

PHOTOGRAPHIE ASTRONOMIQUE

Deuxième partie

PHOTOGRAPHER LE CIEL PROFOND

JP. Maratrey - 2013

Avec une caméra CCD ou un APN

LA THEORIE

Caméra CCD ou APN ?



Les surfaces sensibles numériques utilisées en astrophotographie du ciel profond sont soit des caméras CCD, soit des APN. Il sera question, parmi les APN, des reflex à objectif interchangeable. Les avantages et inconvénients des deux systèmes sont les suivants (liste non exhaustive) :

- Les caméras CCD sont plus sensibles à la lumière que les APN. La sensibilité d'un capteur, sa propension à détecter la faible lumière des objets du ciel profond, est fonction, entre autres, de la taille des photosites (plus grands dans les caméras CCD) et de son rendement quantique (de 40 à 60% pour une caméra CCD, pas de filtre interposé).
- Contrairement aux APN, les caméras CCD peuvent être facilement refroidies, ce qui réduit le bruit thermique des poses individuelles, permet les poses plus longues.
- La plupart des caméras CCD donnent des images en noir et blanc. Pour passer à la couleur, il est nécessaire de réaliser des poses à travers des filtres colorés, ce qui grossièrement triple les temps de pose. Les APN fournissent directement des images en couleurs au prix d'une interpolation due à la matrice de Bayer (voir plus loin).
- La caméra CCD nécessite un ordinateur portable pour les réglages et l'acquisition des images. On peut plus facilement s'en passer avec un APN (conservation de la vision nocturne).
- Les APN ont généralement une très mauvaise sensibilité dans le rouge, du fait de l'interposition devant le capteur d'un filtre IR peu sélectif (et les nébuleuses sont souvent rouges !).
- Une caméra CCD ne fait que des photos d'astronomie, est extrêmement spécialisée. Un APN sert à tous types de photographies.

L'APN est de type reflex à objectifs interchangeables. Comme dans le cas d'une caméra CCD, l'objectif est l'instrument astronomique : télescope, lunette, voire téléobjectif, et le capteur est positionné au foyer. On peut avantageusement y adjoindre un correcteur de champ afin d'obtenir des étoiles piquées même sur les bords du champ.



Les appareils compacts sont mal adaptés pour la photo du ciel profond, car ils ne permettent pas les poses individuelles longues, ne fournissent pas (ou rarement) de fichiers bruts sans traitement interne. Ils ont une mauvaise sensibilité globale, et génèrent beaucoup de bruit, surtout aux fortes sensibilités.

La seule utilisation possible, avec de piètres résultats, est le montage en digiscopie, c'est-à-dire en photographiant l'objet visé au travers de l'oculaire du télescope ou de la lunette.

A oublier si l'on vise l'astrophotographie de qualité.

Les temps de poses

Photographier des objets du ciel profond, peu lumineux par essence, nécessite des poses longues, et des surfaces sensibles ... très sensibles ! Une heure est une base de travail satisfaisante pour la plupart des objets visibles facilement à l'oculaire d'un 200 mm ouvert à $F/D = 10$. Il est possible d'allonger la pose jusqu'à plusieurs heures sans autre inconvénient que le temps nécessaire à la réalisation et au traitement.

Cette durée de base peut varier d'un objet à l'autre. Plus il sera de faible luminosité apparente, plus la pose sera longue.

De même, si le rapport F/D (l'« ouverture » de l'instrument) est plus grand, la pose s'en trouvera grandement allongée. Si je double le rapport F/D, je multiplie par 4 le temps de pose !

Avec les capteurs numériques, la pose totale peut être fractionnée. Les poses individuelles seront ensuite additionnées grâce à l'informatique, avec plusieurs avantages :

- Le rapport signal/bruit après addition est meilleur que les poses individuelles. L'augmentation du bruit par addition est proportionnelle à la racine carrée du nombre de poses individuelles, alors que les détails du sujet augmentent en proportion directe de ce nombre.
- Le suivi est facilité (poses individuelles plus courtes).
- Les erreurs de mise en station (raisonnables) peuvent être corrigées dans une certaine mesure.

Les poses individuelles doivent permettre de capter suffisamment de lumière pour impressionner le capteur. Pour un total de 1 heure de pose, 3 600 poses de 1 seconde chacune ne conviennent pas.

Encore faut-il que le signal soit présent sur les images ! Qu'il ne soit pas confondu avec du bruit.

Généralement, et en fonction de la luminosité des objets photographiés, les poses individuelles s'échelonnent entre 1 et 5 minutes, voire plus si le suivi est suffisamment bon. La mise en station doit permettre la stabilité en déclinaison durant cette période afin d'éviter la rotation de champs sur les poses unitaires.

Cela dit, des poses bien faites, avec un instrument bien réglé pourront seules donner de bonnes images. L'informatique ne peut restituer visuellement que des signaux captés suffisamment distincts du bruit. Rien n'est inventé. Si la collimation et/ou la mise au point sont mauvaises, si la mise en station est trop approximative, le traitement informatique n'y pourra rien !

Le point capital est donc de réussir de bonnes images brutes.

Les fichiers images

Quelle que soit la solution matérielle retenue, caméra CCD ou APN, il est important de travailler avec des fichiers images bruts, sans aucun traitement interne dans l'APN ou la caméra. Pas de réduction de bruit, pas d'accentuation, pas d'équilibrage des couleurs... qui dénaturent le signal d'origine.

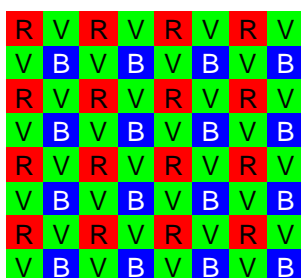
Les fichiers bruts sont accessibles naturellement avec les caméras CCD, mais doivent être programmés dans les APN. Les fichiers bruts sont souvent appelés fichiers « RAW » (brut en anglais), et ont une extension qui varie avec les fabricants (.raw, .crw, .cr2, .nef...).

Une image d'un fichier brut d'APN d'une scène en couleurs est une image noir et blanc contenant les informations issues des photosites filtrés en rouge, vert et bleu (voir chapitre suivant). Cette image en noir et blanc s'appelle une image « CFA » (Color Filter Array, en anglais).

La matrice de Bayer des APN

Dans une caméra CCD, chaque photosite reçoit de la lumière qui est traduite en courant électrique directement proportionnel à la quantité totale de lumière reçue. Le courant électrique est traduit numériquement en « niveaux de gris ». L'image finale est en noir et blanc. Il faut utiliser la trichromie pour rendre leurs couleurs aux objets photographiés.

Il n'en va pas de même avec les APN, qui donnent directement une image en couleurs. L'artifice utilisé est un filtre interposé juste devant le capteur, sur chaque photosite. Le filtre est grosso modo alternativement rouge, vert ou bleu, comme l'indique ce schéma d'une partie d'un capteur :



Chaque carré de 4 photosites contient un filtre rouge, un bleu et deux verts (le vert est la couleur la mieux perçue par l'œil).

Cette mosaïque de filtres s'appelle la « Matrice de Bayer ». L'image qui en est issue (image CFA) est en noir et blanc, contenant les niveaux respectifs de rouge, vert et bleu.

Chaque pixel de l'image finale renferme donc un niveau d'éclairement (N&B) correspondant à la couleur de son filtre.

L'opération qui consiste à former une image couleur à partir de l'image noir et blanc issue de la matrice de Bayer s'appelle « DERAFTISATION » (affreux anglicisme se prononçant « dérôatisation »).

Elle s'effectue en trois phases :

- Le « développement » consiste à restituer par interpolation les niveaux de chaque couleur (obtention, à partir de l'image CFA, de 3 images représentant respectivement les niveaux R, V et B).
- L'addition des différentes couches colorées, donnant une image en couleurs à forte dominante verte.
- La balance des couleurs rétablit les bonnes couleurs de la scène d'origine.

L'image est divisée en quatre couches (R, B et deux V). Les valeurs de niveaux de couleurs inconnus, sont calculées lors du développement. Par exemple, les valeurs de rouge d'un pixel filtré vert sont calculées par interpolation entre les pixels rouges adjacents. Les 4 couches R, B et les deux V d'un même photosite sont ensuite additionnées pour donner l'image couleur qui va pouvoir subir d'autres traitements.

Un logiciel spécialisé comme IRIS travaille sur les images CFA, du moins dans la première partie du prétraitement.

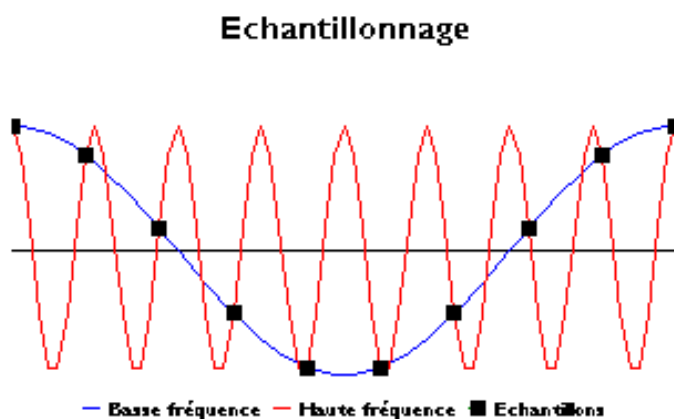
Une dernière remarque. Les capteurs numériques sont sensibles dans l'infrarouge. Sur un APN, et afin de restituer au mieux les scènes de la vie courante (l'œil ne voit pas l'infrarouge) un filtre IR supplémentaire est placé devant le capteur. Malheureusement, ce filtre n'est pas très sélectif et filtre aussi l'extrémité rouge du spectre. La conséquence est une très faible sensibilité aux rayonnements de l'hydrogène composant majoritairement les nébuleuses (raie $H\alpha$).

La faible sensibilité dans le rouge, ainsi que le nombre plus important de pixels filtrés verts, font que l'image traitée a une forte dominante verte qui est corrigée par le traitement ultérieur (la balance des blanc).

Echantillonnage

L'échantillonnage sert à convertir un signal analogique périodique, en un signal numérique représentatif, le plus proche possible de la réalité analogique. Cet échantillonnage est réalisé en « prélevant », en « échantillonnant » des valeurs du signal initial pour le reproduire. Si les prélèvements sont trop espacés dans le temps, le signal sera mal reproduit.

Dans l'exemple qui suit, l'échantillonnage (en bleu) ne reproduit pas la courbe d'origine (en rouge) :



Harry Nyquist et Claude Shannon ont démontré que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égal ou supérieur à deux fois la fréquence maximale contenue dans le signal d'origine. C'est l'« échantillonnage de Nyquist ».

Comme illustration, citons la reproduction numérique de la musique (signal d'origine analogique). L'oreille humaine perçoit des sons jusqu'à la fréquence de 20 000 hertz (20 000 oscillations par seconde). Pour convertir ce signal de 20 kHz en un signal numérique de qualité suffisante, il faut prélever un échantillon à une fréquence double, soit 40 kHz ou plus, c'est-à-dire à au moins 40 000 échantillons par seconde.

En astrophotographie, l'échantillonnage d'une image représente la portion angulaire du ciel vue par un photosite, et rendue par un pixel. Il s'exprime en seconde d'arc par pixels ("/pix) et doit être au moins le double de la fréquence spatiale maximale, c'est-à-dire des plus petits détails discernables.

On calcule aisément l'échantillonnage d'un système instrument/capteur par la formule :

$$E = 206 P/f$$

E est l'échantillonnage en seconde d'arc par pixel

P est la taille des photosites en microns (μ)

f est la focale résultante de l'optique en mm.

Exemple : L'échantillonnage d'un système composé d'un C8 et d'un APN Canon 350D ($f = 2\,000$ mm et $P = 6,4\mu$) est de $206 \times 6,4 / 2\,000 = 0,66$ "/pix.

On voit que la résolution n'est fonction que de la taille d'un pixel et de la focale de l'instrument à l'exclusion de tout autre paramètre.

Connaissant l'échantillonnage, il est facile de calculer le champ photographique du capteur en multipliant E par le nombre de pixels en largeur et en longueur.

Quelle valeur d'échantillonnage utiliser ?

Celle de Nyquist évidemment comme base de travail. En appliquant à l'astrophotographie le théorème de Nyquist, on trouve que l'échantillonnage optimal est :

$$E_n = 0,206\lambda/2D$$

E_n est l'échantillonnage de Nyquist en seconde d'arc par pixel

λ est la longueur d'onde de la lumière observée en nm

D est le diamètre de l'instrument, en mm

Exemple pour le montage précédent, et pour la raie $H\alpha$: $E_n = 0,206 \times 656,28 / 2 / 200 = 0,34$ "/pix

Plus pratique est l'utilisation du rapport F/D de Nyquist qui s'écrit :

$$F/D_n = 2000P/\lambda$$

F/D_n est le rapport F/D optimal

P est la taille d'un photosite en μ

λ est la longueur d'onde observée en nm

Par exemple, photographier une nébuleuse émettant majoritairement en $H\alpha$ avec le même APN (pixels de $6,4\mu$ et capteur de $3\,456 \times 2\,304$ photosites) :

$$F/D_n = 2 \times 6,4 / 0,656 = 19,5 \text{ (environ 20)}$$

Si l'instrument est le C8 à $2\,000$ mm de focale et un diamètre de 200 mm :

$$E = 206 \times 6,4 / 2\,000 = 0,66 \text{ "/pix avec un champ photographique de } 38 \times 25 \text{ '}$$

$$E_n = 656 \cdot 10^{-9} / 0,4 = 0,0000016 \text{ rd/pix} = 0,34 \text{ "/pix}$$

On voit que le télescope peut accueillir une Barlow x2. La qualité de l'image sera améliorée. Pousser encore le rapport F/D introduit des inconvénients souvent rédhibitoires comme l'allongement des temps de pose, la difficulté du suivi, le rétrécissement du champ... sans gagner en résolution.

Ne pas oublier que la turbulence peut dépasser la seconde d'arc facilement, et que la prise de vue ci-dessus sera brouillée par l'atmosphère.

Ces conditions conviennent au planétaire avec un bon ciel, mais est peu adapté au ciel profond qui demande des grands champs et se satisfait d'échantillonnages plus importants, du fait de la turbulence.

L'expérience montre qu'un échantillonnage de 1 à 3 "/pix est un compromis qui convient parfaitement au ciel profond.

On peut alors calculer la focale donnant un échantillonnage de 1"/pix (bonne turbulence) :

$$f = 206 \times 6,4 / 1 = 1\,318 \text{ mm}$$

Dans le cas du C8, le réducteur 0,63 convient parfaitement avec une focale résultante de 1 260 mm. Le champ photographié est alors de 3456 x 2304", soit 58' x 38'.

Descendre en dessous de 1"/pix introduit les inconvénients du sur-échantillonnage cités plus haut : empâtement des images (fait apparaître la turbulence), réduction du champ, allongement des temps de pose, difficulté du suivi...

D'après la formule donnant la valeur de l'échantillonnage ($E = 206P/f$), E augmente quand f diminue. Les petits instruments, de courte focale, à capteur égal, ont une valeur d'échantillonnage plus grande.

Le tableau suivant donne une idée de l'échantillonnage de deux instruments de taille différente, ainsi que l'échantillonnage d'une émulsion grain fin en argentique, pour comparaison.

	C8	ED80
Diamètre	200 mm	80 mm
Focale	2 000 mm	600 mm
Echantillonnage (EOS 350D)	0,66 "/pix	2,2"/pix
Emulsion (grain de 15μ)	1,54 "/pix	5,15 "/pix

Cela veut dire que les petits instruments, ayant par ailleurs une résolution théorique moindre, ne verront pas une turbulence en dessous de leur seuil d'échantillonnage.

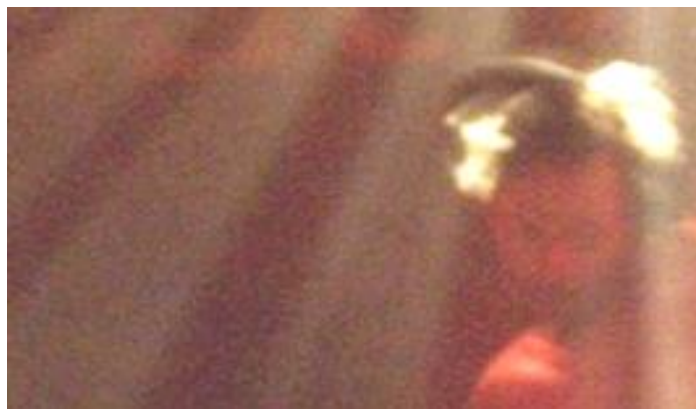
Le bruit des capteurs et leur sensibilité

Le bruit issu du capteur est fonction de sa nature, ainsi que de sa température d'utilisation. Les caméras CCD refroidies ont ici un avantage sur les APN. Plus la température du capteur est basse, plus le bruit est faible. Les nuits d'hiver procurent un certain avantage...

Le « bruit » d'un capteur est différent du « grain » d'une émulsion. Le grain est défini par la taille moyenne des grains d'argent de la couche sensible. Les meilleures pellicules grain fin d'antan donnaient un grain d'environ 15μ. La taille des photosites des capteurs numériques est bien inférieure à cette valeur.

Le bruit numérique se manifeste notamment par des pixels colorés aléatoirement dans des zones de faible lumière où ils devraient être uniformément foncés.

Le bruit d'un capteur est aléatoire, et réparti uniformément. Ce qui permet de le réduire en superposant plusieurs poses du même objet dans les mêmes conditions.



Dans un APN, le bruit natif du capteur, celui à la sensibilité la plus faible, est augmenté en même temps qu'augmente la sensibilité. La sensibilité ISO n'est qu'une amplification, apportée électroniquement au signal... et au bruit. De plus, l'amplification apporte son propre bruit ! Les appareils reflex récents (pour obtenir de meilleurs résultats, il faut viser le haut de gamme) ont un bruit faible jusqu'à 1 600 / 3 200 ISO. Il commence à être présent

visiblement à partir de 3 200 / 6400 ISO selon les modèles. Les valeurs élevées permettent néanmoins de réduire les temps de poses individuels. Tout est histoire de compromis.

Améliorer la résolution d'un capteur ne se fait pas forcément en réduisant la taille de ses photosites et en les multipliant. Les trop petits photosites captent individuellement moins de lumière et leur rapport signal/bruit diminue. C'est ce qui se passe pour les photoscopes à petit capteur et photosites minuscules.

LA PRATIQUE SUR LE TERRAIN

Réalisation des poses individuelles

Pour résumer, prendre une photo du ciel profond demande une excellente mise en station, une bonne mise en température du tube optique, une collimation sans faille, et une mise au point parfaite.

Un mot sur le suivi.

Poser plusieurs minutes nécessite soit une monture dépourvue de déviation par rapport à la rotation terrestre (rare), soit de suivre une étoile « guide » pour corriger les défauts de la monture. Ceci est réalisé soit manuellement à l'aide de la raquette de commande, soit automatiquement avec un système d'autoguidage.

Dans les deux cas, nous avons le choix de la lunette guide ou du diviseur optique.

- La lunette guide permet de choisir confortablement l'étoile guide, mais les risques de flexions entre la lunette et l'instrument sont grands.
- Le diviseur optique n'a pas ce défaut, puisque c'est une partie de l'image photographiée qui est utilisée pour guider l'ensemble. L'inconvénient est la difficulté de trouver une bonne étoile guide dans cette petite partie du bord du champ. Pas toujours évident !

Le guidage peut avantageusement être fait à l'aide d'une petite caméra CCD ou d'une webcam, dont le logiciel assurera le suivi correct par des actions contrôlées sur les moteurs de la monture. C'est l'autoguidage, qui tend à se généraliser.

Nous voici donc partis pour photographier un objet du ciel profond. Nous avons déterminé l'échantillonnage, la focale, le temps de pose (total et poses individuelles), la sensibilité ISO de l'APN (si APN il y a), les différents réglages de son menu, le passage en manuel, pose B (bulb), mode « raw »... le tout en fonction de notre propre matériel.

Les réglages d'une caméra CCD se font directement dans le logiciel d'acquisition.

Pour un APN, le déclenchement de la première pose est fait avec une commande à distance, avec un relevage préalable du miroir et retardateur pour éviter les vibrations.

Les chapitres suivants montreront qu'il faut, en plus des poses de l'objet, réaliser d'autres images qui permettront d'épurer le signal venant du ciel.

Ne jamais oublier que la prise de vue est essentielle, et qu'on n'obtiendra jamais de bonnes images avec des mauvaises données brutes, malgré l'apport considérable de l'informatique.

DEVANT L'ORDINATEUR

Le signal global issu du capteur

Analysons une des vues de l'objet.

L'image brute issue d'une caméra CCD ou d'un APN se compose en fait d'au moins 5 signaux superposés :

- L'image de l'objet en question, bien sûr. C'est le signal recherché. A noter que la pollution lumineuse ou le passage d'un satellite est dans cette catégorie de signaux.
- Un signal de décalage électronique.
- Un signal de bruit thermique dû à l'électronique.
- Des signaux non voulus dus au matériel : poussières sur le capteur, inhomogénéité de la sensibilité du capteur, vignettage...
- D'autres bruits, plus confus, et plus difficiles à éliminer.

Le signal de bruit thermique, peut en partie être atténué d'une part en refroidissant le capteur (CCD), d'autre part en additionnant plusieurs poses de l'objet.

Le prétraitement devra éliminer au mieux ce qui n'est pas le signal de l'objet. Pour cela, il faut prévoir au moment de la prise de vue de réaliser des clichés supplémentaires (images brutes, prises en mode « raw ») visant à isoler les autres signaux.

Il faudra ensuite utiliser à bon escient ces images des signaux parasites avec des logiciels spécialisés comme Iris, Registax, Prism ... ou avec moins de flexibilité et de rapidité, des logiciels classiques de traitement d'image comme Paint Shop Pro, Photoshop, The Gimp...

Le signal de décalage de zéro (offset)

Dans un circuit électronique compliqué comme dans une caméra CCD ou un APN, un signal faible est généré, même en l'absence de lumière sur le capteur et d'alimentation électrique.

C'est le « signal de décalage », sorte de zéro électrique, appelé « Offset » ou « Bias » en anglais. Il n'est jamais nul, et n'est pas forcément réparti uniformément sur le capteur.

Il est reproduit en réalisant une photographie sans lumière sur le capteur, en bouchant l'objectif de l'instrument. Il faut aussi s'assurer sur un APN, que de la lumière n'entre pas par le viseur en l'obturant également.

Les poses sont les plus courtes possibles permises avec le matériel à disposition, au moins inférieures au millième de seconde.

Dans la pratique, on réalise plusieurs images, afin d'obtenir une image « maître » de décalage de zéro, représentative de la moyenne de ce signal, et qui sera utilisé par la suite. Chaque image de décalage est faite à la même sensibilité que la prise de vue de l'objet.

Le décalage maître est obtenu en conservant la valeur médiane de chaque pixel de toutes les images. Cette méthode est plus efficace qu'une simple moyenne car elle permet d'éliminer les artéfacts, les valeurs aberrantes qui peuvent être provoquées par des pixels défectueux ou par des rayons cosmiques. La méthode des médianes demande un nombre impair d'images de décalage.

Le signal de noir ou signal thermique (Dark)

Durant la pose de l'objet à photographier, le capteur génère un signal thermique qui n'a rien à voir avec l'image de l'objet lui-même. Il est différent d'un pixel à l'autre, et dépend de la qualité du silicium composant le photosite, ainsi et surtout que de sa température. Ce signal apparaît avec les poses longues. Il est d'autant plus fort que la pose est longue et que la température est élevée.

Il est reproduit en réalisant une image dans l'obscurité, en obturant l'objectif de l'instrument et le viseur de l'APN. D'où le nom de ce signal : « signal de noir » ou « signal thermique », ou « dark » en anglais. Contrairement au signal de décalage, les images de noir sont réalisées avec le même temps de pose que l'image de l'objet. Si les poses individuelles de l'objet sont de 4 minutes, les images de noir seront également de 4 minutes, avec la même sensibilité, à la même température.

Une image « maître » du noir est réalisée grâce à une médiane d'un nombre impair d'images de noir, idéalement le même nombre que les images du ciel. Le maître de décalage (offset) est soustrait de chaque image de noir avant de procéder à la médiane pour réaliser le noir maître.

Il est important que les images de noir soient réalisées à la même température que les images du ciel.

Dans l'idéal, on peut envisager la suite : image du ciel, image de noir, image de décalage, image du ciel, image de noir, image de décalage... Dans ce cas, les conditions de prises de vue, de température... restent identiques (éviter les images de noir le lendemain, sauf si la température du capteur est connue et régulée).

Pour résumer, faire un noir maître, c'est :

- Soustraire le maître de décalage (offset) de chaque image de noir.
- Calculer le noir maître par médiane.

Plage de lumière uniforme (PLU, ou blanc, ou Flat Field)

La réponse à la lumière des différents photosites du capteur n'est pas uniforme. Cela est dû à leur construction, à leur taille qui peut varier, mais aussi et surtout à des poussières sur le capteur générant des taches, et au vignettage optique de l'instrument qui assombrit les angles. Le signal de l'objet sera pollué par ce signal parasite qui peut être important.

Cela signifie que si le capteur regarde une feuille de papier blanc uniforme, l'image qu'il en donnera ne sera pas forcément blanche et uniforme.

Nous devons donc réaliser des images d'une scène uniforme en luminosité, soit en visant le ciel au crépuscule, soit à l'aide d'une feuille ou d'un réflecteur blanc éclairé uniformément, placé devant l'objectif de l'instrument.

Le nom de ces images est « signal de blanc », ou « plage de lumière uniforme » (PLU) ou « Flat Field » en anglais. Comme pour les deux autres, faire un nombre impair de vues, pour l'obtention d'un PLU « maître » par médiane. Le maître de décalage est soustrait de chacune des images de blanc avant de procéder au calcul de la médiane.

Le PLU doit être réalisé à travers le même montage optique que l'image de l'objet, même sensibilité de l'APN. L'exposition en mode manuel utilise un temps de pose qui doit donner un histogramme ne comportant qu'une barre verticale, la plus fine possible (moins le capteur sera pollué par des poussières ou sujet au vignettage, plus la barre sera fine), située à peu près au tiers de l'échelle des valeurs de luminosité.

Pour résumer, faire un blanc maître, c'est :

- Soustraire le décalage maître de chaque image de blanc
- Calculer le blanc maître par médiane
- Ramener les niveaux d'éclairage du blanc maître à une valeur déterminée (normalisation)

Dans la plupart des cas, les temps de pose des blancs est suffisamment faible pour ne pas nécessiter de retirer le signal thermique (noir).

Elimination des pixels chauds

La fabrication des capteurs numériques n'est pas parfaite. Certains photosites (peu nombreux sur les bons capteurs) donnent un signal thermique anormalement élevé et peuvent venir perturber le signal. Cela se traduit par l'apparition de points blancs sur l'image, à ne pas confondre avec une étoile exagérément piquée !

De plus, la réponse de ces pixels chauds n'est généralement pas linéaire, et soustraire le noir maître à cet endroit peut amener des surprises désagréables. Il convient donc de les repérer et de les éliminer en les remplaçant par la médiane des pixels adjacents.

Cette opération est exclusivement logicielle et utilise le signal maître de noir réalisé précédemment.

Isoler le signal

C'est retirer les signaux de décalage, de noir et de blanc. Avec un APN, il est rappelé que tout ce travail est effectué sur les images CFA, prises en mode brut (raw).

Sur chacune des images du ciel, l'ordre des opérations est le suivant :

- Soustraire pixel par pixel le signal maître de décalage (offset) de chacune des images du ciel.
- Soustraire le signal maître de noir (dark) du résultat précédent.
- Diviser l'image obtenue par le maître blanc (Flat Field).

Si les images de noir n'ont pas été faites avec exactement le même temps de pose ou à la même température que les images du ciel, un ajustement doit être réalisé. C'est l'optimisation du fond du ciel (réduit le bruit des images brutes à leur minimum).

Les logiciels de traitement d'images astronomiques réalisent ces opérations plus ou moins automatiquement. Elles sont également réalisables avec un logiciel de traitement d'image classique comme Photoshop, manuellement, image par image.

Conversion en images couleur

C'est ici que les images en 16 bits CFA d'un APN sont transformées en images couleurs 48 bits. Chaque niveau RVB est calculé d'après la matrice de Bayer, et les 4 couches additionnées avec leur couleur respective.

Les images sont déséquilibrées colorimétriquement, et doivent être corrigés par la balance des blancs. Cette opération se fera plus tard, sur l'image compositée, mais certains logiciels comme IRIS peuvent ajuster les valeurs relatives des couches RVB à ce stade, en attribuant à chacune des couches un coefficient. Bien entendu, cette méthode n'est à utiliser que si l'on connaît à priori l'équilibre des couleurs donné par l'APN.

Cas de la trichromie avec une caméra CCD N&B

La technique LRVB est utilisée. Elle consiste à préparer des vues dites de Luminance (L), avec un temps de pose global suffisamment long pour obtenir tous les détails voulus. Cette image L en N&B est ensuite colorée avec des images R, V et B (images de chrominance). Leur temps de pose peut être réduit. Elles ne contiennent que des informations de couleur.

Le traitement, après retrait des offset, dark et division par le Flat, consiste à superposer les couches R, V et B à la couche de luminance pour obtenir l'image en couleurs.

Registration

Débarrassées des signaux parasites, les images du ciel vont pouvoir être additionnées. Mais auparavant, il faut les aligner pour réaliser une superposition parfaite. Cette opération s'appelle la « registration ». Les logiciels de traitement d'image astronomique savent réaliser ce type de calcul. Quatre sortes de registrations sont possibles :

- Décalage simple en x et y (translation). Rectifie la turbulence lente, de la haute atmosphère. Les images sont simplement décalées linéairement (gauche/droite – haut/bas).
- Rotation. Dans le cas d'une mauvaise mise en station, la rotation de champ peut être corrigée ou limitée, selon l'ampleur du décalage de mise en station.
- Changement d'échelle. Si les images proviennent de différents montages optiques, de différents instruments, si des filtres modifient le grossissement...
- Plus rarement, et sans garantie de réussite, des décalages locaux dans une image peuvent être calculés en utilisant une fonction de « morphing » pour repositionner localement une partie d'image déformée. Permet de gommer partiellement la turbulence locale. Les corrections sont généralement faibles.

Les trois premières registrations peuvent être réalisées en une seule fois si nécessaire dans les logiciels comme Iris. Cette registration opère à la fois le décalage linéaire, angulaire et le changement d'échelle. Le temps de traitement est long, mais permet des registrations de qualité.

Compositage

Les images sont prêtes pour une addition appelée « compositage ».

Les signaux de chaque pixel de chaque image s'additionnent. Les niveaux de l'objet photographié, mais aussi le bruit. Ce dernier étant aléatoire, non constant d'un pixel à l'autre et d'une image à l'autre, leur somme grandira à l'addition moins vite que le signal recherché proprement dit. Ce qui aura pour effet d'améliorer le rapport signal/bruit. L'image finale compositée n'aura plus cet aspect granuleux des images brutes, mais sera au contraire plus douce et lisse.

La réduction du bruit est d'autant plus efficace que le nombre d'images compositées est grand. La dynamique finale de l'image est également augmentée.

Balance des blancs

A ce stade, l'image compositée en couleur d'un APN a une dominante importante comme on l'a vu précédemment. Plusieurs méthodes sont utilisables pour la corriger. Les logiciels classiques de traitement d'image (Photoshop, Paint shop pro, The Gimp...) proposent des fonctions d'équilibrage des couleurs :

- Point blanc, point noir
- Attribution de coefficients à chaque couche Rouge-Vert-Bleu ou Cyan-Magenta-Jaune, ou les deux, pour les basses, hautes ou moyennes lumières
- Ajustement des teintes, saturation, luminosité
- Réglage de la température de couleurs
- ...

La première méthode est utilisée en astronomie, car la mieux représentative de la réalité.

Elle consiste dans un premier temps à définir à l'écran une zone du ciel sans étoile, noire par définition, à l'ajuster comme étant du noir (valeurs R, V et B à zéro), et à généraliser le traitement à toute l'image. La deuxième étape est identique dans son principe, mais avec du blanc. Il faut s'assurer que l'étoile choisie comme zone blanche est bien une étoile blanche et non une géante rouge, par exemple...

Traitements

Au sortir du prétraitement, l'image compositée, bien équilibrée colorimétriquement doit encore subir quelques modifications, en particulier pour faire ressortir des détails encore invisibles, mais présents. Toujours se rappeler que ce type de traitement doit rester léger, afin de ne pas créer d'artéfacts.

Commencer par la préparation de l'image :

- Ajustement des seuils (contraste et luminosité)
- Recadrage suite à la registration, ou par soucis esthétique

Passer ensuite au traitement proprement dit avec les fonctions suivantes :

- Améliorer le rendu des zones de basse et faible lumières (Logarithme, DDP, Egalisation d'histogramme...)
- Améliorer la netteté (masque flou, ondelettes...)
- Améliorer le rendu des étoiles, résolution partielle de certains problèmes de suivi, de décollimation, de coma, d'astigmatisme... par des méthodes de déconvolution (Richardson-Lucy, Vancittert, optimisation d'entropie...). A utiliser avec modération. Les résultats ne sont pas toujours à la hauteur des espérances !

Après chaque traitement, un ajustement des seuils peut se révéler utile.

Si les prétraitements (décalage, noir, blanc) n'ont pas suffi, ou s'ils manquent, les pixels chauds, taches, lignes ou colonnes défectueuses peuvent être éliminés à ce stade, évidemment avec moins d'efficacité qu'avec la méthode décrite plus haut.

Compléter par les traitements suivants :

- Retrait du gradient du fond de ciel, si la pollution lumineuse apparaît sur une partie de l'image
- Elimination des traces laissées par les satellites artificiels

Corrections finales

L'image est proche de sa version définitive. Reste quelques corrections de détail qui font toute la valeur des belles images, selon les goûts de chacun, pour rendre l'image plus esthétique :

- Saturation des couleurs
- Effet Akira Fuji (flou sélectif des étoiles selon leur éclat)...

Puis, terminer par la mise en valeur de l'image, phase trop souvent ignorée, à tort :

- Enregistrement dans un format qui ne détruit pas l'image (attention à la durée de vie des CD et DVD).
- Conserver les images brutes, au cas où...
- Présentation à l'écran : cadre, nom de l'objet, signature, conditions de prises de vue.
- Tirage sur papier, encadrement, titrage, conditions de prises de vue, conservation dans un album.

POUR RESUMER

Sur le terrain :

- Détermination de l'objet à photographier, choix du matériel et du montage optique
- Mise en station sur un bon site
- Mise en température
- Collimation
- Recherche d'une étoile guide
- Mise au point
- Réglages de l'appareil ou de la caméra (manuel, bulb, sensibilité ISO, mode raw...)
- Réalisation des blancs, noirs, décalages, et des images de l'objet
- Stockage sûr des images

Rentré à la maison, le travail sur ordinateur commence :

- Isoler le signal du ciel (décalage, noir, blanc, pixels chauds).
- Convertir les images CFA en images couleurs pour un APN.
- Aligner les images (registration).
- Les additionner (compositage).
- Ajuster la balance des blancs en modifiant l'équilibre des canaux RVB.
- Traitements.
- Corrections finales.

LE JARGON

Quelques mots faisant partie du langage de l'astrophotographe :

APN	Appareil Photo Numérique. Appareil de prises de vues dont la surface sensible est un capteur numérique.
Artefact	Phénomène artificiel ou accidentel rencontré au cours d'une observation ou d'une expérience. En imagerie, un artefact est généré par les traitements s'ils sont trop poussés. On peut ainsi faire apparaître des détails inexistant dans la réalité.
Balance des blancs	Equilibre entre les composantes de couleur rouges, vertes et bleues d'une image RVB, afin de rendre naturelles les couleurs.
Bias	Voir <i>signal de décalage</i> .
Blanc	Voir <i>signal de blanc</i> .
Bruit	Signal parasite produit par le capteur, pouvant avoir plusieurs sources. Le bruit pollue le signal original de l'objet à photographier. Certaines composantes du bruit peuvent être éliminées, d'autres réduites, d'autres enfin ne peuvent être éliminées. Voir page 5.
Bruit aléatoire	Ce type de bruit est réparti au hasard. Certains photosites enregistrent un signal de bruit important, d'autres moins. Cette répartition varie d'un moment à l'autre. Un pixel très bruité sur une image peut l'être très peu sur une autre. L'addition de plusieurs poses permet de réduire ce bruit aléatoire. Voir page 5.
Bruit natif	C'est le bruit d'un APN lorsqu'il est réglé sur sa sensibilité réelle (en général 100 ISO). Pousser la sensibilité ne fait qu'augmenter électroniquement le signal total reçu (par amplification), le signal utile comme le bruit.
Canaux RVB	Voir <i>couches RVB</i>
Capteur	Désigne la surface sensible à la lumière, permettant d'enregistrer celle-ci. La rétine de l'œil contient des capteurs, les cônes et les bâtonnets. Une émulsion est une autre surface sensible. Par extension, ce terme de capteur s'applique plus particulièrement aux surfaces numériques, capables de générer un courant électrique proportionnel à la quantité de lumière reçue. Un capteur numérique transforme ce courant en 1 et 0, codage facilement compris par les ordinateurs. Un capteur numérique est constitué de « photosites » qui sont les éléments les plus petits capables de capter un signal. En première approximation, plus le capteur contient de photosites, plus sa résolution théorique est élevée.
CCD	Technologie de capteur numérique à transfert de charge.
CFA	Color Filter Array. Une image CFA est une image N&B qui contient les valeurs de rouge, de vert et de bleu correspondant aux photosites filtrés en rouge, vert et bleu. Voir page 2.
Compositage	Opération logicielle consistant à additionner pixel par pixel les valeurs de couleurs enregistrées dans plusieurs image du même objet.
Couches RVB	Une image couleur peut être décomposée en trois images contenant les niveaux respectifs de rouge, de vert et de bleu. Les fichiers de ces images ne contiennent que des chiffres représentatifs du niveau de densité de chaque couleur, pas la couleur elle-même. Visionner ces fichiers donne trois images N&B. Pour reconstituer l'image en couleurs, il faut générer trois images, une colorée en rouge, une en verte et une en bleue avec chacune les niveaux de rouge, de vert et de bleu correspondant aux niveaux enregistrés dans les fichiers. Les trois couches sont alors additionnées pour reconstituer l'image couleur.
Dark	Terme anglais désignant le signal thermique. Voir signal de noir.

Déconvolution	Méthodes mathématiques compliquées de traitement des images permettant de corriger certains défauts optiques comme la coma, l'astigmatisme... Ces méthodes sont utilisées également pour corriger des défauts de suivi, de collimation, de mise au point par exemple. Elles sont à doser parcimonieusement et précisément si l'on veut éviter l'apparition d'artefacts.
Derawtisation	Opération qui consiste à transformer une image brute, de format raw, en une image en couleur. Voir page 2.
Développement	Première phase de la derawtisation donnant une image couleur déséquilibrée colorimétriquement à partir d'une image brute. Voir page 2.
Dynamique	Les niveaux de gris d'un pixel peuvent s'étendre sur une gamme plus ou moins grande. L'étendue de cette gamme est la dynamique. Un pixel codé sur 1 seul bit ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou 1. Le pixel est blanc ou noir. Sur 2 bits, 4 valeurs sont possibles : 0, 1, 2 ou 3. La dynamique est un peu plus large. Le pixel peut être blanc, gris clair, gris foncé ou noir. Un codage sur 8 bits (1 octet) donne une dynamique de 256 valeurs de gris. Les APN codent la dynamique sur 12 à 14 bits (4096 à 16384 valeurs), les caméras CCD sur 14 à 16 bits (16384 à 65536 valeurs). Plus la dynamique est élevée, mieux les petits écarts de densité d'une image sont différenciés, plus les détails fins vont pouvoir être enregistrés. L'œil n'est pas capable de différencier plusieurs dizaines de milliers (ou plus) de valeurs de densité. Mais les traitements informatiques vont eux se servir de ces écarts minimes pour les faire apparaître visuellement en les amplifiant.
Echantillonnage	Fréquence de prélèvement d'échantillons d'un signal analogique en vue de sa reproduction par des moyens numériques. En astrophotographie, se mesure en seconde d'arc par pixel. Voir page 3.
Échantillonnage de Nyquist	Échantillonnage optimal, donnant les meilleurs résultats possibles. Voir page 3.
Flat field	Terme anglais désignant la PLU (voir signal de blanc).
Fichier brut	Fichier informatique contenant toutes les informations nécessaires à la reconstitution d'une image couleurs ou N&B. Chaque fabricant possède une façon à lui de coder ces informations, bien que le principe de base soit le même. Les fichiers sont « propriétaires », un brut Canon ne peut être lu par un logiciel Nikon, et inversement. Il existe de plus en plus de logiciels capables de décoder n'importe quel brut de n'importe quelle marque. A titre d'exemple, l'extension des fichiers Canon est .CRW ou .CR2, celle de Nikon est .NEF.
Filtre IR	Les capteurs numériques sont sensibles au rayonnement infrarouge. L'œil ne l'est pas. Pour un rendu réaliste, les fabricants d'APN placent devant le capteur un filtre qui stoppe le rayonnement infrarouge. L'inconvénient est que ce filtre est généralement trop large, et coupe une bonne partie du signal rouge visible, en particulier la radiation H α . Certains appareils (comme le Canon EOS 20Da) sont spécialement étudiés pour l'astronomie et n'ont pas ce filtre. Ces appareils, peu vendus, sont très chers.
Fréquence	Représente l'inverse de la longueur d'onde pour la lumière. Pour un signal sonore par exemple, la fréquence est le nombre de battements par unité de temps, par seconde. Pour un rayonnement se déplaçant à la vitesse de la lumière, la fréquence s'exprime comme le rapport de cette vitesse par la longueur d'onde :
	$v = c/\lambda$ $v = \text{fréquence en Hertz}$ $c = \text{vitesse de la lumière (300 000 000 m/s)}$ $\lambda = \text{longueur d'onde en mètres}$
Fréquence spatiale	Au lieu de s'exprimer par rapport à un temps comme précédemment, la fréquence spatiale s'exprime par rapport à une ou plusieurs dimensions de

l'espace. La fréquence spatiale est le nombre de fois que le plus petit détail peut se retrouver par unité de longueur. En astrophotographie, l'unité de longueur est ramenée à la taille d'un pixel. La fréquence spatiale sera la portion angulaire de ciel vue par un pixel, et sera donnée en "/pix.

Gain	Le signal électrique de chaque photosite d'un APN peut être amplifié pour améliorer la sensibilité du capteur. Le gain est le facteur d'amplification. Dans la pratique, les constructeurs d'APN ont préféré conserver les échelles de sensibilité de l'argentique. La sensibilité s'exprime en ISO et est linéaire. Un 400 ISO est deux fois plus sensible qu'un 200 ISO.
Grain	Le grain est le plus petit élément reproduit sur une émulsion photographique argentique. C'est la taille du plus petit grain d'argent développé. A ne pas confondre avec le bruit en numérique.
Image maître	Les images de décalage, de noir et de blanc sont faites pendant la séance de prise de vue. Pour avoir par exemple une image suffisamment représentative du bruit thermique, il faut procéder à une moyenne de plusieurs vues. Cette vue moyenne est appelée image maître. Voir page 6, 7 et 8.
Interpolation	C'est un ensemble de méthodes mathématiques permettant de calculer des valeurs inconnues dans un intervalle connu. Exemple : pour calculer la valeur d'un pixel inconnu de la couche rouge, dont les pixels adjacents font 100 et 98, il suffit de calculer la moyenne, et d'affecter la valeur 99 à ce pixel inconnu. Cet exemple est beaucoup plus simple que l'interpolation réelle, qui tient compte des valeurs à des éloignements plus importants, et du type de zone colorée concernée (plage uniforme, dégradé, bord, ligne...).
Iris	Iris est le nom d'un logiciel de traitement d'images astronomiques. Il est performant pour les images planétaires et du ciel profond, prises avec des caméras CCD, des APN ou des webcams. Il possède des fonctions évoluées pour le traitement des spectres, l'astrométrie et la photométrie. Sa particularité est de procéder étape par étape en conservant en mémoire les images intermédiaires. Ses fonctions sont accessibles classiquement par les menus, mais aussi par sa console qui permet d'entrer au clavier les fonctions et leur paramètres.
Matrice de Bayer	Jeu de filtres colorés positionné juste devant les capteurs numériques des APN. Voir page 2.
Médiane	La médiane remplace avantageusement la moyenne d'une série de chiffres en ne tenant pas compte des valeurs aberrantes. La méthode consiste à classer les différentes valeurs d'un même pixel de plusieurs images dans l'ordre croissant, et de ne garder pour l'image moyenne que la valeur positionnée au milieu de la liste. En astrophotographie, la médiane est utilisée pour fabriquer les images maîtres de décalage, de noir et de blanc.
Mode bulb	Dans un APN, mode qui permet d'exposer le capteur à la lumière tout le temps que le déclencheur est appuyé. S'utilise de préférence avec un déclencheur à distance pour éviter les bougés.
Mode raw	Dans un APN, mode qui permet d'enregistrer une image sans aucun traitement interne à l'appareil. Dans les autres modes, l'appareil procède à une dératisation, puis des traitements initiaux plus ou moins sophistiqués comme la balance des couleurs, l'accentuation, la netteté... selon les réglages de l'appareil. Ces traitements internes dénaturent plus ou moins le signal d'origine.
Offset	Terme anglais désignant le signal de décalage. Voir signal de décalage.
Photoscope	Appareil photo numérique de poche, possédant un petit capteur, et dont les possibilités sont peu adaptées à l'astrophotographie du ciel profond. Voir page 2.
Photosite	Plus petit élément d'un capteur numérique. C'est sur un photosite que la lumière arrive et est enregistrée grâce à des semi-conducteurs rendus sensibles à la

lumière. Les photons arrivant sur un photosite émettent des électrons qui forment le courant qui sera enregistré. Plus le nombre de photosite est grand pour une même surface de capteur, et plus sa résolution théorique sera grande.

Pixel	Le pixel est le plus petit élément d'une image numérique. C'est le résultat de l'exposition des photosites d'un capteur. A ne pas confondre avec un photosite.
Pixel chaud	Les capteurs numériques, qui contiennent plusieurs millions de photosites, ne sont pas parfaits. Certains photosites réagissent différemment des autres à la lumière. Ils se saturent plus ou moins rapidement que les autres. Sur des poses longues, les pixels correspondants apparaissent blancs ou noirs. Les blancs ne doivent pas être confondus avec une étoile fine ! Ces pixels sont présents dans une image du ciel, mais également dans l'image maître thermique, d'où le nom de pixel chaud. Ils seront facilement repérables dans ce maître, et éliminés de l'image du ciel. Voir page 7.
PLU	Voir <i>signal de blanc</i>
Prétraitement	Suite d'opérations logicielles sur les images permettant d'éliminer certains signaux parasites (décalage, noir, blanc, pixels chauds), de produire une image couleur équilibrée, d'ajouter plusieurs vues pour en réduire le bruit et améliorer la dynamique. Le rendu de l'objet photographié n'est pas modifié par le prétraitement.
Prism	Logiciel de traitement d'images spécialisé pour les caméras CCD. Sait également traiter les images des webcams et des APN. Performant en photométrie et en astrométrie.
Rapport signal/bruit	Rapport entre la valeur du signal recherché d'un pixel d'une image à la valeur du bruit de ce même pixel. S'applique également à toute l'image. Le rapport signal/bruit est généralement exprimé en décibels, rapport du logarithme du signal sur le logarithme du bruit. Cette astuce mathématique permet de mieux visualiser les écarts importants qui peuvent exister entre le bruit et le signal utile. Pour qu'une image soit bonne, avec un bruit faible, il faut augmenter le rapport signal/bruit.
Registax	Logiciel de traitement d'image qui permet un prétraitement en très peu d'opérations. Traite les images CCD, APN et webcam.
Registration	Opération logicielle consistant à mettre en repérage exact plusieurs images par rapport à une image de référence, de façon à pouvoir ensuite les superposer et les additionner le plus parfaitement possible. Les fonctions calculent dans un premier temps les décalages linéaires, de rotation et d'échelle selon le type de registration demandée, puis procèdent aux décalages physiques sur les images. Voir page 8.
Rendement quantique	Mesure la quantité d'électrons produits pour 100 photons reçus sur un photosite d'un capteur numérique. Un capteur parfait a un rendement quantique de 100 %. Dans le monde réel, les capteurs ont un rendement quantique compris entre 40 et 60 %. Il est possible, avec des photomultiplicateurs, d'obtenir des rendements quantiques supérieurs à 100 %. Ces systèmes sont utilisés par les militaires pour voir la nuit, mais ne sont pas utilisables sur le ciel pour la haute résolution.
Résolution	Taille angulaire du plus petit détail visible par un système optique. La résolution est donnée par la formule suivante :

$$r = 1,22 \times \lambda / D \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} r = \text{résolution en radians} \\ \lambda = \text{longueur d'onde observée en mètres} \\ D = \text{diamètre de l'objectif en mètres} \end{array}$$

Pour améliorer la résolution, il faut soit diminuer la longueur d'onde observée, soit augmenter le diamètre de l'instrument (ou les deux)
Ne pas confondre avec l'échantillonnage. La résolution s'applique à un système optique analogique par essence, l'échantillonnage à un système numérique.

Sensibilité	La sensibilité d'un capteur (numérique ou analogique comme une émulsion argentique) désigne sa capacité à enregistrer des faibles signaux lumineux. Elle est exprimée en unités ISO (ex ASA). Plus la valeur ISO est grande, plus la surface est sensible à la lumière. Dans les capteurs numériques, l'augmentation de la sensibilité est réalisée grâce à une amplification électronique du signal, ce qui a pour conséquence d'augmenter également le bruit. Dans une émulsion argentique, la sensibilité est donnée par la structure et la nature des composés chimiques photosensibles, ainsi que par la chimie du développement.
Signal de blanc	Voir page 7
Signal de décalage	Voir page 6
Signal de noir	Voir page 7
Signal thermique	Voir <i>Signal de noir</i>
Sous échantillonnage	Défaut consistant à échantillonner trop peu de valeurs d'un signal analogique. Ce dernier est mal reproduit par le signal numérique qui en est issu. En astrophotographie numérique, un sous échantillonnage donnera moins de détails de la scène photographiée par rapport aux possibilités de l'ensemble capteur/optique. Voir page 4.
Sur échantillonnage	Défaut consistant à échantillonner trop de valeurs d'un signal analogique. Ce surplus n'apporte rien au niveau de la qualité, et encombre inutilement la mémoire. Le même détail sera traduit par trop de pixels. Voir page 4.
Traitement	Opérations logicielles consistant à extraire d'une image prétraitée des détails invisibles mais présents, et de les rendre visibles. Le traitement comprend les fonctions logarithme, DDP, égalisation d'histogramme... les fonctions d'amélioration de la netteté comme le masque flou ou les ondelettes... les fonctions de déconvolution qui améliorent entre autres l'aspect des étoiles (Richardson-Lucy, Vancittert, optimisation d'entropie...). Voir page 9.
Trichromie	Procédé d'obtention d'images en couleurs à partir de trois images du même objet prises successivement avec un filtre rouge, vert et bleu. Les trois images sont superposées avec chacune la couleur de son filtre.
Zéro électronique	Voir <i>signal de décalage</i> .