

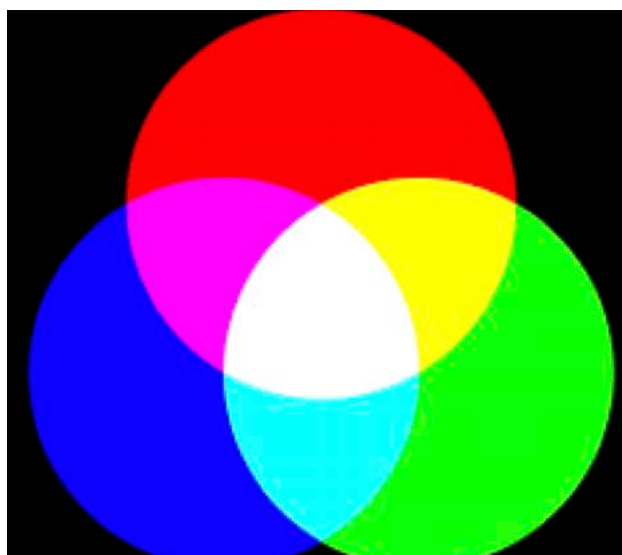
## Capture d'images en couleurs par un APN

sauvé dans T7Shield/CapteurAPN

Le reflex **Nikon D850 servira d'exemple**. Lancé fin 2017, il reste en 2023 troisième *ex aequo* au classement général DxO pour la qualité de son capteur dit *plein format* (23.9 mm x 35.9 mm), derrière deux capteurs dits *moyens formats*, ceux d'un Hasselblad (32 mm x 43.8 mm) et d'un Pentax (32.8 mm x 43.8 mm) *beaucoup* plus chers.



D850. On voit le miroir, pas le capteur ;-)



Synthèse additive des couleurs

Génération des couleurs par *synthèse additive* à partir du Rouge, du Vert et du Bleu (RVB).

Le capteur comporte des millions de photodiodes, les *photosites*, dont le but dans la vie est de recevoir et compter des photons.

On peut voir les photons comme des gouttes de pluie et chaque photosite comme un seau qui se remplit progressivement d'eau à partir du moment où l'obturateur s'ouvre.

Quand l'obturateur se referme, le seau renvoie un nombre entier positif qui correspond à la hauteur de l'eau qu'il contient.

Ce nombre ne correspond à la quantité d'eau reçue que si le seau n'a pas débordé. Quand le seau est plein tous les détails apportés par les gouttes d'eau suivantes sont perdus. Il y a *surexposition catastrophique*. Notons qu'une surexposition non catastrophique peut rester acceptable, par exemple dans le contexte de l'exposition à droite dont nous parlerons une autre fois.

**La surexposition catastrophique est plus grave que la sous-exposition.  
(Mieux vaut ne pas remplir le seau autant qu'on aurait pu que de le faire déborder.)**

Les pauvres photosites sont bien incapables de savoir la couleur des photons qu'ils recueillent. C'est pourquoi on place un filtre R, V ou B devant chacun d'eux, qui ne laisse passer que les photons rouges, verts ou bleus respectivement. On parle des *canaux* R, V et B.

La répartition des filtres colorés pour ces trois canaux correspond presque toujours à une *matrice de Bayer*.



Matrice de Bayer

L'image brute (le *fichier RAW*) est constituée de millions de nombres entiers (un par photosite). On doit la transformer pour pouvoir l'exploiter.

Transformer un fichier RAW en un fichier JPEG consiste à calculer, en chaque point noir de la figure précédente, la couleur et la luminosité qui résulte de la fusion additive des caractéristiques des photosites qui l'entourent.

Cette opération s'appelle le *dématriçage*.

Ces points noirs sont les *pixels* (pour *picture elements*).

Ne pas confondre les pixels (les éléments de l'image calculée) et les photosites (qui ont servi à calculer des pixels).

Pour un D850 ça fait 5 504 lignes de 8 256 pixels soit plus de 45 millions de pixels (Mpix). Il y a quatre photosites par pixel (1 R, 2 V et 1 B). Ça se traduit par de *gros fichiers* (en pratique,

jusqu'à 70 Mo par image avec une compression sans perte, sinon on monterait allègrement. Les *fichiers JPEG sont beaucoup moins gros* mais du coup moins souples d'utilisation.

**JPEG, moins lourds que les RAW, permettent moins de correction.**

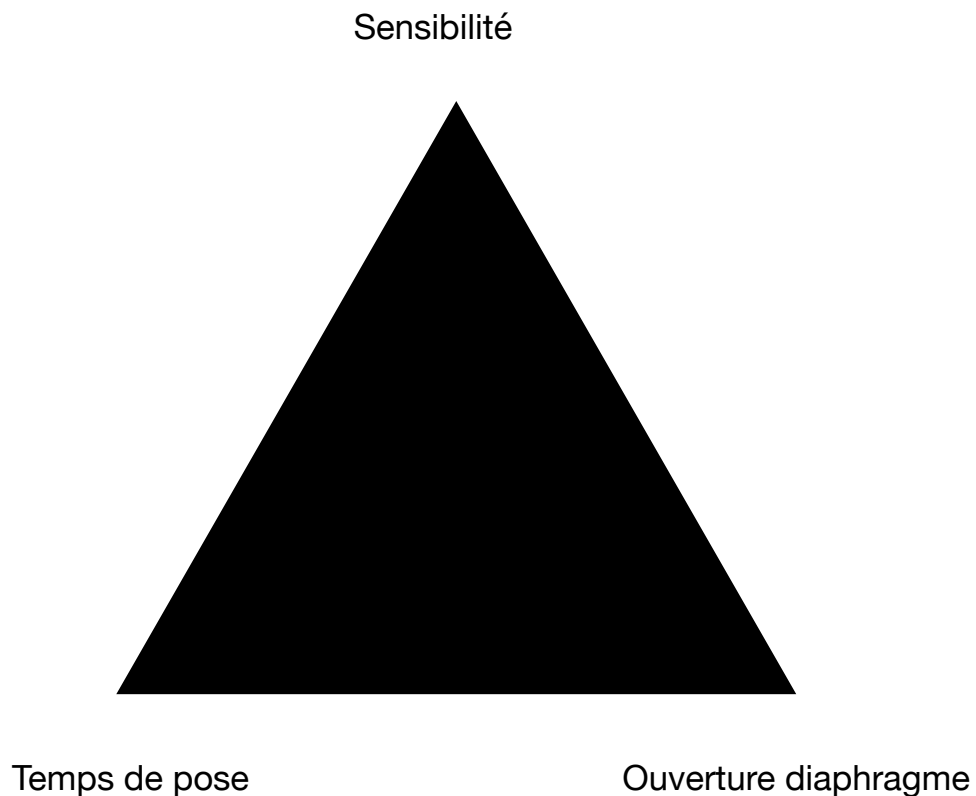
Un RAW est une image (presque) directe des signaux produits par le capteur, donc plus facile de

- corriger la balance des blancs,
- éclaircir les zones d'ombre,
- passer au noir et blanc en simulant l'effet de filtres colorés,
- ...

Cette facilité a un coût en terme de taille des fichiers.

Remarque ; les aperçus générés par l'appareil et qu'on peut voir sur l'écran arrière (ou sur le viseur d'un hybride) sont des JPEG. Les RAW on ne peut pas les voir.

Sur le fameux *triangle d'exposition*, le réglage de la sensibilité joue un rôle à part. Pourquoi ?



Quand on ouvre plus le diaphragme ou quand on augmente le temps de pose, on augmente le nombre des photons qui vont entrer dans les photosites. Quand on augmente la sensibilité, on augmente le gain des photosites mais pas le nombre des photons qu'ils auront reçus. Cela a des conséquences fondamentales en ce qui concerne la maîtrise du bruit numérique.

**La sensibilité n'a pas un rôle analogue au temps de pose ou à l'ouverture du diaphragme.**

## Du bruit dans la cuisine à RAW

Le bruit est ce qui va venir aléatoirement modifier le fichier RAW et se traduire par des pixels de luminosité ou de couleur bizarre lors de la fabrication du JPEG.

On distingue deux sortes de bruits : le *bruit de grenaille* et le *bruit électronique*. Ils ont le même effet sur l'image (ils la détériorent), mais pas les mêmes causes.

### Bruit de grenaille (shot noise)

Si on refait plusieurs fois la même photo, le nombre de photons que recevra un photosite donné variera de façon aléatoire. C'est une *propriété de la lumière, vraie quel que soit le capteur*. Si on met des seaux étroits sous la pluie (disons des tubes à essai), tous ne recevront pas le même nombre de gouttes d'eau. Plus la surface de l'ouverture des seaux sera grande et moins la fluctuation du nombre des gouttes reçues sera importante.

Supposons qu'on puisse refaire plusieurs fois exactement la même photo et qu'il n'y ait pas de bruit de grenaille. Un photosite donné recevrait alors toujours le même nombre de photons. Ce nombre est le *signal* qui nous intéresse. (Plus la luminosité est grande dans la zone de l'image concernée et plus ce signal est grand.)

En réalité ce qu'on observe c'est la somme du signal et du bruit de grenaille.

**Plus un photosite reçoit de photons (de lumière), et tant que le « seau » ne déborde pas, plus l'effet du bruit de grenaille devient négligeable (on améliore le rapport signal à bruit).**

C'est dans les parties de l'image les plus sombres qu'on voit le plus l'effet du bruit de grenaille (rapport signal à bruit défavorable).

Pour minimiser cet effet, il faut maximiser le rapport signal à bruit en augmentant la quantité de lumière captée.

On peut jouer sur

- la taille des photosites (suppose de changer d'appareil photo)
- l'éclairage de la scène,
- l'ouverture du diaphragme,
- le temps de pose,

[Mais **PAS sur la sensibilité** (qui ne change pas le nombre de photons reçus). Au contraire *faire monter les ISO diminue la dynamique = l'écart de luminosité entre les parties les plus claires et les plus sombres sur lesquelles il reste des détails*]

C'est ce qui justifie le concept d'*exposition à droite* (ETTR), dont nous parlerons une autre fois.

## Bruit électronique

Contrairement au bruit de grenaille qui est dû aux propriétés de la lumière, ce bruit est créé par la caméra, et en particulier par son capteur. C'est surtout là qu'un capteur de qualité fait la différence.

Avec certains appareils, mieux vaut laisser les ISO au niveau de base (64 ISO pour un D850) et compenser le manque de luminosité en post-production. On parle d'*ISO invariance*.

Pour d'autres, mieux vaut monter les ISO sur la caméra.

Dans les deux cas ça revient à augmenter un gain mais l'effet sur le bruit peut être différent.

Pour le D850, le problème est traité ici :

<https://www.dpreview.com/reviews/nikon-d850/9>

En résumé, le *D850 n'est pas ISO invariant* (il fait mieux).

À partir de 400 ISO il utilise un autre amplificateur de signal qui donne d'encore meilleures performances que si on restait à 64 ISO (*dual-gain amplification*).

Tout se passe donc comme si on avait *deux ISO de base*, et ça pourrait suggérer la stratégie suivante :

- quand il y a assez de lumière pour que la sensibilité requise soit inférieure à 400 ISO, *bloquer la sensibilité à 64 ISO* et compenser éventuellement en post production,
- quand il y a moins de lumière, *bloquer la sensibilité à 400 ISO* pour enclencher le second gain et compenser éventuellement en post production.

En pratique, je ne m'embarrasse pas de tout ça car les résultats sont déjà excellents en adaptant la sensibilité à chaque image, mais ça mériterait une petite expérimentation.

## Trois caractéristiques fondamentales d'un capteur

- son nombre de pixels (*résolution*),
- la finesse avec laquelle il distingue les couleurs (*color depth*),
- l'écart de luminosité entre les parties les plus claires et les plus sombres sur lesquelles il reste des détails exploitables (*dynamique*).

À sa sensibilité de base (64 ISO, *record du monde*), le D850 a les caractéristiques suivantes :

- *color depth* > 26 bits. Ça veut dire que le nombre de couleurs qu'il est capable de distinguer est supérieur à  $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2$  où 2 apparaît 26 fois. C'est un nombre gigantesque (plus de 67 millions) et notre œil est bien incapable d'en faire autant mais il peut être utile pour le traitement de l'image.
- *dynamique* environ 14,8 IL/EV. Ça veut dire qu'on passe de la luminosité la plus sombre à la plus claire en multipliant la luminosité presque 15 fois par deux. Comme si un temps de pose passait d'une seconde à environ huit heures...

[IL = Indice de Luminance = EV = *Exposure Value* en anglais. Chaque fois qu'on *double* la quantité de lumière reçue, on augmente l'IL d'*une unité*]

Le capteur offre ses meilleures performances à sa sensibilité de base.

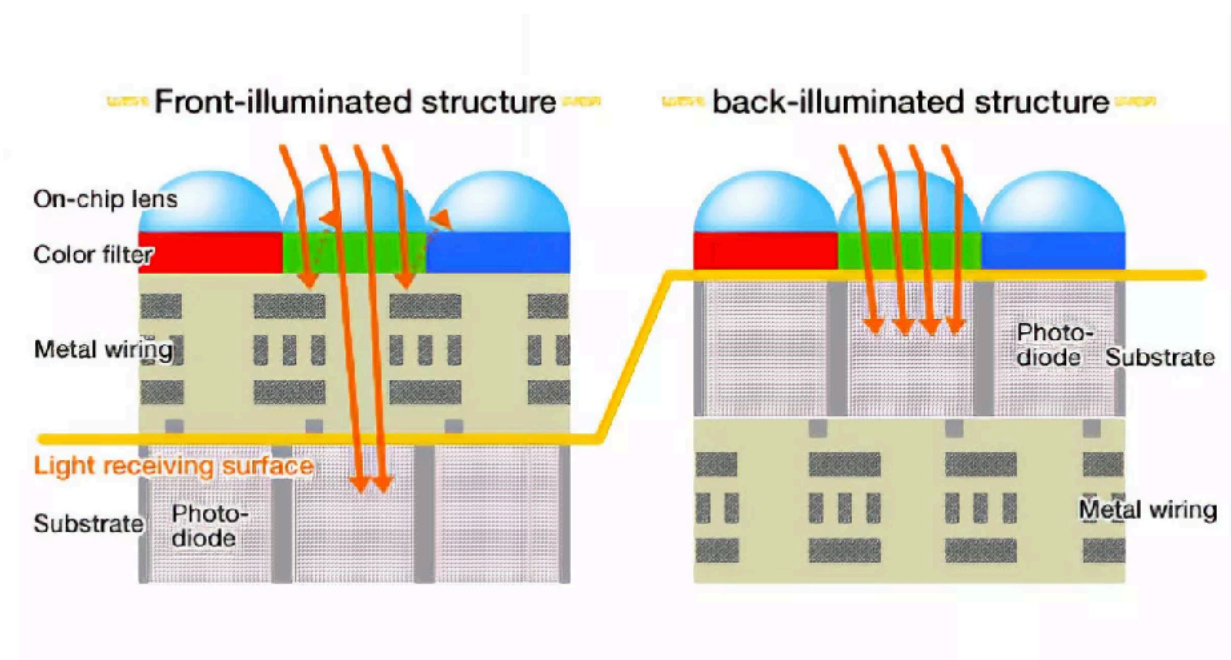
Chaque fois qu'on double la sensibilité on perd un IL de dynamique.

Si le capteur a une dynamique de 14 IL à 64 ISO, elle ne sera plus que de 10 IL à 1024 ISO (on a multiplié la sensibilité quatre fois par 2).

## Obsession des concepteurs de capteurs

Faire rentrer le plus de photons possible dans les photosites.

Le capteur du D850 est un *BSI* (*Back Side Illuminated*), ce qui augmente la quantité de lumière qui atteint les photosites en mettant le câblage derrière.



Back illuminated sensors effectively reverse the photo-diode and wiring layers so that the wiring doesn't get in the way of the light coming in. (Image credit: Sony)

Principe du capteur BSI

## Problème du moirage

Vous avez peut-être remarqué comment des tissus fins repliés sur eux-même peuvent faire apparaître de beaux motifs changeant avec les déplacements des plis de l'étoffe on parle de *moiré*.

Les capteurs numériques à l'organisation périodique confrontés à de sujets présentant des trames périodiques peuvent subir des effets similaires. Pour les éviter, on plaçait traditionnellement au dessus du capteur un *filtre anti-repliement (antialiasing)*, qui venait flouter (un peu) l'image.

Quand Nikon a pensé supprimer ce filtre, il n'a pas osé le faire sans tester les clients potentiels. Ainsi le D800 (lancé en 2012) avait un tel filtre tandis que le D800E a été muni d'un filtre supplémentaire qui venait annuler l'effet du premier pour simuler l'absence de filtre.

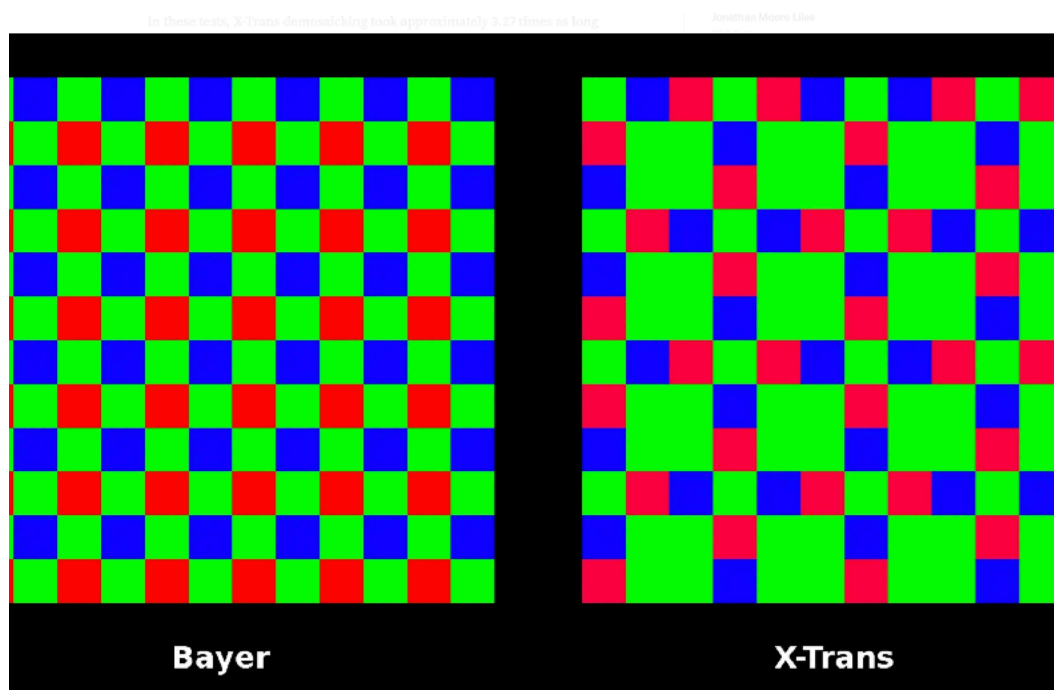
C'était une usine à gaz, et dès le D810 (lancé en 2014) Nikon a choisi son camp et supprimé ce filtre. Il en est de même pour le D850 (lancé en 2017).

- Avantage : plus grande netteté des images.
- Inconvénient : risque de moirage qui demande alors un traitement spécifique en post-production pour l'éliminer. Après des dizaines de milliers d'images le moirage est un problème que j'ai vraiment *très* rarement rencontré (quelques photos tout au plus).

Dans ces appareils les plus récents, PENTAX a lui aussi supprimé le filtre anti-repliement mais donne la possibilité d'en simuler les effets par déplacement du capteur durant la prise de vue.

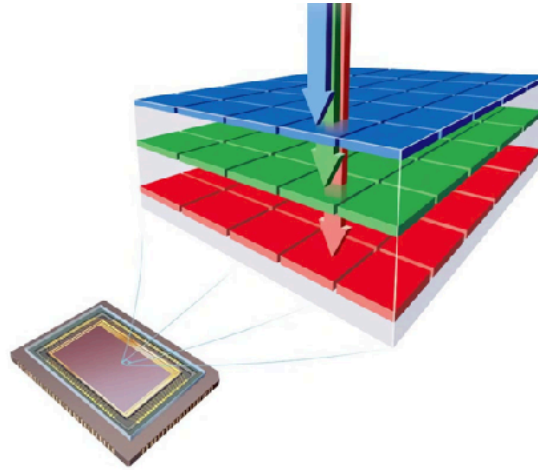
## Variantes

Fuji propose sur certains de ses appareils des capteurs dits X-Trans, avec une matrice de couleurs différente de celle de Bayer. L'idée est de diminuer le risque de moirage.



Capteur Fuji X-Trans

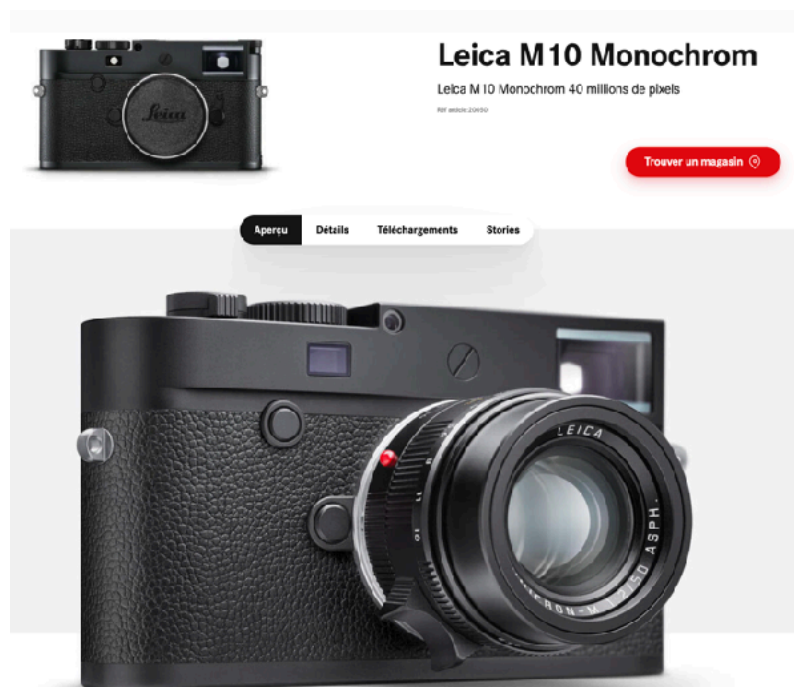
**Sigma** propose sur certain de ses appareils des capteurs Foveon, dont les filtres des trois couleurs de base sont superposés. Il n'y a plus de décalage entre les positions des photosites et des pixels.



Capteur Foveon

**Pentax** propose d'utiliser des poses multiples avec micro-déplacements du capteur pour obtenir des informations colorimétriques en chaque pixel (ne marche que pour des sujets immobiles).

**Leitz** propose des caméras monochromes (!)





## En résumé

La surexposition catastrophique est plus grave que la sous-exposition.

Ne pas confondre photosites (seaux) et pixels (points de l'image).

Tous les photosites sont identiques (aux filtres R, V ou B près).

Le RAW décrit l'état des photosites, le JPEG celui des pixels.

JPEG, moins lourds que les RAW, permettent moins de correction.

La sensibilité n'a pas un rôle analogue à la vitesse ou l'ouverture.

Plus le capteur reçoit de lumière et meilleur est le rapport signal à bruit (tant que les « seaux » ne débordent pas).

## Bibliographie

La plupart des liens qui suivent sont malheureusement en anglais. La bonne nouvelle, c'est qu'il existe DeepL, un traducteur phénoménal. Il vous suffit d'ouvrir

<https://www.deepl.com/fr/translator>

Et de coller votre texte en anglais dans la fenêtre de gauche pour voir sa traduction dans la fenêtre de droite. Il peut y avoir quelques erreurs mais cette traduction est en générale excellente.

<https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>

<https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/bit-depth.htm>

<https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/dynamic-range.htm>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Raw\\_image\\_format](https://en.wikipedia.org/wiki/Raw_image_format)

<https://www.dxomark.com/nikon-d850-sensor-review-first-dslr-hit-100-points/>

<https://www.dxomark.com/Cameras/>

<https://www.dpreview.com/articles/8189925268/what-s-that-noise-shedding-some-light-on-the-sources-of-noise>

<https://www.dpreview.com/articles/0388507676/sources-of-noise-part-two-electronic-noise>

<https://www.dpreview.com/reviews/nikon-d850/9>