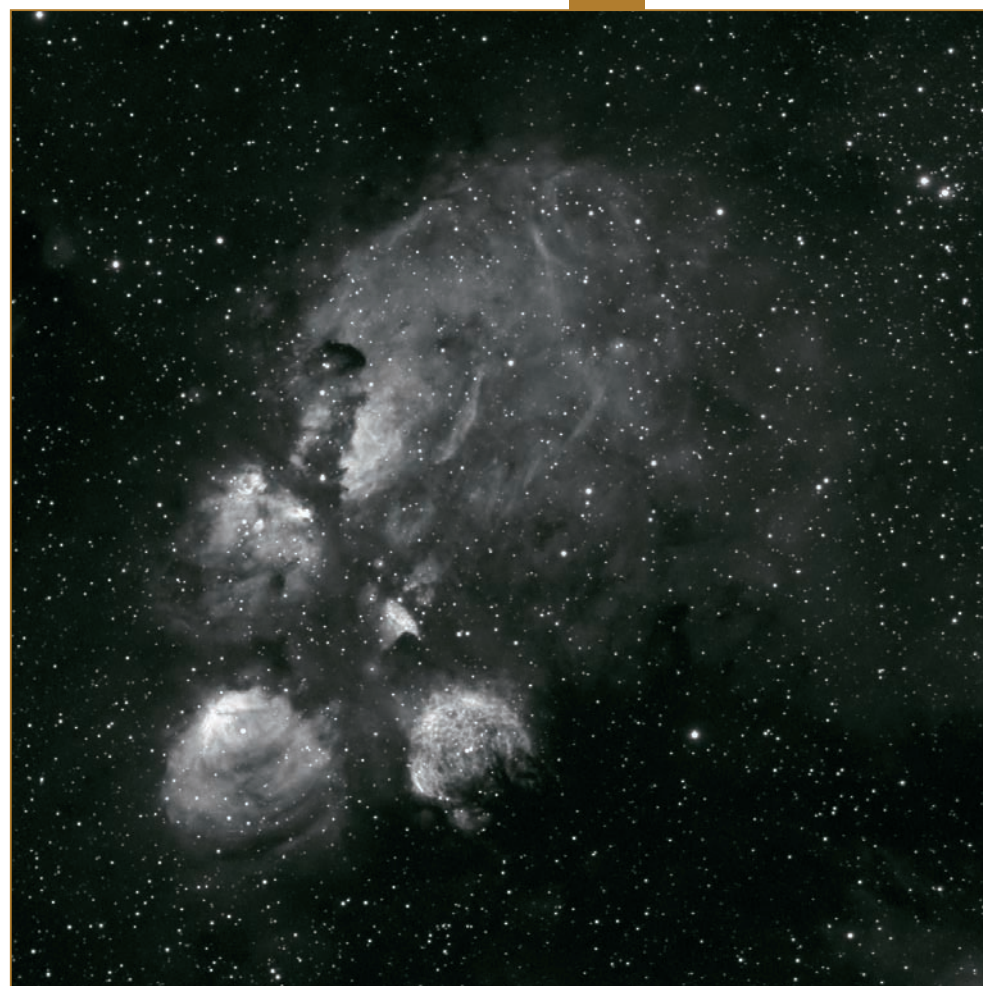
citée par les rayonnements des étoiles qui les environnent : elle ne réfléchit pas (ou peu) leur lumière, elle en émet par elle-même. Cette émission de lumière se fait seulement dans de toutes petites plages de longueur d'onde, à des valeurs très précises correspondant à ce que les physiciens appellent des raies d'émission monochromatiques. Le spectre de ces nébuleuses est discontinu, il en dit long sur leur composition chimique car chaque élément (hydrogène, oxygène, soufre, azote, hélium, etc.) possède ses propres raies caractéristiques. Deux de ces éléments se révèlent prépondérants en termes de rayonnement :

- l'hydrogène qui émet une série de raies dont les principales sont situées à 656,3 nm (raie  $H\alpha$ , « H alpha ») et à 486,1 nm (raie  $H\beta$ , « H bêta ») ;
- l'oxygène doublement ionisé qui émet une double raie à 495,9 et 500,7 nm (raies  $OIII$ , prononcer « oxygène trois »), la seconde raie étant toujours plus intense que sa voisine.

Les principales raies des nébuleuses par émission ; de gauche à droite :  $H\beta$ ,  $OIII$  (raie double),  $H\alpha$ . Les intensités relatives peuvent varier quelque peu mais  $H\alpha$  est toujours prédominante, suivie de  $OIII$  et de  $H\beta$ .



En regardant en plein jour à travers des filtres à bande étroite (voir plus loin) qui isolent chacune de ces raies, on peut évaluer leur couleur réelle : la raie  $H\alpha$  est d'un rouge profond, la raie  $H\beta$  est un mélange de bleu et de vert et les raies  $OIII$ , bien que placées à la limite théorique du bleu et du vert, non loin de la raie  $H\beta$ , sont à dominante verte. C'est, et de loin, la raie  $H\alpha$  qui prédomine en termes d'intensité lumineuse. Pour de nombreuses nébuleuses par émission, c'est même la seule qui soit détectable. Malheureusement, l'œil est pratiquement insensible à cette radiation en vision nocturne. On trouve également d'autres raies plus faibles, notamment  $SII$  (soufre ionisé) dans le rouge profond, non loin de  $H\alpha$  (674 nm). Lorsque nous observons des nébuleuses dans un instrument, ce sont princi-

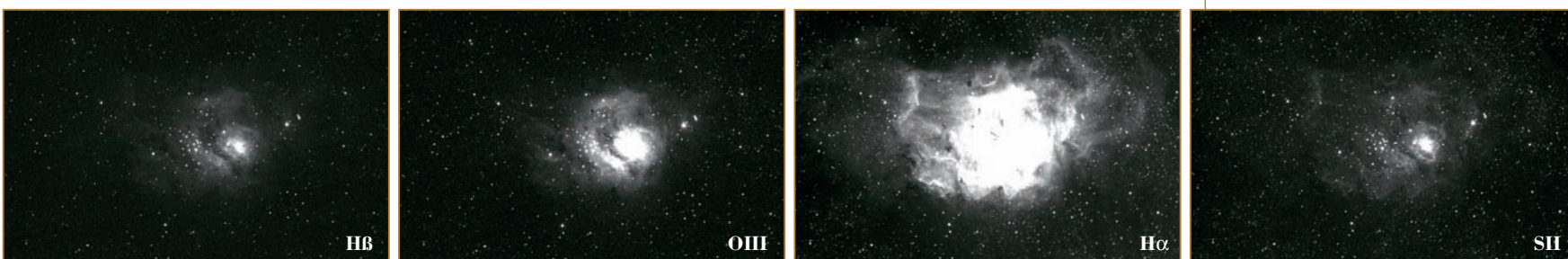


Comme NGC6334 (surnommée la nébuleuse de la Patte de Chat) dans la constellation du Scorpion, de nombreuses nébuleuses n'émettent pratiquement qu'en  $H\alpha$  et constituent donc un domaine de prédilection pour les caméras CCD.

palement les raies  $OIII$  que notre œil perçoit et qui donnent une couleur verdâtre aux plus brillantes d'entre elles. Quant aux autres nébuleuses par émission, moins brillantes, nous n'en percevons pas les couleurs dans un instrument d'amateur car, en faible lumière, l'œil ne voit plus qu'en noir et blanc : la nuit, tous les chats sont gris !

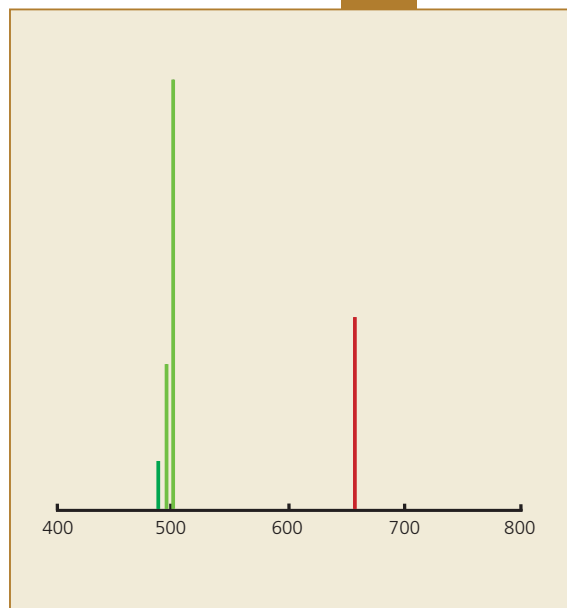
Il existe une autre espèce de nébuleuse : les nébuleuses obscures. Il s'agit de concentrations de matière n'émettant ni ne réfléchissant la lumière car il n'y a pas d'étoile brillante à proximité immédiate. Elles sont repérables parce qu'elles masquent les étoiles ou les nébuleuses situées en arrière-plan. Les plus célèbres sont le Sac à Charbon, immense nébuleuse obscure située dans la constellation de la Croix du Sud, et la nébuleuse de la Tête de cheval dans la constellation d'Orion. Cette dernière région regroupe d'ailleurs tous les types de nébuleuses : par réflexion, par émission et obscure (photographie page 16).

Contribution de différentes raies au rayonnement de la nébuleuse M8.



La gamme des dimensions angulaires des nébuleuses par émission est très étendue : les plus grandes d'entre elles présentent une envergure de plusieurs degrés. Il est d'ailleurs parfois difficile d'attribuer des limites précises à de grands complexes nébulaires tels que celui d'Orion qui englobe les régions de M42, de la Tête de Cheval et de la Boucle de Barnard.

*Les principales raies des nébuleuses planétaires sont les mêmes que celles des nébuleuses par émission mais leur importance relative change : cette fois, c'est OIII qui domine.*



## Les nébuleuses planétaires

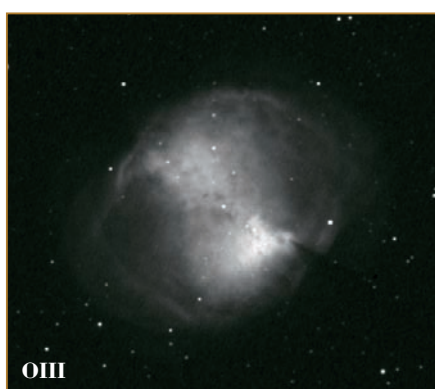
Les nébuleuses planétaires sont des coquilles de matière, de forme plus ou moins symétrique, entourant une étoile. Leur dénomination vient du fait que les astronomes ont longtemps pensé qu'il s'agissait de cocons de gaz et de poussières entourant une étoile jeune et allant donner naissance à un système planétaire. Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit en réalité d'étoiles en fin de vie ayant expulsé une partie de leur matière dans l'espace. Leur rayonnement, essentiellement monochromatique, est proche de celui des nébuleuses diffuses par émission. De nombreux éléments chimiques y contribuent, à commencer ici aussi par l'hydrogène et l'oxygène. Les intensités relatives des différentes raies varient d'une nébuleuse planétaire à l'autre, mais cette fois c'est la raie OIII à 500,7 nm qui domine généralement et qui donne aux plus brillantes d'entre elles leur couleur verte caractéristique. Viennent ensuite les raies OIII à 495,9 nm, Hα et Hβ. Selon la nébuleuse, d'autres raies pourront s'y ajouter, notamment des raies du soufre et de l'hélium, ainsi qu'une raie de l'azote ionisé à 654,8 nm (NII) qui est très proche de la raie Hα et qui est exceptionnellement brillante dans M57 (nébuleuse annulaire de la Lyre).



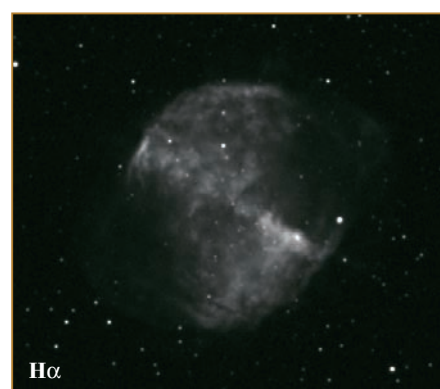
*La nébuleuse planétaire Helix, photographiée à l'aide d'une caméra CCD équipée de filtres RVB à bande large. Hα constitue l'essentiel du rayonnement de la coquille de la nébuleuse, alors que OIII ne s'octroie que sa partie centrale. La coquille principale est entourée d'une seconde coquille beaucoup plus faible, tout juste discernable en haut de l'image.*



Hβ



OIII



Hα

*Contribution de différentes raies au rayonnement de la nébuleuse planétaire M27. Notez la profonde différence morphologique de la nébuleuse entre OIII et Hα.*

La plus grande nébuleuse planétaire du ciel est NGC7293 (nébuleuse de l'Hélice, ou Helix Nebula) dans la constellation du Verseau, sa dimension apparente est voisine de la moitié de la Pleine Lune. Elle est suivie par M27, la célèbre nébuleuse Haltère (Dumbbell Nebula) qui mesure 7'. La plupart des nébuleuses planétaires ont une dimension apparente inférieure à la minute d'arc, ce sont en moyenne des objets plus petits que les nébuleuses par émission. Elles réclament un échantillonnage plus fin, c'est-à-dire une focale plus longue, si l'on veut en obtenir des images détaillées.

## Les galaxies

Ce sont les étoiles qui contribuent essentiellement au rayonnement nous parvenant des galaxies, ce sont par conséquent des objets à spectre continu. Le cœur des galaxies spirales apparaît souvent rougeâtre ou jaunâtre car il est composé de vieilles étoiles alors que les bras spiraux contiennent plus d'étoiles jeunes, ce qui leur donne souvent une coloration bleutée. Les galaxies elliptiques présentent une dominante globale jaunâtre.

À part quelques grandes galaxies (M31, M33 et les Nuages de Magellan), aucune ne dépasse le demi-degré d'envergure. La célèbre





*Les galaxies telles que celle-ci (M101 dans la Grande Ourse) sont essentiellement composées d'étoiles et présentent donc un spectre continu. Certaines comportent des petites régions HII teintées de rouge (hydrogène ionisé) et de bleu (étoiles jeunes).*

galaxie des Chiens de Chasse, M51, mesure une dizaine de minutes d'arc. Les plus belles galaxies du Lion, de la Vierge et de la Grande Ourse mesurent entre 5' et 15'. Ces régions englobent de magnifiques amas de galaxies et sont truffées de milliers de petites galaxies, plus petites qu'une minute d'arc mais tout à fait accessibles à la photographie numérique à longue pose : l'occasion de sortir des sentiers battus !

Les quasars sont des galaxies extrêmement lointaines et n'apparaissent que sous forme de points lumineux, comme les étoiles. Le plus brillant d'entre eux, 3C273, est situé dans la Vierge et sa magnitude est de 13 ; il est facile à photographier dès lors qu'on a pu le localiser par rapport aux étoiles environnantes. Des milliers de quasars parsèment le ciel mais leur magnitude, rarement inférieure à 18, réclame des temps de pose bien plus longs.

*Il a suffi de 30 s de pose avec un instrument de 130 mm de diamètre et un APN reflex pour photographier le quasar 3C273.*







Le quasar double 0959+561 dans la Grande Ourse, près de la galaxie NGC3079. Bien qu'il soit une cinquantaine de fois moins brillant que 3C273 (magnitude 17,3), il s'agit d'un des rares mirages gravitationnels accessible aux amateurs : l'un des deux quasars est un mirage de l'autre provoqué par une galaxie trop faible pour être photographiable. Les deux composantes étant séparées de 5,7", un échantillonnage de 2"/pixel est nécessaire pour bien les distinguer.



Une supernova vient parfois troubler pendant quelques semaines l'apparence immuable d'une galaxie, comme ici SN2005cs dans M51 en juin 2005. Sa magnitude d'environ 14 la classait parmi les supernovae faciles à photographier, ici en 3 minutes de pose avec un APN reflex sur une lunette de 130 mm. C'est la deuxième supernova que je photographie dans cette galaxie, la précédente a eu lieu en 1994.

## Les comètes

Ces vagabondes du Système Solaire réfléchissent la lumière du Soleil, elles présentent donc un spectre continu. Une comète typique montre une queue de poussières peu colorée et une queue de gaz bleutée. Peuvent s'y ajouter diverses raies d'émission d'intensité très variable selon la comète

dont, en particulier, les raies du carbone moléculaire ( $C_2$ ), entre 450 et 550 nm, qui donnent à certaines comètes une coloration verdâtre caractéristique.

En matière de photographie cométaire, la principale difficulté est induite par leur mouvement propre qui les fait petit à petit se déplacer par rapport aux étoiles. La comparaison de l'amplitude de ce mouvement avec l'échantillonnage permet de déterminer le temps de pose maximal approximatif. Cette amplitude peut varier dans de grandes proportions, selon la distance de la comète au Soleil et de sa distance à la Terre. Une belle comète visible à l'œil nu peut ainsi



La comète Machholz le 7 janvier 2005, alors que sa queue de gaz passait devant les Pléiades. Photographiée en 4 poses de 5 min à l'aide d'un téléobjectif de 200 mm et un APN reflex.







dérivée de plusieurs centaines de secondes d'arc par heure, ce qui est considérable. Dans ce cas, à moins d'employer une focale très courte et des temps de pose très brefs, la comète sera bougée sur la photographie. Deux moyens d'éviter cet inconvénient :

1. Utiliser une monture informatisée sur laquelle il est possible de programmer un mouvement cométaire en ascension droite et en déclinaison.



*La comète Neat (C/20001 Q4) photographiée en mai 2004 avec un APN Canon 10D et un téléobjectif de 200 mm, en 13 poses de 5 min. L'appareil était installé sur une monture équatoriale programmée pour suivre la comète dans ses mouvements propres par rapport aux étoiles en ascension droite et en déclinaison.*

2. Effectuer un guidage (visuel ou autoguidage) sur le noyau de la comète à l'aide d'un instrument-guide ; ceci suppose que ce noyau soit suffisamment brillant et ponctuel, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas.

Il existe deux manières de photographier une comète :

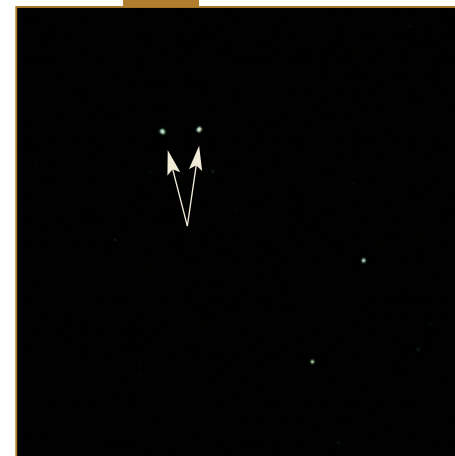
1. À l'aide d'un instrument de courte focale ou d'un téléobjectif permettant de cadrer la comète en entier dans un environnement d'étoiles.
2. À l'aide d'un instrument de plus longue focale offrant un gros plan sur son noyau et une partie de sa (ses) queue(s). Sur une comète active, une série de poses courtes, prises de préférence avec un capteur monochrome afin de profiter d'une sensibilité plus élevée, permet de mettre en évidence les mouvements de matière de jour en jour voire d'heure en heure. On peut ainsi constituer des séquences animées extrêmement spectaculaires et pédagogiques, mettant en relief le mouvement de la comète sur le fond des étoiles, les jets de matière du noyau et même parfois des fragmentations de parties de ce noyau.

## Les astéroïdes

Comme pour les étoiles, aucun télescope terrestre n'est capable de « grossir » les astéroïdes pour enregistrer des détails de surface. Leur photographie s'apparente à celle des étoiles mais ils ont, comme les comètes, un mouvement propre. Là encore, tout dépend de leur position par rapport à la Terre et au Soleil. Les petits astéroïdes géocroiseurs sont susceptibles de passer à (relative) proximité de la Terre et ont à ce moment un mouvement apparent qui peut être extrêmement rapide, dépassant plusieurs degrés par heure. Ils nécessitent une monture informatisée et programmée pour leur poursuite à l'aide de leurs paramètres orbitaux. Mais la plupart des astéroïdes du Système Solaire appartiennent à la ceinture des astéroïdes, située entre Mars et Jupiter, et présentent un mouvement apparent de l'ordre de la minute d'arc par heure. Selon l'échantillonnage et la durée des poses, l'astéroïde apparaîtra sous la forme d'une étoile ou d'un petit trait trahissant son déplacement. Comme pour les planètes, chaque astéroïde présente une période d'opposition pendant laquelle il est un peu plus proche de nous et donc plus lumineux.

Les plus brillants astéroïdes ont une magnitude, à l'opposition, avoisinant 6. Leur photographie avec un instrument astronomique est donc facile, ils sont même à la portée d'une webcam non modifiée. Des dizaines de milliers d'astéroïdes sont répertoriés et la liste s'allonge chaque jour, mais leur magnitude est généralement supérieure à 15. Il n'est pas rare qu'un ou plusieurs d'entre eux viennent agrémenter des photographies de ciel profond à grand champ.

*Vesta était à la magnitude 8 lorsqu'il a été photographié en 1 s de pose avec un APN reflex sur une lunette de 106 mm de diamètre. Sur cette portion d'image de 400 pixels de côté, deux poses espacées de deux heures ont été recalées par rapport aux étoiles situées à droite puis ajoutées, ce qui permet de distinguer Vesta des étoiles qui l'entourent en mettant en évidence son déplacement relatif durant ce laps de temps.*



*L'astéroïde Legault porte le numéro 19458. Il est identifiable ici par la petite traînée due à son mouvement propre sur une pose cumulée d'une heure, réalisée avec une caméra CCD et une lunette de 130 mm de diamètre. Sa magnitude était de 17. Pendant une des poses, la queue d'un avion passant dans le champ de prise de vue a été éclairée très brièvement par un de ses feux clignotants.*



## L'atmosphère

Les qualités que l'on demande à l'atmosphère, comme celles de l'instrument, sont assez différentes en planétaire et en ciel profond. Pour les objets faibles, la transparence atmosphérique est un facteur important : si l'air est brumeux ou voilé, le signal risque d'être affaibli et le temps de pose devra être allongé en conséquence. De ce point de vue, les sites situés en altitude, donc placés au-dessus de ce qu'on appelle vulgairement la crasse atmosphérique et qui affecte ses basses couches, sont généralement favorisés. Réservez les nuits voilées aux objets lumineux... ou aux essais de matériel !



*Ces deux images brutes de M31 ont été obtenues avec le même instrument (lunette de 106 mm à F/D 5), le même reflex et le même temps de pose (3 min). Mais celle du haut a été réalisée depuis un site de haute montagne alors que celle du bas a été obtenue à 35 km de Paris, la ville-lumière...*

La pollution à l'oxyde de carbone ou à l'ozone ne dérange pas les astronomes dans leur activité car elle est invisible. En revanche, la noirceur du ciel est un facteur extrêmement important pour eux. Le ciel des villes est envahi par la lumière de l'éclairage urbain réfléchi et diffusée par l'atmosphère, c'est la pollution lumineuse. Comme nous l'avons vu au chapitre 3, le signal lumineux du fond de ciel s'accompagne d'un bruit dans lequel risquent d'être noyés les objets de ciel profond. L'acquisition d'images en ciel pollué est possible dans une certaine mesure, mais plus la pollution est importante et moins la photographie des objets faibles est possible. De plus, pour obtenir un rapport signal sur bruit équivalent à celui obtenu dans un ciel non pollué, il faudra poser beaucoup plus longtemps. Si la pollution lumineuse est importante, le fond de ciel est plus brillant que les objets à photographier et c'est par conséquent le bruit de fond de ciel qui domine : même en posant très longtemps, le rapport signal sur bruit plafonne et il n'atteindra jamais ce qu'on aurait pu obtenir sans pollution.

Le spectre d'un fond de ciel pollué par l'éclairage urbain est complexe et dépend

du type de lampe utilisé. Les lampes à vapeur de mercure et de sodium, très courantes en éclairage urbain, ainsi que les lampes à fluorescence, émettent des raies majoritairement situées dans les bandes 400-440 nm (bleu) et 540-600 nm (vert). Le cas des lampes à incandescence est différent : elles émettent un spectre continu dont la majeure partie de l'émission est située dans le vert et le rouge.

La Lune cause également une pollution lumineuse lorsqu'elle est présente dans le ciel. L'ampleur de cette pollution varie énormément selon la phase : faible en petit croissant, elle est très marquée à la Pleine Lune. Le phénomène est similaire à la diffusion de la lumière du Soleil en plein jour : cette pollution est donc de couleur bleutée.

À focale courte, au-dessous de 500 mm, la turbulence n'a la plupart du temps aucune influence visible. Mais, à partir de 1 000 mm, elle peut commencer à devenir perceptible et la finesse des images varie quelque peu d'une nuit à l'autre. À 2 000 mm et au-delà, elle devient un facteur prépondérant pour la finesse de l'image : si vous vivez dans une région où la turbulence est constamment forte, vous aurez des difficultés à tirer parti d'un télescope de grande focale car les images paraîtront souvent empâtées.



*Gros plan sur une partie de l'image ci-contre. Elles ont toutes deux été traitées pour soustraire leur signal de fond de ciel mais subsiste le bruit associé qui, lui, ne peut être retiré et qui noie, dans l'image du bas, les fines structures des bras spiraux de M31.*

## Couleur, noir & blanc et filtrage

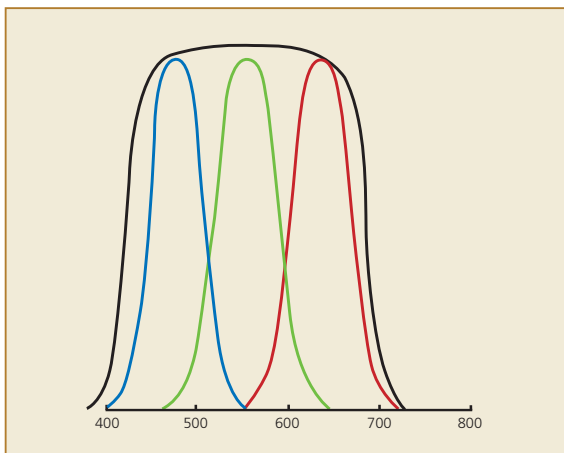
Les filtres colorés sont d'une importance considérable en astrophotographie du ciel profond. Ils ont deux usages : d'une part procurer des images d'un astre dans différentes longueurs d'onde afin d'en reconstituer les couleurs, d'autre part réduire les effets néfastes de la pollution lumineuse. C'est la raison pour laquelle il en existe plusieurs types.

### Les filtres à large bande

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les filtres rouges, verts et bleus incorporés aux capteurs couleur des APN et des webcams sont à large bande, c'est-à-dire qu'ils transmettent une plage de longueurs d'onde assez étendue, environ une centaine de nm par filtre. Il en va de même pour les jeux de filtres astronomiques RVB (RGB pour *Red Green Blue* en anglais) que l'on peut adjoindre à une caméra CCD à capteur monochrome. Tous ces filtres sont adaptés à la photographie terrestre des objets éclairés par la lumière solaire, ils conduisent à un rendu des couleurs proche de celui donné par la vision humaine diurne. Ils fournissent donc de bons résultats sur les astres à spectre continu : étoiles, galaxies, nébuleuses par réflexion. La photographie en couleurs de ces astres ne présente donc pas de difficulté particulière, même si différents jeux de filtres peuvent donner des résultats quelque peu différents.

Les choses sont bien différentes avec les nébuleuses par émission et planétaires. La réponse du capteur aux raies d'émission dépend du

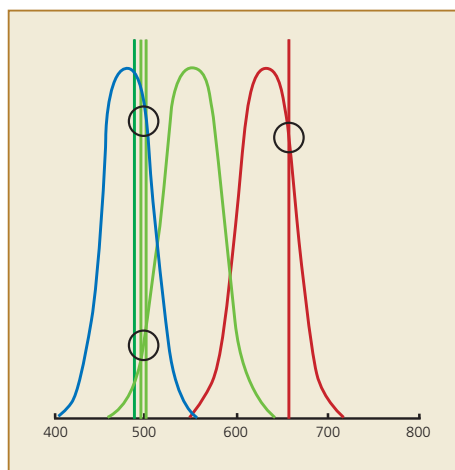
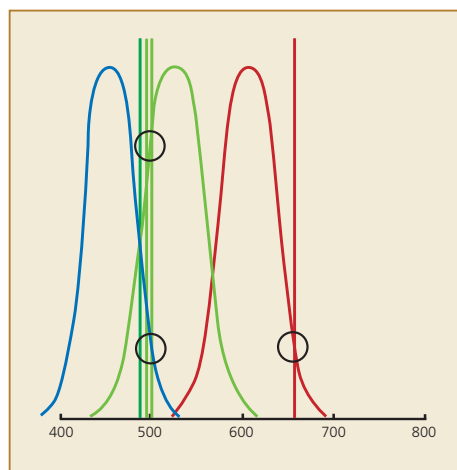




Courbe de transmission typique de filtres interférentiels à large bande. La courbe noire est celle d'un filtre appelé « luminance » ou « visible », utilisé avec les capteurs monochromes et destiné à transmettre l'ensemble de la lumière visible en éliminant l'infrarouge et l'ultraviolet.

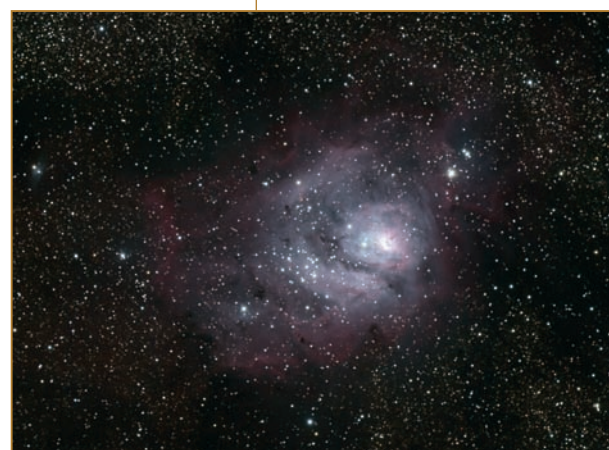
positionnement des bandes de transmission de chacun des filtres par rapport à ces raies. Un léger décalage de ces bandes suffit à modifier profondément, à la fois en intensité et en coloris, la manière dont ce capteur va nous présenter la nébuleuse, en particulier sur les deux aspects suivants :

- la raie  $H\alpha$  est en limite basse de la bande passante des filtres rouges des capteurs couleur : selon le positionnement de cette limite par rapport à la raie, tel capteur sera peu sensible à ce rayonnement alors que tel autre y sera très sensible ;
- les raies  $H\beta$  et  $OIII$  sont situées à la frontière des bandes passantes des filtres bleus et verts : selon le positionnement et le recouvrement de ces bandes, la transmission y sera plus ou moins élevée et le rendu pourra varier entre le bleu, le cyan et le vert.



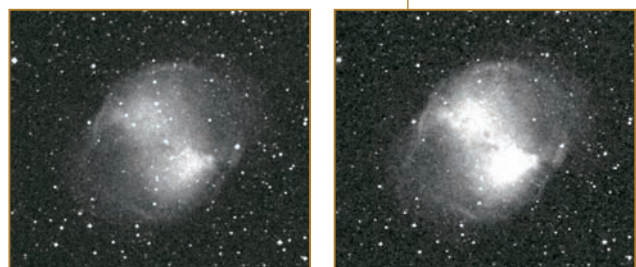
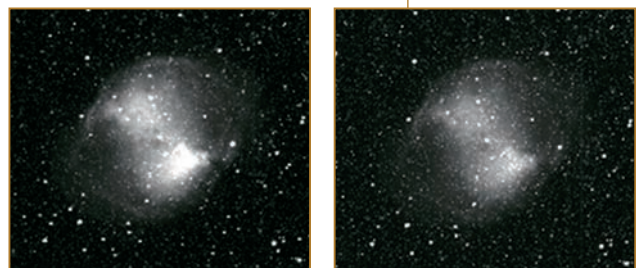
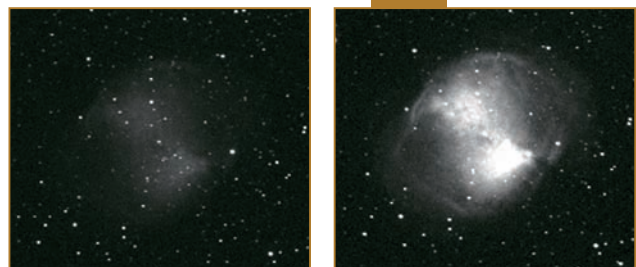
Les courbes de transmission des filtres de ces deux capteurs (imaginaires mais possibles) sont identiques, à ceci près que celles du second sont légèrement décalées vers les grandes longueurs d'onde. La différence est imperceptible en photographie diurne ou en photographie d'étoiles et de galaxies. Mais, sur les raies d'émission des nébuleuses (cercles), le rendu est extrêmement différent. Avec le premier capteur,  $H\alpha$  est mal captée par les photosites rouges et  $OIII$  est captée surtout par les photosites verts : la nébuleuse est verte. Avec le second,  $H\alpha$  est mieux captée par les photosites rouges et  $OIII$  est surtout captée par les photosites bleus : la nébuleuse est magenta, mélange de rouge et de bleu.

Image des nébuleuses M8 et M20 obtenues avec une caméra CCD et un jeu de filtres RVB. La prépondérance de la raie  $H\alpha$  est respectée.

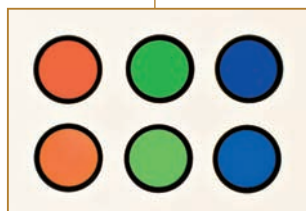


La nébuleuse M8 photographiée avec un APN reflex. On constate que la sensibilité aux différentes raies n'est pas cohérente avec leurs intensités intrinsèques : le déficit sur la raie  $H\alpha$  est considérable.





Images verte (en haut à gauche) et bleue (en haut à droite) de M27 obtenues avec une caméra CCD et un jeu de filtres RVB (numéro 1) : OIII est essentiellement transmise par le filtre bleu, donnant une coloration très bleue à l'image finale. Au centre, un autre jeu de filtres RVB (numéro 2) a été utilisé : cette fois, les couleurs sont mieux équilibrées avec une transmission de OIII voisine entre les filtres bleu et vert. À noter qu'en revanche, la transmission en H $\alpha$  des filtres rouges de ces deux jeux est équivalente. En bas, couche verte et bleue issues d'un reflex Canon : l'image est à dominante bleue.



La comparaison des filtres RVB Wratten (en haut) et des filtres dichroïques (en bas) montre la supériorité de ces derniers en matière de transmission et de séparation des couleurs. Pour cette photographie comme pour celle des filtres rouges qui suivent, un parfait réalisme par rapport à ce que vous auriez vu à travers ces filtres n'est pas garanti : l'appareil photo est passé par là et a retranscrit ses propres couleurs.

En revanche, les jeux de filtres RVB astronomiques présentent tous une transmission excellente sur la raie H $\alpha$ , supérieure à 90 %. Cependant, le rendu de OIII peut varier selon le positionnement des bandes passantes des filtres verts et bleus.

La nébuleuse planétaire du Hibou (M97), photographiée avec une caméra CCD et le jeu de filtres RVB numéro 1.



## Le choix des filtres RVB

Deux solutions sont envisageables pour les filtres RVB à large bande :

- Les filtres dont la couleur est identifiée par sa numérotation Wratten : 56 vert, 25 rouge, etc. De nombreux fabricants en proposent, ils sont peu coûteux et servent généralement de complément visuel sur les planètes. Ils sont très peu utilisés en photographie car trop absorbants, surtout les filtres verts et bleus. De plus, ils sont transparents à l'infrarouge.

- Les filtres dichroïques ou interférentiels : nettement préférables mais un peu plus coûteux, leur bande passante est plus carrée (donc plus sélective) que celle des Wratten ou des filtres incorporés aux capteurs couleur et monte couramment à plus de 80 % de transmission dans leur couleur ; de plus, ils sont opaques à l'infrarouge. Autre avantage : les jeux de filtres proposés aujourd'hui sont parfocaux, c'est-à-dire que la mise au point ne change pas en passant d'un filtre à l'autre car leur épaisseur optique est identique : un gain de temps appréciable !

## Les filtres à bande étroite

Les observateurs assidus des nébuleuses par émission et planétaires connaissent bien les fameux filtres OIII. Ce sont des filtres à bande étroite, car ils ne laissent passer qu'une petite plage de longueurs d'onde, autour d'une dizaine de nm seulement, centrée sur les deux raies OIII. Ils présentent l'avantage de transmettre ces raies et d'éliminer presque tous les autres rayonnements, en particulier la pollution lumineuse. Celle-ci est atténuée d'un facteur 10 à 100 selon le filtre, ce qui est considérable ! Ils sont donc extrêmement efficaces dans un ciel pollué par l'éclairage urbain ou par la Lune, mais ils améliorent aussi le contraste et le rapport signal sur bruit en ciel de cam-

pagne. Ils atténuent de la même manière les étoiles : dans les régions riches en étoiles, ils donnent des images moins surchargées mettant mieux en valeur la nébuleuse. Et enfin, en atténuant les étoiles brillantes, ils réduisent l'effet de blooming si le capteur est sans anti-blooming. Ils sont, par contre, totalement inutilisables pour les astres à spectre continu : amas d'étoiles, galaxies et nébuleuses par réflexion.

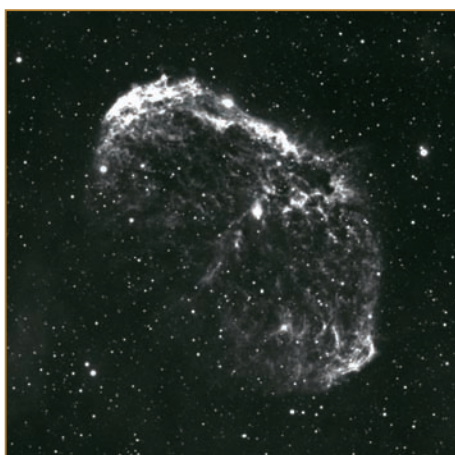
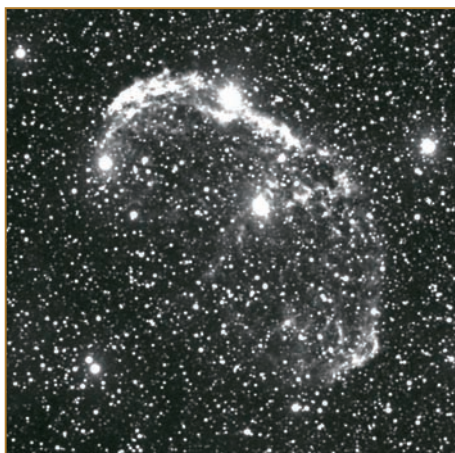
Pour la photographie, plusieurs fabricants proposent de tels filtres pour les principales raies d'émission : H $\alpha$ , OIII, H $\beta$ . Le filtre photographique le plus utilisé est évidemment le filtre H $\alpha$ , il convient à toutes les nébuleuses diffuses par émission. Le filtre OIII se révèle particulièrement adapté aux nébuleuses planétaires. Suivant le modèle de filtre, la bande passante varie de 4 nm à 15 nm ; plus elle est étroite, plus le filtre élimine efficacement la pollution, mais plus il est coûteux. Les filtres de 4 à 5 nm sont compatibles avec un rapport F/D supérieur ou égal à 5 environ ; pour un rapport F/D inférieur à 5, il est préférable d'utiliser un filtre de 10 à 15 nm car, pour des raisons optiques dont la description dépasse le cadre de cet ouvrage, le cône de lumière devient trop ouvert et un filtre de 4 à 5 nm ne le transmet plus convenablement, la bande passante étant élargie et décalée. Comme les filtres à bande large, les filtres à bande étroite sont proposés en monture 31,75 mm (1,25 pouce) ou 50,8 mm (2 pouces), à choisir selon les dimensions du capteur. Lorsque plusieurs filtres sont utilisés, il est tout à fait possible de reconstituer une image colorée comme avec les filtres RVB (voir plus loin).



Ces trois filtres laissent tous passer la quasi-totalité du rayonnement H $\alpha$  mais bloquent plus ou moins efficacement les autres rayonnements : à gauche un simple filtre rouge (bande passante d'environ 100 nm), au centre un filtre de 14 nm, à droite un filtre de 5 nm. La courbe de transmission de filtres à bande étroite n'a pas une forme rectangulaire mais en cloche et les valeurs indiquées par les fabricants correspondent à la largeur de bande pour laquelle la transmission est de plus de 50 % de la transmission maximale (le principe est le même que pour le calcul de la FWHM à partir du profil d'une étoile, voir chapitre 4).

Même si les filtres à bande étroite sont destinés à être utilisés avec un capteur monochrome, rien n'interdit de les utiliser avec un capteur couleur lorsqu'il s'agit de photographier des nébuleuses par émission ou planétaires en présence de pollution lumineuse. Tous les





Ces deux images de la nébuleuse du Croissant ont été réalisées avec une caméra CCD équipée d'un filtre rouge (en haut) et d'un filtre  $H\alpha$  à bande étroite (en bas). Avec le second filtre, la nébuleuse est moins noyée parmi les nombreuses étoiles de la Voie Lactée.

objets présents sur la photographie prendront naturellement la couleur correspondant à ce filtre. Mais, évidemment, celui-ci n'améliorera pas la sensibilité du capteur couleur sur la raie considérée.

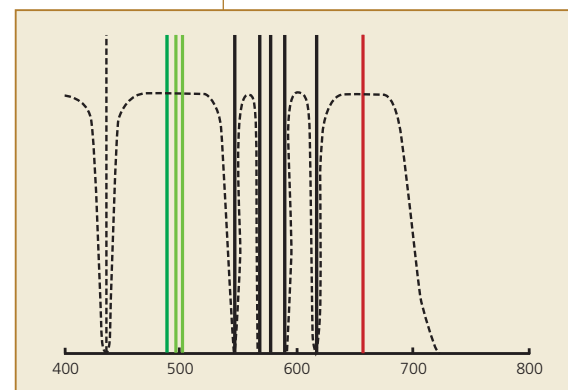
On trouve d'autres filtres sous des dénominations telles que UHC (pour *Ultra High Contrast*), NBN (pour *Narrow Band Nebula*), Nebular, Deep Sky. Leur bande passante est centrée sur les raies OIII et  $H\beta$ , elle est un peu plus large que celle des filtres précédents (20 à 60 nm). Ils sont donc un peu moins efficaces contre la pollution lumineuse. Certains de ces filtres étant destinés à l'observation visuelle, la transmission de la raie  $H\alpha$  peut varier énormément d'un modèle de filtre à l'autre ; il convient donc d'être particulièrement attentif aux courbes de transmission fournies par les fabricants avant l'achat de ces filtres pour la photographie. Beaucoup sont transparents à l'infrarouge proche : dans le cas d'une utilisation avec un capteur monochrome, il faut leur adjoindre un filtre anti-infrarouge.

## Les filtres anti-pollution

On trouve également dans le commerce des filtres dits anti-pollution, sous des dénominations telles que LPS (*Light Pollution Suppression*), LPR (*Light Pollution Rejection*), CLS (*City Light Suppression*). Leur bande passante est plus large que celle des filtres précédents (une centaine de nm ou plus), leur principe est d'éliminer les principales plages de longueurs d'onde des raies de la pollution urbaine (raies du mercure

et du sodium). Mais, leur pouvoir est faible contre la lumière des lampes à incandescence, il faudrait donc plutôt parler de réduction de la pollution et non de sa suppression. D'après leurs fabricants, ils sont également utilisables sur les étoiles, les galaxies et les nébuleuses par réflexion, mais leur efficacité sur les nébuleuses par émission et planétaires est nettement inférieure à celle des filtres à bande étroite. Utilisés avec un capteur couleur, ils présentent une dominante colorée moins prononcée qu'avec les filtres à bande étroite.

L'installation d'un filtre à bande étroite ou anti-pollution s'effectue très facilement si l'appareil est une caméra CCD avec roue à filtres. Dans le cas d'un APN reflex sur instrument astronomique, il faudra trouver le moyen de placer le filtre juste devant l'appareil, au niveau de sa bague d'adaptation. Le cas de l'objectif photographique est plus délicat : on placera le filtre soit à l'arrière de l'objectif lorsque cela est mécaniquement possible (certains téléobjectifs comportent, à leur partie arrière, une petite tirette à filtres), soit à l'avant si le diamètre du filtre est compatible avec celui des lentilles de l'objectif. Dans la plupart des situations, il faudra faire fabriquer une bague d'adaptation par un artisan mécanicien.

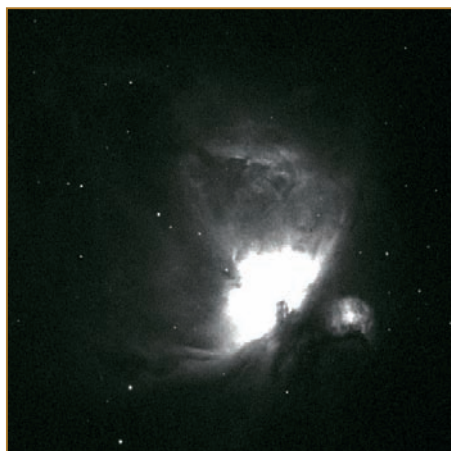


Courbe de transmission typique d'un filtre anti-pollution. Les principales raies d'émission de l'éclairage urbain sont en noir, le spectre continu des lampes à incandescence en jaune et la pollution lunaire en bleu.

## APN, $H\alpha$ et filtre anti-infrarouge

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les filtres colorés recouvrant les photosites d'un capteur couleur sont plus ou moins transparents à l'infrarouge proche. C'est pourquoi un filtre rejetant l'infrarouge est placé sur le capteur dans tous les APN : c'est le prix à payer pour obtenir des couleurs réalistes et bien différenciées... du moins pour les objets à spectre continu (étoiles et galaxies). Mais la majeure partie du rayonnement  $H\alpha$  est généralement rejetée car la fréquence de coupure du filtre se situe avant cette raie. Le bilan des photons  $H\alpha$  captés est désastreux : non seulement un photosite sur quatre est capable de recueillir ces photons, mais la plupart de ceux-ci ne lui parviennent même pas. Sur une nébuleuse telle que celle de la page 92, obtenue avec une caméra CCD sur une lunette de 106 mm, la perte de photons reviendrait à diaphragmer la lunette à une ouverture de moins de 20 mm. Ce calcul est même optimiste car les rares photons  $H\alpha$  captés sont noyés dans une lumière de fond de ciel et dans des bruits qui, eux, n'ont pas diminué : il est à craindre que, même en augmentant indéfiniment le temps de pose, il ne soit pas possible de compenser la perte de photons.

Ces deux images de la nébuleuse d'Orion ont été réalisées à l'aide d'une caméra CCD monochrome équipée d'un filtre  $H\alpha$ . À droite, le filtre anti-infrarouge extrait d'un reflex Canon 20D a été interposé dans le faisceau lumineux : ce filtre transmet seulement 20 % de la raie  $H\alpha$ . La même expérience avec un filtre OIII montre que la transmission du filtre anti-infrarouge est excellente sur cette raie, de l'ordre de 95 %. S'ajoute à cela le fait que, sur le reflex, seul un photosite sur quatre recueille le rayonnement  $H\alpha$  : la transmission du filtre recouvrant les photosites rouges est inconnue mais on peut donc estimer que moins d'un photon  $H\alpha$  sur vingt atteint le silicium du capteur de ce reflex, contre vingt sur vingt pour une caméra CCD monochrome.



Le filtre anti-infrarouge recouvrant le capteur d'un reflex Canon 20D présente une couleur bleutée témoignant de son absorption dans le rouge.



Le retrait du filtre d'un reflex Canon ne doit être effectué que par une personne sachant manier un fer à souder et, de préférence, ayant déjà réalisé cette opération. C'est le cas de Richard Galli qui a obtenu cette photographie de la nébuleuse IC1848 à l'aide d'un 350D dont le filtre a été retiré par ses soins.



Afin d'améliorer la sensibilité à la raie  $H\alpha$ , des amateurs intrépides ont retiré le filtre anti-infrarouge placé sur le capteur de leur APN reflex Canon ou Nikon. Bien sûr, cette manipulation présente des risques d'endommager l'appareil et rend la garantie caduque d'autant que, sur certains appareils, l'opération nécessite un démontage et un remontage quasi complets, fer à souder en main. Une fois le filtre retiré, trois solutions s'offrent à eux :

1. Ne pas remplacer le filtre d'origine. Dans ce cas, l'appareil ne peut être utilisé qu'en astronomie car la balance des couleurs est profondément modifiée et la mise au point n'est plus directement possible, ni par l'autofocus, ni même à travers le viseur de l'appareil (mais des solutions existent pour réaliser la mise au point en astrophotographie, voir chapitre 4). Sur les nébuleuses par émission, le gain sur la raie  $H\alpha$  est considérable (typiquement 5 fois) ; en revanche, sur d'autres raies telles que OIII, le gain est bien plus limité. Sur les objets à spectre continu, l'appareil présente également un gain en sensibilité car tous les photosites recueillent plus ou moins d'infrarouge proche : on retrouve une partie de la sensibilité d'un capteur monochrome dans cette portion du spectre, mais avec des couleurs finales dont il est bien difficile, voire impossible, de dire à quoi elles correspondent...
2. Remplacer le filtre d'origine par un filtre anti-infrarouge de type KG3, dont la fréquence de coupure est située un peu au-delà des fatidiques 656 nm, ce qui permet d'obtenir une bien meilleure transmission de la raie  $H\alpha$ . La photographie diurne est encore possible car la mise au point est conservée, sous réserve de dénicher un filtre de remplacement possédant exactement les mêmes dimensions, et surtout la même épaisseur optique que le filtre d'origine (à quelques centièmes de mm près). Quant au léger décalage de la balance des couleurs, elle peut se compenser au traitement : les couleurs des étoiles et des galaxies demeurent réalistes. Le gain en  $H\alpha$  est le même que pour la solution précédente, il est négligeable sur les objets à spectre continu (étoiles et galaxies).
3. Se procurer, auprès d'un fabricant de filtres RVB pour caméra CCD, un filtre dit « visible » ou « luminance » qui, comme un KG3, laisse passer toute la lumière visible,  $H\alpha$  inclus, et qui bloque l'infrarouge. Ce filtre sera placé devant l'appareil, au niveau de la bague d'adaptation. Le bénéfice en sensibilité est le même que pour la solution 2, avec les inconvénients de la solution 1 : l'appareil n'est plus utilisable en photographie diurne et la mise au point n'est possible ni avec l'autofocus, ni à travers le viseur.

La firme Hutech propose des boîtiers neufs déjà modifiés selon les solutions 1 et 2. Canon a également proposé en 2005 une série limitée nommée « 20Da », variante astronomique du 20D correspondant à la solution 2 avec un filtre anti-infrarouge transmettant environ 65 % de la raie  $H\alpha$  (contre 20 % pour le filtre d'origine). Le coût de ces appareils est nettement plus élevé que celui de l'appareil d'origine. L'amateur doit donc déterminer si le jeu en vaut la chandelle, en particulier par rapport à une caméra CCD monochrome qui reste, de toute manière, bien plus sensible puisque tous ses photosites, et non un sur quatre, recueillent le rayonnement  $H\alpha$ .

## Choisir et régler son appareil

Tous les appareils capables de faire des poses de 30 s et au-delà sont utilisables en ciel profond. L'APN à objectif non interchangeable ne peut guère être utilisé que pour la photographie en parallèle car le montage afocal est mal adapté au ciel profond, mais son temps de pose souvent limité à 15 s ou 30 s et sa qualité d'image généralement en retrait en matière de bruit et de signal thermique conduisent à lui préférer les reflex en vogue chez les astrophotographes, bien plus performants et polyvalents. Ceux-ci sont utilisés sans objectif et installés au foyer de l'instrument, associés éventuellement à un réducteur de focale ou à un correcteur de champ.

Inutile de dire que le nombre de photosites est un paramètre qui semble important aux yeux de beaucoup, à tel point qu'on parle souvent de « course aux pixels » des constructeurs, un plus grand nombre de pixels étant censé séduire l'acheteur. Mais un appareil à 10 millions de photosites procure-t-il de meilleures images qu'un capteur à 5 millions de photosites ? Pas forcément ! Surtout si l'augmentation du nombre de photosites se fait à surface de capteur égale, donc au détriment de leur taille. En effet, plus leur surface sensible est grande, plus ils recueillent de lumière et plus le rapport signal sur bruit est favorable. De plus, des photosites de petite taille ne peuvent se justifier que si l'instrument est capable de mettre leur finesse en valeur, c'est-à-dire s'il s'agit d'un instrument de très bonne qualité optique et de focale limitée... et si l'image est exploitée à pleine échelle, sans réduction de taille.

Pour le ciel profond, les qualités de l'appareil en termes de bruit de lecture et de signal thermique (voir chapitre 3) sont primordiales. Il est en effet important que le signal thermique soit limité car, dans le cas contraire, la dynamique de l'image est réduite et même si, comme nous l'avons exposé au chapitre 3, ce signal peut être soustrait avec un noir, il subsiste le bruit associé. Sur ce plan, tous les APN reflex sont loin d'être égaux et peu d'entre eux rivalisent avec les meilleures caméras CCD. Une numérisation en 8 bits seulement est aussi un handicap, surtout en ciel profond : les objets sont peu lumineux et n'occupent souvent qu'une petite partie de la dynamique de l'image ce qui, en 8 bits, ne correspond qu'à quelques niveaux de gris. Une numérisation en 12, 14 ou 16 bits est nettement préférable, c'est la raison pour laquelle, sur les APN reflex, la présence du mode RAW est également un atout.

Les webcams modifiées longue pose (voir chapitre 2), même si elles présentent un champ et une qualité d'image inférieurs à ceux des APN, permettent, moyennant le compositage d'un grand nombre de poses et des traitements soignés, de réaliser de belles photographies de ciel profond pour un coût extrêmement réduit.

Les caméras CCD présentant des caractéristiques souvent voisines (refroidissement performant, liaison USB, alimentation 12 V...), un critère primordial de choix est le capteur : nombre et taille des pixels mais aussi rendement quantique dans les différentes couleurs et sur les raies d'émission des nébuleuses. Un autre critère important peut





*Un grand capteur à plusieurs millions de pixels n'est pas indispensable pour obtenir une belle image de ciel profond. Pour preuve cette photographie de la galaxie M64, obtenue avec une webcam modifiée longue pose (capteur noir et blanc) et une roue à filtres sur un télescope Schmidt-Cassegrain de 355 mm de diamètre avec réducteur de focale (F/D 3,4), en 130 poses de 25 s (luminance) et 45 poses de 25 s (RVB). Photographie Marc Jousset.*

concerner les capacités en autoguidage de la caméra. La présence d'une régulation de température simplifie énormément la vie car une petite bibliothèque de noirs peut être constituée une fois pour toutes et permet de corriger très précisément le signal thermique, ce qui n'est pas le cas avec les APN dont la température varie de manière imprévisible en cours de prise de vue.

Certaines caméras CCD sont proposées avec un capteur doté d'anti-blooming, d'autres non. Ce système est intéressant s'il s'agit de réaliser des photographies de larges champs à l'aide d'un téléobjectif ou d'une lunette courte car les étoiles brillantes y seront nombreuses. En revanche, il est superflu pour les cadrages plus serrés (nébuleuses planétaires, galaxies). Pour certains modèles, en particulier ceux disposant de capteur CCD Kodak, l'acheteur peut choisir le « grade » du capteur. La solution la plus avantageuse est généralement de prendre le grade le plus bas, la différence entre les grades en termes de qualité d'image étant imperceptible en pratique.

## APN ou caméra CCD ?

Les APN reflex offrent aujourd'hui un rapport performances/prix très intéressant et permettent au plus grand nombre de réaliser de belles photographies directement en couleurs de nombreux objets célestes. Outre leur polyvalence astronomie/vie courante, un de leurs principaux atouts est la taille de capteur (et par conséquent le champ embrassé) plus importante que celle d'une caméra CCD de même gamme de prix.

Mais ce sont les caméras CCD astronomiques qui sont les appareils de ciel profond par excellence, grâce notamment au capteur monochrome qui leur confère une sensibilité et une polyvalence sans égales. On pourrait s'étonner qu'aujourd'hui encore la plupart des caméras CCD soient proposées avec un tel capteur. Mais ce serait oublier leur écrasante supériorité en termes de sensibilité. En ciel profond, les photons sont rares : au foyer d'un télescope de 200 mm de diamètre, une dizaine de photons au plus sont reçus chaque seconde d'une étoile de magnitude 20 ! Sur cent photons de chaque couleur atteignant un capteur à matrice de Bayer, on peut estimer que moins de 30 photons verts et moins de 15 photons bleus et rouges sont finalement transformés en électrons. Pour le rayonnement H $\alpha$ , ce nombre tombe à 5. En revanche, un capteur monochrome parvient à transformer 30 à 80 photons en électrons.

À gamme de prix égale, un APN présente une taille de capteur certes plus grande qu'une caméra CCD, mais, en ciel profond, cet avantage est surtout intéressant pour les grandes nébuleuses par émission pour lesquelles la sensibilité de l'APN est malheureusement très faible. Celui-ci est moins pénalisé sur les galaxies et les nébuleuses planétaires, mais la plupart de ces objets s'accommodent mieux d'un petit capteur CCD au foyer d'un instrument d'amateur.

L'astronome désireux de réaliser régulièrement des photographies du ciel profond doit non seulement apporter autant d'attention à sa monture qu'à son tube optique, mais il doit considérer l'appareil avec tout autant de soin et prendre conscience qu'il est judicieux d'équilibrer les différents maillons de la chaîne photographique. À quoi bon se procurer un instrument de grand diamètre pour collecter un plus grand nombre de photons si c'est, faute d'un budget restant suffisant, pour lui adjoindre un détecteur qui en rejettera la plus grande partie ? L'expérience montre que les amateurs disposant d'un instrument de grande dimension (de grand diamètre et de longue focale) réduisent leurs images d'un facteur 2 à 4 car, lorsque l'image est visualisée à pleine échelle, les défauts de suivi et la turbulence sont trop apparents ; l'intérêt théorique de cet instrument, à savoir des images plus détaillées, s'efface et un instrument de dimensions plus réduites (donc moins encombrant, moins coûteux, plus facile à guider...) équipé d'une caméra CCD devient une alternative intéressante car la sensibilité et la polyvalence sont au rendez-vous, pour un champ couvert pas forcément beaucoup plus réduit. La question « J'ai un bon détecteur, quel instrument puis-je mettre devant ? » est tout aussi valable que « J'ai un bon instrument, quel détecteur puis-je mettre derrière ? ».

Pour l'amateur qui souhaite obtenir les meilleurs résultats possibles en couleurs et qui est prêt à y mettre le prix, l'utilisation de filtres colorés RVB de bonne qualité, couplés à un capteur monochrome, présente des avantages considérables :

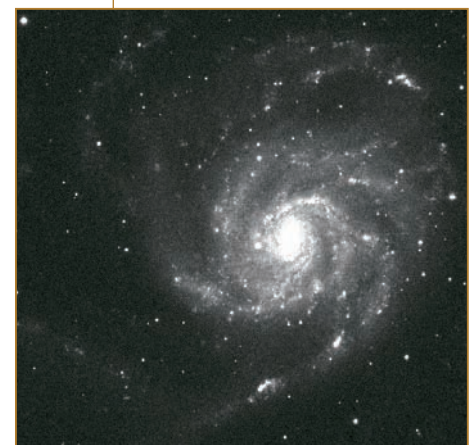
- tous les photosites sont sensibles de manière égale à la couleur transmise par le filtre alors que, sur un capteur couleur, seuls 25 % des photosites recueillent le rouge, 25 % le bleu et 50 % le vert ;
- la séparation des couleurs est généralement meilleure car les bandes passantes des filtres se recouvrent moins et la quantité de lumière transmise par chaque filtre dans sa couleur est plus importante, grâce à une bande passante plus « carrée » et à un pic de transmission plus élevé (il dépasse couramment 80 %) ;
- le temps de pose peut être ajusté dans chaque couleur afin que l'ensemble des couleurs présente un rapport signal sur bruit homogène, ce qui permet d'optimiser le temps de pose total ; avec un capteur couleur, le rapport signal sur bruit n'est pas homogène entre les différentes couleurs, au désavantage du bleu et du rouge qui sont plus bruités que la couche verte.

Outre sa sensibilité, le capteur monochrome est très polyvalent : une image en couleurs « classiques » peut évidemment être obtenue à l'aide d'un jeu de filtres RVB à bande large, mais la bande spectrale peut être choisie au gré des besoins en utilisant des filtres particuliers, notamment pour aller chercher des « couleurs » telles que l'infrarouge proche, l'ultraviolet (pour Vénus par exemple) ou, naturellement, des raies d'émission comme H $\alpha$ .

Enfin, les caméras CCD disposant de l'autoguidage intégré sont une solution simple et efficace au problème du guidage, de même que celles dotées d'une régulation de température pour la réalisation des noirs.

À noter que régler un APN ou une webcam couleur en mode « noir et blanc » revient à demander à l'appareil de moyenniser les trois couches couleur au lieu de les conserver séparées. Cela n'équivaut donc absolument

*La supériorité d'un capteur monochrome en termes de sensibilité est flagrante sur les nébuleuses mais elle est également très nette sur les autres astres, comme le montrent ces deux images prétraitées de M101 prises avec le même instrument et le même temps de pose, avec un APN à gauche et une caméra CCD à droite (visualisation ajustée pour obtenir un rapport signal sur bruit équivalent).*



pas à un capteur monochrome, puisque les minuscules filtres colorés de la grille de Bayer n'ont pas été retirés pour autant : ce réglage ne procure aucun gain en sensibilité !

## Quel temps de pose ?

Que ce soit avec un APN, une webcam modifiée longue pose ou une caméra CCD, la première question qui vient à l'esprit est : quel temps de pose choisir pour chaque image ? La réponse est : aussi longtemps que le permettent :

- la qualité du suivi, sujet que nous avons traité en détail plus haut ;
- la saturation de l'image : il est normal – et sans importance – que la majorité des étoiles du champ photographié soient surexposées ; par contre, il faut éviter que les hautes lumières de l'objet principal, par exemple la région centrale d'une galaxie ou d'un amas globulaire, soient surexposées car il y a perte d'information ; il faut également éviter, sur un appareil à fort signal thermique, d'avoir trop de pixels chauds saturés.

Une autre considération vient modérer cette réponse : nous avons vu au chapitre 3 qu'il n'était pas toujours judicieux de ne faire qu'une seule pose très longue. En effet, cette pose peut être entachée par le passage d'un avion ou d'un satellite, comporter des traces de rayons cosmiques ou être dégradée par une rafale de vent ou par un bougé accidentel de l'instrument. D'une manière générale, il faut éviter de se fier à une seule image. Si vous comptez poser un total d'une demi-heure sur une galaxie, faites 3 poses de 10 min, 6 poses de 5 min ou 10 poses de 3 min plutôt qu'une seule pose de 30 min.

Le temps de pose peut donc varier énormément en fonction de l'objet photographié et de l'instrumentation employée. Dans la pratique, les temps de pose individuels s'étagent généralement d'une dizaine de secondes pour un objet très lumineux tel que le cœur de la nébuleuse d'Orion à une durée de 15 à 20 minutes pour un objet plus faible, les valeurs les plus couramment utilisées étant situées dans la plage 1 à 10 minutes.

Cette question en amène une autre : quel temps de pose total ? Autrement dit, une fois le temps de pose individuel déterminé, combien d'images réaliser ? Tout dépend de l'objet photographié mais aussi du but recherché, les exigences de qualité d'image n'étant pas les mêmes selon que vous vouliez juste détecter la présence d'un objet ou que vous vouliez réaliser la plus belle image possible, profonde et douce, avec un très bon rapport signal sur bruit (voir chapitre 3). Dans le second cas, vous pourrez être amené à accumuler des poses pendant plusieurs dizaines de minutes voire plusieurs heures : c'est ce que font les amateurs qui souhaitent privilégier la qualité à la quantité et tirer la quintessence de leur équipement.

Si votre suivi est déficient, vous vous poserez certainement la question du temps de pose minimal que vous pouvez raisonnablement utiliser pour chaque image sans subir les inconvénients d'un saucissonnage excessif des poses. Encore une fois, les notions vues au chapitre 3 vont nous être utiles. Si le bruit de lecture de l'appareil était

nul, il serait possible de découper la pose totale en un aussi grand nombre de poses que voulu, par exemple 180 poses de 5 s pour un total d'un quart d'heure. En effet, le bruit de lecture est le seul qui se cumule au fur et à mesure que le nombre d'images composées augmente, à temps de pose total égal. Le signal thermique, le signal lumineux et les bruits associés ne dépendent pas du nombre de poses effectuées, ils ne dépendent que du temps de pose total. Mais, bien sûr, aucun appareil n'a un bruit de lecture nul. En pratique, la durée d'une pose individuelle peut être réduite sans inconvénient tant que le bruit de lecture reste négligeable face aux autres bruits présents dans l'image. Plaçons-nous dans deux situations extrêmes :

- vous travaillez en ciel pollué ou sur un objet relativement brillant : le bruit de photons associé au signal du fond de ciel ou de l'objet devient rapidement prépondérant face à toutes les autres sources de bruit et le temps de pose individuel peut être relativement court sans inconvénient ;
- vous photographiez un objet très faible dans un ciel bien noir avec un appareil dont le bruit de lecture est significatif : vous aurez intérêt à ne pas trop diminuer la durée de chaque pose, sous peine de subir une contribution croissante du bruit de lecture qui risque de devenir dominant puisque, comme vu au chapitre 3, ce bruit va augmenter comme la racine carrée du nombre d'images composées.

## Les autres réglages

La sensibilité à afficher sur un APN est souvent l'objet d'interminables interrogations entre amateurs. Une photographie prise à plus forte sensibilité présente une image en apparence plus lumineuse de l'objet, mais elle est aussi plus bruitée. Sur un APN, les choses sont très différentes de l'argentique : modifier le réglage de sensibilité n'améliore pas la capacité du capteur à transformer les photons en électrons... pas plus que celle de l'instrument à recueillir plus de lumière ! Ce réglage n'est guère plus qu'une commodité permettant d'obtenir des photographies de la vie courante directement visualisables sur l'écran de l'APN ou de l'ordinateur ; mais en ciel profond, il faudra de toute façon retoucher les niveaux/seuils de l'image. Souvenez-vous des notions vues au chapitre 3 et ne vous dites pas : si je choisis 400 ISO, je pourrai poser 4 fois moins longtemps qu'à 100 ISO pour un résultat équivalent. Dans les faits, la différence sera minime, voire indétectable, entre les différents réglages. Le plus simple est de choisir une sensibilité intermédiaire, par exemple 400 ou 800 ISO. Tout en n'hésitant pas à la diminuer si les hautes lumières saturent trop vite car il ne faut pas oublier qu'à 400 ISO, la dynamique disponible est réduite de moitié et la saturation intervient deux fois plus rapidement qu'à 200 ISO. Vous trouverez en Annexe 8 une méthode de détermination du réglage optimal en ciel profond.

Aucun autre réglage de l'appareil (résolution, balance des blancs, accentuation, etc.) n'a d'influence directe sur le contenu d'une image enregistrée en mode RAW puisque celle-ci est le reflet direct de ce qu'a recueilli le capteur.

Sur une caméra CCD, il n'existe pas de réglage de « sensibilité » (ce qui est bien la preuve que ce n'est pas un point important !), seul le mode de binning peut être modifié. En binning 1 x 1, vous aurez la plus grande image possible en termes de nombre de pixels puisqu'à chaque photosite du capteur est associé un pixel de l'image. En binning 2 x 2, les photosites sont regroupés par paquets de quatre pour faire un pixel : l'image comporte deux fois moins de pixels sur chaque dimension, soit quatre fois moins de pixels au total. Mais vous y gagnez en rapport signal sur bruit puisque la surface virtuelle du photosite est

*Ces images de M27 ont été prises avec le même instrument, le même APN reflex et le même temps de pose (6 x 2 min). Seul le réglage de sensibilité diffère (de gauche à droite : 100 ISO, 400 ISO, 1 600 ISO). Les images brutes paraissent de plus en plus lumineuses au fur et à mesure que le réglage s'élève mais, une fois les seuils ajustés pour donner des niveaux de lumière équivalents à l'écran, on constate que leur rapport signal sur bruit est très proche, ce qui confirme le fait que ce réglage a peu ou pas d'influence sur la qualité du résultat.*







quadruplée. Vous y perdrez en finesse d'image seulement si vos étoiles sont assez fines en binning  $1 \times 1$  ; si vous travaillez à grande focale et que la largeur à mi-hauteur de vos étoiles s'étale, à cause de la turbulence, sur plus de 3 pixels, le binning ne vous fera pas perdre en résolution. Il va de soi que le mode de binning ne modifie pas le champ visé qui ne dépend que des dimensions du capteur.

## La recherche des objets

Les objets du ciel profond sont plus difficiles à repérer que les planètes car ils sont moins lumineux. Nombre d'entre eux sont même invisibles au télescope. Plusieurs techniques permettent de les placer dans le champ visé.

### Le chercheur

Largement employé en observation visuelle, le chercheur est également utilisable en photographie. Lorsque la cible recherchée n'est pas visible car trop peu lumineuse, il est toujours possible d'effectuer un centrage à l'aide des étoiles environnantes, repérées au préalable avec un bon atlas. La précision de pointage d'un chercheur standard  $7 \times 50$  ou  $8 \times 50$  bien réglé est d'une dizaine de minutes d'arc environ. Si l'appareil couvre un champ supérieur à cette valeur, l'objet recherché a des chances de se trouver dans le cadre. Dans le cas contraire, la recherche risque d'être plus délicate.

### Le centrage à l'oculaire

Il est toujours possible d'installer un oculaire à la place de l'appareil pour affiner le centrage, mais cela oblige à retirer l'appareil de l'instrument. Ce qui n'est pas sans risque, notamment pour la mise au point ou la qualité de la correction de la PLU (voir chapitre 3).

Le flip-mirror (voir chapitre 5) est une bonne solution pour centrer une cible en profitant de toute la lumière de l'instrument sans avoir à démonter l'appareil. Mais son usage est plus délicat qu'en planétaire :

- il n'est pas utilisable au foyer d'un Newton ou de certaines lunettes dont la course de mise au point est trop petite ;
- l'allongement de tirage qu'il induit peut provoquer des aberrations, voire une impossibilité de mise au point, s'il est placé derrière un correcteur de champ ou un réducteur de focale ;
- si son diamètre interne est insuffisant, il peut provoquer du vignettage.

### La visée directe avec un APN

Avec un APN reflex installé au foyer de l'instrument, il est possible de centrer l'objet par visée directe à travers l'appareil, en complément du chercheur. Comme avec ce dernier, si l'objet n'est pas visible, on pourra s'aider des étoiles environnantes... si celles-ci sont suffisamment nombreuses et facilement repérables, ce qui n'est pas toujours le cas compte tenu du manque de luminosité des dépôts de viseurs de reflex.

### Les cercles de coordonnées

La plupart des montures équatoriales, du moins celles qui ne sont pas équipées de système GOTO (voir ci-dessous), sont pourvues de cercles de coordonnées d'ascension droite et de déclinaison. Ces

cercles ne sont pas toujours parfaitement réglés, aussi la méthode la plus utilisée est la suivante :

- centrer soigneusement une étoile brillante située non loin de la cible et dont les coordonnées équatoriales sont connues ;
- noter les valeurs affichées par ces cercles de coordonnées ;
- calculer la différence de coordonnées entre cette étoile et la cible, en ascension droite et en déclinaison ;
- actionner les mouvements de la monture sur chacun des axes pour décaler les coordonnées d'une valeur correspondant à cette différence.

Cependant, la précision de mesure de la position des cercles est rarement aussi bonne que celle d'un chercheur bien réglé. Cette technique est donc à réserver aux configurations offrant un grand champ de prise de vue.

### Le système GOTO

De nombreuses montures (certaines sont présentées dans ce livre) sont équipées de systèmes informatisés qualifiés du terme GOTO (en anglais, GO TO signifie « aller à ») permettant, une fois mis en station en début de séance par pointage de quelques étoiles-repères, de viser automatiquement n'importe quel objet dont les coordonnées sont inscrites dans la base de données de l'instrument. Comme pour les précédents, ce système n'est efficace que si l'objet a de bonnes chances de se retrouver à l'intérieur du champ visé par le capteur et non pas en dehors, ce qui dépend non seulement de la taille du capteur et de la focale de l'instrument mais aussi de la précision intrinsèque de pointage du système GOTO, variable selon les instruments, et de la qualité du calage initial sur les étoiles-repères. Un système GOTO offrant une précision réelle de plusieurs dizaines de minutes d'arc est de peu d'utilité si le champ photographié n'est que de quelques minutes d'arc !

## La prise de vue

Une séance d'acquisition en ciel profond se déroule typiquement selon la séquence suivante :

- montage de l'instrument principal (et d'un instrument-guide, le cas échéant) ;
- vérification de la collimation (chapitre 4) ;
- alignement polaire approximatif de la monture ;
- montage de l'appareil sur l'instrument avec éventuellement un réducteur de focale, un correcteur de champ ou un diviseur optique (chapitre 4) ;
- équilibrage de l'ensemble en ascension droite et en déclinaison ;
- vérification et affinage de l'alignement polaire (les montages et équilibrages ont souvent tendance à modifier légèrement cet alignement) ;
- recherche et centrage du premier objet à photographier ;
- recherche d'une étoile-guide, installation et calibration de l'autoguideur, le cas échéant ;
- affinage de la mise au point (chapitre 4) et réglage des paramètres de l'appareil ;
- lancement de l'autoguidage (ce chapitre), le cas échéant, puis lancement des poses sur l'appareil, en n'oubliant pas de vérifier et de retoucher la mise au point de temps à autre ;
- réalisation des images de prétraitement : noir, PLU et éventuellement offset, en fin de séance ou en alternance avec les photographies du ciel (chapitre 3).

#### Attention aux câbles qui pendent !

*Lorsque votre appareil ou votre caméra d'autoguidage est relié par des câbles à une alimentation ou à un ordinateur, ne les laissez pas pendre de l'appareil vers le sol : la traction des câbles, même minime, provoquerait à coup sûr des bougés dans vos images (d'autant que les câbles électriques ont tendance à se rigidifier au froid). N'oubliez pas qu'un décalage de 1/10 de mm à l'extrémité d'un tube de 1 m de long tenu en son centre se traduit par un dépointage de 40" ! Faites passer ces câbles sur la monture, de sorte qu'ils ne soient pas tendus et que le mouvement de suivi ne soit en aucune manière contrarié par leur poids.*

## Quelle FWHM ?

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, la largeur à mi-hauteur (FWHM) est un critère très fiable de finesse d'images d'étoiles. Tous les logiciels de traitement astronomique savent la mesurer sur une étoile (non saturée) que vous leur désignez et vous donnent sa valeur en pixels. Dans l'idéal, les étoiles les plus fines n'occuperaient qu'un seul pixel : la FWHM vaudrait alors 1. Mais une étoile peut très bien être située à la frontière entre deux pixels. Et surtout, de nombreux facteurs viennent augmenter cette largeur, notamment la turbulence, les défauts de suivi et de mise au point et les aberrations instrumentales. Bien sûr, si l'étoile choisie n'est pas sur l'axe optique, les défauts de couverture de champ vont également contribuer à dégrader la FWHM. En pratique, avec un capteur monochrome, il est possible de descendre à une FWHM

de 1,1 à 1,3 pixels avec un instrument de courte focale et d'excellente qualité optique, moyennant l'emploi d'un filtre sélectionnant une seule couleur. Sans filtre, une FWHM inférieure à 1,5 pixel est plus qu'honorable. Si le capteur utilisé est un capteur couleur, la FWHM est un peu plus élevée qu'avec un capteur monochrome (à taille de pixel égal) à cause des interpolations, elle ne peut guère descendre sous 1,6 pixel. À mesure que la focale augmente, la turbulence provoque l'augmentation de la FWHM et il n'est pas rare avec des instruments de plusieurs mètres de focale de constater une FWHM supérieure à 3 pixels. Dans ce cas, l'image est très suréchantillonnée et l'on aura tout intérêt, dans le cas d'une caméra CCD, à passer en binning  $2 \times 2$ .

ront bien placées dans le ciel durant la nuit à l'aide d'une carte du ciel rotative ou d'un logiciel de cartographie céleste. N'oubliez pas que la préparation de l'instrument (montage, alignement polaire, mise au point, initialisation de l'autoguidage, etc.) peut prendre plusieurs dizaines de minutes auxquelles il faut ajouter :

- le temps pris pour les photographies elles-mêmes ;
- les moments d'arrêt entre les poses, notamment pour transférer les images depuis un APN vers un ordinateur ou effectuer la lecture des images depuis une caméra CCD, ainsi que pour contrôler et retoucher la mise au point.

De nombreux logiciels de cartographie (parfois appelés « logiciels planétarium ») tels que Starry Night, Guide et Megastar, savent, une fois paramétrés avec la focale de l'instrument et la dimension du capteur, dessiner un rectangle représentant le champ vu par l'appareil sur le ciel. Vous pouvez ainsi préparer votre cadrage et vérifier que l'objet rentre bien en entier dans l'image.

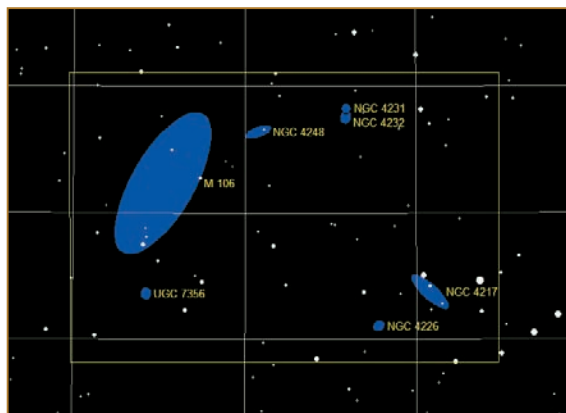
Certains photographes affirment que le cadrage représente la moitié de la qualité d'une photographie. En astronomie, il est impossible de changer de point de vue par rapport à notre sujet, le cadrage est donc également un élément essentiel de composition, que l'on photographie des cratères lunaires, des constellations, des conjonctions planétaires ou des galaxies. Lorsque l'image ne comporte qu'un objet intéressant, il est d'usage de le centrer dans l'image.

## Préparer sa séance de photographie

Je vous conseille vivement de préparer votre séance de photographie à l'avance en sélectionnant le ou les astres que vous comptez photographier. Il vous faut d'abord déterminer quelles constellations se-







Une galaxie voyage rarement seule... le cadrage de cette photographie de la région de M106 (page ci-contre) a été préparé avec Megastar, après lui avoir indiqué la focale de l'instrument et les dimensions du capteur CCD (cadre jaune), afin d'englober les galaxies qui entourent M106.

Mais l'exemple de la photographie de M106 montre que centrer l'objet principal n'est pas toujours la meilleure tactique s'il est entouré d'autres objets susceptibles d'enrichir la photographie. Lorsqu'une nébuleuse comporte de grandes extensions, voire déborde du cadre, il convient de soigner particulièrement sa position dans l'image afin d'englober les régions les plus intéressantes.

N'oubliez pas que vous pouvez faire tourner l'appareil sur lui-même pour cadrer un objet céleste de grande dimension le long du grand côté du capteur ou en diagonale. À l'ère du numérique, maintenant que l'image est immédiatement disponible et contrôlable, il est impardonnable de bâcler son cadrage ! Rien ne vous oblige non plus à ne sélectionner que des galaxies ou des nébuleuses dont les dimensions sont telles qu'elles remplissent tout le cadre de votre appareil : un astre de ciel profond qui « respire » au milieu de grandes étendues stellaires, c'est aussi très photogénique.

## La technique du shift-and-add

Aussi surprenant que cela puisse paraître, lorsque plusieurs poses du même champ céleste sont réalisées, il est préférable qu'à la prise de vue les objets ne soient pas placés exactement au même endroit sur toutes les images. Sans autoguidage, il est probable qu'une petite dérive se produise au cours du temps, provoquant automatiquement le petit décalage souhaité. Mais, avec l'autoguidage, il vaut mieux introduire volontairement de temps à autre un léger décalage (en anglais : shift) de quelques pixels dans une direction aléatoire. Cela aidera à obtenir une image finale plus propre en éliminant mieux les pixels mal corrigés par les prétraitements, et en premier lieu ceux des photosites chauds. En effet, une fois effectué le recalage des images les unes par rapport aux autres, ces pixels se retrouveront à des emplacements différents entre les images recentrées.

Cette technique est particulièrement efficace avec les appareils non régulés en température, lorsque la correction de noir n'est pas excellente, ce qui est fréquent. En outre, il ne faut pas oublier que les images de prétraitement sont bruitées et, puisqu'elles servent à corriger l'ensemble des images, leur bruit est introduit de nombreuses reprises à l'identique dans la chaîne de traitement. Le *shift-and-add* aide à lisser la contribution de ce bruit et permet d'obtenir des images finales moins bruitées.

# Le traitement des images

Une fois les acquisitions réalisées, le traitement des images de ciel profond se déroule habituellement selon la séquence qui suit. Les logiciels grand public sont capables de réaliser certains traitements tels que la combinaison d'images LRGB et peuvent se révéler pratiques si vous avez l'habitude de les utiliser, mais ils ne savent pas réaliser un prétraitement dans les règles, ni un DDP, et sont bien plus lourds pour une correction de gradient. Je vous conseille donc vivement l'utilisation d'un ou plusieurs logiciels astronomiques : ils sont conçus pour ce type de photographie et savent prendre en charge la quasi-totalité des traitements décrits ci-dessous. En outre, toutes leurs manipulations d'images se font en 16 bits.

## Prétraitements

La première opération est impérativement le prétraitement des images ; il s'effectue comme indiqué au chapitre 3. Chaque image doit être prétraitée individuellement avant recentrage et compositage, mais les logiciels astronomiques savent réaliser l'opération de prétraitement en une fois sur tout un lot d'images. Insistons encore une fois sur l'importance d'une bonne correction de PLU permettant d'obtenir un fond de ciel uniforme.

Lorsque les images brutes sont en format RAW, elles doivent être prétraitées par un logiciel astronomique capable d'effectuer cette opération sur le format RAW de l'appareil considéré. Les images sont ensuite toutes converties en RVB, soit en une série d'images couleur, soit en trois séries d'images rouges, vertes et bleues.

## Recentrage et compositage des images

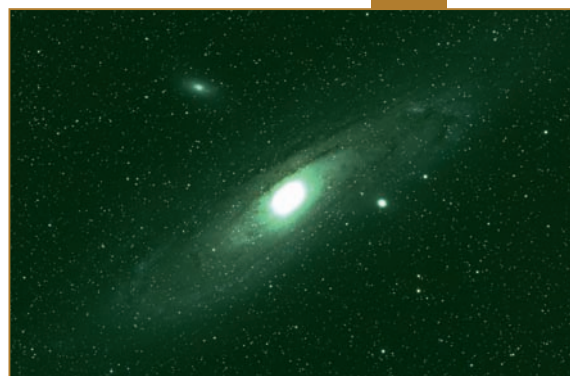
La seconde opération consiste à recentrer et à composer les différentes images prétraitées. Comme en planétaire, les logiciels de traitement astronomique savent recentrer automatiquement et très précisément un lot d'images de ciel profond. Lorsque les décalages d'images sont uniquement horizontaux et verticaux, le logiciel n'a besoin que d'une seule étoile de référence. Selon le logiciel utilisé, cette étoile est choisie par le logiciel ou par l'utilisateur ; dans ce second cas, elle doit être relativement isolée de ses voisines, afin qu'il n'y ait pas de confusion, et non saturée. Sa position dans chaque image est calculée par le logiciel à une fraction de pixel près (les mathématiciens reconnaîtront un calcul de barycentre) puis les décalages adéquats sont appliqués à chaque image afin de replacer l'étoile à la position qu'elle occupe dans la toute première image de la série. Le décalage entre images n'étant jamais un nombre de pixels entier, le logiciel effectue une interpolation sur chaque image recalée afin de la recentrer précisément.

Si les images successives sont entachées d'un peu de rotation de champ due à une mise en station imparfaite, le logiciel aura besoin de deux étoiles, car il doit calculer non seulement les décalages horizontaux et verticaux, mais aussi la rotation entre l'image considérée et la première image de la série.

Un recalage des images à l'aide d'un logiciel grand public est faisable mais long (il faut recalé à la main, à l'aide de calques superposés, chaque image par rapport à la première de la série) et peu précis (le recalage se fait au pixel près seulement).

Le recalage d'un lot d'images RAW prétraitées doit s'effectuer une fois que chacune de ces images a été convertie en RVB, c'est-à-dire

Après recentrage et compositage des images dans un logiciel astronomique, apparaît une dominante verte tout à fait normale (en haut).  
Après application des coefficients propres au modèle d'appareil, la balance des couleurs devient satisfaisante sur la galaxie (au centre). Mais la pollution a rendu le fond de ciel rougeâtre. Cette dominante peut être éliminée en soustrayant une valeur constante à chacune des couches RVB (en bas, la commande « black » a été employée dans le logiciel Iris afin d'uniformiser le fond de ciel).



après dématricage (voir Annexe 4). En effet, si ces images étaient laissées en RAW, les recentrages par rapport à la première image de la série provoqueraient des décalages aléatoires des pixels rouges, verts et bleus entre les différentes images, conduisant à des mélanges de couleurs absurdes.

Le compositage des images recentrées s'effectue ensuite par addition, médiane ou sigma-clipping. Comme nous l'avons vu au chapitre 3, si ces deux derniers algorithmes permettent d'éliminer les défauts présents dans une seule image, ils ne fonctionnent bien que si toutes les images présentent des niveaux de lumière équivalents, c'est-à-dire s'il n'y a pas eu de variation sensible de la transparence atmosphérique ou de la pollution lumineuse entre la première et la dernière image. Cette situation peut se produire par exemple si la Lune s'est levée ou couchée en cours de séance ou si la rotation de la voûte céleste a rapproché ou éloigné l'objet d'une source de pollution lumineuse située à l'horizon. Les logiciels astronomiques savent indiquer le niveau de fond de ciel d'une image et savent même ramener le fond de ciel d'une série d'images à une valeur commune à toutes les images avant de les combiner.

Pour un compositage d'images acquises en format RAW, il faudra équilibrer les couleurs de l'image RVB finale en appliquant à chacune d'elles un coefficient propre à l'appareil utilisé, afin de compenser les écarts de sensibilité entre les photosites des différentes couleurs (voir Annexe 8).

Comme en planétaire, lorsque les images sont additionnées, il faut veiller à ce que les parties les plus lumineuses de l'objet principal ne deviennent pas saturées. Si c'est le cas, on pourra réduire la dynamique de chacune des images en la multipliant par un coefficient réducteur inférieur à 1 (par exemple 1/2 ou 1/4) avant de toutes les combiner.

Si les images sont empâtées ou si leurs dimensions doivent être réduites (par exemple pour être déposées sur un site web), il est possible de le faire soit par rééchantillonnage (ce que savent faire tous les logiciels de traitement, voir Annexe 1), soit par binning logiciel. Ce binning permet d'améliorer le rapport signal sur bruit et suit le même principe que celui décrit au chapitre 2, à ceci près qu'il s'effectue au traitement et non à l'acquisition ; seuls les logiciels astronomiques savent le prendre en charge.

## Fond de ciel et gradients

La présence du fond de ciel dans l'image est facile à corriger : il suffit de régler les seuils de visualisation (voir plus loin) ou de soustraire une valeur constante à toute l'image pour éliminer ce fond à l'affichage. Mais il est fréquent que le fond de ciel ne soit pas neutre : la pollution lumineuse urbaine présente des dominantes colorées dépendant du type d'éclairage employé, par exemple la pollution due à la Lune est bleutée. Même en l'absence de Lune ou d'éclairage urbain, les hautes couches de l'atmosphère émettent une lumière légèrement colorée, verdâtre ou rougeâtre. Par ailleurs, lorsque le crépuscule astronomique n'est pas atteint, le fond de ciel est bleuté. Si le fond de l'image n'est pas neutre, il faut soustraire une valeur constante à chacune des couches RVB afin d'homogénéiser le fond des trois couches.

Mais ce n'est pas tout : même si la correction de PLU est de bonne qualité, apparaît parfois ce qu'on appelle un gradient ou un dégradé : le fond de l'image « penche », il est plus lumineux d'un côté que de l'autre. Dans l'image, ce gradient peut être orienté horizontalement, verticalement ou dans n'importe quelle autre direction. La cause est la pollution lumineuse lorsque celle-ci n'est pas uniforme sur le ciel, ce qui est le cas le plus courant. En effet, un fond de ciel pollué par l'éclairage urbain est en général plus brillant près de l'horizon, là où se trouvent les sources de pollution. En outre, lorsque la Lune est présente, le ciel est plus lumineux à proximité de celle-ci, ce qui provoque dans les images un gradient orienté dans la direction de notre satellite. Plus le champ de l'image est large, plus le gradient de ciel y est visible : les photographies prises avec un objectif photographique grand-angle y échappent rarement.

Heureusement, les gradients dus à la pollution lumineuse sont le plus souvent linéaires, c'est-à-dire qu'ils présentent une variation de luminosité constante d'un bout à l'autre de l'image. Des fonctions donnant d'excellents résultats en correction automatique de gradient sont notamment incluses dans Prism et Iris. Ces fonctions sont capables de calculer des modélisations de fond d'image complexe avec des polynômes de degré élevé mais, pour les gradients de pollution, il faut se limiter à un polynôme linéaire (degré 1) ; elles prennent alors en charge la mesure du fond de ciel dans les différentes parties de l'image, la modélisation du fond de ciel et la soustraction du gradient ainsi déterminé, le tout en une seule commande. Autre possibilité, dans Photoshop existe une fonction de création d'un calque de type Dégradé Linéaire, mais cela demande davantage de manipulations car il faut l'ajuster et le soustraire manuellement : encore une fois, avantage aux logiciels astronomiques et à leurs fonctions automatisées et parfaitement adaptées aux besoins spécifiques des astronomes.



Lorsque, après correction de la PLU, le fond de l'image présente une variation de luminosité régulière, c'est probablement à cause d'une pollution lumineuse du ciel, même minime. En haut, avant correction : le gradient est plus lumineux en direction de l'horizon, là où se trouve une ville au lointain. En bas, la correction par un polynôme de degré 1 élimine totalement ce gradient.





## Amélioration de la netteté

Disons-le tout net : le masque flou qui nous était si utile en planétaire n'est guère utilisable en ciel profond. À cela deux raisons, liées aux deux inconvénients de ce traitement vus au chapitre 5 :

- il amplifie le bruit, or le rapport signal sur bruit d'une image de ciel profond est très inférieur à celui d'une image planétaire ;
- il crée des artefacts, particulièrement visibles sur les étoiles sous la forme d'une auréole sombre du plus mauvais effet esthétique.



*Un masque flou a été appliqué sur une image de ciel profond, avec des coefficients appliqués couramment en planétaire. Le bruit est fortement amplifié et l'auréole caractéristique apparaît autour des étoiles (effet couramment appelé « yeux de panda » ou « étoiles au beurre noir »).*

Les logiciels astronomiques proposent d'autres traitements, dits « de déconvolution » ou « de restauration d'image ». Le plus connu se nomme Richardson-Lucy mais il en existe d'autres : Van Cittert, maximum d'entropie, etc. Ces algorithmes exploitent le fait qu'une étoile est une source de lumière ponctuelle et se basent sur une des images d'étoiles présentes dans la photographie pour calculer la dégradation atmosphérique et instrumentale qu'elle a subie, afin d'appliquer à l'image l'opération inverse. Le traitement est appliqué de manière itérative, le nombre d'itérations étant réglable et servant à ajuster la force du traitement. Sur le papier, ces traitements font des merveilles. En pratique, eux aussi amplifient le bruit et créent des artefacts, ils fonctionnent donc d'autant mieux que le rapport signal sur bruit des images est élevé, ce qui n'est jamais très facile à obtenir en ciel profond. Ils permettent de gagner un peu en finesse d'image et d'atténuer un éventuel bougé dû à un défaut de suivi. Mais il ne faut pas leur accorder des vertus excessives : une amélioration de la netteté de l'image à la prise de vue, par exemple via une mise au point plus soignée ou un guidage, sera toujours bien plus rentable (voir également l'encadré sur le télescope Hubble au chapitre 5). Appliqués de façon immodérée, ils peuvent même conduire à des images à l'aspect étrange dans lesquelles on ne sait plus ce qui est réel et ce qui ne l'est pas.

## Harmonisation des lumières

Les différentes parties de la plupart des nébuleuses présentent des variations de luminosité considérables, dépassant couramment un rapport de 1 à 100. Il en va de même pour la plupart des galaxies

et pour les amas globulaires : leur cœur est beaucoup plus lumineux que leurs extensions. Lors de l'affichage d'une image prétraitée à l'écran, impossible de tout voir en même temps : il nous faut choisir entre des seuils de visualisation larges qui montreront uniquement les parties brillantes, ou des seuils serrés qui feront apparaître les parties sombres mais surexposeront les autres. Heureusement, des traitements vont nous permettre de visualiser ces parties simultanément. Ils sont tous basés sur le même principe : amplifier les basses lumières sans (trop) toucher aux hautes lumières.



*En haut à gauche, les seuils de visualisation ont été ajustés pour le centre de M13, ce qui rend invisible sa périphérie. À droite, ils ont été ajustés pour la périphérie mais le centre de l'amas est saturé à l'écran. Un traitement DDP permet de rendre les deux zones visibles simultanément. Photographie obtenue avec un APN reflex sur un instrument de 1 000 mm de focale en 30 poses de 2 min.*

Parmi les multiples fonctions offertes par les logiciels grand public, l'ajustement de courbes est probablement le plus utilisé. Pour rehausser les basses lumières, la partie gauche de la courbe est remontée. Paint Shop Pro propose une autre fonction, Réglage à l'aide du graphique, dans laquelle il est possible de jouer avec un paramètre nommé gamma : pour rehausser les basses lumières, il suffit de le positionner à une valeur supérieure à 1, par exemple 1,5. La fonction Tons clairs/Tons foncés dans Photoshop peut également aider à la retouche finale des niveaux de luminosité de l'image.

Les manipulations visant à éclaircir les parties faibles de l'image présentent toutes le même inconvénient : ces parties sont celles qui ont le rapport signal sur bruit le plus mauvais et, en les rehaussant, on

amplifie le bruit dans les mêmes proportions. Ces traitements dérivant un résultat plus bruité que l'original, ils doivent de préférence être alimentés avec des images qui présentent un bon rapport signal sur bruit. En outre, en rehaussant les extensions faibles des étoiles (on parle aussi de leurs « pieds »), ils les élargissent. Il en résulte une image plus empâtée et moins fine que l'original.

Un autre traitement, longtemps utilisé par le biais des logiciels astronomiques, est appelé « logarithme ». Son effet est sensiblement le même que celui de l'ajustement de courbe. Il a été supplanté par le DDP (pour *Digital Development Processing*), traitement bien plus performant. Son algorithme varie quelque peu d'un logiciel à l'autre mais son principe est le même : rehausser les basses lumières en écrasant les hautes lumières. L'un des paramètres sert à ajuster la force de cette compression de dynamique. Afin de pallier l'empâtement des images, le DDP incorpore un masque flou (voir chapitre 5). Un autre paramètre du DDP sert à régler la largeur de la gaussienne (sigma) de ce masque flou ; une valeur excessive se signale par des auréoles sombres autour de certaines étoiles.



Effacement du blooming à l'aide du pinceau à cloner.

## Retouches cosmétiques

Lorsqu'une caméra CCD sans anti-blooming est utilisée et que certaines étoiles brillantes présentent du blooming, le moyen le plus simple de l'éliminer est de le gommer en copiant une zone voisine à l'aide du pinceau à cloner dans un logiciel de retouche. Évidemment, ce qui se trouve derrière l'aigrette de blooming a été perdu.

Les quelques pixels mal corrigés du signal thermique qui subsistent éventuellement dans l'image, ou les rayons cosmiques, peuvent être éliminés de la même manière. Les logiciels astronomiques savent remplacer la valeur d'un pixel isolé par la moyenne ou la médiane des pixels qui l'entourent. Cette manipulation est même possible sur une ligne ou une colonne entière de pixels.

## Mosaïques

La mosaïque permet d'agrandir a posteriori le champ de l'instrument, par réalisation de photographies de plusieurs régions contiguës. Ces images seront ensuite assemblées bout à bout, de la même manière qu'un panoramique en photographie de paysage. Un instrument présentant une mauvaise couverture de champ n'est pas idéal pour la réalisation de mosaïques, car il sera difficile de faire coïncider des étoiles très déformées en bordure de champ.

Lors de la prise de vue, il est préférable d'orienter les côtés du capteur avec les axes de la monture ; ainsi, le décalage du champ pour passer d'un cadrage au suivant pourra se faire en agissant sur un

seul de ces axes. Les différents cadrages doivent présenter une bordure commune bien visible : cette zone sera utilisée par le logiciel pour recalculer l'une des images par rapport à l'autre. Il est également préférable que le temps de pose cumulé soit identique sur tous les cadrages. En effet, lors de la réalisation d'une mosaïque, la principale difficulté est de rendre les jointures invisibles, ce qui nécessite des niveaux de lumière extrêmement proches et des fonds d'image très uniformes. Cela signifie que les corrections de PLU et des éventuels gradients sont fondamentales. En cas de variation de la transparence atmosphérique en cours de séance, il sera nécessaire d'ajuster les niveaux de chaque image avant de les assembler.

Il existe de multiples manières d'assembler des images. Les logiciels astronomiques proposent tous des fonctions de réalisation de mosaïques ; Prism, par exemple, comporte une fonction dans laquelle il suffit d'indiquer quelles sont les deux images à assembler, puis de cliquer dans chacune des images sur une étoile de la zone commune. La fonction prend en charge la création d'une image de dimension adéquate incluant les deux images sources, le recalage de l'une des images par rapport à l'autre à une fraction de pixel près, ainsi que l'ajustement des niveaux. La fonction Photomerge de Photoshop sait trouver la zone commune entre deux images et les assembler. Il est également possible de réaliser des assemblages à l'aide de calques superposés et déplacés manuellement les uns par rapport aux autres.

Avec un objectif photographique présentant de la distorsion, il faudra la corriger au mieux avant de réaliser la mosaïque. Paint Shop Pro et Photoshop comportent des fonctions de correction des distorsions de forme simple avec plusieurs paramètres de réglage. Il est conseillé de modéliser au préalable son objectif en photographiant un quadrillage, car il est impossible de trouver les bons paramètres à partir d'une photo d'un champ d'étoiles. Ces paramètres de correction sont toujours les mêmes pour un objectif donné (et à une focale donnée s'il s'agit d'un zoom), ils ne dépendent pas du diaphragme. La meilleure solution pour réaliser une mosaïque d'images souffrant de distorsion est peut-être l'utilisation d'un logiciel spécialisé en panoramiques, car ce type de logiciel est très performant lorsqu'il s'agit de redresser les distorsions avant l'assemblage des images.

## Animations

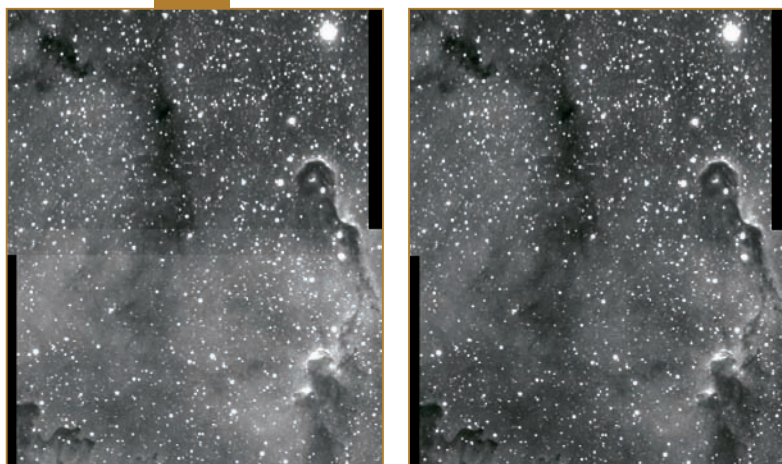
La réalisation d'une animation en ciel profond ne diffère pas de celle d'une animation planétaire (dont la confection est décrite au chapitre 5). Bien sûr, seuls les astres présentant une variation de position ou de luminosité présentent un intérêt : comètes bien sûr mais aussi astéroïdes et, pourquoi pas, étoiles variables, novae et supernovae.

## Réglage des seuils

Le traitement de votre image est terminé, elle est prête à être imprimée ou convertie en JPEG pour transfert sur votre site web. Il vous reste à régler précisément les niveaux, appelés « seuils » dans les logiciels astronomiques (voir Annexe 1). Certains logiciels astronomiques vous proposent de les régler eux-mêmes automatiquement, ce qui ne vous dispense pas de vérifier qu'ils vous conviennent ! D'autant que pour le seuil haut qui correspond au blanc pur, il n'y a pas de règle : vous pouvez décider de ne pas avoir de zone saturée dans l'objet principal ou au contraire de sacrifier certaines zones pour mieux en souligner d'autres. Une règle cependant : les zones et les étoiles saturées à l'acquisition ou au traitement doivent être affichées en blanc pur et non en gris.

Le seuil bas correspond au noir pur, il est naturellement à ajuster en fonction du niveau de fond de ciel de l'image. Ce réglage revêt une importance considérable pour la visualisation ou l'impression d'une image de ciel profond. S'il est trop clair, l'image n'est pas très

Malgré un temps de pose équivalent, ces deux portions de la nébuleuse IC1396 présentent un écart de luminosité bien visible sur leur zone de raccordement. À droite, Prism a su déterminer les coefficients permettant d'éliminer cet écart.







esthétique et manque de contraste. S'il est trop sombre au contraire, les parties faibles de la nébuleuse ou de la galaxie vont disparaître et peuvent laisser place à de disgracieuses transitions entre l'objet et le fond de ciel. Le réglage des niveaux ou des seuils ne doit jamais conduire à un fond complètement noir ; il doit se situer dans une fourchette de 4 à 12 % de la dynamique de la visualisation. Par exemple, pour une image visualisée sur 8 bits (256 niveaux) par couleur, le fond, mesuré dans les zones les plus sombres de l'image, doit se situer entre 10 et 30. Une valeur supérieure peut même se révéler utile s'il s'agit de mettre en évidence des parties très faibles d'une nébuleuse ou d'une galaxie. Lorsque l'image est visualisée avec un logiciel astronomique, le seuil bas doit être positionné un peu en des-

sous de la valeur du fond de ciel : par exemple, si le fond de ciel est à 300 et le seuil haut à 3 000, un seuil bas entre 150 et 250 donnera un résultat visuel satisfaisant. Rendre le fond de l'image complètement noir est certes un moyen commode de masquer une correction de PLU défectueuse ou non réalisée ou encore un gradient de fond de ciel... mais ce n'est qu'un cache-misère !

### Astrophotographie et graphisme

*Le compositage est une technique constamment employée et très performante pour simuler un temps de pose long et ainsi améliorer le rapport signal sur bruit. Comme vous avez pu le constater à la lecture de ce livre, elle consiste à combiner des images d'un astre (planète, comète...) prises dans un laps de temps suffisamment court pour que la morphologie de l'astre n'ait pas eu le temps d'évoluer ; pour les nébuleuses et galaxies, ce laps de temps est pratiquement illimité. Mais, dans le cas de phénomènes fugitifs et délicats à photographier en une seule fois (par exemple le passage d'une comète rapide devant un astre de ciel profond) voire impossibles (par exemple une photographie du ciel à grand champ réalisée avec suivi, au-dessus d'un paysage net), on peut être tenté de combiner des images des différents éléments prises dans des situations différentes pour reconstituer a posteriori la vision que l'on aurait eue au moment du phénomène. Ces assemblages d'images de contenu différent peuvent donner un résultat plaisant à l'œil, mais il s'agit alors de travaux qui sortent du domaine de l'astrophotographie pour entrer dans celui du graphisme ou de la vue d'artiste et il est impératif d'avertir clairement le spectateur de la manipulation effectuée.*

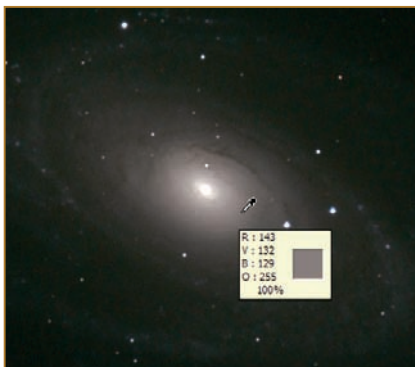
## Le traitement des couleurs

Nous avons vu qu'il était possible de recueillir de l'information sur la coloration des objets célestes de différentes manières : avec un capteur couleur, avec un capteur monochrome et un jeu de filtres à bande large, avec un capteur monochrome et un jeu de filtres à bande étroite. Il nous faut maintenant traiter les différentes images ou couches colorées afin de reconstituer l'image finale en couleurs. Dans la Nature n'existent que des rayonnements lumineux de différentes longueurs d'onde : les couleurs sont un génial artifice inventé par notre cerveau pour nous permettre de différencier les différents rayonnements auxquels notre œil est plus ou moins sensible. En as-

trophotographie, nous cherchons à obtenir des couleurs telles que nous les verrions au télescope si les astres émettaient une lumière beaucoup plus intense, capable de solliciter notre vision diurne qui est sensible aux couleurs. Mais ce n'est pas toujours facile, surtout avec les nébuleuses...

### Comment contrôler les couleurs

*Le contrôle visuel des couleurs à l'écran, surtout si celui-ci n'a pas été soigneusement calibré, est une opération hasardeuse. Tous les logiciels savent vous indiquer les valeurs d'intensité dans chaque couleur pour un pixel désigné dans l'image par un curseur ou une pipette. N'hésitez pas à les utiliser, par exemple pour équilibrer les couleurs sur une zone de référence de l'image dont vous savez qu'elle doit être grise.*



*La pipette de Paint Shop Pro affiche les valeurs numériques du pixel qu'elle désigne.*

## Pour les étoiles et les galaxies photographiées avec capteur couleur

C'est le cas simple. Vous pouvez considérer que les couleurs des objets à spectre continu (étoiles, galaxies, etc.) que vous avez obtenues sont proches de ce que votre œil verrait à l'oculaire si ces astres étaient plus lumineux. Vous pouvez toujours jouer un peu sur la saturation des couleurs si vous trouvez votre image peu colorée, mais évitez de tomber dans l'excès des images aux couleurs psychédéliques ! Si un filtre à bande étroite ou anti-pollution est utilisé, une dominante colorée est à prévoir compte tenu de l'élimination plus ou moins importante de certaines plages de longueurs d'onde.



*Sur cette photographie de M82 obtenue avec une lunette de 1 000 mm de focale et un APN reflex, un fond de ciel gris sombre met bien en évidence les extensions de la galaxie (à gauche). En revanche, un fond de ciel complètement noir (à droite) les fait disparaître et peut créer des transitions inesthétiques ou irréelles.*

## Pour les étoiles et les galaxies photographiées avec capteur monochrome et filtres RVB

Une fois prétraités et composés les groupes d'images rouges, vertes et bleues obtenues successivement avec chacun des filtres, il faut réaliser une trichromie, c'est-à-dire combiner ces trois couches colorées pour obtenir une image en couleurs, ce qui peut se faire facilement avec les logiciels de retouche ou avec les logiciels astronomiques. Mais la balance des couleurs n'est pas faite d'avance, il vous faut la prendre en charge. En effet, il y a toutes les chances pour que, à temps de pose égal, les trois couleurs ne soient pas équitablement représentées, à cause des variations de rendement du capteur et de transmission des filtres entre les différentes plages de longueurs d'onde.

Heureusement, les coefficients d'équilibrage sont constants pour un capteur et un jeu de filtres donnés, il suffit de les déterminer une fois pour toutes. Pour ce faire, la méthode la plus précise consiste à utiliser une étoile de type solaire (voir Annexe 6). À défaut, il est toujours possible de déterminer les coefficients correcteurs au jugé en s'assurant que l'ensemble des étoiles de l'image ne présente pas de dominante générale. Certaines étoiles peuvent présenter une coloration bleue, jaune, orange ou rouge mais, si vous voyez des étoiles vertes, c'est que votre balance des couleurs est défectueuse : il n'existe pas d'étoile verte !

Un prétraitement soigné des images RVB, notamment la correction de PLU et des gradients, est primordial. S'il est négligé, des dominantes apparaissent dans certaines parties de l'image, rendant l'équilibrage des couleurs particulièrement pénible.

Une fois les coefficients correcteurs RVB déterminés, il est judicieux d'ajuster le temps de pose total dans chaque couleur en fonction de ces coefficients, pour qu'ils leurs soient proportionnels. Par exemple, supposons qu'un capteur avec ses filtres présente une sensibilité allant décroissant du rouge au bleu, de telle sorte qu'ils aient comme coefficients 1/1,5/2, c'est-à-dire que le bleu doive être doublé et le vert augmenté de 50 % par rapport au rouge pour obtenir des couleurs équilibrées. Si le temps de pose cumulé dans le rouge est de 10 min, celui du vert pourra être voisin de 15 min et celui du bleu de 20 min. Ainsi, le rapport signal sur bruit des trois couches sera équivalent et aucune des couleurs n'aura été posée inutilement longtemps par rapport aux autres : le temps de pose global est optimisé.

La trichromie était la technique utilisée par les amateurs dans les années 1990. Mais elle présente un inconvénient majeur : elle nécessite, pour obtenir un bon rapport signal sur bruit, un temps de pose total très long. En effet, la majeure partie de la lumière, et donc du

signal, est rejetée par les filtres : le rouge et le vert sont éliminés par le filtre bleu, et ainsi de suite. L'intérêt du capteur monochrome (sa sensibilité) s'en trouve considérablement amoindri.

La technique LRVB (en anglais LRGB) évite cet inconvénient, elle est aujourd'hui universellement utilisée par les amateurs équipés de caméras CCD monochromes. Elle s'appuie sur une propriété de la vision humaine : les détails d'une scène sont majoritairement perçus à travers la composante monochrome de l'image, ce qu'on appelle sa luminance. La composante couleur, la chrominance, peut être d'une qualité médiocre, tant en termes de résolution que de signal sur bruit, sans que cela soit réellement perceptible (cette propriété est exploitée depuis longtemps pour la transmission d'images télévisées, pour lesquelles la quantité d'information transmise est beaucoup plus importante en luminance qu'en chrominance, sans que le téléspectateur perçoive une dégradation de la qualité de l'image).

En astronomie, le principe du LRGB est le suivant : combiner une image monochrome, présentant le meilleur rapport signal sur bruit et la meilleure résolution possibles, avec une image trichrome RVB de moins bonne qualité, uniquement destinée à sa colorisation. Afin d'obtenir un bon rapport signal sur bruit en un temps raisonnable, l'image de luminance sera obtenue soit sans filtre, soit avec un filtre anti-infrarouge laissant passer toute la lumière visible. Les images RVB pourront être réalisées en binning 2 x 2, ce qui permet de diviser leur temps de pose par quatre. Dans ce cas, il faudra évidemment les redimensionner d'un facteur 2 avant de les recentrer par rapport à l'image de luminance et de les combiner avec celle-ci. Puisque leur rapport signal sur bruit importe bien moins que celui de l'image de luminance, le temps de pose cumulé dans les trois couleurs n'a pas besoin d'excéder celui utilisé pour la luminance. Par exemple, on pourra choisir de poser 30 min pour la luminance et 30 min pour l'ensemble des images RVB, ce qui permettra d'obtenir en une heure de pose une image finale dont l'équivalent en trichromie aurait nécessité au moins quatre heures de prise de vue en RVB, et encore plus avec un capteur couleur. À temps de pose total égal, le LRVB surpasse tous les autres modes de prise de vue en termes de qualité de résultat.

Tous les logiciels astronomiques sont capables de réaliser la combinaison des images de luminance et de chrominance, il suffit de leur indiquer le nom de chacune des images L, R, V et B. Auparavant, il faut que toutes ces images aient été recentrées les unes par rapport aux autres afin qu'elles coïncident parfaitement. Les niveaux ou les seuils des images RVB doivent également avoir été soigneusement réglés afin d'équilibrer correctement les couleurs : une très petite variation de ces réglages peut conduire à de grandes différences de coloris.

*Portion de l'image de la page 99. En LRVB, l'image monochrome (à gauche) est colorisée grâce à l'image RVB (au centre) pour donner l'image en couleurs (à droite) qui doit à l'image monochrome sa finesse et son rapport signal sur bruit.*







Il est également facile de combiner les images dans les logiciels de retouche, en ayant au préalable préparé l'image de chrominance par association des images RVB. Dans Photoshop, les images de luminance et de chrominance sont ouvertes et converties en mode Lab, puis l'image de luminance est sélectionnée et copiée/collée à la place de la couche L de l'image de chrominance. Une méthode donnant un résultat très proche consiste à copier l'image de luminance en tant que nouveau calque de l'image de chrominance et à préciser qu'il s'agit d'un calque de type Luminosité. Dans Paint Shop Pro, la méthode est la même : ouvrir les deux images, sélectionner l'image de luminance, la copier/coller en tant que nouveau calque sur l'image de chrominance, passer ce calque en mode Luminance (palette Calques) et enfin fusionner tous les calques (menu Calques).

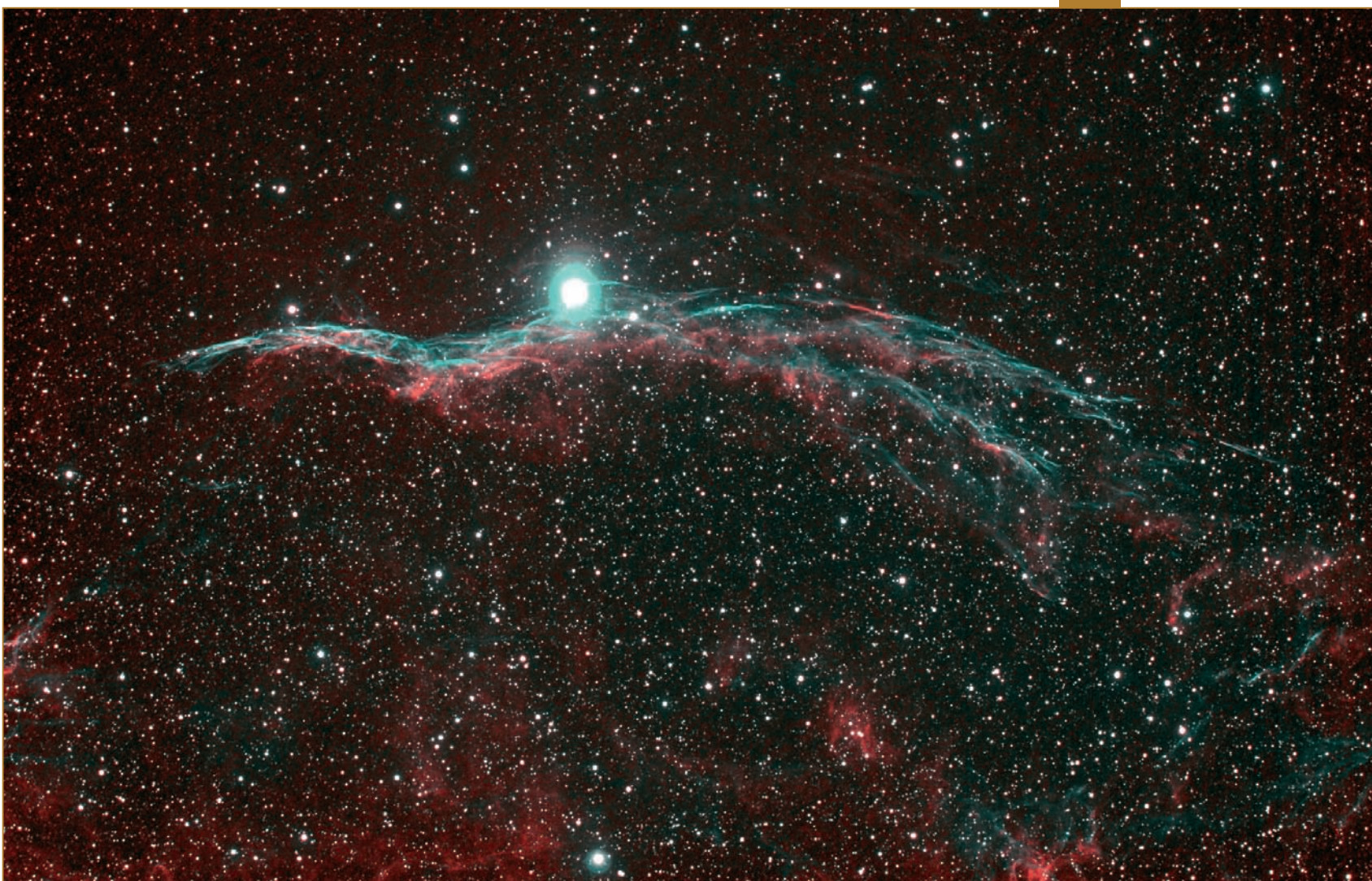
## Pour les nébuleuses photographiées avec capteur couleur

La situation est bien plus délicate qu'avec les objets à spectre continu. Nous avons vu que la sensibilité en  $H\alpha$  et le rendu de la couleur de  $OIII$  pouvaient varier énormément entre différents capteurs. Ces différences entre appareils expliquent en grande partie pourquoi les nébuleuses par émission et planétaires présentent des couleurs aussi

variées d'une photographie à l'autre. C'est un des inconvénients des capteurs couleur : ils font ce qu'ils veulent, sans marge de manœuvre pour l'utilisateur ! En cas de déficit important en  $H\alpha$ , il est toujours possible de rehausser la couche rouge au traitement mais dans des proportions limitées car celle-ci est peu profonde et très bruitée, compte tenu du faible nombre de photons captés. De plus, toutes les étoiles risquent de prendre une dominante rouge.

## Pour les nébuleuses photographiées avec capteur monochrome et filtres

Les images de nébuleuses par émission obtenues à l'aide de filtres RVB à bande large peuvent être équilibrées à partir des coefficients déterminés sur une étoile de type solaire. Comme nous l'avons vu plus haut, la situation est plus favorable qu'avec un capteur couleur, car un déficit de transmission en  $H\alpha$  du filtre R n'est pas à craindre. En revanche, la transmission des filtres vert et bleu pour les raies  $OIII$  et  $H\beta$  varie selon la marque des filtres et la couleur de ces raies peut donc aller du vert au bleu, en passant par toutes les nuances intermédiaires. Un étalonnage sur une étoile ne garantit pas une représentativité exacte sur les raies : en toute rigueur, il faudrait plutôt équilibrer les couleurs en fonction des coefficients de sensibilité du







*Ci-contre et ci-dessus, les Dentelles du Cygne sont un reste de supernova situé dans la constellation du même nom, rayonnement essentiellement en  $H\alpha$  et OIII. Les images données par deux filtres à bande étroite  $H\alpha$  et OIII ont été combinées pour donner une image en couleurs (couche rouge pour le premier, couches bleue et verte pour le second).*

capteur et de transmission des filtres sur les différentes raies, déterminés à partir de leurs courbes de rendement respectives.

Dans le cas de filtres à bande étroite, la marge de manœuvre est bien plus grande car nous pouvons décider à quelle couleur faire correspondre chaque raie et quelle intensité lui donner. Si des filtres  $H\alpha$ , OIII et  $H\beta$  sont utilisés, on attribuera leurs images respectivement aux couches rouge, vert et bleue de l'image finale. Si seuls deux filtres sont utilisés, un  $H\alpha$  et un OIII, on pourra attribuer OIII aux couches verte et bleue. Pour obtenir une bonne représentativité des raies, il faudra équilibrer les couleurs avec des coefficients déterminés à partir des valeurs de sensibilité du capteur sur les différentes raies. Par exemple, si un capteur est deux fois moins sensible à OIII qu'à  $H\alpha$ , il faudra rehausser la couche correspondant à OIII d'un facteur deux. Le seul petit inconvénient des filtres à bande étroite est qu'ils donnent des couleurs irréalistes sur les étoiles.

Lorsqu'une raie telle que SII est utilisée, la situation se complique car il faudrait l'attribuer au rouge, ce qui fait passer  $H\alpha$  en vert et OIII en bleu, d'où une dominante verte dans l'image finale. C'est ainsi que se présente la célèbre image de Hubble de la nébuleuse de l'Aigle (M16). On pourrait considérer qu'il n'est pas réaliste que la raie  $H\alpha$  soit représentée en vert, mais il s'agit ici de fournir une in-

formation à contenu scientifique sur la composition chimique de la nébuleuse ; ce choix de représentation est donc tout aussi défendable qu'un autre, même s'il n'est pas conforme aux couleurs visuelles des raies.

Les possibilités ne s'arrêtent pas là : il est tout à fait possible de combiner des images réalisées avec des filtres RVB à bande large et des filtres à bande étroite. Par exemple en colorisant à l'aide d'images RVB une image de luminance obtenue avec un filtre  $H\alpha$  (c'est ainsi qu'a été réalisée l'image du début de ce chapitre). Le réalisme des images, au sens physique du terme, n'est plus forcément respecté si la nébuleuse n'émet pas la quasi-totalité de sa lumière en  $H\alpha$  car une image prise dans cette raie ne contient aucune information de luminance verte ou bleue. Mais si l'objectif est purement esthétique, tout est envisageable... à condition d'en avertir le spectateur.

Précisons, pour clore ce sujet, qu'une belle image n'est pas nécessairement en couleurs. Une image de nébuleuse prise en  $H\alpha$  et présentée en noir et blanc peut être très esthétique. Si cette nébuleuse n'émet qu'en  $H\alpha$ , une colorisation en rouge n'apporte pas d'information supplémentaire et diminue même le contraste de l'image : les détails sont mieux perçus en noir et blanc. Vous pouvez préférer l'une ou l'autre des représentations : c'est une question de goût !





EFFETS	CAUSES POSSIBLES
Image floue et étoiles empâtées ou allongées en périphérie, quelle que soit la mise au point	<ul style="list-style-type: none"><li>• Couverture de champ incompatible avec la taille du capteur utilisé : coma et/ou astigmatisme</li><li>• Tirage inapproprié entre le capteur et un correcteur de champ ou un réducteur de focale</li></ul>
Image floue en périphérie ou au centre, selon la position de mise au point	<ul style="list-style-type: none"><li>• Couverture de champ incompatible avec la taille du capteur utilisé : courbure de champ</li></ul>
Image floue sur un bord ou un autre de l'image, selon la position de mise au point	<ul style="list-style-type: none"><li>• Appareil non perpendiculaire à l'axe optique</li></ul>
Étoiles entourées d'une auréole diffuse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Chromatisme</li><li>• Condensation sur l'instrument</li></ul>
Étoiles allongées sur une partie du champ ou sur tout le champ, quelle que soit la durée de la pose	<ul style="list-style-type: none"><li>• Défaut de collimation</li></ul>
Bougés et/ou dérive de l'image au fil du temps	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erreur d'alignement polaire</li><li>• Flexions entre l'instrument-guide et l'instrument principal</li></ul>
Bougés en ascension droite	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erreur périodique</li><li>• Vitesse de suivi en ascension droite légèrement différente de la vitesse sidérale</li></ul>
Image peu nette sur tout le champ	<ul style="list-style-type: none"><li>• Défaut de mise au point</li></ul>
Image peu nette à grande focale	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbulence</li></ul>
Bougés aléatoires	<ul style="list-style-type: none"><li>• Monture instable, surchargée ou déréglée</li><li>• Jeux optiques ou mécaniques</li></ul>
Image finale bruitée	<ul style="list-style-type: none"><li>• Temps de pose total trop court</li><li>• Rapport F/D trop élevé</li><li>• Appareil insuffisamment sensible</li><li>• Bruit de lecture de l'appareil élevé</li><li>• Pollution lumineuse</li></ul>
Pixels chauds résiduels	<ul style="list-style-type: none"><li>• Correction de noir défectueuse ou non réalisée</li></ul>
Couleurs non satisfaisantes	<ul style="list-style-type: none"><li>• Balance des couleurs mal réglée (APN)</li><li>• Défaut d'équilibrage des couleurs (caméra CCD)</li><li>• Capteur couleur peu sensible à certaines raies d'émission de nébuleuses</li></ul>
Périphérie de l'image assombrie Présence d'ombres de poussières	<ul style="list-style-type: none"><li>• Correction de PLU défectueuse ou non réalisée</li></ul>
Fond de l'image non uniforme et/ou coloré, en gradient ou dégradé	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pollution lumineuse due à l'éclairage urbain ou à la Lune</li></ul>

Quelques phénomènes courants et leurs causes possibles. Les remèdes sont décrits au fil de ce chapitre. Pour comprendre l'origine d'un problème, étudiez vos images : par exemple, une erreur périodique ne provoque un allongement des étoiles qu'en ascension droite, alors qu'un défaut de mise en station les fait dériver aussi en déclinaison. Faites varier les réglages et les paramètres : par exemple, certains problèmes disparaissent lorsque le temps de pose est réduit, d'autres non.

Le ciel profond pas à pas

*Autant que possible, faites vos premiers pas en ciel profond avec un instrument de courte focale et même, si possible, avec un APN muni de son objectif grand-angle et installé en parallèle sur une monture équatoriale : les objets seront faciles à cadrer et le suivi ne vous posera pas de problème. La ou les premières soirées, vous vous familiariserez avec le maniement de l'appareil et de la monture : mise en station, recherche des objets, mise au point, prise de vue et vérification des images sur l'écran de l'APN ou de l'ordinateur. Une fois ces techniques maîtrisées, choisissez un objet, faites-en plusieurs poses et réalisez des images de pré-traitement : noirs et PLU. Le lendemain, au chaud,*

*prétraitez chacune des images puis recentrez-les et composez-les. Jouez avec les seuils et appliquez des traitements de type DDP pour harmoniser les lumières et ajuster le fond de ciel. Lorsque vous vous sentirez à l'aise avec votre équipement et avec les traitements de base, vous pourrez tenter la photographie à plus longue focale, tout en étant conscient que cela vous conduira peut-être à devoir mettre en œuvre les techniques d'autoguidage. Si vous disposez d'une caméra CCD avec jeu de filtres, ne vous lancez dans la technique LRVB que lorsque vous maîtriserez la réalisation d'une belle image en noir et blanc.*







# Annexes

## A1 - Les images numériques

Cette annexe présente quelques notions indispensables à la compréhension des chapitres qui précèdent : les formats les plus couramment utilisés en astronomie et les opérations de base que tout logiciel sait réaliser. Des informations complémentaires pourront être trouvées dans les ouvrages de photographie numérique.

### Formats les plus courants

Physiquement, dans notre ordinateur, toutes les informations contenues dans une image sont stockées dans un fichier. À chacune des très nombreuses manières de représenter ces informations et de les agencer à l'intérieur du fichier correspond ce qu'on appelle « un format d'image ». Chaque format présente des avantages et des inconvénients, et s'applique à un usage particulier.

#### Format TIFF

Le format TIFF est, avec le JPEG, un des formats les plus utilisés en photographie courante. Sa structure est simple : c'est une suite de nombres dont chacun représente la valeur numérique d'un pixel, arrangés de telle manière qu'il soit possible de retrouver, simplement à partir de la position du nombre dans la suite, à quel pixel de l'image il correspond. Bien sûr, trois nombres par pixel sont nécessaires pour une image couleur : un pour la couche rouge, un pour la couche verte et un pour la couche bleue. Le volume du fichier correspondant est facile à calculer : à chaque pixel correspond un octet (image noir et blanc) ou trois octets (image couleur). Par exemple, une image couleur de 6 millions de pixels nécessite 6 millions d'octets par couleur, soit 18 millions d'octets au total, ce qui correspond à un volume de fichier d'environ 18 mégaoctets (Mo).

Une caractéristique importante du format TIFF réside dans sa capacité à coder des images en 8 bits ou en 16 bits par couleur. Dans le second cas, le volume du fichier est doublé : 36 Mo pour une image couleur de 6 millions de pixels. Mais seuls certains logiciels, notamment Photoshop, sont capables d'exploiter du TIFF 16 bits.

#### Les informations complémentaires

*Outre les données numériques représentant les valeurs numériques de chaque pixel, un fichier image contient également des informations plus générales sur l'image ou son contexte de prise de vue. Les formats sont plus ou moins souples de ce point de vue ; certains d'entre eux permettent de stocker des informations ou des commentaires sur les paramètres de prise de vue : temps de pose, instrument ou objectif employé, réglage de l'appareil, etc. Par exemple, le réglage de la balance des blancs n'influe pas sur les valeurs numériques contenues dans un fichier RAW (voir plus loin), mais ce réglage est mémorisé en commentaire dans le fichier pour que le logiciel de décodage du RAW puisse en prendre connaissance. Ces informations complémentaires sont appelées « données EXIF ».*

Le format bitmap (BMP) est un cousin du TIFF car ce sont tous les deux des formats non compressés (voir ci-dessous), mais le bitmap ne peut être utilisé qu'en 8 bits par couleur.

#### Format JPEG

Le format TIFF 8 ou 16 bits serait parfait... s'il ne conduisait pas à des fichiers occupant énormément d'octets. Trop en général pour des images déposées sur un site web, transmises par courrier électronique ou stockées sur une carte mémoire de petite capacité. Ont été inventés et sans cesse perfectionnés de multiples formats d'image (JPEG), de vidéo (MPEG, DV) ou de son (MP3) dont les données sont compressées, c'est-à-dire qu'elles sont codées et décodées à l'aide d'algorithmes mathématiques souvent extrêmement sophistiqués, afin que le nombre d'octets occupés soit le plus faible possible, tout en préservant autant que faire se peut, la qualité des données originales. Il existe deux types de compression :

- la compression sans perte : une fois les données compressées puis décompressées, toute l'information initiale est retrouvée à l'identique, sans aucune perte ; la célèbre compression de fichiers ZIP est de ce type ;
- la compression avec perte : l'information perd en qualité et des artefacts sont susceptibles d'apparaître, cela d'autant plus que les données sont fortement compressées et que le nombre d'octets occupés est petit.

Dans le premier cas, le gain en octets est relativement faible et n'excède généralement pas 50 % sur des images courantes. Dans le second cas, celui du JPEG, le taux de compression est réglable lors de l'enregistrement du fichier et le gain est beaucoup plus important. Le volume final du fichier dépend non seulement des dimensions de l'image mais aussi de son contenu : à taux de compression égal, une image riche en informations et en détails occupera plus d'octets qu'une image floue ou uniforme.

Même si ce n'est pas une situation idéale, le fait qu'une image (ou une vidéo) soit compressée avec perte ne signifie en aucun cas qu'elle ne peut être utilisée et donner de bons résultats. Tout dépend de l'ampleur de la perte et de l'usage ultérieur qui est fait de l'image : une forte compression sera plus tolérable sur une image déjà traitée et destinée à être simplement affichée sur un site web que sur une image devant faire l'objet de traitements poussés (manipulation de contraste ou de netteté par exemple).

#### Format GIF

Le format GIF est un format 8 bits essentiellement utilisé pour constituer des animations, car ce format est capable de contenir la mise en séquence d'une petite série d'images, avec un temps d'attente réglable entre chaque image et la suivante. Sa principale limitation est la gamme de 256 couleurs par pixel, ce qui est fort peu. Il est petit à petit supplanté par le format PNG qui présente des capacités bien plus étendues (jusqu'à 16 bits par couleur, compression sans perte). La quasi-totalité des images visibles sur les sites web est en format JPEG pour les images fixes et en GIF pour les petites séquences animées.

## Format RAW

Le format RAW (mot qui signifie « brut » en anglais) est né avec les appareils numériques de moyenne et haut de gamme. Il est au numérique ce que le négatif est à la photographie argentique. Il faudrait d'ailleurs plutôt parler des formats RAW, car pratiquement chaque appareil a le sien et les constructeurs les font évoluer très fréquemment, ce qui ne facilite pas le travail des réalisateurs de logiciels de traitement. Ils sont tous basés sur le même principe : conserver les données brutes directement issues du capteur et de la chaîne de numérisation, sans aucune transformation. La structure de la matrice de Bayer est conservée telle quelle, aucune interpolation n'étant effectuée en vue de la constitution d'une image à trois couches RVB ; cette interpolation sera effectuée ultérieurement par le logiciel de traitement qui va décoder ce format (voir Annexe 3). Tout au plus une compression sans perte est-elle appliquée. En d'autres termes, une image RAW n'est rien d'autre qu'une image monochrome qui est structurée exactement comme la matrice de Bayer du capteur dont elle est issue et où chaque pixel correspond à un photosite et un seul. Pour ces raisons, une image RAW occupe deux à trois fois moins d'octets que l'image TIFF couleur qui en sera issue. Le terme « CFA » (*Color Filter Array*) est parfois employé pour désigner une telle image.

Un autre avantage du format RAW réside dans le fait qu'il contient des images codées en plus de 8 bits par couleur, le plus souvent en 12 bits, ce qui correspond à 4 096 niveaux ( $2^{12}$ ) pour chaque couleur.

## Format FITS

Nous aurions pu commencer l'énumération des formats par le FITS (*Flexible Image Transport System*), tant est importante la place qu'il occupe en astronomie. Il s'agit en effet d'un format standard très complet créé par et pour le monde scientifique, et adopté de manière très large en astronomie aussi bien professionnelle qu'amateur. Tous les logiciels astronomiques savent ouvrir, traiter et enregistrer ce format, en général uniquement pour des images monochromes en 16 bits. Le FITS est le format à privilégier avec ces logiciels.

Sur 16 bits, les valeurs possibles pour un pixel vont de 0 à 65 535 ( $2^{16} - 1$ ), mais certains logiciels astronomiques écrètent à 15 bits (0 à 32 767) ou interprètent la moitié supérieure de cette gamme de valeurs numériques (32 768 à 65 535), comme étant négatives (-32 768 à 0).

## Formats propriétaires

Des fabricants de caméras CCD et des réalisateurs de logiciels astronomiques ont parfois créé des formats qui leur sont propres, destinés comme le FITS aux images monochromes 16 bits. C'est ainsi que l'on trouve notamment des formats STX chez SBIG, CPA dans Prism, PIC dans Iris. Ces deux derniers logiciels utilisent leur format propriétaire respectif pour coder les images en couleurs en 3 x 16 bits, ce qui est particulièrement utile pour les images issues d'APN ou de webcams couleur.

## Format AVI

Avec le format AVI, nous sortons du monde des images fixes pour entrer dans celui de la vidéo. Ce format est conçu pour stocker de grandes quantités d'images : une simple séquence vidéo d'une minute enregistrée à une cadence de 30 images par seconde contient déjà 1 800 images ! Dans le cas de la photographie astronomique, ce format nous intéresse au plus haut point puisque c'est celui des fichiers issus des webcams. À partir d'une webcam couleur standard fournissant des séquences en dimension VGA (640 pixels sur 480), notre vidéo d'une minute représente une taille de fichier respectable : 1,5 Go (1 800 x 640 x 480 x 3 octets).

Si vous effectuez des acquisitions en faisant varier la cadence d'images, vous pourrez constater que le volume du fichier lui est proportionnel : un AVI enregistré à 30 images par seconde est deux fois

plus volumineux qu'à 15 images par seconde. Cependant, les images du premier fichier risquent d'être de moins bonne qualité que celles du second. En effet, lorsque le débit des données à transmettre de la webcam à l'ordinateur dépasse les capacités de la liaison avec l'ordinateur, il y a compression des données avec perte, ce qui se traduit par un bruit accru et l'apparition d'artefacts de compression. En outre, si la puissance de l'ordinateur est insuffisante, 30 images par seconde seront bien enregistrées mais il y aura des doublons ; en effet, certaines images seront identiques à celles qui les précèdent, l'ordinateur n'arrivant plus à prendre en compte en temps réel le flux d'informations qui lui parvient.

Il existe de nombreux autres formats vidéo, citons par exemple le MPEG2 qui est le format d'enregistrement de certains boîtiers de numérisation vidéo. C'est un format compressé avec perte, il procure des fichiers vidéo moins volumineux que les AVI.

## Conversions de format

Presque toutes les conversions de format sont envisageables et les logiciels n'en interdisent aucune, mais on peut noter quelques recommandations sur certaines conversions. Un des principes fondamentaux est de rester en 16 bits le plus longtemps possible et de ne passer en format compressé que le plus tard possible.

- Il n'existe pas de format 10, 12 ou 14 bits à proprement parler ; une image issue d'une caméra CCD disposant d'un convertisseur correspondant à ces nombres doit donc être stockée en format 16 bits (en l'occurrence FITS) si l'on veut ne pas perdre d'informations ; de même, une image RAW issue d'un APN contient des données généralement codées sur 12 bits et, lors d'une conversion, doit si possible être stockée dans un format 16 bits (TIFF 16 bits ou FITS).
- Si vous utilisez une caméra CCD, vos acquisitions d'image se feront en FITS, de même que les traitements ultérieurs assurés par un logiciel de traitement astronomique ; pour les traitements dans un logiciel grand public, convertissez votre image en TIFF (16 bits si possible, sinon 8 bits) ; enfin, une fois tous les traitements achevés, vous pourrez passer en JPEG pour réaliser un diaporama destiné à vos amis ou pour télécharger l'image sur votre site web.
- Si vous utilisez un APN en format RAW, prétraitez les images dans un logiciel astronomique capable d'interpréter ce format, puis procédez comme ci-dessus.
- Si vous utilisez un APN en format JPEG, convertissez les images en format FITS si vous les ouvrez dans un logiciel astronomique, en TIFF dans un logiciel grand public.
- La conversion d'une image d'un format 8 bits en 16 bits n'apporte rien car elle ne crée pas d'information ; cependant, lorsque des images 8 bits doivent être composées (voir chapitre 3), on pourra avoir intérêt à passer en 16 bits.
- Les images contenues dans une vidéo AVI doivent en être extraites (en totalité ou en partie par sélection des meilleures images) à l'aide d'un logiciel de traitement astronomique et stockées sous la forme d'images fixes, par exemple en format BMP ou FITS, avant d'être traitées individuellement.
- Une vidéo obtenue dans un format autre que AVI (MPEG2 par exemple) doit être convertie en AVI pour être prise en compte de la même manière qu'une vidéo de webcam ; de nombreux petits logiciels gratuits disponibles sur Internet savent effectuer ce type de conversion.
- La constitution d'une séquence animée GIF à partir d'une petite série d'images fixes doit se faire à l'aide d'un logiciel spécialisé dans cette opération.

Certains logiciels astronomiques savent manipuler simultanément les trois couches RVB d'une image couleur, pour d'autres il faut passer par trois images (ou trois séries d'images) séparées.





Tableau récapitulatif des différents formats d'image et de leurs caractéristiques principales.

Format	Extension de fichier	Compression des données avec perte	Nombre de bits par couche
TIFF	.tif	Non	8 ou 16
GIF	.gif	Oui : réduction du nombre de couleurs à 256	Moins de 8
JPEG	.jpg	Oui	8
FITS	.fit ou .fts ou .fits	Non	16
RAW	Variable selon le fabricant et l'appareil, par exemple : .crw et .cr2 pour Canon, .nef pour Nikon, .orf pour Olympus, etc.	Non	Conforme aux capacités de numérisation de l'appareil de numérisation de l'appareil (12 ou 14 bits en général)

## Visualisation des images

La manière d'afficher les images à l'écran diffère selon le type de logiciel utilisé. Dans un logiciel grand public, une image est toujours présentée dans sa pleine dynamique : les pixels à zéro sont affichés en noir, ceux à 255 en blanc (pour une image monochrome). Entre les deux, les niveaux de gris s'étagent de manière régulière ; par exemple, un pixel à 128 sera représenté en gris moyen. Lorsque nous retouchons le contraste ou la lumière de l'image, les valeurs numériques des pixels sont recalculées : si l'on positionne notre souris sur un pixel de référence, nous constaterons que les valeurs ont bien été modifiées.

Les choses sont différentes dans un logiciel astronomique. Ici, nous disposons de deux valeurs à régler, en général à l'aide de curseurs : le seuil haut et le seuil bas. Le premier sert à ajuster le niveau d'affichage du blanc pur, le second le niveau d'affichage du noir pur. Par exemple, ouvrons une image 16 bits dans un de ces logiciels, puis positionnons le seuil haut à 4 000 et le seuil bas à 2 000. Tous les pixels ayant une valeur inférieure ou égale à 2 000 seront alors affichés en noir, tandis que ceux supérieurs à 4 000 seront affichés en blanc. Entre les deux, les niveaux de gris s'étagèrent de manière régulière : un pixel à 3 000 sera affiché en gris moyen. Changer les valeurs des seuils produit le même effet que la modification du contraste et de la luminosité de l'image, mais seulement pour l'affichage : les valeurs des pixels ne sont pas modifiées.

À noter que Photoshop, lorsqu'il affiche une image 16 bits, présente des niveaux entre 0 et 255, comme il le ferait pour une image 8 bits, et non entre 0 et 65 535 comme le fait un logiciel astronomique. Mais il effectue bien les opérations avec une précision supérieure, comme s'il considérait que les valeurs numériques sont des nombres décimaux comportant des chiffres après la virgule, chiffres qui ne sont pas affichés mais qui sont bien utilisés pour les calculs.

## Opérations courantes sur une image

Les opérations de base décrites ci-dessous sont utilisées fréquemment en traitement d'image astronomique, que ce soit directement par l'utilisateur ou implicitement au travers de traitements plus complexes. Tous les logiciels cités dans ce livre sont capables de les prendre en charge.

### Opérations arithmétiques

Toutes sortes d'opérations arithmétiques peuvent être réalisées sur les valeurs de l'ensemble des pixels d'une image : addition, soustraction, multiplication, division, écrêtage inférieur ou supérieur par un nombre quelconque. Des opérations arithmétiques entre images peuvent également être effectuées : par exemple, les prétraitements (chapitre 3) font appel à des soustractions et des divisions d'images entre elles.

Lors de certaines opérations, il peut y avoir saturation des valeurs de pixels. Par exemple, si une image est traitée en 8 bits, la multiplication de cette image par le coefficient 2 va écrêter à 255 tous les pixels dont la valeur d'origine est comprise entre 128 et 255.

### Redimensionnement

Le redimensionnement d'une image consiste à la transformer en une image comportant un plus grand ou un plus petit nombre de pixels. Le nombre de pixels final étant différent du nombre initial, le logiciel doit effectuer des opérations de type interpolation (nous avons évoqué ce traitement au chapitre 2). Il existe plusieurs algorithmes d'interpolation, du plus simple (duplication de pixels) au plus élaboré (interpolation bicubique).

### Inversions

Les inversions (aussi appelées symétries ou effets miroir) consistent à permuter soit le haut et le bas de l'image, soit sa droite et sa gauche. Par exemple, nous avons vu au chapitre 6 qu'un hélioscope solaire inversait l'image par effet miroir ; il faut donc la redresser au traitement en lui appliquant une inversion haut/bas.

### Fenêtrage

Nous avons évoqué le fenêtrage au chapitre 2 : il consiste à extraire une partie rectangulaire de l'image. Cette partie peut être désignée soit directement à la souris, soit en indiquant au logiciel les coordonnées des points situés dans ses coins.

### Rotations

Une rotation consiste à faire tourner l'image d'un angle donné autour d'un point donné. Ce traitement, qui fait appel à des interpolations, est notamment utilisé lorsqu'il y a eu rotation de champ entre plusieurs images devant être composées (chapitre 7). Lorsque la rotation s'effectue sans changer les dimensions de l'image, une partie de celle-ci est perdue car elle sort des limites de l'image et des plages noires apparaissent dans d'autres zones.

### Translations

Une translation consiste à décaler le contenu de l'image horizontalement et/ou verticalement d'un certain nombre de pixels. Ce traitement est employé notamment lorsqu'il s'agit de recentrer des images devant être composées par une des méthodes décrites au chapitre 3. Il est tout à fait possible de demander à un logiciel astronomique d'effectuer une translation d'un nombre de pixels non entier, par exemple 10,3 ou 3,95, ce qui améliore grandement la précision de recentrage ; des calculs d'interpolation sont alors mis en œuvre.

## A2 - Matériels et logiciels

Cette annexe présente, par ordre alphabétique, des fabricants majeurs de matériel destiné à l'astrophotographie : caméras CCD, caméras vidéo et accessoires (filtres, roues à filtres, flip-mirror), ainsi que quelques logiciels astronomiques très utilisés par les amateurs. Attention : cette liste et les descriptions associées, élaborées début 2006, ne sont pas exhaustives et sont susceptibles d'évoluer – consultez régulièrement leurs sites Internet !

### Caméras CCD et vidéo

#### Apogee

La gamme la plus récente des caméras CCD Apogee se nomme Alta et regroupe des caméras modulaires en liaison USB ou Ethernet. Elles sont dotées d'une mémoire tampon intégrée et d'une double numérisation 12/16 bits, la numérisation 12 bits autorisant une lecture plus rapide de l'image, et de nombreux capteurs de différentes marques (Kodak, Thomson, E2V) et de différents types (pleine trame standard ou aminci, interligne).

Pays : USA

Site constructeur : [www.ccd.com](http://www.ccd.com)

Importateur/revendeur en France :

Photonlines ([www.photonlines.com](http://www.photonlines.com))

#### Astrovid

Astrovid est un revendeur de matériel astronomique qui propose de nombreux modèles de caméras vidéo monochrome et couleur au standard vidéo PAL ou NTSC, pour la photographie des planètes, de la Lune et du Soleil (*Planetcam*). Certains modèles permettent de réaliser des photographies d'objets brillants de ciel profond par accumulation automatique de plusieurs images vidéo successives (*Stellacam*).

Pays : USA

Site : [www.astrovid.com](http://www.astrovid.com)

#### Atik Instruments

Atik Instruments propose des caméras monochrome et couleur destinées à la photographie des planètes ou du ciel profond, de type webcam modifiée longue pose, en liaison USB (plus port parallèle pour certains modèles). Plusieurs dimensions de capteurs sont disponibles. Le modèle le plus récent intègre un capteur interligne de 1,4 million de photosites, un convertisseur 16 bits et un refroidissement par module Peltier.

Pays : Portugal

Site : [www.atik-instruments.com](http://www.atik-instruments.com)

Revendeur au Portugal : Perseu ([www.perseu.pt](http://www.perseu.pt))

#### Audine

L'association AUDE (Association des utilisateurs de détecteurs électroniques) qui œuvre depuis plus de dix ans est à l'origine du projet *Audine* visant à proposer aux amateurs une caméra CCD performante au moindre coût. Elle est proposée en kit pour les amateurs sachant manier un fer à souder ou entièrement montée pour les autres. Elle peut recevoir divers capteurs Kodak et possède une interface parallèle, Ethernet ou USB. Elle est fabriquée en Allemagne sous la dénomination *Platinum*.

Site : [www.astrosurf.com/audine/](http://www.astrosurf.com/audine/)

Distributeurs : Essentiel Électronique pour le kit – monté ou non – ([www.essentielelectronique.com](http://www.essentielelectronique.com)) et Optique Unterlinden pour la Platinum ([www.optique-unterlinden.com](http://www.optique-unterlinden.com)).

#### Finger Lakes Instruments

FLI propose plusieurs gammes de caméras CCD et roues à filtres en liaison USB, avec des capteurs de différentes marques (Kodak, E2V, SITe) et de différents types (pleine trame standard ou aminci).

Pays : USA

Site : [www.fli-cam.com](http://www.fli-cam.com)

#### Hutech

Entre autres produits astronomiques, Hutech propose des boîtiers Canon modifiés avec filtre anti-infrarouge retiré et remplacé par un filtre transparent au rayonnement H $\alpha$ .

Pays : USA

Site : [www.sciencecenter.net/hutech](http://www.sciencecenter.net/hutech)

#### Meade Instruments

Ce fabricant de télescopes propose, sous la dénomination DSI (*Deep-Sky Imager*), de petites caméras CCD monochrome et couleur basées sur des capteurs interligne Sony et une liaison USB.

Pays : USA

Site : [www.meade.com](http://www.meade.com)

Nombreux revendeurs en France.

#### Lumenera

Fabricant de matériel pour l'industrie et la science, Lumenera propose des caméras vidéo monochrome et couleur 8 à 12 bits avec capteurs CCD ou CMOS de 1 à 6 millions de pixels, avec ou sans refroidissement, en liaison USB2.

Pays : Canada

Site : [www.lumenera.com](http://www.lumenera.com)

Importateur/revendeur en France :

Photonlines ([www.photonlines.com](http://www.photonlines.com))

#### SAC

SAC Imaging propose une gamme de caméras CCD monochrome et couleur à base de capteurs Sony.

Pays : USA

Site constructeur : [www.sac-imaging.com](http://www.sac-imaging.com)

#### SBIG (Santa Barbara Instruments Group)

Fabricant du plus grand nombre de caméras CCD astronomiques pour amateur, SBIG propose plusieurs gammes de caméras CCD, avec simple ou double capteur pour l'imagerie et/ou l'autoguidage, en liaison USB. Roues à filtres intégrées à certains modèles et proposées en option pour les autres.

Pays : USA

Site constructeur : [www.sbig.com](http://www.sbig.com)

Importateur en France : Médas Instruments ([www.medas.com](http://www.medas.com))

#### Starlight Xpress

Starlight Xpress Ltd propose une gamme de caméras CCD monochrome et couleur à base de capteurs Sony de divers types (interligne, pleine trame) et dimensions, pour l'imagerie et/ou pour l'autoguidage.

Pays : Royaume Uni

Site constructeur : [www.starlight-xpress.co.uk/](http://www.starlight-xpress.co.uk/)

Importateurs/revendeurs en France :

l'Astronome ([www.astronome.fr](http://www.astronome.fr)) et Galileo

([www.galileo.cc/galileo-france/](http://www.galileo.cc/galileo-france/))





Filtres et accessoires photographiques

Fabricant	Produits principaux	site
Astrodon	Filtres LRVB et à bande étroite	www.astrodon.com
Astronomik	Filtres anti-pollution, LRVB, à bande étroite ; roues à filtres	www.astronomik.com
Baader	Filtres anti-chromatisme, anti-pollution, LRVB, à bande étroite, UV, anti-IR pour reflex Canon	www.baader-planetarium.de
Custom Scientific	Filtres LRVB et à bande étroite	www.customscientific.com
Idas	Filtres anti-pollution, LRVB et à bande étroite ; filtres pour reflex Canon	www.sciencecenter.net/hutech
Optec	Filtres LRGB ; roues à filtres ; réducteurs de focale	www.optecinc.com
Murnaghan instruments	Filtres LRVB ; roues à filtres ; flip-mirrors	www.e-scopes.cc
Technical Innovations	Robo-focus (mise au point motorisée automatisable avec compensation de température)	www.homedome.com
True Technology	Filtres LRVB ; roues à filtres ; flip-mirrors	www.trutek-uk.com

Logiciels astronomiques

La plupart des logiciels ci-contre savent prendre en charge les traitements astronomiques décrits dans ce livre. Certains offrent également des fonctions d'exploitation des images (mesures astrométriques et photométriques) ou des fonctions particulières (par exemple, aide à l'alignement d'une monture équatoriale ou à la collimation, pilotage d'instrument, planétarium). Plusieurs d'entre eux proposent des fonctions de pilotage de webcams, de caméras CCD et d'APN reflex, certains sont même spécialisés dans ces opérations. L'interface est en langue anglaise et, pour certains d'entre eux, en langue française.

Logiciel	Pays d'origine	Site
Astroart	Italie	www.msb-astroart.com
Astrosnap	France	www.astrosnap.com
CCDware	USA	www.ccdware.com
DSLR Focus	USA	www.dsrlrfocus.com
Iris	France	www.astrosurf.com/buil/us/iris
MaximDL/MaximDSLR	USA	www.cyanogen.com
Prism	France	www.astrosurf.com/prism
Registax	Pays-Bas	registax.astronomy.net

A3 - Du capteur à l'image

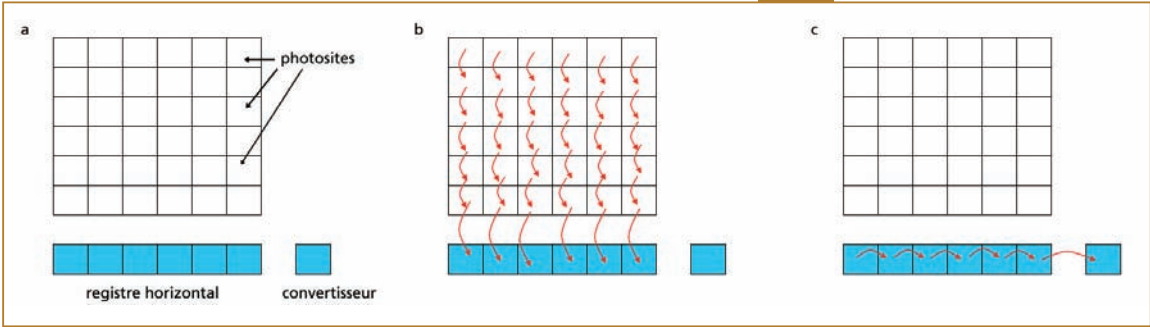
La fabrication d'une image numérique ne se limite pas à la réception de la lumière par le capteur de l'appareil. À l'issue de cette réception s'effectue une phase dite de lecture dont le rôle est de récupérer les électrons stockés dans les photosites, afin de réaliser les calculs de numérisation évoqués au chapitre 2. Enfin, pour un capteur couleur, l'opération de dématricage permet d'obtenir une image à trois composantes (rouge, verte et bleue).

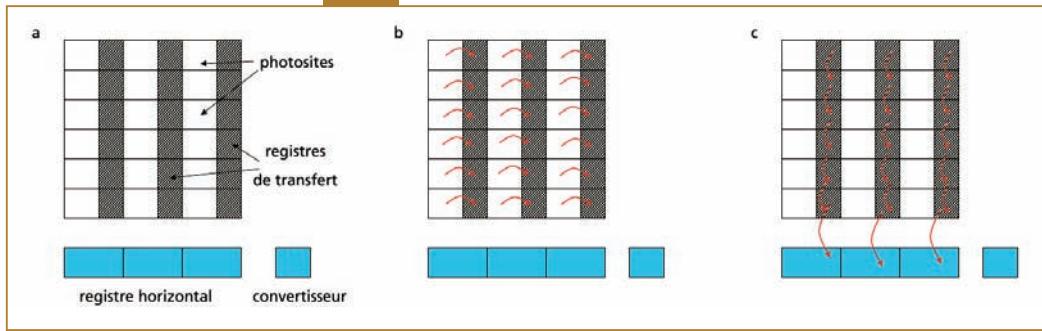
Lecture de l'image

La lecture de l'image d'un capteur CCD non interligne (on dit aussi « pleine trame ») s'effectue selon le principe de la figure ci-dessous. Pour un capteur CCD interligne, cette lecture s'effectue selon le principe de la première figure de la page suivante.

Un capteur CCD comporte, en plus de sa grille de photosites, une ligne supplémentaire de photosites, cachée de la lumière et nommée registre horizontal (en a). En fin de pose, lorsque la numérisation doit commencer, l'application d'une séquence de tensions adéquates permet de transférer, en une seule fois, le contenu de chaque ligne dans celle située juste en dessous (en b). La dernière ligne, quant à elle, est transférée dans le registre horizontal. Le contenu de celui-ci est alors décalé d'un cran vers la droite (en c), ce qui permet de récupérer pour amplification et numérisation le contenu d'un premier photosite. Ceci fait, le registre est décalé

d'un cran supplémentaire pour la numérisation du contenu du photosite voisin, et ainsi de suite pour tous les photosites du registre horizontal. Une fois ce registre entièrement pris en compte, un nouveau décalage vertical de lignes peut alors s'effectuer (retour en b), en vue de la numérisation d'une ligne supplémentaire. Ces opérations sont ainsi répétées pour toutes les lignes et tous les photosites du capteur. Un microprocesseur intégré à l'appareil orchestre toutes ces opérations de décalages et de numérisations. Sur les capteurs des caméras CCD, le binning est réalisé à l'aide de décalages multiples (par exemple, pour le binning 2×2, les lignes sont décalées deux par deux dans le registre horizontal et le contenu de celui-ci est également décalé de manière double vers le convertisseur).





Dans les capteurs interligne, très utilisés en vidéo, chaque colonne de photosites est secondée par une colonne de registres masquée de la lumière (en a). En fin de pose, le contenu de chaque colonne est transféré dans la colonne de registres voisine (en b), en une seule fois et de manière très rapide. La lecture peut alors se faire, comme décrit pour un capteur CCD pleine trame, par le jeu des décalages du contenu des colonnes masquées vers le registre horizontal (en c), mais sans nécessiter cette fois d'obturateur mécanique masquant le capteur à la fin de chaque pose.

Signalons qu'il existe une variante, peu répandue, du capteur CCD interligne : le capteur à transfert de trame (ou *frame transfer*). L'ensemble des photosites masqués est regroupé sur la moitié du capteur, l'autre moitié étant réservée aux photosites recueillant la lumière.

Dans les capteurs CMOS modernes, le contenu de chaque photosite peut être récupéré directement : pas besoin de décalages successifs de leur contenu. Néanmoins, le convertisseur étant généralement unique, comme pour les capteurs CCD, la phase de numérisation doit s'effectuer séquentiellement, photosite après photosite.

## Obtention d'une image en couleurs

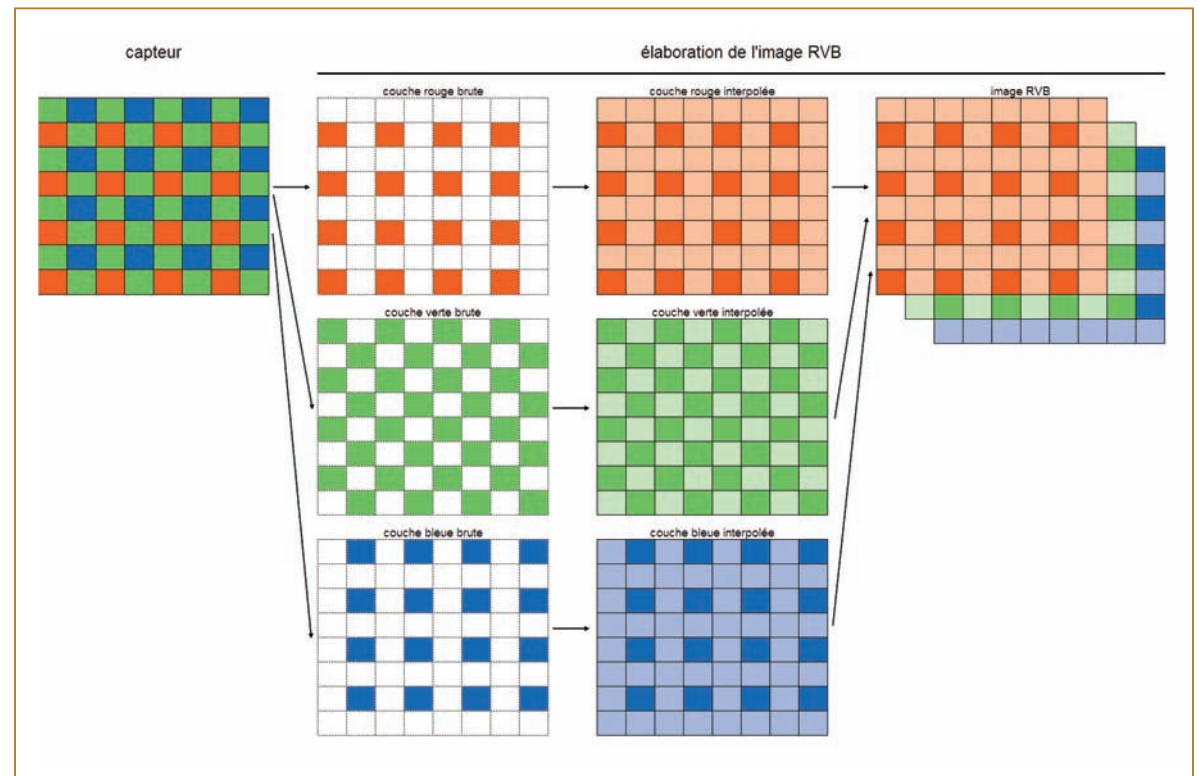
Avec un capteur monochrome, l'étape finale, c'est-à-dire la fabrication de l'image numérique proprement dite, est simple : de manière évidente, à chaque pixel de l'image correspond un et un seul photosite et l'image est le fidèle reflet de ce que le capteur a enregistré. Le nombre issu du CAN pour un photosite donné est associé au pixel correspondant ; on parle alors couramment de l'intensité du pixel.

En revanche, avec un capteur couleur, les choses se compliquent. En effet, si l'on se contentait d'associer un photosite à chaque pixel de l'image, celle-ci présenterait une apparence peu convaincante. Sup-

posons par exemple que l'on ait photographié le ciel bleu : l'image serait alors constituée comme une passoire, avec un pixel brillant sur quatre, celui qui correspond au photosite captant la lumière bleue. Or chacun sait que, dans une image couleur, chaque pixel doit présenter sa propre couleur, il doit donc posséder trois valeurs : une pour le rouge, une pour le vert et une pour le bleu. Autrement dit, une image en couleurs de quatre millions de pixels comporte en réalité douze millions d'informations. Mais le capteur n'en a délivré que quatre millions : d'où sortent les huit millions supplémentaires ? Ils sont issus d'une interpolation.

Prenons un des photosites verts de la première ligne de notre capteur couleur (figure suivante). Il est entouré de deux photosites bleus, un à sa gauche et un à sa droite. Ce photosite vert n'est pas sensible à la lumière bleue et nous ne pouvons donc pas connaître la quantité de lumière bleue qui l'a atteint. Nous devons supposer que la valeur la plus probable pour cette quantité se situe quelque part entre les valeurs indiquées par le convertisseur pour ses voisins bleus. Par exemple, si le convertisseur a indiqué 100 pour le photosite bleu de gauche et 110 pour celui de droite, on pourra attribuer la valeur 105 (la moyenne) pour la valeur bleue du pixel associé à notre photosite vert. Cette opération est effectuée pour tous les pixels de l'image en calculant toutes les valeurs manquantes, elle est appelée « dématricage » de la matrice de Bayer. Le calcul d'interpolation par moyenne que nous venons de décrire est très simple. Dans la pratique, les interpolations effectuées à bord des appareils ou dans les logiciels de dématricage font appel à des algorithmes mathématiques plus sophistiqués et font intervenir un plus grand nombre de photosites.

*La reconstitution d'une image RVB à partir des données recueillies par la matrice de Bayer (couleurs unies) s'effectue à l'aide d'interpolations destinées à combler les données manquantes (couleurs en pointillés).*



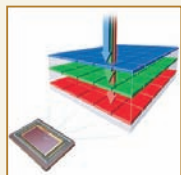




## Le capteur Foveon

Ce capteur ne comporte pas de grille de filtres colorés. Il parvient à distinguer les photons de différentes longueurs d'onde d'une autre manière, en tirant profit du fait que les photons de lumière bleue pénètrent moins profondément dans le silicium que les photons de lumière verte, et ceux-ci moins profondément que les photons de lumière rouge. Ce capteur est structuré en trois couches, un peu à la manière des films argentique couleur, chaque couche étant chargée de stocker les électrons issus de photons d'une des trois couleurs. À la différence d'un capteur équipé d'une matrice de Bayer, un tel capteur, s'il possède trois millions de photosites, recueille neuf millions d'informations, ce qui correspond bien à la quantité d'information nécessaire à la construction d'une image en couleurs de trois millions de pixels, et cela sans aucune interpolation. C'est la raison pour laquelle les fabricants d'appareils équipés de ce type de capteur indiquent que le nombre de photosites doit être triplé pour être comparable à celui d'un capteur à matrice de Bayer.

Cette solution est très séduisante dans son principe, mais le coût de ces capteurs est plus élevé et des aspects tels que le rendement quantique et la séparation des couleurs sont délicats à maîtriser. On peut espérer que les progrès techniques permettront à cette fin, ou à d'autres, de faire progresser la technologie des capteurs couleur, ce qui ne serait pas superflu pour l'astronomie !



Un capteur de type Foveon tire parti du fait que les photons pénètrent plus ou moins profondément dans le silicium selon leur longueur d'onde.

## Le mode noir et blanc

Certains APN proposent, dans leurs menus de réglage, un mode noir et blanc. Dans cette situation, l'appareil effectue une moyenne des trois couches RVB et remplace chacune d'elles par cette moyenne avant enregistrement de l'image. Ce mode peut paraître séduisant sur des objets monochromes tels que la Lune ou le Soleil, mais outre le fait que cette opération peut très bien s'effectuer ultérieurement sur une image couleur à l'ordinateur, il présente peu d'intérêt car :

- il n'améliore en rien la sensibilité de l'appareil puisque les filtres de Bayer du capteur n'ont pas été retirés ;
- il arrive fréquemment qu'une des trois couches, en général le vert, présente une meilleure résolution et un meilleur rapport signal sur bruit ; on ne pourra l'extraire au traitement que si les trois couches RVB ont été conservées séparément, c'est-à-dire si le mode noir et blanc n'a pas été activé.

## A4 - Les principales causes des défauts d'uniformité et leurs remèdes

Nous avons vu au chapitre 3 que le vignetage et les ombres de poussières peuvent s'éliminer par traitement à partir d'images de correction (PLU). Mais il est tout de même important que ces défauts ne soient pas trop prononcés sur les images brutes car :

- le vignetage occasionne une dégradation du rapport signal sur bruit : la périphérie de l'image est un peu plus bruitée que le centre ;

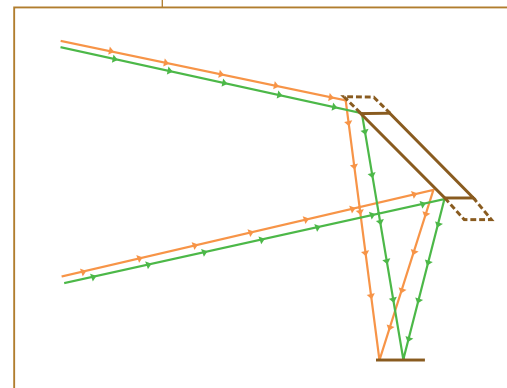
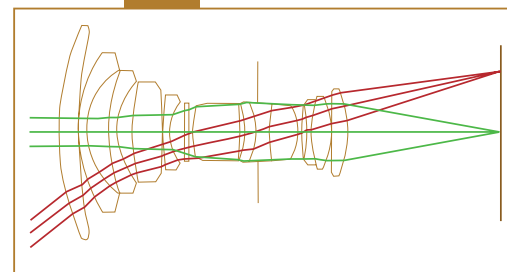
- il est difficile d'obtenir des images de correction qui soient parfaitement représentatives des images à corriger : il y a toujours de légères différences, d'autant plus flagrantes sur l'image corrigée que les défauts sont prononcés sur les images brutes.

## Le vignetage

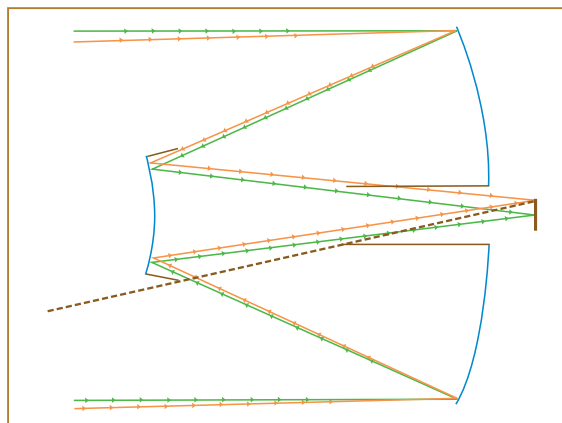
Les causes du vignetage sont très diverses.

1. Géométriques : l'ouverture de l'instrument, vue par des rayons arrivant obliquement, n'est plus un cercle mais une ellipse dont la surface collectrice diminue au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente. De l'autre côté de l'instrument, ces mêmes rayons atteignent le capteur de manière non perpendiculaire et en ayant parcouru une plus grande distance, ce qui se traduit également par une diminution de la lumière reçue sur chaque pixel par rapport au centre du capteur. Cet effet est surtout sensible avec les objectifs photographiques de courte focale.
2. Optiques : une des pièces optiques est sous-dimensionnée par rapport au champ à couvrir. Par exemple, certains télescopes de Newton ont un miroir secondaire dont le diamètre est tout juste suffisant pour intercepter les rayons lumineux provenant du centre du champ, mais une partie des rayons arrivant de la périphérie du champ ne sont pas interceptés. Sur un télescope, le dimensionnement du miroir secondaire est un compromis entre le souci de minimiser l'obstruction centrale et les contraintes de photographie du ciel profond. Le champ à l'intérieur duquel toute la lumière recueillie par l'élément optique primaire est focalisée sans perte au foyer, est appelé le champ de pleine lumière.
3. Mécaniques : une partie de l'instrument bloque des rayons lumineux provenant de la périphérie du champ. Certains éléments sont particulièrement susceptibles de provoquer cet effet :
  - le pare-buée : si vous en fabriquez un pour votre objectif ou votre instrument, veillez à le dimensionner suffisamment large, en fonction du champ couvert par votre appareil. Les pare-buée conçus par les fabricants pour leurs objectifs photographiques ou leurs instruments astronomiques sont toujours correctement dimensionnés ;
  - sur les télescopes de la famille Cassegrain, les baffles qui prolongent les miroirs primaire et secondaire. Ces baffles sont indispensables, car ils sont destinés à empêcher la lumière provenant du ciel de parvenir directement sur l'oculaire ou sur le capteur, ce qui aurait un effet désastreux sur le contraste de l'image. Leur dimensionnement est toujours un compromis entre ce bénéfice et l'inévitable effet de vignetage qui en résulte ; sur les lunettes, le bafflage interne, généralement composé de plusieurs diaphragmes et destiné à éviter les réflexions parasites dans le tube, peut également produire du vignetage ;
  - le tube interne du porte-oculaire, en particulier sur les lunettes ;
  - les bagues d'adaptation de l'appareil sur l'instrument ;
  - les éventuels filtres placés devant l'appareil.

Les rayons lumineux arrivant de manière inclinée sur l'axe optique voient l'ouverture de l'objectif comme une ellipse, puis ils convergent vers la périphérie du capteur de manière également inclinée et en parcourant une distance plus grande que les rayons perpendiculaires.  
Document Leica.



Le miroir secondaire de ce Newton est sous-dimensionné pour la photographie : il intercepte tous les rayons provenant du centre du champ (en vert) mais pas ceux de la périphérie du champ (en rouge). Un miroir secondaire plus largement dimensionné (en traits discontinus) offre un champ de pleine lumière plus étendu. De nombreux livres et sites Internet fournissent les formules permettant de calculer les dimensions du miroir secondaire en fonction du champ de pleine lumière souhaité.

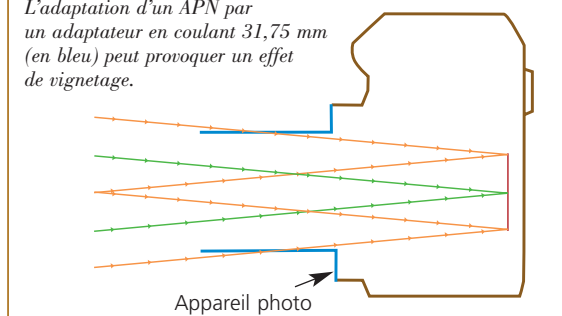


Destiné à empêcher la lumière parasite de parvenir directement au foyer (ligne discontinue), le bafflage des télescopes de la famille Cassegrain provoque un vignetage dont l'ampleur dépend des choix de conception de l'instrument et de la position de mise au point. Un réducteur de focale augmente cet effet puisque le champ couvert par le capteur est élargi et le foyer de l'instrument reculé.

### Le vignetage par bague d'adaptation

Cette cause mérite qu'on s'y attarde, car c'est sur elle que vous pouvez facilement agir si nécessaire. Supposons que vous utilisiez une bague mâle en coulant 31,75 mm pour installer votre APN reflex, via une bague T2 (voir chapitre 4), sur un instrument à F/D 5. Dans cet exemple, l'avant de la bague mâle est situé à environ 100 mm du capteur. Un calcul très simple nous permet d'en déduire que la largeur du faisceau lumineux parvenant au centre du capteur, à 100 mm en avant de celui-ci, est de  $100/5 = 20$  mm. Tout le cône de rayons lumineux passe donc bien à travers la bague dont le diamètre intérieur est d'environ 27 mm (figure ci-dessous en vert). Du moins pour les rayons qui se dirigent vers le centre du capteur... pour ceux qui se dirigent vers sa périphérie, il en va autrement. En simplifiant, nous pouvons considérer que le cône qui atteint un point du capteur situé à 10 mm du centre est parallèle au cône central et décalé latéralement de 10 mm par rapport à celui-ci (figure ci-dessous en rouge). Pour ces cônes, il nous faut donc un diamètre intérieur de bague d'au moins  $(20 + 10) = 30$  mm, ce qui n'est plus le cas puisqu'il ne fait que 27 mm : il y a risque de vignetage par la bague d'adaptation.

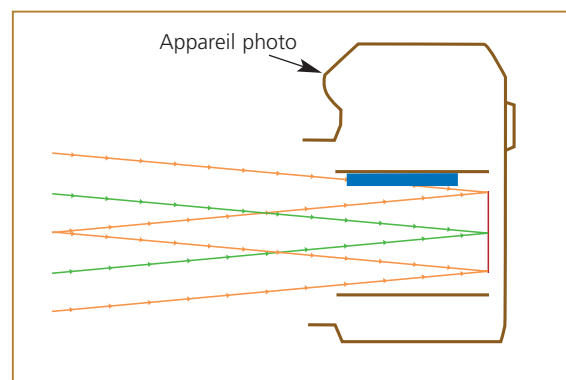
L'adaptation d'un APN par un adaptateur en coulant 31,75 mm (en bleu) peut provoquer un effet de vignetage.



Généralisons : pour vérifier si, sur un instrument astronomique, un élément mécanique situé à une distance T d'un capteur de diagonale C vignette ou non, il suffit de calculer la valeur suivante :

$$C + \frac{T}{(F/D)}$$

et de vérifier que le diamètre intérieur de cet élément est supérieur ou égal à cette valeur.



Une autre cause de vignetage : lorsque mon APN reflex est monté sur ma lunette à rapport F/D court, la partie basse des images brutes (en haut) présente une baisse d'intensité qui est due à un vignetage par son miroir de visée (au centre, en bleu) qui, en position relevée, se trouve dans le prolongement de la partie supérieure du capteur (n'oublions pas qu'un instrument ou un objectif donne, sur le plan focal, une image inversée des objets). La PLU (en bas) reproduit cet effet pour le corriger en même temps que le vignetage et les ombres de poussières.

### Le vignetage par filtre

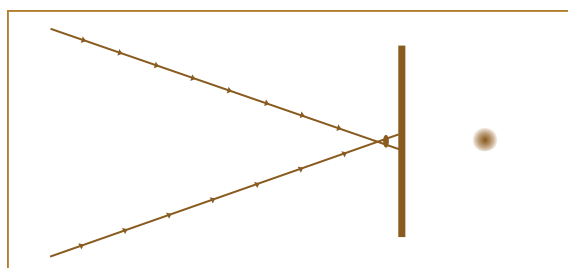
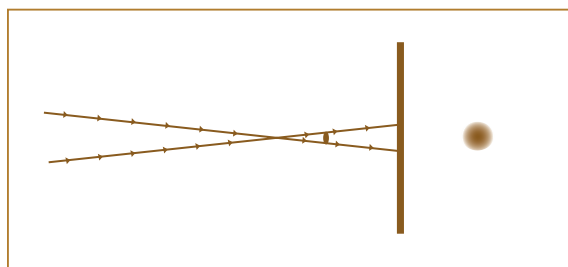
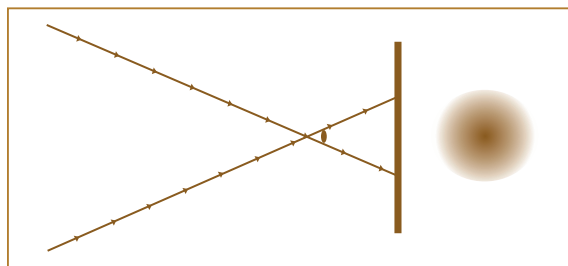
Un autre cas classique de vignetage est dû aux filtres placés devant l'appareil. Par exemple, un filtre dont la monture est en diamètre 31,75 mm (1,25 pouces) présente une ouverture optique d'environ 26 mm. Il est évident qu'avec un capteur de 44 mm de diagonale (cas du 24 x 36), il y aura vignetage. Dans ce cas, il faudra utiliser un filtre plus grand, en monture 50,8 mm (ou 2 pouces).





## Les poussières

Les ombres visibles sur une image numérique sont issues de poussières proches du capteur, et en premier lieu de celles qui se sont déposées à sa surface. En effet, on démontre facilement que la taille de l'ombre d'une petite poussière située à la distance  $d$  du capteur est égale à  $d/(F/D)$ . C'est ainsi que pour un rapport  $F/D$  de 10, une poussière située à 5 mm du capteur s'accompagne d'une ombre de 0,5 mm de diamètre, bien visible, alors que si cette poussière était située à 50 mm du capteur, son ombre aurait une taille de 5 mm et serait invisible sur une image webcam, étant plus grande que le capteur lui-même ! Autrement dit, ne vous préoccupez pas des poussières qui se trouvent loin du capteur, en particulier celles situées sur les miroirs de votre télescope ou les lentilles de votre lunette : elles ne provoquent aucun effet visible sur l'image.



Un petit rapport  $F/D$  (en haut) provoque des ombres de poussières plus larges et plus diluées qu'un grand rapport  $F/D$  (au centre). Mais la distance de la poussière au capteur influe également : plus elle en est proche, plus l'ombre est petite et marquée (en bas).

Le premier moyen d'éviter les poussières est préventif, il consiste à les empêcher de se déposer sur le capteur. Lorsque vous changez d'objectif sur votre appareil reflex, faites-le rapidement et si possible dans un lieu contenant peu de poussières, en lui gardant la tête en bas. Certains appareils reflex possèdent un système intégré d'élimination des poussières par vibration du capteur à haute fréquence, ce qui est l'idéal. À l'extrémité de l'adaptateur de votre webcam, vous pouvez visser un filtre dit « clair », constitué d'une petite lame de verre transparent qui jouera le rôle de hublot, comme sur une caméra CCD, en empêchant les poussières d'atteindre le capteur.

Le second moyen est correctif, il consiste à nettoyer le capteur. Les revues de photographie publient régulièrement des articles sur les diverses méthodes de nettoyage. Mais même après nettoyage, il est

difficile d'obtenir un capteur propre à 100 %. Si quelques rares poussières subsistent, ne vous acharnez pas, elles seront corrigées par une bonne PLU.

Le moyen le plus simple de vérifier la présence de poussières sur le capteur est de réaliser une image de PLU au plus grand rapport  $F/D$  possible : les ombres apparaîtront alors petites et très marquées. Avec un APN, il suffit de régler l'objectif à la plus petite ouverture ( $F/16$  ou  $F/32$ ) et de viser un mur ou le ciel. Avec une caméra CCD ou une webcam, vous pouvez utiliser un tube long et étroit, placé à l'avant de l'appareil.

## A5 - Contrôler et régler sa monture équatoriale

### Mesurer son erreur périodique

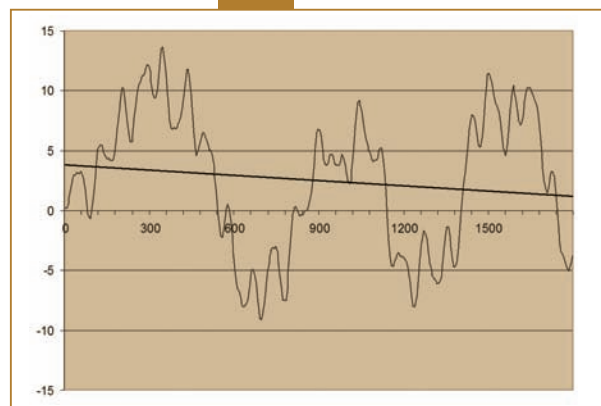
La mesure de l'erreur périodique est un bon moyen de s'assurer de la qualité réelle du suivi d'une monture. Ce contrôle s'effectue après une mise en station soignée, par surveillance des dérives d'une étoile située près de l'intersection entre l'équateur céleste et le méridien. Seuls les mouvements de l'étoile en ascension droite sont à prendre en considération, de préférence pendant plusieurs tours de la vis tangente (aussi appelée « vis sans fin »), pour repérer les périodicités. La mesure peut s'effectuer de deux façons, à l'aide :

- d'un oculaire avec réticule gradué dont un des axes est parallèle à l'ascension droite ; pour étalonner son échelle, positionnez l'étoile à une extrémité de l'axe, coupez la motorisation et chronométrez le temps mis pour parcourir un certain nombre de graduations ; sachant que son déplacement est de  $15''/s$ , il est facile de déterminer l'échelle (par exemple, si l'étoile a mis 6 s pour parcourir 60 graduations, cela signifie qu'une graduation représente  $1,5''$  sur le ciel). Le grossissement doit être suffisant pour apprécier facilement la seconde d'arc : au besoin, ajoutez une lentille de Barlow ;
- d'une webcam : une acquisition d'une série d'images de l'étoile est effectuée de manière périodique, à intervalles de quelques secondes, et un graphique des dérives en fonction du temps est tracé. Les axes de la webcam doivent être orientés selon ceux de la monture. Le logiciel gratuit PEAS (Periodic Error Analyzing Software, disponible à l'adresse [http://web.telecom.cz/elektrometal/peas\\_f.htm](http://web.telecom.cz/elektrometal/peas_f.htm)), utilisé en conjonction avec un logiciel d'acquisition comme Iris ou Astroart, sait tracer et analyser la courbe d'erreur périodique. À défaut, on effectuera le traitement suivant sur le lot d'images ainsi prises :

*Ce graphique d'erreur périodique a été réalisé dans Excel à partir des positions d'une étoile mesurées par le logiciel Iris sur une série d'images webcam couvrant une durée de 30 minutes. L'abscisse est graduée en secondes de temps, l'ordonnée en secondes d'arc. La période de rotation de la vis tangente de cette monture peut facilement être déduite du graphique, elle est de 10 minutes. La droite noire est une courbe de tendance linéaire ; son inclinaison par rapport à l'horizontale est le signe d'une vitesse de suivi un peu différente de la vitesse sidérale ou, tout simplement, d'un léger défaut de mise en station.*

- un recalage des images par rapport à la première de la série, en utilisant un logiciel astronomique tel Iris qui mémorise dans un fichier texte les valeurs (en pixels) des décalages en  $x$  et en  $y$  ;

- la copie de ces valeurs dans une feuille Microsoft Excel et la création d'un graphique à partir de ces données, en représentant la dérive en ascension droite en fonction du temps. Pour pouvoir étalonner les échelles, il faut connaître l'intervalle de temps entre deux images successives et la valeur de l'échantillonnage (chapitre 4).



Faire doucement osciller la monture en ascension droite permet de s'assurer qu'un très léger jeu entre la vis tangente et la roue dentée est perceptible.



## Régler sa monture

Le réglage d'une monture équatoriale est simple mais essentiel si l'on veut en tirer de bons résultats photographiques, que ce soit avec ou sans PEC et avec ou sans autoguidage. Le principal réglage se situe dans le mouvement d'ascension droite, entre la vis tangente et la roue dentée : comme pour tout ensemble d'engrenages, il doit impérativement subsister un peu de jeu entre ces deux éléments. Pour le contrôler, faites osciller la monture axes serrés (sans forcer !) autour de l'axe polaire, en tenant d'une main les contrepoids et de l'autre le tube optique s'il s'agit d'une monture allemande, ou en saisissant les bras sur une monture à fourche. Le jeu peut être aussi minime que l'on veut, mais il doit rester perceptible. Si vous ne percevez absolument rien, c'est que la vis tangente est peut-être trop serrée sur la roue dentée, et vous risquez alors de subir les désagréments suivants :

- le moteur peine et peut même tomber en panne s'il n'est pas suffisamment puissant ;
- les pièces mécaniques sont soumises à une usure prématurée ;
- des vibrations se transmettent du moteur au tube optique et peuvent dégrader la netteté de l'image ;
- le suivi devient irrégulier et l'erreur périodique est augmentée.

Le réglage s'effectue par tâtonnements successifs : desserrage des vis de blocage de la vis tangente, positionnement de cette vis, serrage des vis de blocage et contrôle du jeu. Attention : si la température baisse, le jeu diminue et peut même disparaître, il est donc conseillé d'effectuer ce réglage en extérieur. Lorsque j'ai réglé la position de la vis sur ma première monture équatoriale, j'ai réduit l'erreur périodique de 30" à 10" environ ! Comme pour la collimation, même si la monture a été réglée à l'usine ou chez le revendeur, elle a pu se dérégler. J'ai constaté à plusieurs reprises, sur une monture que je possède depuis de nombreuses années, une disparition du jeu consécutive à un transport en voiture. À cause de vibrations transmises du moteur de la monture, l'image d'une étoile à fort grossissement (figure d'Airy) était dédoublée : l'instrument perdait plus de la moitié de ses capacités de résolution ! Un simple réglage de la vis tangente a suffi à faire disparaître ce dédoublement.

Si des engrenages sont accessibles, vérifiez qu'il y a un soupçon de jeu entre eux : bloquez-en un avec votre main et imprimez un petit mouvement rotatif à son voisin. Lorsque vous équilibrez votre monture allemande en ascension droite et en déclinaison, introduisez un très léger déséquilibre d'un côté ou de l'autre ; ainsi vous éviterez tout risque d'oscillation liée aux jeux mécaniques. Bien que moins critique, n'hésitez pas à contrôler également le jeu du mécanisme de déclinaison par la même méthode, si vous pouvez y accéder facilement.

Si votre monture dispose de mouvements lents manuels, vérifiez la douceur du mécanisme en réalisant à la main un tour entier en ascension droite. Vous ne devez sentir aucun point dur. S'il s'en produit à chaque tour de la vis tangente, celle-ci doit être désaxée voire légèrement tordue. Si les points durs se produisent dans certaines positions d'ascension droite, votre monture souffre peut-être d'un des défauts suivants :

- la roue dentée est légèrement excentrée par rapport à l'axe polaire : à défaut de pouvoir régler sa position, ajustez le jeu de la vis tangente en conséquence ;

- la roue dentée et la vis tangente manquent de graisse, ce qui arrive parfois sur des montures anciennes : utilisez une bonne graisse restant fluide quelle que soit la température, comme une graisse au Teflon ou au silicone. Si vous pensez que la graisse d'origine n'est pas de bonne qualité, vous pouvez même dégraisser le mécanisme avant application de la nouvelle graisse (attention, les solvants tels que le trichloréthylène dégraisseront très bien mais sont toxiques, et sont donc à manier avec précaution !).



Les vis tangentes sont maintenues en place en leurs extrémités par des butées (également visibles sur les photographies ci-contre en bas sous forme d'un disque métallique percé de petits trous) qui, si elles sont trop serrées, sont susceptibles de provoquer des irrégularités de rotation.

Aux amateurs qui s'étonneraient que les constructeurs de matériel astronomique conçoivent des instruments sur lesquels la vis tangente ou les miroirs puissent avoir besoin d'être réglés par l'utilisateur, on peut répondre qu'il ne choque personne qu'une bicyclette ait besoin pour bien fonctionner, elle aussi, d'être réglée et graissée régulièrement. Certes, un instrument astronomique n'est pas aussi chahuté qu'une bicyclette, mais la précision mécanique requise pour le premier n'a rien à voir avec celle de la seconde. Soignez votre monture, elle vous le rendra !

## A6 - Calibrer un capteur et un jeu de filtres RVB

La calibration d'un capteur monochrome et d'un jeu de filtres RVB s'effectue par utilisation d'une étoile de même type spectral que le Soleil (G2). Le tableau suivant liste quelques étoiles G2 réparties sur la voûte céleste. Le principe est le suivant.

1. Prise d'images de l'étoile avec chacun des filtres, de préférence lorsqu'elle est haute dans le ciel (plus de 50°) afin de minimiser l'absorption atmosphérique qui varie selon la couleur. Le temps de pose doit être exactement le même entre les différentes images. L'étoile doit présenter un bon rapport signal sur bruit, mais elle ne doit surtout pas être saturée. Elle peut être étalée sur plusieurs pixels (c'est même conseillé), et un prétraitement soigné est le seul traitement qui doit être appliqué.
2. Mesure du flux lumineux dans chaque couleur ; cette mesure s'effectue très simplement avec les fonctions de photométrie des logiciels astronomiques.
3. Détermination des coefficients d'équilibrage par simple calcul du rapport des flux par rapport à une des couleurs choisie comme référence.



Ces montures disposent d'un réglage apparent de position de vis tangente, c'est l'idéal ! Pour d'autres montures, le mécanisme est interne mais le réglage peut se faire en modifiant légèrement la position du carter renfermant la vis tangente ou en ouvrant ce carter.





Par exemple, si les flux mesurés en rouge, vert et bleu sont respectivement 12 000, 16 000 et 10 000, les coefficients RVB à appliquer sont 1/0,75/1,2 par rapport au rouge. L'équilibrage d'une image de ciel profond se fera ensuite en appliquant ces coefficients multiplicateurs sur chacune des couches.

Quelques étoiles de type spectral solaire.

Étoile	Constellation	–	–	Magnitude
SAO 53622	Andromède	0 h 04 min 53 s	34° 39' 33"	6,2
SAO 37434	Andromède	1 h 41 min 47 s	42° 36' 49"	5,0
SAO 171711	Grand Chien	6 h 24 min 44 s	-28° 46' 48"	6,4
SAO 81968	Grande Ourse	11 h 44 min 44 s	28° 40' 13"	7,0
SAO 120424	Vierge	14 h 23 min 15 s	1° 14' 30"	6,3
SAO 85952	Hercule	18 h 20 min 49 s	27° 31' 47"	7,0
SAO 104394	Aigle	19 h 02 min 38 s	14° 34' 02"	6,9

## A7 - Réaliser un chapelet d'éclipse

Les chapelets classiques se composent d'un disque (lunaire ou solaire) central correspondant à l'instant du maximum de l'éclipse totale ou partielle, encadré par des disques en nombre égal avant et après le maximum. Le tout est placé dans une vue du paysage du lieu d'observation de l'éclipse. La trajectoire de l'astre et l'échelle de l'image sont réalistes : chaque disque est situé à une position et dans une orientation correspondant à la situation réelle de l'astre dans le ciel du lieu d'observation. De plus, le diamètre des disques et leur écartement mutuel sont angulairement cohérents. Bien sûr, l'astrophotographe est libre de réaliser un chapelet selon une composition moins réaliste : échelles différentes, disposition en ligne droite, en cercle ou en spirale, etc. Dans tous les cas, il pourra utiliser la méthode d'assemblage décrite plus bas.

### Préparer la prise de vue

La réalisation d'un chapelet régulier est identique quelle que soit l'éclipse : solaire ou lunaire, totale ou partielle. Elle commence par une prévision soignée des instants de prise de vue. Pour ce faire, le point de départ est l'heure correspondant au maximum de l'éclipse. On calculera les deux intervalles de temps séparant ce maximum des instants de début et de fin de l'éclipse (aussi appelés, dans les éphémérides, premier et dernier contacts). Attention, ces intervalles de temps sont généralement voisins mais pas identiques ! Puis on divisera chacun d'eux par le nombre de disques que l'on souhaite insérer dans l'image finale avant et après le maximum, pour obtenir les deux périodes de base des prises de vue.

Par exemple, soit une éclipse commençant à 9 h 02 min et finissant à 11 h 44 min, avec un maximum à 10 h 20 min. Les deux intervalles de temps sont respectivement 78 min et 84 min. Si l'on souhaite réaliser un chapelet comportant 6 disques avant le maximum et 6 disques après, les deux périodes seront respectivement 13 min et 14 min. Les heures de prise de vue seront finalement :

- avant le maximum (période de 13 min) : 9 h 02 min, 9 h 15 min, 9 h 28 min, 9 h 41 min, 9 h 54 min, 10 h 07 min ;
- maximum : 10 h 20 min ;
- après le maximum (période de 14 min) : 10 h 34 min, 10 h 48 min, 11 h 02 min, 11 h 16 min, 11 h 30 min, 11 h 44 min.

Il arrive fréquemment que le début ou la fin de l'éclipse ne soit pas visible depuis le lieu d'observation, car l'astre est déjà couché ou pas encore levé à cet instant. Les nombres de disques avant et après le maximum pourront alors être différents et la période sera, par exemple, celle calculée pour la moitié entièrement visible de l'éclipse.

Si le maximum n'est pas visible (premier contact ayant lieu peu avant le coucher de l'astre, ou dernier contact ayant lieu peu après son lever), la période sera simplement calculée en divisant la durée de visibilité de l'éclipse par le nombre de vues souhaité.

Lors de la prise de vue, il est préférable de s'aider d'un chronomètre réglé pour sonner à intervalles prédéterminés : dans l'effervescence accompagnant une éclipse, il est facile de laisser passer un des instants de prise de vue ! Le placement du disque lunaire ou solaire dans chaque image n'a pas d'importance puisqu'il sera de toute manière remplacé à l'endroit voulu lors du traitement. Cependant, le plus sûr est de le centrer approximativement lors de chaque prise de vue, afin d'éviter d'éventuels problèmes de vignetage ou de dégradation de netteté de l'image dans les angles.

### Assembler les images

Les calculs de positionnement des disques dans l'image du chapelet sont très simples. Pour les réaliser, on s'aidera des coordonnées horizontales (hauteur  $h$  sur l'horizon et azimut  $A$ ) de l'astre éclipsé pour chacun des instants de prise de vue, fournies par tout bon logiciel de type « planétarium ». Si  $\Delta h$  et  $\Delta A$  sont respectivement la différence de hauteur et la différence d'azimut de l'astre entre deux instants de prise de vue (en degrés), les écarts en pixels (respectivement horizontalement et verticalement) entre les centres de ces deux disques sur l'image doivent être :

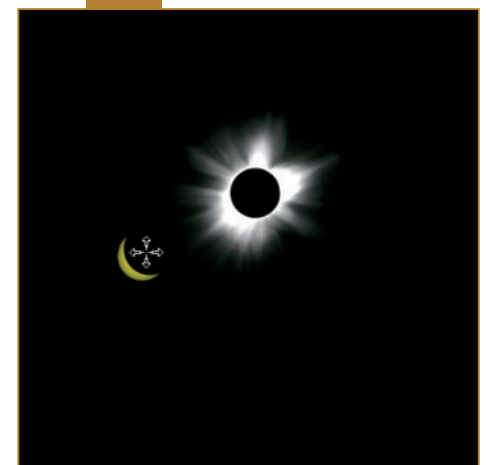
$$\Delta x = 1,9.D.\Delta A.\cos h,$$

$$\Delta y = 1,9.D.\Delta h,$$

D étant le diamètre en pixels du disque lunaire ou solaire sur les images.

L'élaboration du chapelet s'effectue de manière itérative. L'image de départ peut être une simple image entièrement noire créée dans le logiciel de retouche (commande Nouveau, menu Fichier) ou une photographie du paysage prise un peu avant ou après l'éclipse et rééchantillonnée à la dimension adéquate. Chaque image contenant un disque à placer sera ouverte dans le logiciel, copiée/collée comme nouveau calque sur l'image de travail, puis déplacée à la souris pour positionner le centre du disque à l'emplacement calculé à l'aide des formules ci-dessus, en s'aidant des coordonnées de position du cur-

*La confection du chapelet débute par collage de l'image correspondant à l'instant du maximum de l'éclipse sur l'image de départ (photographie du paysage ou image noire vierge) en tant que nouveau calque et placée à l'endroit voulu à l'aide de la souris (à gauche). Chaque image devant faire partie du chapelet subit ensuite la même opération (à droite).*



seur indiquées par le logiciel. Les deux calques seront ensuite fusionnés et l'image suivante subira la même opération. Il est plus simple de commencer par placer le disque central du chapelet et de placer ensuite tous les autres disques par rapport à lui.

### L'orientation des disques en équatorial

Reste la question de l'orientation des disques. Lorsque les photographies ont été obtenues avec un appareil sur trépied ou sur monture altazimutale (voir les chapitres 5 ou 7 pour la signification de ce terme), les disques sont naturellement bien orientés et aucune transformation n'est à effectuer. Un chapelet est donc plus facile à réaliser à partir d'images prises en azimutal. Par contre, si une monture équatoriale a été utilisée, il faudra faire subir à chacun des disques, avant leur assemblage, une rotation sur lui-même afin de le ramener dans une orientation similaire à celle qui aurait été obtenue avec une monture altazimutale. Concrètement, il faudra faire tourner chaque image de l'angle parallactique correspondant à l'instant de prise de vue. La formule suivante permet de calculer cet angle ( $q$ ), elle est tirée du livre *Astronomical Algorithms* de Jean Meeus :

$$\tan q = \frac{\sin H}{\tan \Phi \cos \delta - \sin \delta \cos H} ,$$

avec :

$\Phi$  : latitude du lieu d'observation

$\delta$  : déclinaison de l'astre

$H$  : angle horaire. Il se calcule comme suit :

$$H = \theta_0 - L - \alpha ,$$

avec :

$\theta_0$  : heure sidérale

$L$  : longitude du lieu (positive vers l'ouest, négative vers l'est)

$\alpha$  : ascension droite de l'astre

Toutes ces informations doivent être exprimées dans la même unité (degrés) avant d'être combinées. Si l'angle  $q$  trouvé est négatif, il faut faire tourner le disque dans le sens contraire des aiguilles d'une montre ; s'il est positif, il faut le faire tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette méthode suppose que l'appareil a été orienté selon les directions équatoriales, c'est-à-dire que le grand côté du capteur est parallèle à l'ascension droite.

### Un chapelet d'éclipse lunaire par rapport à l'ombre de la Terre

Une autre manière de réaliser un chapelet d'éclipse de Lune est de placer les disques en considérant que, dans l'image finale, ce n'est plus le paysage qui doit être fixe mais l'ombre terrestre au travers de laquelle vient glisser la Lune durant l'éclipse. L'image de couverture de ce livre a été réalisée de cette manière. La photographie de la phase totale a nécessité un temps de pose 2 000 fois plus long que les phases partielles, soit 4 s contre 1/500 s. L'appareil utilisé était un APN à objectif fixe en montage afocal sur un télescope de 180 mm de diamètre.

Cette fois, il faut travailler en coordonnées équatoriales et non plus horizontales. Bien sûr, cette ombre (invisible sur les photographies, si ce n'est indirectement lorsqu'elle masque une partie de la Lune) suit la rotation de la voûte céleste, elle se déplace même par rapport aux étoiles puisque la Terre a légèrement tourné autour du Soleil pendant la durée de l'éclipse. Les coordonnées équatoriales du centre de l'ombre sont très faciles à obtenir si l'on réalise qu'elle est située à l'exact opposé du Soleil :  $\alpha_s$  et  $\delta_s$  étant respectivement l'ascension droite et la déclinaison du Soleil, le centre de l'ombre a pour coordonnées équatoriales :

$$\alpha_0 = \alpha_s \pm 180^\circ ,$$

$$\delta_0 = -\delta_s .$$

On calculera ensuite, pour chaque instant de prise de vue, les écarts de coordonnées équatoriales  $\Delta\alpha$  et  $\Delta\delta$  (en degrés) entre chaque disque et le centre de l'ombre terrestre. Ce qui donnera finalement

les écarts de position en pixels sur l'image finale, par une formule similaire à celle donnée plus haut :

$$\Delta x = 1,9.D.\Delta\alpha ,$$

$$\Delta y = 1,9.D.\Delta\delta .$$

Ici, la correction de l'angle parallactique ne doit pas être effectuée : ce type de chapelet est plus facile à construire à partir d'images réalisées sur monture équatoriale. Avec une monture azimutale, il faudra, avant leur assemblage, faire tourner chaque disque de l'angle  $-q$ ,  $q$  étant l'angle parallactique calculé selon la formule donnée plus haut.

## A8 - Optimiser les paramètres d'un APN

### Réglage de sensibilité optimal en ciel profond

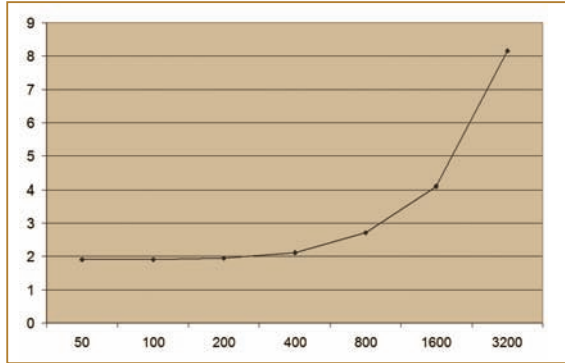
En photographie planétaire, lunaire et solaire, le réglage de sensibilité le plus bas (100 ISO en général) est celui qui procure le meilleur rapport signal sur bruit car il autorise un temps de pose plus long permettant de recueillir plus de signal.

Sur les astres peu lumineux du ciel profond, l'expérience montre que, à temps de pose égal, différents réglages de sensibilité (ISO) procurent des résultats peu ou pas différents en termes de rapport signal sur bruit. Ce qui ne doit pas nous étonner si nous nous souvenons que ce réglage ne modifie pas la sensibilité intrinsèque du capteur mais joue simplement sur l'amplification de l'information provenant de celui-ci. Nous pouvons en déduire (voir chapitre 3) que le signal de photons et le bruit associé sont amplifiés de la même manière : le réglage de sensibilité n'a donc aucune influence sur leur rapport. Il en va de même pour le signal thermique et le bruit associé. La seule composante de l'image sur laquelle le réglage de sensibilité peut avoir une influence est le bruit de lecture. Sur les appareils électriquement bien conçus, ce bruit n'est pas amplifié proportionnellement au réglage de sensibilité, tout au moins pour certaines valeurs. La règle de détermination du réglage optimal s'en déduit simplement : il correspond à la situation où le bruit de lecture devient proportionnel au réglage ISO car, à ce moment-là, il n'y a plus aucun intérêt à passer à une valeur supérieure. La méthode est la suivante.

1. Une série d'images RAW de durée la plus courte possible (par exemple 1/4 000 s) est réalisée à des réglages de sensibilité croissants, capteur non éclairé.
2. Ces images RAW sont décodées dans un logiciel astronomique et le bruit de lecture est mesuré dans une petite zone d'une centaine de pixels de côté.
3. Le réglage optimal est obtenu en repérant la dernière sensibilité pour laquelle le bruit de lecture n'est pas amplifié proportionnellement au réglage.

Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'en aucune manière un réglage optimal à 400 ISO ne permet d'obtenir une qualité d'image équivalente à 100 ISO avec un temps de pose quatre fois plus court, malheureusement ! Au mieux, le gain est minime. Dans de nombreuses situations, en particulier lorsque le fond de ciel est relativement lumineux, le gain est nul car le bruit de photons prend le dessus sur le bruit de lecture. Dans cette situation, il est même préférable de se cantonner à un réglage plus bas afin que ce fond de ciel n'occupe pas une part trop importante de la dynamique disponible.





Ce graphique réalisé pour un reflex Canon 5D montre que le bruit à 800 ISO est notablement inférieur au double de celui à 400 ISO (respectivement 2,7 et 2,1), alors qu'à 1 600 ISO il est voisin du double de celui à 800 ISO (respectivement 4,1 et 2,7). Le réglage optimal est donc proche de 800 ISO : monter à 1 600 ou 3 200 ISO n'amène plus guère que des inconvénients (en particulier : pixels chauds saturés plus nombreux et dynamique d'image réduite).

## Coefficients de balance des couleurs applicables à une image RAW

Lorsqu'une image RAW est décodée par un logiciel grand public, ce dernier connaît les coefficients à appliquer à chaque couche RVB afin d'aboutir à un équilibre des couleurs conforme au réglage de balance des couleurs désiré. Mais lorsqu'une telle image est ouverte dans un logiciel astronomique tel que Iris ou Prism, aucune correction n'est appliquée et l'image présente une dominante colorée normale, généralement verte.

Chaque modèle d'APN possède ses propres coefficients. Si d'autres amateurs ne les ont pas déjà déterminés pour le vôtre, voici comment procéder.

1. Photographiez une feuille de papier blanc directement exposée au Soleil, appareil réglé sur « lumière du Soleil », en JPEG puis en RAW.
2. Examinez les valeurs RVB sur quelques pixels de l'image JPEG avec un logiciel de retouche afin de vous assurer que l'image est bien grise et ne présente pas de dominante colorée.
3. Ouvrez l'image RAW dans le logiciel astronomique et soustrayez-lui une image d'offset que vous aurez réalisée au préalable (voir chapitre 3).
4. Déterminez les coefficients de balance des couleurs à partir du rapport des intensités entre les trois couches RVB de l'image RAW ; par exemple, si ces trois couches présentent des intensités moyennes respectives de 1 000, 1 500 et 1 200, leurs coefficients valent 1,5, 1 et 1,25 (une fois appliqués à leur couche respective, ils ramèneront bien leur intensité moyenne à la valeur commune de 1 500).

## A9 - Traduction de quelques termes techniques

Voici les traductions de quelques termes très utilisés dans les logiciels d'acquisition et de traitement. Les termes dont la traduction est identique ou très proche ne sont pas indiqués (ex : format, angle, astigmatisme).

Français	Anglais
animation	animation/movie
aplanisseur de champ	field flattener
APN reflex	digital single lens reflex (DSLR)
boîte à lumière	light box
bruit	noise
capteur	sensor
champ	field
ciel profond	deep sky
cliché	shot
comparateur à cadran	dial gauge
compositage	combination
condensation/buée	dew
courbure de champ	field curvature
dérive	drift
échantillonnage	sampling
filtre à bande étroite	narrow band filter
filtre à large bande	large band filter
filtre anti-infrarouge	infrared blocking filter (IRB)
fond de ciel	sky background
foyer	focus
guidage	guiding
image brute	raw image
largeur à mi-hauteur	FWHM (full width half maximum)
luminosité	brightness
lunette	refractor (telescope)
masque flou	unsharp mask
médiane	median sum
montage parallèle	piggy-back
monture	mount
netteté	sharpness
noir	dark
noir, blanc	black, white
numérique	digital
objectif	lens
obturateur	shutter
ondelette	wavelet
pixel chaud	hot pixel
PLU	flat/flat-field
pose	exposure
rapport F/D	focal ratio
rapport signal sur bruit (RSB)	signal to noise ratio (SNR)
recalage/recentrage	registration
réducteur de focale	focal reducer
rendement quantique	quantum efficiency
réticule	cross-hair/reticle
roue à filtres	filter wheel
rouge, vert, bleu (RVB)	red, green, blue (RGB)
sensibilité	sensitivity
suivi	tracking
système de mise au point	focuser/focusing system
télescope	reflector (telescope)
(pré)traitement	(pre)processing
turbulence	seeing
vignetage	vigneting
viseur polaire	polar finder
vitesse	speed







# Bibliographie

## Photographie numérique

*La pratique du reflex numérique*, R. Bouillot, éditions VM, 2006.

*Cours de photographie numérique : principes, acquisition et stockage*, R. Bouillot, éditions Dunod, 2006.

*Cours de traitement numérique de l'image*, R. Bouillot, éditions Dunod, 2005.

*Apprendre à photographier en numérique*, J.-M. Sepulchre, éditions VM, 2006.

## Astronomie technique

*Arpenter l'Univers*, G. Dodray, éditions Vuibert, 2004.

*Star testing astronomical telescopes*, H.R. Suiter, Willmann-Bell, 1994.

*Telescope optics, evaluation and design*, H. Rutten & M. van Venrooij, Willmann-Bell, 1993.

*Astronomical algorithms*, J. Meeus, Willmann-Bell, 1991.

*Video astronomy*, S. Massey, T. Dobbins & E. Douglass, Sky Publishing, 2000.

*CCD astronomy*, C. Buil, Willmann-Bell, 1991.

*The new CCD astronomy*, R. Wodaski, New Astronomy Press, 2002.

*High resolution astrophotography*, J. Dragesco, Cambridge University Press, 1995.

*Lunettes et télescopes*, A. Danjon et A. Couder, Librairie Scientifique et Technique, 1990.

*Guide du matériel d'observation de l'astronome*, A. Van Der Elst, éditions Vuibert, 2004.

## Éphémérides et phénomènes astronomiques

*Le guide du ciel 2006-2007*, G. Cannat, éditions Nathan (réédition annuelle).

*Guide de données astronomiques 2006*, IMCCE, Edp Sciences (réédition annuelle).

*Le ciel à l'œil nu en 2006*, G. Cannat, éditions Nathan (réédition annuelle).

## Du même auteur

*Le grand Atlas de la Lune*, S. Brunier et T. Legault, éditions Larousse, 2004.







# Index

## A

Adaptateurs photo.....	43-47, 144
Afocal (montage).....	46
Aigrettes .....	52, 98
Airy (figure) .....	49
Alignement polaire .....	102
Amas globulaire .....	111
Amas ouvert.....	111
Animation .....	68, 130
Anti-blooming .....	20
Aplanisseur de champ .....	96
APN .....	2, 24-25, 124
Alimentation .....	9, 25
Autofocus .....	2, 52
Bridge.....	2
Compact.....	2, 24, 35
Noir et blanc (mode).....	63, 87, 123, 143
Réduction de bruit longue pose .....	9, 31
Reflex .....	2, 25
Réglages .....	2, 34, 62, 122
Retardateur .....	2, 25
Sensibilité.....	23, 124, 148
Stabilisateur d'image .....	2
APS-C .....	3, 25
Argentique .....	18
Artefact .....	66
Astéroïde.....	117
Astigmatisme.....	96
Astrographe .....	99
Atmosphère.....	13
Dispersion.....	61
Réfraction .....	106
Transparence .....	118
Turbulence .....	60, 62, 82, 95
Aurore polaire .....	11
Autoguidage .....	24, 108

## B

Barlow (lentille de).....	44
Bayer (matrice).....	22, 142
Bigourdan (méthode).....	105
Binning .....	24, 124, 128
Blooming.....	19
Boîte à lumière .....	33
Bruit .....	35
Lecture .....	35
Numérique .....	35
Photons .....	35
Réduction sur image unique.....	39
Thermique .....	35

## C

Caméra CCD .....	23, 25, 123, 140
Alimentation.....	23
Liaison ordinateur .....	23

Obturbateur .....	23
Refroidissement .....	23
Régulation de température.....	23, 123
Caméra vidéo .....	26, 140
Canon 20Da .....	25
Capteur .....	
Anti-blooming .....	20, 123
Blooming .....	19
Capacité en électrons .....	20
CCD.....	19, 22, 141
CMOS .....	19, 142
Dimensions .....	19
Interligne .....	141
Lecture .....	141
Linéarité .....	19
Microlentilles .....	19, 21
Monochrome et couleur.....	21, 25, 87, 118, 123, 131
Photosite .....	18, 36, 142
Pleine trame .....	141
Registre horizontal.....	141
Registres de lecture .....	141
Rendement quantique.....	20-21
Repère de position .....	47
Sensibilité spectrale .....	20
Structure .....	18
Transfert de trame.....	142
CCD .....	19, 22
Cercles de coordonnées .....	125
Champ.....	3, 46, 144
Chercheur .....	104, 125
Chromatisme (aberration) .....	57, 81, 96
Chrominance.....	132
Chromosphère.....	83
CMOS .....	19
Coefficients d'équilibrage RVB .....	128, 133, 146, 149
Collimation .....	49, 59, 100
Colorisation des images solaires .....	88
Coma .....	95
Comète .....	8, 116
Comparateur .....	53
Compositage .....	8, 10, 37, 66, 127
Par médiane .....	37
Par sigma-clipping .....	38
Par somme .....	37
Condensation .....	10
Constellations .....	5
Convertisseur analogique-numérique .....	19, 141
Coronographe .....	86
Correcteur de champ .....	96, 98
Courbure de champ .....	96, 98
Couverture de champ.....	95

## D

Dall-Kirkham.....	98
DDP.....	76, 130
Dématriçage.....	34, 142
Diviseur optique .....	107
Dobson .....	59, 101

## E

Échantillonnage.....	46, 63
Éclipse	
Chapelet d'éclipse.....	13, 147
Lune.....	12, 77
Soleil.....	12, 89
Sténopé.....	13
Électroluminescence.....	32
Erreur périodique.....	105, 145
Éruption.....	83
Étoile.....	111
Double.....	112
Guide.....	107
Polaire.....	104
Type solaire.....	146
Étoiles filantes.....	10

## F

Fenêtrage.....	24, 139
Filtre.....	141, 144
Anti-infrarouge.....	58, 121
Anti-pollution.....	121
Bande étroite.....	120, 133
Calcium K.....	86
Décalage de mise au point.....	53
H $\alpha$ .....	85, 120
Interférentiel.....	120
Large bande.....	118, 131
Roue à filtres.....	24, 141
RVB.....	120, 131, 146
Solaire.....	80
Wratten.....	120
Flip-mirror.....	64, 141
Formats d'image.....	137
AVI.....	65, 138
BMP.....	137
CFA.....	138
Compression.....	137
Conversions.....	138
EXIF.....	137
FITS.....	138
GIF.....	137
JPEG.....	34, 87, 137
TIFF.....	137
Foyer (montage).....	43
FWHM.....	52, 126

## G

Galaxie.....	114
Gradient.....	128
Grandissement.....	45
Guidage.....	107, 117
Par diviseur optique.....	107
Parallèle.....	107
Visuel.....	108

## H

Hélioscope.....	81
Hydrogène $\alpha$ (H $\alpha$ ).....	21, 83, 113-114, 119, 134
Hydrogène $\beta$ (H $\beta$ ).....	113-114, 119, 134

## I

Impression.....	27
Infrarouge.....	21-22, 58, 120
Interférométrie.....	57
Interpolation.....	142
Intervallomètre.....	25

## J

JPEG.....	34, 87
Jupiter.....	71

## K

King (méthode).....	105
---------------------	-----

## L

Logiciel	
Acquisition.....	23
Astronomique.....	141
LRVB.....	132
Lumière zodiacale.....	1, 11
Luminance.....	132
Lune.....	4
Croissant.....	4-5, 76
Gros plan.....	74
Lumière cendrée.....	4, 76
Mouvement propre.....	74
Occultation.....	77
Pleine Lune.....	76
Lunette astronomique.....	57

## M

Maksutov-Cassegrain.....	57, 98
Mars.....	71
Masque flou.....	66, 129
Médiane.....	37
Mercure.....	70
Mise au point.....	50-52
Systèmes.....	51
Techniques.....	52
Tolérance.....	50
Monture	
À fourche.....	101
Altazimutale.....	59, 100
Équatoriale.....	59, 100
Fixe.....	59, 100
Réglages.....	145
Mosaïque.....	130

## N

Nébuleuse.....	17, 112
Obscure.....	113
Par émission.....	113
Par réflexion.....	112
Planétaire.....	114
Neptune.....	72
Newton (télescope).....	57, 97
Noir.....	9, 31
Générique.....	31
Normalisation.....	38
Numérisation.....	19





## O

Objectifs photographiques.....	96
Champ .....	3
Diaphragme .....	2, 96
Fish-eye .....	7, 12
Montages particuliers .....	47
Obstruction centrale .....	58
Oculaire .....	
De projection .....	45
Parfocal .....	53
Réticulé .....	104
Offset .....	31
Ondelettes .....	67
Ordinateur .....	25, 27
Oxygène III (OIII).....	113-114, 119, 134

## P

Parallèle (montage).....	42
Peltier (module) .....	23
Petzval .....	96
Photosite .....	18, 36, 142
Photosphère .....	80
Pixel .....	18, 142
Chaud .....	9, 30
Plage de lumière uniforme (PLU) .....	33, 88
Planètes .....	4
Pluton .....	72
Pollution lumineuse .....	6, 118, 120
Pose B .....	2
Poussières .....	32, 145
Pouvoir séparateur .....	56
Prétraitement .....	34, 64, 127
Protubérance .....	84, 88

## Q

Quasar .....	115
--------------	-----

## R

Raies d'émission .....	113
Rapport F/D .....	44, 57, 94
Rapport signal sur bruit .....	35
Rapprochements de planètes .....	4
RAW .....	3, 23, 27, 34, 87, 138, 149
Rayon cosmique .....	38
Recentrage .....	66, 127
Réducteur de focale .....	46
Reflet .....	43
Reflex .....	2, 25, 47, 62, 125
Retrait du filtre .....	122
Vibration .....	62
Rendement quantique .....	20-22
Restauration d'image .....	67, 129
Ritchey-Chrétien .....	98
Rotation de champ .....	59, 100, 109
Rotation et filé d'étoile .....	18

Rotule photographique.....	3
Roue dentée .....	105

## S

Satellites .....	
Artificiels .....	13, 91
Des planètes .....	72
Géostationnaires .....	14
Iridium .....	14
Saturne .....	72
Schmidt-Cassegrain .....	57, 98
Seuils de visualisation .....	130, 139
Shift and add .....	127
Signal .....	35
Thermique .....	9, 30, 122
Stéréo .....	68
Supernova .....	116
Système grandissant .....	44, 63

## T

Table équatoriale.....	101
Tache solaire .....	80
Télécommande .....	3, 25
Traitement .....	
Ajustement des lumières .....	15
Animation .....	68, 130
Correction de gradient .....	128
Correction du fond de ciel .....	15, 128
Cosmétiques .....	15, 130
DDP .....	76, 130
Masque flou .....	66, 128
Ondelettes .....	67
Restauration d'image .....	67, 129
Stéréo .....	68
Surtraitement .....	69, 82
Transit solaire .....	91
Trépied .....	3

## U

Ultraviolet .....	20, 70
Uranus .....	72

## V

Vénus .....	70
Vignelage .....	32, 96, 143
Vis tangente .....	105, 145
Viseur d'angle .....	25
Viseur polaire .....	103
Voie Lactée .....	5

## W

Webcam .....	26, 62, 87, 109
Longue pose .....	27, 122

Conception maquette et mise en pages : Nord compo

Dépôt légal : août 2006  
N° d'éditeur : 7475