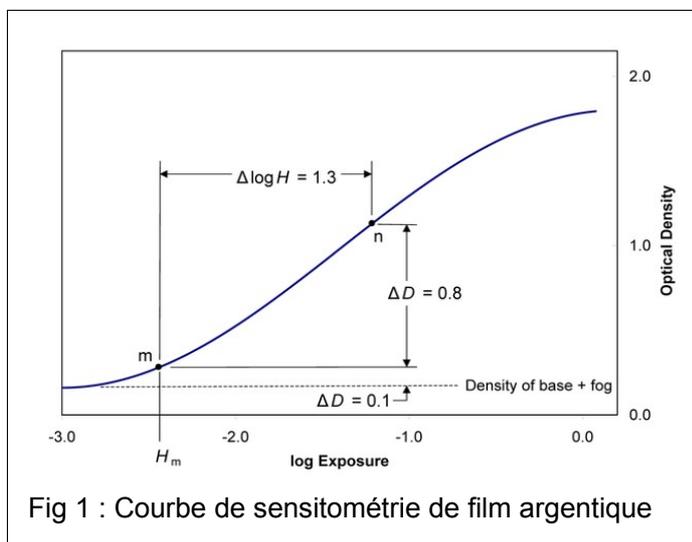


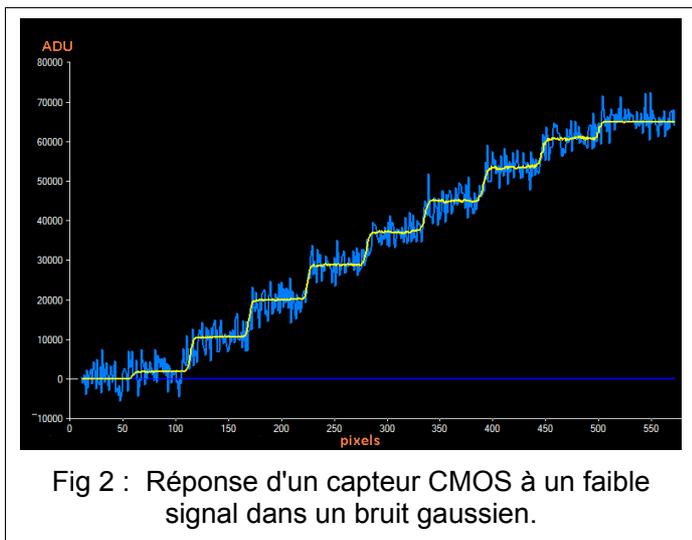
Imagerie Astronomique et APN:

- Bruits aléatoires, la vraie limite de sensibilité,
- Les textures, motifs fixes et leur traitement.

1 - Introduction :



A l'époque du film argentique la limite de sensibilité en prise de vue basse lumière était un seuil d'illumination au-dessous duquel la surface sensible n'était plus impressionnée (Fig 1). Le standard de sensibilité des films, défini par l'ISO, était lié au niveau de ce seuil. Par ailleurs nous nous souvenons du phénomène de non-réciprocité de ces films argentiques. Leur densité ne s'accroissait que de plus en plus lentement avec le temps d'exposition. Ils avaient aussi une courbe de réponse non linéaire, gammatisée (0.55 en standard). Les images présentaient une granulation s'accroissant avec la sensibilité ISO. Nous étions dans le domaine de la photo-chimie.



Les capteurs photoélectriques de nos APN procèdent de la mécanique quantique, de la physique, et ont des propriétés très différentes. Ces détecteurs, combinés aux possibilités de la micro-électronique actuelle de technologie CMOS, atteignent un niveau de sensibilité et de qualité d'image totalement inconnu de la technique argentique : sans seuil, sans problème de réciprocité, parfaitement linéaires. La vraie limite pour nos capteurs CMOS (ou CCD) est le bruit

électronique, l'agitation thermique des électrons.

Le terme "bruit" peut paraître curieux quand il est appliqué aux images. Le bruit électronique a été découvert au début de la radio (Johnson 1926): un récepteur radio sensible, sans signal, laisse entendre une sorte de "souffle" ou "bruit". C'est la première manifestation reconnue de l'effet de l'agitation des électrons dans des circuits analogiques (Nyquist 1926). Nous verrons qu'ils en existe de deux types, un en l'absence de signal et un autre lié au signal.

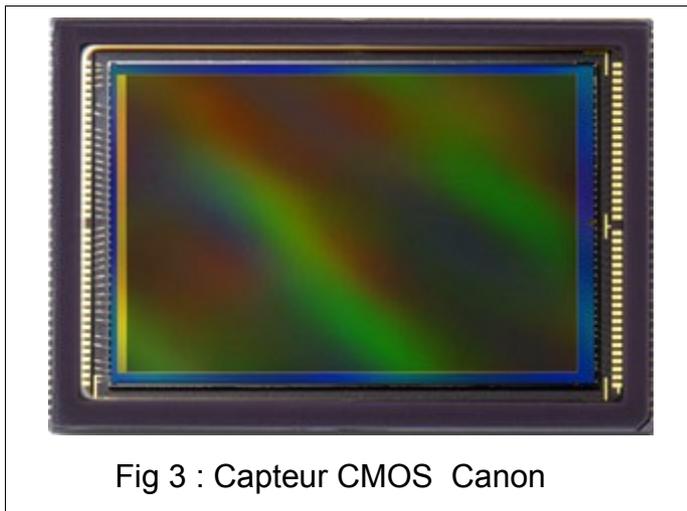
Quand le signal utile est noyé dans le bruit il n'est plus exploitable et même, à un certain point, détectable (Fig 2). On le caractérise par le rapport du signal utile au bruit : SNR (Signal to Noise Ratio)

Dans une image ceci se traduit d'abord par une granulation peu esthétique et, à l'extrême, par la disparition de l'image dans le bruit.

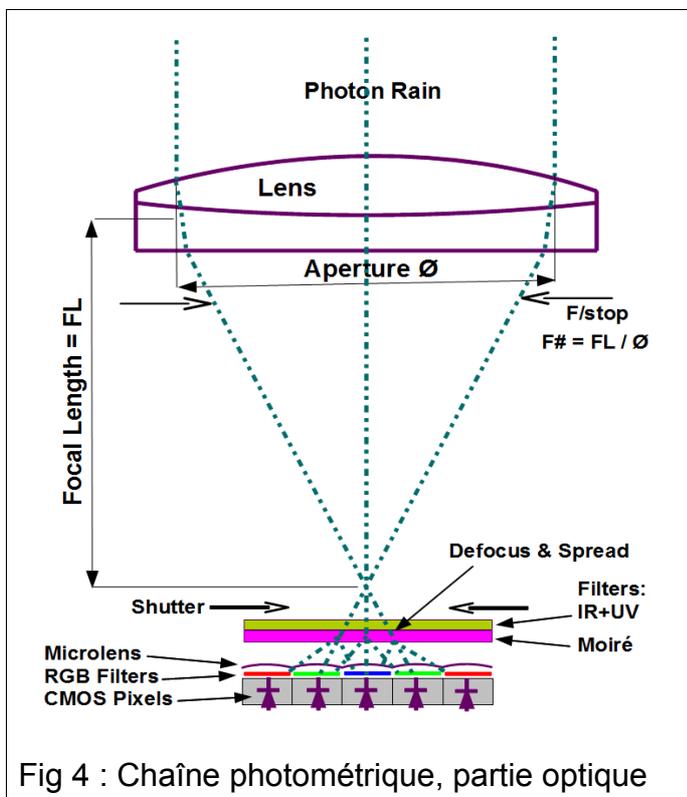
Il existe d'autres défauts dans les images électroniques qui peuvent être plus-ou-moins perçus comme du bruit, ce sont en fait des non-uniformités instrumentales. Elles sont de nature technologique et ne relèvent pas de la physique fondamentale.

Nous allons explorer ci-après ces différents phénomènes et la manière de minimiser leur effet dans nos images des objets du ciel.

2 - Fonctionnement d'un capteur d'image CMOS



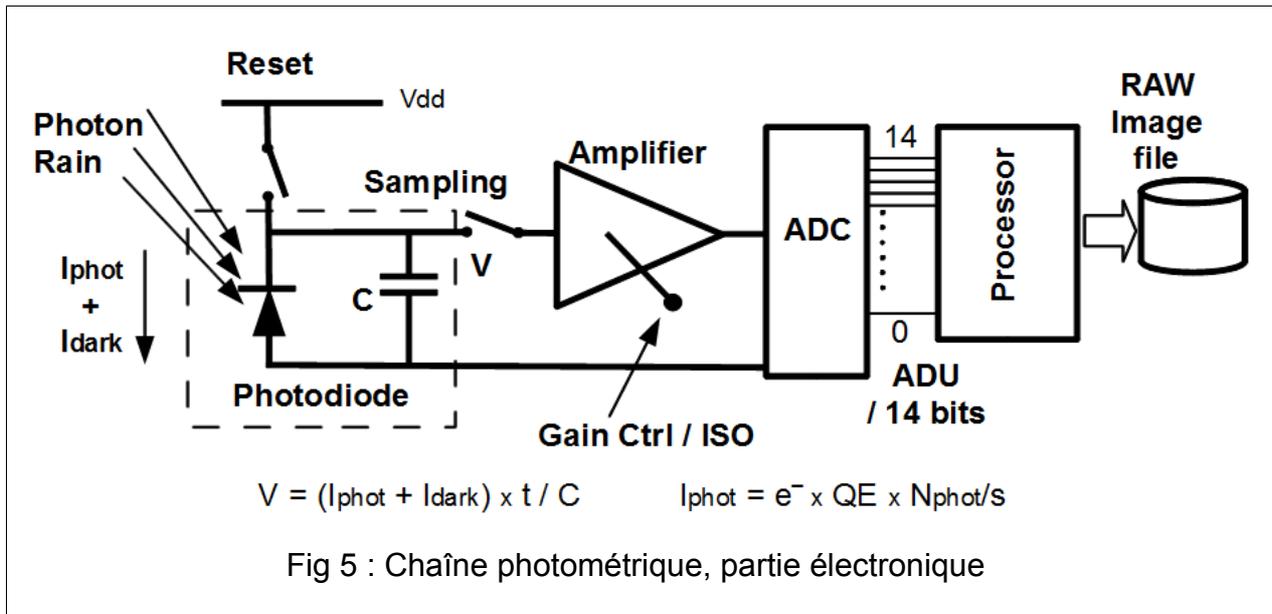
Un capteur d'image est constitué d'un ensemble d'éléments sensibles assemblés en une matrice régulière en lignes et colonnes, ces éléments d'image sont couramment dénommés "pixel". Chaque pixel est constitué d'une photodiode (ou photogate suivant la technologie utilisée) et de circuits électroniques. Le capteur est placé au foyer d'un ensemble optique focalisant une image sur le plan de pixels. Des filtres mettent en forme et distribuent les bandes passantes Rouge, Vert, Bleu sur des blocs de quatre pixels (cellule de Bayer, RG / GB), simulant la perception de la vision humaine suivant les normes CIE. Un obturateur détermine le temps de pose, d'illumination du capteur, pour chaque image (obturateur électronique en fait). La figure 4 montre un schéma simplifié de ce dispositif. Du point de vue électronique, sensibilité, réponse, bruit, les quatre canaux de la cellule de Bayer sont identiques. Nous allons donc traiter d'un seul canal dans la suite.



La figure 5 montre un schéma très simplifié de la chaîne photométrique constituée d'un pixel, d'un amplificateur, d'un convertisseur analogique-numérique (CAN), puis processeur et mémoire.

En fait entre chaque pixel et la suite existe une matrice d'adressage qui permet de faire remonter les données de chaque pixel vers la tête de colonne.

Les capteurs CMOS les plus avancés ont aujourd'hui un convertisseur en tête de chaque colonne, l'analogique s'arrête à ce niveau. On a donc des milliers de chaînes photométriques travaillant en parallèle, jusqu'au niveau numérique, à partir duquel les données ne risquent plus d'être altérées.



Le pixel lui même est formé d'un circuit électronique comprenant plusieurs transistors CMOS simplement symbolisés par des contacteurs dans notre schéma très simplifié. Plus une photodiode.

La technologie CMOS est le standard actuel de la micro-électronique, la plupart des circuits intégrés utilisés en électronique actuellement sont en technologie CMOS. Les gros bataillons de cette industrie sont bien sûr les processeurs d'ordinateur, les mémoires... La technologie CMOS a été conçue pour une consommation, et donc un échauffement, très faible, point important pour les APN: température réduite (bruit), autonomie. La technologie CMOS évolue très vite (loi de Moore) ,soit un doublement de densité et donc de performance tous les 18 mois : les APN d'aujourd'hui n'ont rien à voir avec ceux d' il-y- a dix ans !

2.1 - La photodiode, effet photoélectrique :

L'essentiel de ce qui nous intéresse ici se passe à ce niveau. La lumière est quantifiée (Einstein 1905) sous forme de particules élémentaires nommées "photon". Il n'a pas de masse et voyage, dans le vide, "à la vitesse de la lumière". Il a une énergie quantifiée fonction inverse de la longueur d'onde. Dans notre cas chaque photon du domaine visible a assez d'énergie pour déloger, un électron du "trou" correspondant de la matrice cristalline du silicium. La photodiode a pour fonction de récupérer et stocker cet électron libéré dans son silicium.

En fait il-y-a des photons et des électrons perdus dans ce processus (recombinaison électron-trou, photons absorbés...) Il-y-a donc une probabilité définie de récupérer un électron pour chaque photon. C'est l'efficacité quantique, QE. Le QE intrinsèque des bon capteurs actuels est de l'ordre de 75%.

Donc CHAQUE PHOTON, individuellement, a une probabilité définie (et élevée) de résulter en comptage d'un électron par l'électronique.

Ceci explique les propriétés évoquées au début : pas de seuil, parfaite réciprocity, réponse linéaire en sortie RAW.

Si nous revenons à la figure 5, en pratique les électrons sont stockés dans la capacité (le réservoir) propre à la diode (polarisée par Vdd en inverse, non conductrice). Le voltage aux bornes de cette capacité évolue proportionnellement à la charge, au nombre d'électrons (e^-), donc de photons. Le voltage est "lu" au début et à la fin du temps de pose de l'image. La différence des tensions est proportionnelle au nombre de photons arrivés durant cette pose.

La capacité de stockage de la photodiode est limitée, de l'ordre de 28000 e^- pour un APS-C actuel (compter environ 1400 e^- par micron carré de pixel pour un CMOS). A ce point le capteur "sature" et les données restent bloquées à ce maximum.

2.2 - La chaîne électronique, les données et leur étendue

La suite est simple, le faible voltage résultant est amplifié et converti en donnée numérique. A compter de ce point il n'y a plus de risque d'altération des données, elle sont stockées sans autre opération (en principe...) dans le fichier RAW que nous traitons ensuite, à notre convenance. Nous disposons d'un nombre, en ADU (Arbitrary Digital Unit), qui est proportionnel au nombre d'électrons et de photons collectés. On peut déterminer le ratio électron/ADU de nos APN. Ceci est fortement recommandé car les bruits, le rapport signal/bruit, s'expriment, se calculent, en électron au niveau de la photodiode.

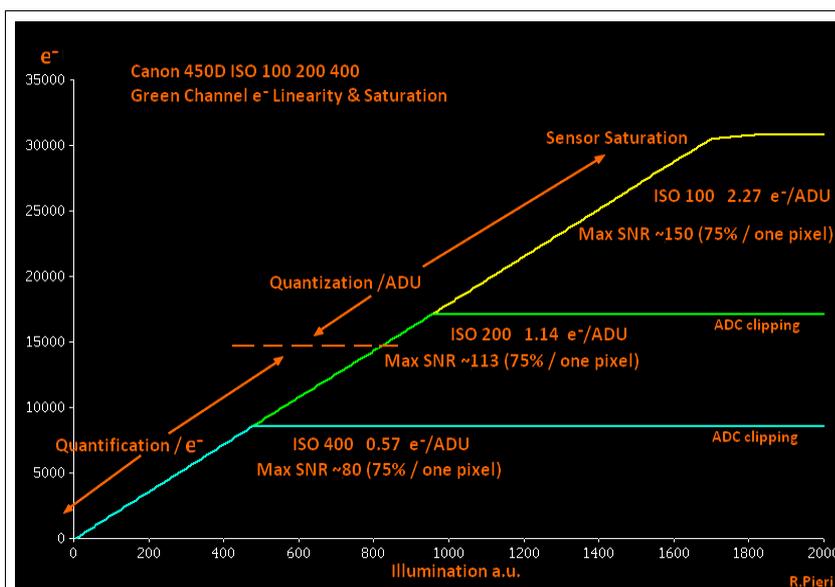


Fig 6 : Réponse e^- / photons à divers ISO. Niveaux de saturation / ISO. Sensibilité incrémentale limitée par la quantification des photo-électrons ou quantization du CAN.

Le gain de l'amplificateur est en fait réglable par le bouton des "ISO" de l'APN. Le facteur multiplicatif est proportionnel à l'indice ISO. Pour un capteur APS-C actuel, 18 Mpix, et convertisseur 14 bits on a typiquement 1 e^-/ADU à 200 ISO, donc 0.125 e^-/ADU à 1600 ISO, etc... Il faut aussi réaliser que le convertisseur est limité à 14 bits, soit 16383, moins un offset systématique de 2048, donc une étendue utilisable de 0 à 14335 ADU. Le nombre d'électrons maximum avant saturation du convertisseur dépend du réglage ISO (Fig 6). Environ

14000 e^- à 200 ISO, seulement 1750 e^- à 1600 ISO. Dans ce cas ce n'est pas la capacité de la photodiode qui limite. Si on a un bruit Johnson de 7 e^- à 1600 ISO, la dynamique du noir au blanc saturé, utilisable, sera seulement de 250. Les objets du ciel demandent souvent beaucoup plus !

3 - Les types et sources de bruit

Il-y-a deux grandes classes de bruit, les bruits dus à l'agitation électronique et les (faux?) bruits d'origine technologique. Les premiers sont aléatoires, les seconds sont en général des textures permanentes formées par des défauts des capteurs, donc reproductibles, pas du tout aléatoires.

3.1 - Les bruits aléatoires (Random Noises):

Ils sont totalement indépendants, non corrélés, de pixel à pixel et du temps, donc d'une image à la suivante. Il-y-a essentiellement deux types dans le cas des APN :

3.1.1 - Bruit de Johnson-Nyquist

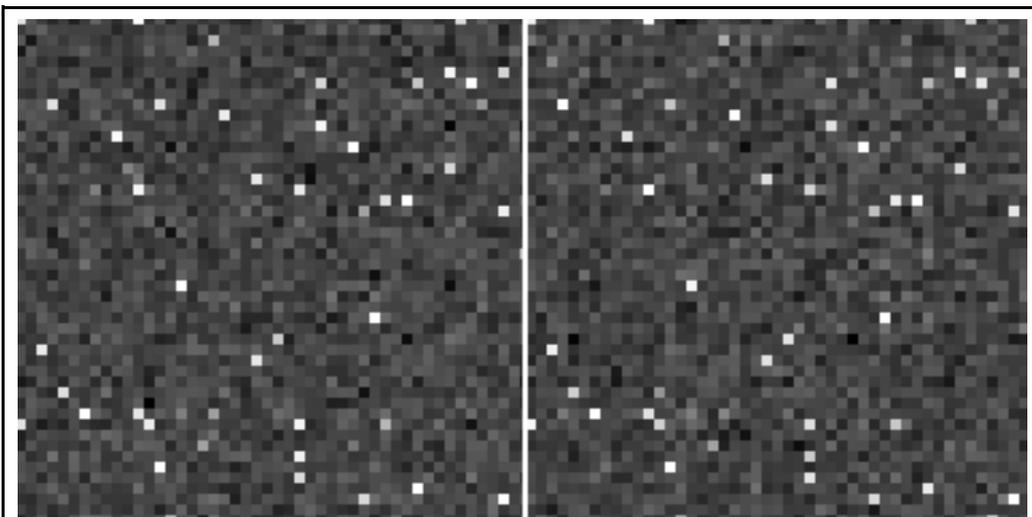


Fig 7: Deux poses de 120 s. ISO 400, 20°C, même bloc de pixels d'une image Raw (CFA / Bayer).
Les pixels lumineux sont des impulsions de courants d'obscurité.
Le grain du fond est le bruit aléatoire, essentiellement de Johnson, il est différent dans les deux images successives.

En l'absence de signal, le bruit est celui de l'agitation électronique dans la photodiode et l'entrée de l'électronique (d'après Johnson-Nyquist). Il prend une valeur aléatoire chaque fois qu'on mesure le voltage de la capacité de la photodiode. Sur un ensemble d'image et/ou de pixels sa valeur se mesure par son écart-type (σ), son voltage RMS (root-mean-square, valeur efficace). La distribution statistique de ce bruit est gaussienne (Fig 7 - Fig 8). En astronomie on parle souvent de bruit de lecture (read noise). En fait le bruit de lecture peut inclure d'autres bruits. Les électroniciens utilisent le terme "bruit thermique" (mais il-y-a confusion avec les amateurs astronomes qui parlent de bruit thermique à propos des courants d'obscurité...)

$$\text{Sigma du bruit de Johnson} = \sqrt{(4 R.k.T.B)}$$

La valeur RMS de ce bruit est fonction de la racine carrée de la température T absolue et de la bande passante B . Refroidir de quelques dizaine de degrés n'est pas efficace. Mais réduire la bande passante par la mise en parallèle de nombreuses chaînes photométriques dans les CMOS est très efficace.

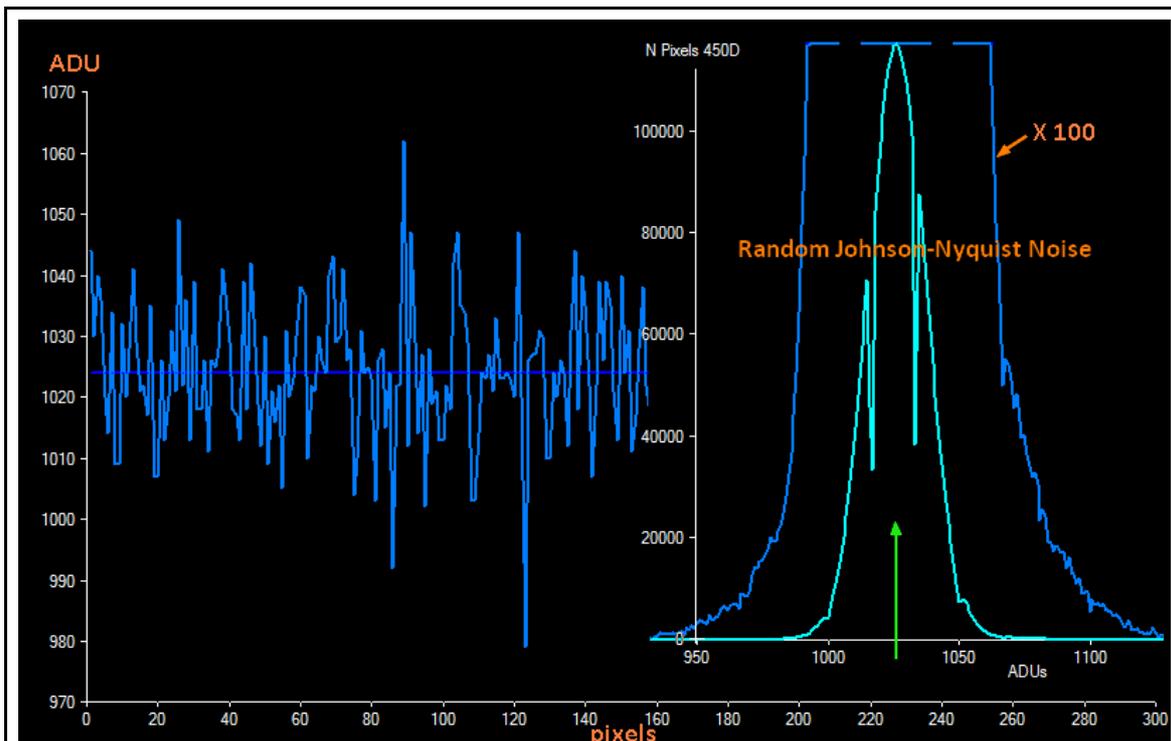


Fig 8: Bruit d'une centaine de pixels d'un dark de 1 s. essentiellement de Johnson, gaussien. L'historgramme montre une distribution gaussienne, légèrement asymétrique, donc comportant un peu de courant d'obscurité. Les deux trous étranges sont dus à la quantification des photo-électrons. Le décalage du niveau du noir du 450D est à 1024.

Les capteurs récents ont environ 5000 colonnes, le gain potentiel sur le bruit instrumental lié à la bande passante est donc de l'ordre de 70 !
 Ce bruit est le facteur dominant en cas de faible flux lumineux, régime bas flux.

EOSM - ISO	100	200	400	800	1600
ADU	7,55	8	9,7	13,5	22,6
e ⁻	15,1	8	4,85	3,37	2,83

Table 1 : Bruit de lecture (~Johnson) de l' EOSM (~ 700D / 650D)

3.1.2 - Le bruit de grenaille

Il est lié au signal lui-même par la relation :

$$\text{Écart-type} = \sqrt{N}$$

Où N est le nombre d'électron accumulés et lus (sous forme de voltage) dans la photodiode. Ceci peut être interprété comme résultant du principe d'incertitude de la physique quantique. Le rapport signal bruit est donc de même \sqrt{N} . La distribution statistique du bruit de grenaille n'est pas gaussienne mais de Poisson. En fait dès qu'on a un nombre d'électrons important par rapport au bruit Johnson on peut assimiler cette distribution à une gaussienne. C'est ce que nous ferons ci-après.

Dans le cas d'un flux lumineux notable, le régime haut flux, ce bruit est vite dominant. A 100 e⁻ il domine déjà le bruit Johnson bas ISO !

3.1.3 - Combinaison des bruits aléatoires, optimisation du rapport signal/bruit :

L'amplitude des bruits aléatoires gaussiens est caractérisée par leur écart-type (valeur RMS, sigma). Quand des signaux bruités sont additionnés ou soustraits, ce qui se produit souvent dans nos calibrations (offset, dark, additions de séries d'images), leurs bruits se combinent en puissance, quadratiquement, soit :

$$B = \sqrt{B1^2 + B2^2 \dots} \quad \text{où } B, B1, B2 \dots \text{ sont les écarts-types des bruits.}$$

De ce fait dès qu'un bruit devient dominant, l'autre est rapidement négligeable. De même, du fait de leur combinaison quadratique, les bruits Johnson et de grenaille ne peuvent être éliminés. Leur combinaison résulte toujours en un accroissement du bruit suivant la racine carrée. Le signal utile croît linéairement donc il-y-a amélioration du rapport signal/bruit par l'addition d'image et l'allongement des poses.

3.1.4 - Réduction des bruits aléatoires :

La seule solution pour améliorer le SNR (rapport signal/bruit) est d'accumuler le plus possible d'électrons par pixel, le signal croissant plus vite que les bruits aléatoires. Ceci est obtenu d'abord, en régime bas flux, par l'ouverture de l'optique et/ou l'accroissement du temps de pose de chaque image. Quand le régime haut flux est atteint dans chaque image (bruit de grenaille dominant) il suffit d'augmenter le temps de pose cumulé des séries d'images, augmenter la durée unitaire n'est plus nécessaire, mais le gain est plus faible à partir de ce point. Il faut toutefois tenir compte d'une possible saturation d'éléments utiles de l'image.

La photographie utilise des filtres électroniques ou logiciels pour lisser les bruits dans les images. On ne doit pas les utiliser en photométrie ou spectroscopie car ils affectent aussi les données. En imagerie, sans objectif scientifique, il est envisageable d'en utiliser. Mais il est recommandé de ne le faire qu'à la fin du traitement, pour donner une touche finale à une image par ailleurs satisfaisante, ceci doit toujours rester mesuré.

Ce filtrage est dit "réduction de bruit haut ISO" dans la plupart des menus des APN. Normalement il n'est pas actif en mode RAW.

3.2 - Les bruits technologiques, textures fixes (FPN, Fixed Pattern Noises), calibration des images

Ils n'ont rien d'aléatoires, mais souvent présentent une texture ressemblant à celle des bruits aléatoires. Leur origine est technologique, et ils sont normalement permanents. C'est par exemple un pixel qui a un niveau de noir décalé (offset / bias) ou une sensibilité plus ou moins forte que la norme (flat), un courant de fuite (dark impulse)... Ces défauts peuvent être "enregistrés" suivant un processus spécifique et ensuite corrigés par un traitement approprié des données de l'image RAW (impossible dans le cas d'un enregistrement sRGB/Jpeg)

D'autres aspects comme le vignettage sont corrigés de la même manière bien que ne constituant pas à proprement parler un bruit ou en avoir l'aspect.

Ces opérations correctives se retrouvent généralement sous les vocables "pré-traitement", "pré-processing", "calibration des images"

3.2.1 - Offset / Bias / Décalages du niveau du noir :

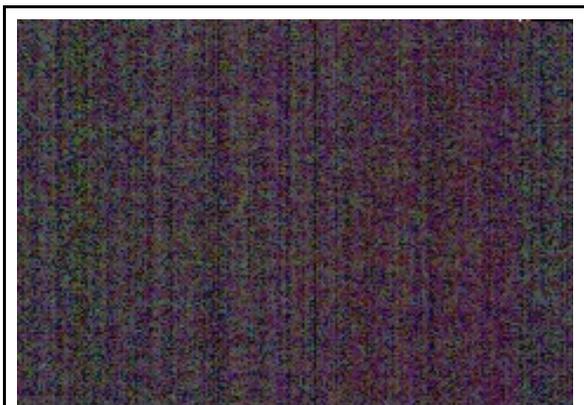


Fig 9 : Offset à 400 ISO, l'amplitude est très faible en fait, quelques ADUs.

C'est un décalage permanent du niveau du noir de chaque pixel. Il est en général très faible dans les capteurs actuels, totalement négligeable dans une image classique normalement exposée. Ces décalages suivent généralement la structure "colonne" du capteur, et moins la structure "ligne", voir la figure 9. Ces décalages peuvent devenir visibles dans certaines images à bas flux. Quand un traitement de courants d'obscurité (dark) classique est utilisé, les données d'offset y sont incluses. Donc un traitement d'offset séparé n'est pas utile. Le processus exact dépend de l'organisation du logiciel utilisé, consulter sa documentation (IRIS impose l'offset dans certains cas).

La texture d'offset est généralement éliminée en soustrayant de chaque images utiles un offset-maître. L'offset-maître est obtenu par empilage et moyenne de clichés pris dans l'obscurité absolue, de très courte exposition, au niveau ISO de l'observation à traiter. L'empilement d'images d'offset permet d'en réduire le bruit aléatoire qui autrement augmenterait le bruit des images du ciel. Un offset-maître peut être utilisé pendant des mois. La limite est le possible vieillissement de l'électronique.

Il est à noter qu'il existe des défauts similaires (bandes) dans les APN qui ne sont pas reproductibles d'image à image, donc plus ou moins aléatoires. Ils sont à des niveaux très bas (2~3 ADU) mais peuvent aussi apparaître dans le cas d'image à bas flux et traitement poussé. Cela est généralement dû à des signaux parasites induits par les circuits électroniques numériques dans l'électronique analogique très sensibles de la chaîne photométrique. On peut réduire ces bandes par des algorithmes spécifiques de traitement.

Certains caméra ont, un offset, un décalage systématique par conception. C'est un décalage fixe du codage du niveau de noir des données RAW. Il est souvent de 1024 ou 2048 ADU dans les APN Canon actuels. Ceci permet d'enregistrer les valeurs négatives de bruit gaussien et une certaine dérive négative du niveau de noir. Cette fonctionnalité est importante pour nos traitement (niveau du noir, mesure du bruit). Ce décalage, une constante, doit être soustraite avant d'appliquer des opérations non-additives (division par les "flats", par exemple). Ceci peut être réalisé en créant un faux flat-maître si la soustraction de constante n'est pas disponible.

3.2.2 - Pixel Chauds :

Ces pixels ne fonctionnent plus correctement, ne répondent plus, peuvent avoir un très fort courant d'obscurité, avoir une réponse non-linéaire... Ils sont souvent soit à un niveau de saturation ou à zéro. Ils ne peuvent pas être traités par les techniques de calibration usuelles. Quelques défauts de capteur sont tolérés à la périphérie des images, pas ou exceptionnellement en zone centrale. Le nombre de défauts définit une classe de qualité de ces produits, les meilleurs sont proposés à un prix élevé.

Le processus de correction des pixels chauds est rapide et efficace, il ne prend pas de temps d'observation. La technique consiste à préparer une table d'adresse de ces pixels. Ceux lumineux sont détectés dans un "dark" les sombres dans un "flat". En début de calibration d'image on remplace les données de ces pixels par une valeur interpolée des niveaux des pixels voisins. Le tableau de pixel chaud est utilisable pendant des mois, sa validité étant limitée par le vieillissement lent du capteur.

On peut en fait étendre ce processus très efficace au traitement de pixels ayant un courant d'obscurité élevé. Ceci peut être fait par le choix d'un seuil de décision "pixel chaud" adapté. Un niveau en ADU de 500 à 1000 à 100 ISO au-dessus du niveau du noir est un bon point de départ (camera 14 bits). L'idéal est d'utiliser l'histogramme d'un "dark" pour guider ce choix (voir ci-après).

3.2.3 - Courants d'obscurité des photodiodes / Dark currents :

Nous allons distinguer deux cas : le courant inverse d'obscurité "normal" qui existe dans toute diode et le cas de photodiodes présentant un défaut avec un courant d'obscurité largement supérieur à la spécification du capteur. Ces dernières sont celles dont les données sont habituellement traitées par le processus de "dark" mais nous verrons que les premières sont une vraie limite aux longues poses.

3.2.3.1 - Courants d'obscurité normaux :

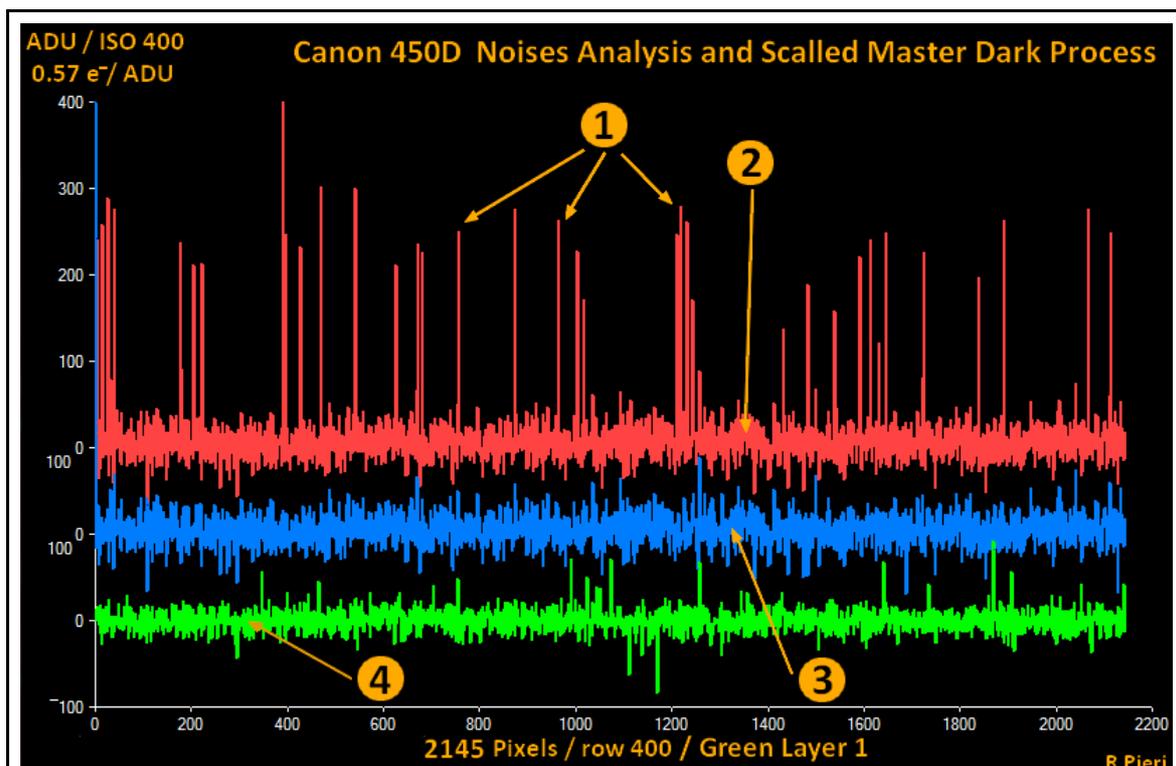


Fig 10: Bruits d'une image d'un 450D posée 5 minutes à chaud. En 1 on voit les impulsions de courant d'obscurité. En 2 les bruits aléatoires superposés. En 3 restent les bruits aléatoires après un traitement de dark adaptatif. En 4 on trouve le bruit aléatoire des mêmes pixels après une pose courte, le bruit plus que doublé en 3 est le bruit de grenaille du fond d'image de courant d'obscurité normal.

Dans un capteur d'image CMOS la photo-diode fonctionne sous un mode de polarisation inverse. Donc une tension positive est appliquée à sa cathode par rapport à l'anode. Le

courant de la source est bloqué (Fig 5, Vdd). Le courant est principalement celui des électrons utiles, libérés par les photons. Mais il y existe un autre courant faible qui s'additionne au courant utile, le courant d'obscurité inverse de la photodiode. Cette perturbation est faible 0.1 à 1 e⁻/s à 20°C, mais provoque une élévation générale du niveau du noir en longue pose. Cette élévation est proportionnelle au temps de pose mais augmente exponentiellement avec la température (double tous les 6~10°C). L'élévation du niveau du noir n'est pas visible en pratique car compensée par l'électronique de l'APN. Il ne reste dans nos images que le bruit de grenaille correspondant !

Une longue pose à 20°C avec une élévation de 10°C de l'ambiante du boîtier peut amener à un bruit de grenaille de l'ordre du bruit Johnson en une centaine de secondes (figure 10).

Les capteurs CMOS ont une dissipation de puissance très faible, mais la température ambiante interne de l'appareil est accrue par la dissipation du processeur. On atteint typiquement une élévation de 10°C après une heure de fonctionnement continu. C'est bien moins que les capteurs CCD, ces derniers nécessitent un refroidissement en longue pose.

Ultimement le refroidissement du capteur est la seule solution à ce problème.

3.2.3.2 - Impulsions de courants d'obscurité (dark pulses) :

Si chaque pixel est affecté par un faible courant d'obscurité bien défini, un petit pourcentage de ces pixels présente un courant d'obscurité bien plus élevé. Ceci est dû à divers défauts dans les matériaux de la photodiode. Ces pixels apparaissent dans les images comme des "impulsions" isolées dépassant du reste de l'image en particulier du fond du ciel (figure 10- 1). En astro-imagerie et spectroscopie ce phénomène est gênant soit du point de vue esthétique, soit quand à la qualité des données.

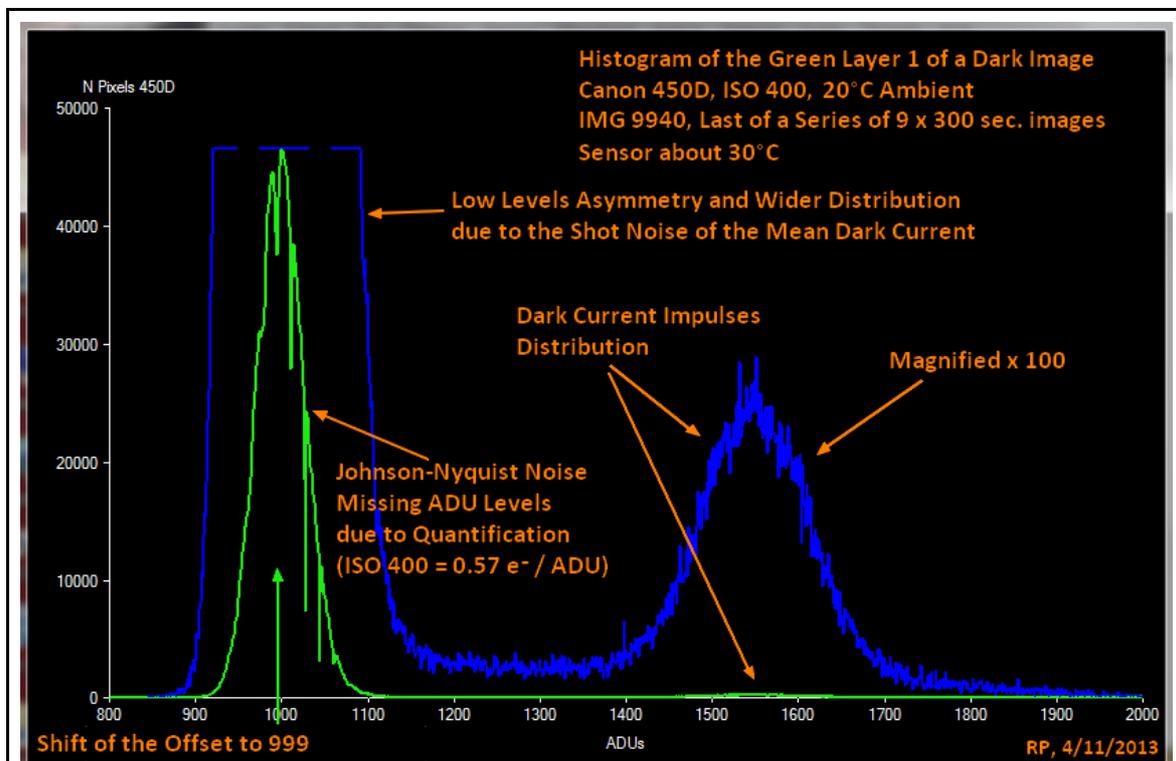


Fig 11 : Histogramme des bruits d'une image d'un 450D posée 5 minutes à chaud. En bleu on voit la distribution des impulsions de courant d'obscurité. La courbe verte est principalement du bruit gaussien mais on voit un décalage et une asymétrie due au courant d'obscurité normal et à son bruit de grenaille.

Dans un cas extrême de poses très longues il peut totalement masquer le signal utile (généralement pas notre cas, la pollution lumineuse nous limite bien avant).

Ces impulsions de courants d'obscurité ne sont pas mesurables dans les images instantanées. Elles sont juste en dessous des bruits aléatoires dans le cas d'APN récents, à 20 ° C et 20~30 secondes d'exposition. 2 à 5% des pixels sont typiquement affectés. L'empilement d'images prises sans guidage réduit également l'impact des impulsions de courant d'obscurité.

Comme dans le cas du courant d'obscurité normal, l'amplitude des impulsions croît proportionnellement au temps de pose et exponentiellement avec la température.

La correction de ces défauts se pratique classiquement comme la soustraction d'offset.

Les pixels impliqués sont les mêmes d'une image à une autre et l'amplitude des courants est y est assez reproductible. Les deux variables qui déterminent le niveau des impulsions sont le temps d'exposition et la température. Le temps d'exposition, d'intégration, est parfaitement connu et a un effet linéaire, mais la température interne des photodiodes est difficile à déterminer, d'autant que son effet est exponentiel.

3.2.3.3 - Réalisation des "dark-maîtres" :

Dans le processus classique, les images du noir doivent être prises lors de la séance d'observation, avec les mêmes paramètres que les images du ciel (ISO, temps d'exposition, température, toutes les fonctions de traitement internes de l'APN étant désactivées). Toute fuite possible de lumière dans l'appareil doit être éliminée (viseur ? ...)

Le nombre d'images du noir doit être suffisamment élevé pour éviter l'importation de bruit aléatoire dans les images du ciel. Si nous produisons N images noires avec un bruit aléatoire Nd , le bruit Nds après empilage et normalisation du dark-maître sera :

$$Nds = Nd / \sqrt{N}$$

- Ensuite, si une monture sans suivi est utilisée (trépied..), les bruits du dark-maître soustraits de chaque image ne seront pas corrélés dans l'image finale. Nds sera juste une augmentation du bruit aléatoire de chaque image. Si nous tolérons une augmentation du bruit de 10% dans l'images finale, le dark-maître devra compter 6 images du noir.
Si les poses sont courtes (10~20 s) à faible ISO et à température normale ou basse on peut très bien ne pas appliquer de processus de dark, voire utiliser le dark interne de l'APN ("réduction du bruit longue pose" des menus), ceci est d'ailleurs inévitable avec certains APN.
- Si un très bon suivi est utilisé (guidage sub-pixel) le bruit aléatoire du dark-maître sera corrélé dans la pile d'images du ciel. Le dark-maître devra comporter beaucoup plus d'images du noir. Pour une série de 5 images du ciel, 24 images noires sont nécessaires, pour 20 images c'est quelque 80 images du noir qui seront nécessaires !
- En cas de suivi précis au niveau de quelques pixels, nous devrions avoir seulement une corrélation partielle. Une bonne règle sera d'utiliser un nombre d' images du noir du même ordre que le nombre d'images du ciel.

Le point suivant à considérer est le fait que la température du capteur de l'APN n'est pas stabilisée, même si sa variation n'est pas grande. Ensuite, il est difficile de faire une série d'images du noir au même niveau de courants d'obscurité que les images du ciel. En hiver ou en été, la température peut être très différente de celle de stockage du boîtier. Avec l'échauffement propre du boîtier, variable en fonction de l'utilisation du processeur, ceci peut amener à une évolution imprévisible de la température des photodiodes. Une solution suffisante pour des poses de quelques minutes est de prendre la moitié des images du noir avant la série d'images du ciel et l'autre moitié après (figure 12).

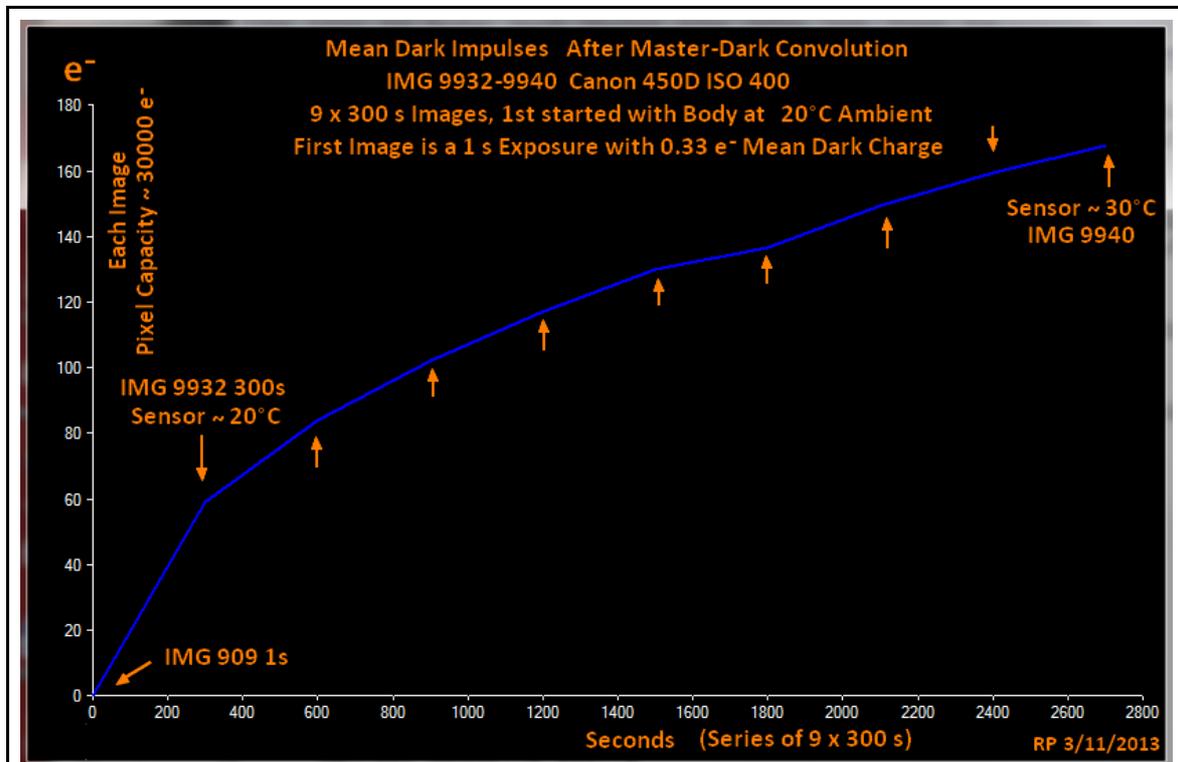


Fig 12: Évolution de l'amplitude moyenne des impulsions de courant d'obscurité au long d'une série de 45 minutes de longues poses, un "dark" fait en début ou fin de la série manquerait de précision.

Il existe des technique avancées, adaptatives, qui permettent une correction plus précise, sans avoir à réaliser de dark-maître à chaque observation.

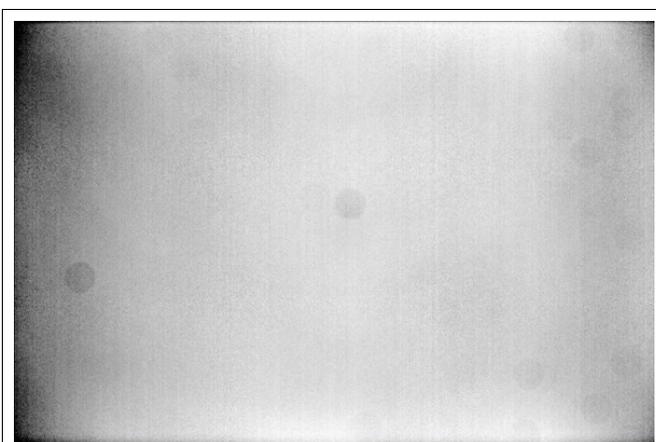


Fig 13 : Image de PLU/Flat dont le contraste a été poussé pour montrer le vignettage et les taches des poussières (M.Blackford)

3.2.4 - Non-uniformités de sensibilité instrumentale, (Flat, PLU...) :

Les défauts d'image technologiques précédents sont mathématiquement "additifs", ils viennent en addition des signaux utiles, ont les élimines en soustrayant aux images utiles des enregistrements séparés de ces mêmes défauts.

Nous allons maintenant considérer des défauts "multiplicatifs". Il s'agit de variations de sensibilité, ou gain de la chaîne électronique et optique, en diverses parties des images. Ce peut être

de pixel à pixel quand l'origine est électronique ou des variations plus ou moins monotones quand la cause est optique.

La correction s'effectue par une division et normalisation des signaux utiles par une carte de ces défauts. En Anglais ces cartes sont des master-flats, disons flat-maîtres.

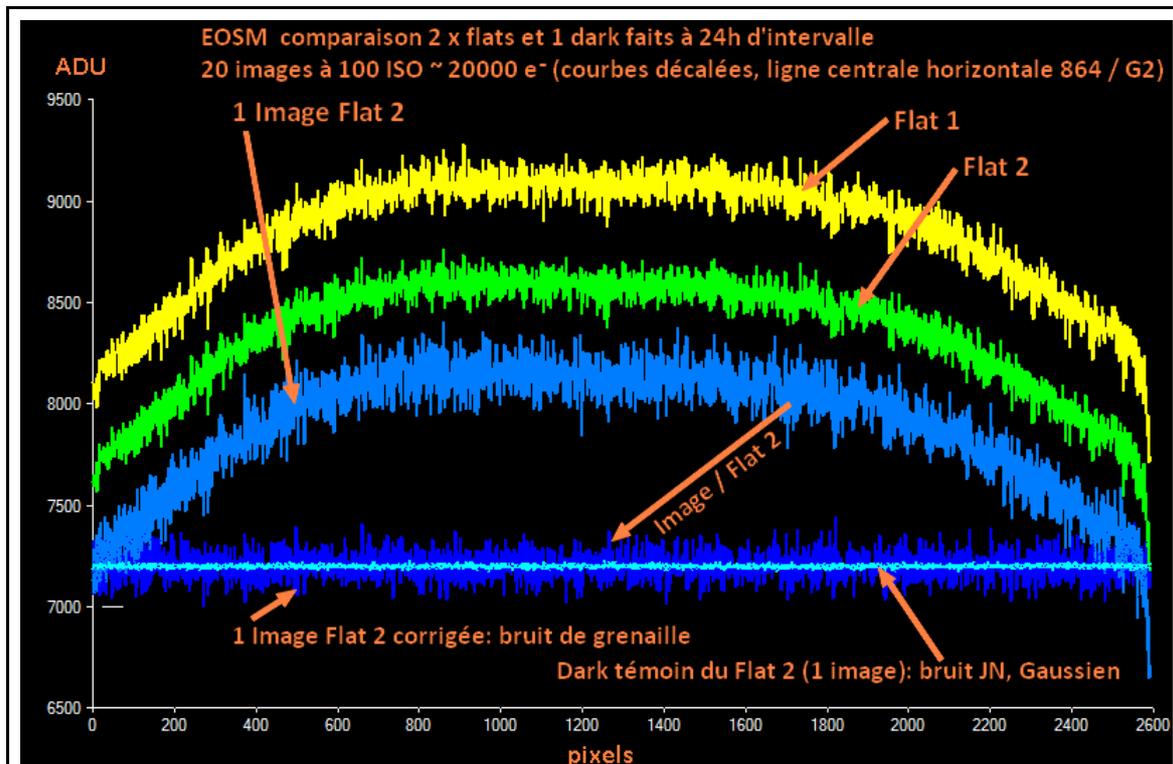


Fig 14 : Variation de sensibilité des pixels : deux flats réalisés à 24 h d' intervalle, ils sont identiques, le bruit aléatoire est négligeable. La variation de sensibilité pixel/pixel ressemble fortement à un bruit gaussien ! La courbe bleu est une seule image du flat 2, après division par le flat (en bleu foncé) elle montre le bruit de grenaille des 8500 ADUs (17000 e⁻). Pour comparaison le trait horizontal est le bruit d'un dark de la même série. Le bruit Johnson est totalement négligeable devant le bruit de grenaille du flat : régime haut flux. Les courbes sont décalées pour la comparaison.

3.2.4.1 - Défauts de sensibilité de pixel à pixel :

Il s'agit d'une variation de la sensibilité d'un pixel par rapport à ses voisins, donc du ratio ADU-par-photon arrivant sur ce pixel. Ce défaut apparaît comme un bruit superposé aux plages lumineuses, les figures 13 - 14 en montre un exemple. Cette variation de sensibilité pouvait être très importante au début de la technologie CCD, de l'ordre de 20% ! La division par un flat-maître était alors indispensable. Cette variation est d'environ +/-0.5% avec les capteurs actuels. Elle n'est pas visible en photo classique. En astronomie elle peut devenir critique dans des cas tels que la soustraction d'une plage lumineuse telle que le fond du ciel affecté d'une pollution lumineuse. Dans ce cas la texture fixe de cette variation de niveau se retrouve au niveau du noir tout comme le bruit de grenaille de la même plage.

3.2.4.2 - Effet des poussières :

Des poussières présentes dans le chemin optique peuvent significativement assombrir certaine zones de l'image. La taille de la tache sur le capteur dépend de l'ouverture du faisceau (F#) et de la distance de la poussière au capteur. Le contraste de la tache dépend du rapport d'obstruction de cette poussière et de la taille de faisceau. Les capteurs

d' APN sont scellés sous un empilement de filtres (Moiré, IR, IR+UV), la première surface où une poussière peut se déposer est à 3~4 mm du capteur. Pour une ouverture à F/4 il est peu probable qu'une poussière pose problème à ce niveau, dans un objectif il n'y a aucun risque. A F/30 (planétaire) c'est beaucoup plus critique.

Les taches dues aux poussières peuvent être réduites par l'application d'un flat-maître à condition qu'il soit préparé exactement dans la même configuration optique que l'observation, incluant la focalisation. Tout n'est pas corrigeable.

3.2.4.3 - Le vignettage :

C'est l'obscurcissement des bords et coins des images (figures 13 et 14). Il est dû essentiellement à l'obstruction partielle du faisceau lumineux, soit dans l'optique, les parois de la chambre de l'APN, le réseau de microlentilles du capteur... C'est en fait le plus critique des problèmes d'uniformité. Un objectif photo utilisé à pleine ouverture a souvent une obstruction de 40% en coin. Il est rare qu'un instrument n'est pas un obscurcissement de 10% en coin d'image. Ce problème est critique en photométrie stellaire et en spectroscopie. En imagerie un défaut de 10% monotone n'est pas visible mais pose problème quand il s'agit de soustraire un fort fond de ciel.

3.2.4.4 - Préparation des flat-maîtres :

C'est une opération assez délicate, en particulier quand on a besoin d'une bonne précision comme en photométrie et spectroscopie. En fait, il n'y a pas de solution parfaite, le principe même de la procédure de flat n'est pas optiquement exact. En imagerie il s'agit surtout de corriger les problèmes de grandes plages lumineuses et il n'y a pas trop de difficulté. En photométrie les flats de grande plages diffuses ne correspondent pas à l'uniformité de la lumière collimatée des étoiles.

Le principe consiste à photographier une surface blanche, très uniformément éclairée et elle-même ayant une réflectivité très uniforme (et Lambertienne...). L'éclairage doit être assez élevé pour permettre une pause courte au niveau ISO le plus bas. On évite ainsi les courants d'obscurité et on minimise le bruit de grenaille qui dans ce cas est largement dominant. On doit opérer à un niveau de l'ordre de 10000 ADU pour un APN 14 bits à 100 ISO.

Pour rendre le bruit de grenaille négligeable devant le bruit pixel/pixel il faut une pile d'environ 12 images. Il faut soustraire l'offset-maître et appliquer le traitement pixel-chaud. Les images de flat doivent être réalisées dans la configuration optique exacte des observations, incluant la focalisation.

Un bon flat-maître est utilisable tant que le vieillissement du capteur ne se fera pas sentir. La préparation logicielle des flat-maîtres fait généralement l'objet d'une procédure spécifique des logiciels d'astronomie, voir leur documentation.

3.3 - Calibration des images :

Une fois les images maître préparées la calibration des images du ciel (dite aussi pré-processing dans bien des logiciels) est simple. Il suffit généralement de donner le nom des fichiers et de lancer l'opération.

Normalement le logiciel :

- Demande le nom générique des différentes images (et le nombre)
- Charge et traite les images du ciel une à une
- Applique le traitement pixel chaud
- Soustrait l'offset-maître de l'image (peut être inclus dans le dark)
- Soustrait le dark-maître
- Divise l'image par le flat-maître et normalise le résultat en 16 bits
- Sauvegarde chaque image traitée en entiers 16 bits non-signés (IRIS : entiers 32 bits signés)

R.Pieri 4/2/2014