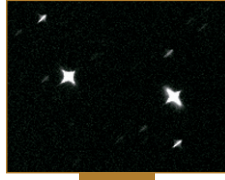


- l'astigmatisme : les étoiles sont déformées (ovalisées ou déformées en une figure complexe comme une croix) ;
- la courbure de champ : l'ensemble des points où l'image est la plus nette n'est pas un plan mais une petite portion de sphère. Lorsque la mise au point est faite au centre du champ, la périphérie 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.

L'astigmatisme déforme les étoiles et peut, selon le cas, leur donner une forme allongée ou en croix.



La courbure de champ

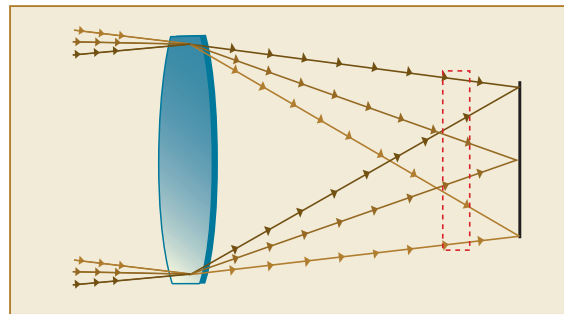
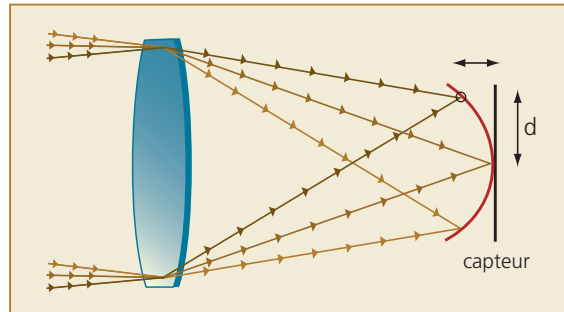
Le paramètre caractérisant la courbure de champ d'un instrument est le rayon R de la sphère supportant les points où l'image est la plus nette. À une distance d de l'axe optique, le décalage de mise au point ε vaut :

$$\varepsilon = \frac{d^2}{2R}$$

ε 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 ε 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 $\varepsilon = 13,5^2 / 1600 = 0,1$ mm. Si ce télescope est à F/D 5, cet écart de mise au point correspond à environ 1λ (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 réhibitoire, 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 de 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.

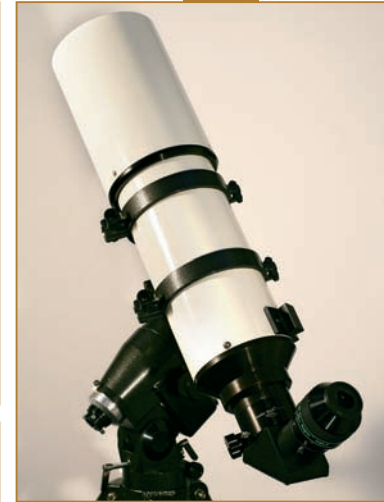
Avec ce type de télescope très ouvert, un correcteur de champ, dont le rôle est en premier lieu d'atténuer la coma, se révèle indispensable. Il existe deux grands types de correcteur pour Newton :

- 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

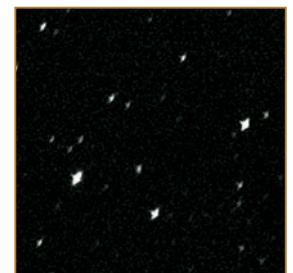
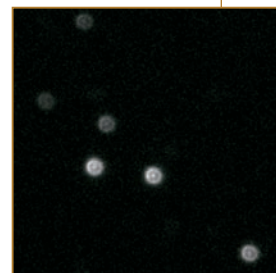
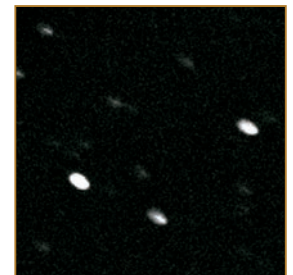
Au vu de ce qui précède, on pourrait penser que le télescope de Newton est particulièrement défavorisé. Mais c'est surtout parce que cet instrument est d'un rapport F/D souvent petit, ce qui accentue



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 télescopes de la famille Cassegrain

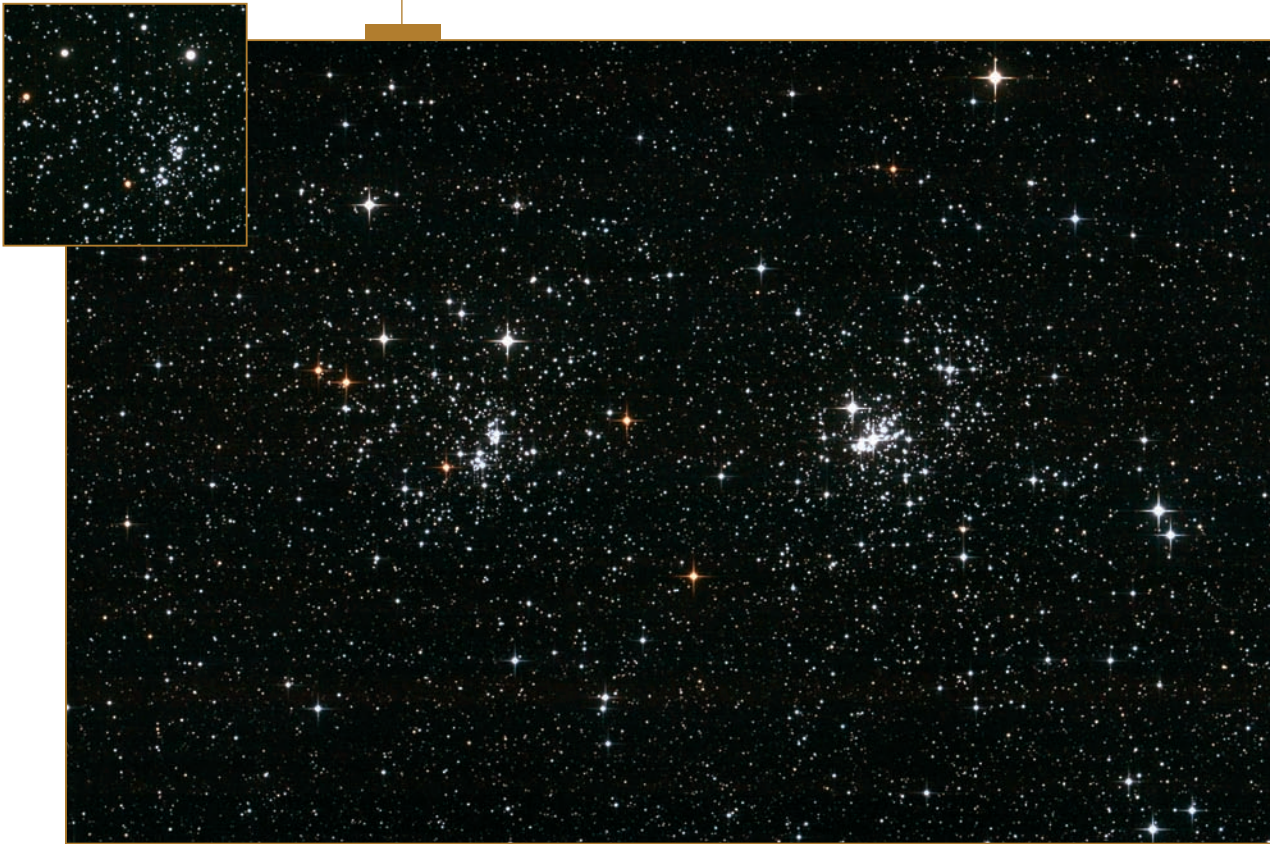
Il existe plusieurs variantes de Cassegrain (télescope à miroir primaire concave et miroir secondaire convexe), chacune présentant des caractéristiques de couverture de champ différentes. Tous les télescopes de cette famille présentent des rapports F/D et des focales relativement élevés.

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.

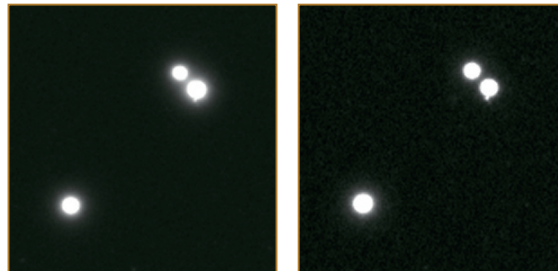
Le Ritchey-Chrétien (RC) est une variante dont les deux miroirs sont hyperboliques, ce qui les rend bien plus difficiles à fabriquer et donc plus coûteux (le télescope spatial Hubble est de ce type). L'avantage de cette formule est l'élimination de la coma, seul un peu d'astigmatisme subsiste ainsi que 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 Mevlon 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.



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 lumineux qu'il faut compenser par un allongement du temps de pose.



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 : NGC7635 (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.