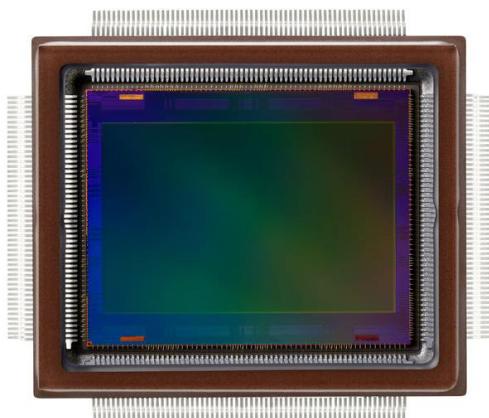


Sommaire

Sommaire	1
1 - Généralités.....	2
2 - La taille des capteurs.....	2
Le 24x36.....	2
L'APS-C.....	3
Le Micro 4/3.....	4
Les plus petits capteurs.....	4
3 - Le nombre de pixels.....	4
4 - La taille des photosites.....	4
5 - CCD et CMOS.....	5
6 - La lecture des photosites	5
7 - La matrice de Bayer	6
8 - Le dématriçage	7
9 - Le rendement quantique.....	8
10 - La linéarité des capteurs	8



1 - Généralités

La surface sensible d'un appareil photo est son capteur.

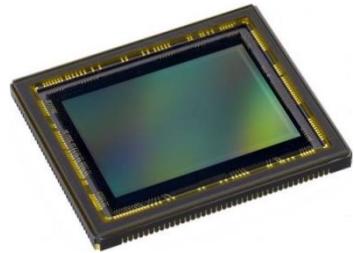
Du temps révolu de l'argentique, la surface sensible était la pellicule photographique, conditionnée sous forme de ruban flexible en plastique (polycarbonate), enroulé dans une bobine, et recouvert d'une émulsion contenant des produits chimiques sensibles à la lumière (des sels d'Argent).

Une fois toute la longueur de l'émulsion exposée à la lumière, il fallait replacer une autre pellicule dans l'appareil.

Aujourd'hui, la surface sensible est électronique. Elle est rigide, et est formée par la juxtaposition de millions d'éléments électroniques sensibles à la lumière, appelés « *Photosites* ».

La grille ainsi constituée est régulière, contrairement à l'émulsion photographique, où les éléments chimiques sensibles étaient répartis aléatoirement.

Dans l'appareil photographique numérique (APN), le capteur électronique est inamovible. Une fois exposé à la lumière, les informations sont transmises à une mémoire informatique, et le capteur est de nouveau disponible pour une autre photographie.



2 - La taille des capteurs

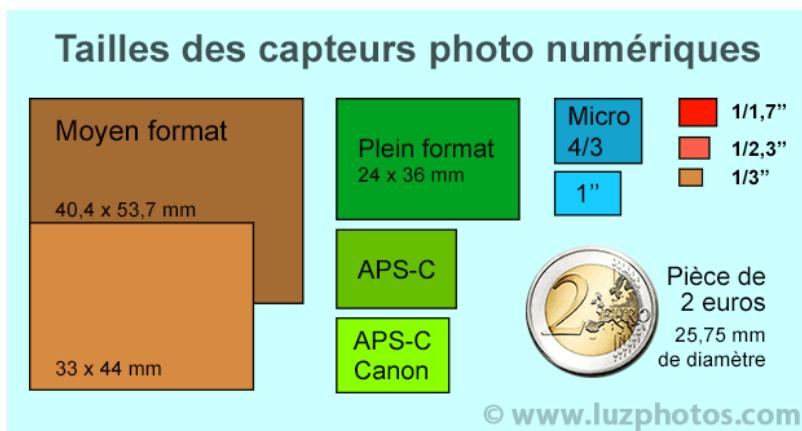
Les pellicules argentiques les plus répandues étaient au format 24x36, soit 24mm de large et 36 mm de long.

La bobine faisait 35 mm de large, perforations comprises. Ce format (appelé 35mm ou 24x36) était une référence.

Aujourd'hui, les tailles des capteurs numériques sont légions.

Mais le format 24x36 reste une référence, même si ce format équipe les appareils plutôt de haut de gamme.

La taille d'un capteur va déterminer certaines caractéristiques de l'appareil et le rendu des images. Nous y reviendrons.



Cette illustration montre quelques tailles de capteurs.

À commencer, à gauche, par le moyen format (qui existait aussi avec l'argentique), et qui reste l'apanage des professionnels, au vu de son coût.

Nous n'en parlerons pas ici.

Le 24x36

La taille des capteurs commence avec le format 24x36, ou « plein format » (full frame en anglais). Il est réservé à l'heure actuelle (le domaine évolue rapidement !) aux appareils reflex de haut de gamme, quoique certains hybrides en soient équipés.

Le rapport longueur/largeur (rapport L/W) fait 3/2 (la longueur est 1,5 fois plus grande que la largeur).

Le 24x36 est le format de référence, nous verrons pourquoi par la suite.

L'APS-C

(Advanced Photo System type C)

Ce capteur assez grand (mais plus petit que le 24x36) est courant dans les réflex de bas et surtout moyenne gamme et dans certains hybrides.

Chez Nikon, Sony, Pentax, Fuji, l'APS-C fait 23,6 x 15,7 mm. Rapport L/I = 1,5.

Chez Canon, l'APS-C est un peu plus petit : 22,2 x 14,8 mm. Rapport L/I = 1,5.

À noter que Canon et Leica avaient commercialisé dans les années 2000 un capteur **APS-H** (27,8 x 19 mm). Ils ont aujourd'hui pratiquement disparu, mais la marque Sigma l'utilise aujourd'hui dans l'un de ses boîtiers.

Ce format (comme les autres plus petits) donne un angle de champ plus petit que le plein format 24x36. C'est comme si l'on ne capturait que la partie centrale de l'image donnée par le plein format, comme si l'on agrandissait cette image plein format.

Cette caractéristique définit un « **coefficient de conversion** » pour les distances focales des objectifs.

Ce coefficient permet, à partir de la focale réelle de l'objectif, de calculer la focale équivalente donnant la même image au format 24x36. Il n'est fonction que des dimensions du capteur. C'est en fait le rapport des dimensions du capteur à celui du 24x36. Il est de 1,5 (36/23,6) chez Nikon, Sony... et de 1,6 (36/22,2) chez Canon.

Par exemple, sur un APS-C Canon, un objectif de 300 mm sera l'équivalent d'un objectif de 480 mm avec un capteur 24x36.

Cet avantage des longues focales devient un inconvénient pour les courtes focales. Un objectif grand angle de 24 mm de focale en 24x36 se transforme en objectif de 38 mm en équivalent 24x36 avec un APS-C Canon, ce qui n'est plus vraiment un grand angle.

Ce coefficient détermine l'angle de champ du capteur avec un objectif donné.



Nous avons vu précédemment que la taille d'un capteur agit sur la profondeur de champ de l'image résultante. Deux images du même champ pris avec une focale de 480 mm en 24x36 et avec une focale de 300 mm en APS-C Canon verront la même scène, même cadrage, mais la profondeur de champ sera plus petite avec le 24x36. Cette profondeur de champ réduite permet de mieux isoler un sujet par rapport au fond et à l'avant plan de la photo.

La « *focale normale* » d'un appareil est celle qui donnera un champ à peu près équivalent à celui de nos yeux. Elle correspond approximativement à la diagonale du capteur en mm. Pour le 24x36, cette diagonale fait 43 mm. Pour un APS-C, elle sera de 27 à 28 mm.

Un point important concernant les reflex à objectifs interchangeables :

Un objectif calculé et optimisé pour le format APS-C sera plus petit qu'un objectif calculé et optimisé pour le 24x36.

L'image projetée sur le capteur APS-C aura un diamètre plus petit et ne sera pas utilisable avec un appareil équipé d'un capteur 24x36 !

Le Micro 4/3

Ce format équipe les compacts à objectifs interchangeables ou les hybrides de marque Panasonic, Kodak et Olympus.

La longueur du capteur est de 18 mm et sa largeur est de 13,5 mm, soit un rapport L/I de $1,33 = 4/3$, d'où son nom. Ce rapport n'est plus homothétique avec le 3/2 des 24x36 ou des APS-C.

Ces appareils sont peu encombrants. D'une part du fait de leur capteur plus petit, mais aussi en l'absence de miroir et de pentaprisme des reflex.

Le coefficient de conversion est de 2. Un objectif de 300 mm rend le même cadrage qu'un objectif de 600 mm en 24x36.

Les plus petits capteurs

Ils sont très nombreux. Leur avantage est leur petitesse et l'encombrement des appareils, mais les inconvénients sont de taille : rendu faible de l'image, mauvaise tenue aux fortes et moyennes sensibilités, bruit important car les photosites sont très petits, profondeur de champ énorme (cela peut être un avantage, mais ne permet pas d'isoler un personnage par exemple)...

Leurs performances limitent leur utilisation aux scènes largement éclairées et aux petits agrandissements. Ils sont très répandus, car peu coûteux. Ils donnent des images satisfaisantes dans les conditions favorables.

Il existe des capteurs encore plus petits que ces plus petits capteurs. Ce sont ceux des téléphones portables.

3 - Le nombre de pixels

Le pixel est un raccourci pour parler de « Picture Element », élément d'image en français. Il ne faut pas confondre photosite et pixel.

Le photosite est un élément du capteur.

Le pixel est un élément de l'image donnée par le capteur.

Dans les caractéristiques d'un APN, on trouve le nombre de pixels. Par exemple, tel boîtier fournit des images de 16 millions de pixels (16 MPix), tel autre 21 millions de pixels (21MPix). Cela veut aussi dire que le capteur utilise 16 ou 21 millions de photosites pour générer une image. Le capteur est plus grand que cette valeur affichée, car il contient des photosites servant à lire l'image (voir le chapitre 5).

Plus le nombre de pixels d'une image est grand, plus sa résolution est forte, plus les détails visibles sont fins. Mais nous verrons par la suite que ce nombre de pixels ne fait pas à lui seul la qualité d'une image, loin s'en faut.

Et en premier lieu, il faut aussi tenir compte de la taille des photosites.

4 - La taille des photosites

Cette taille a un impact direct sur la qualité de l'image. Plus les photosites sont grands, plus ils sont capables de capter la lumière. Les photosites sont carrés et leur taille se mesure en microns (μ).

Dans un capteur 24x36 de 16 Millions de photosites, un photosite individuel sera plus grand que sur un capteur APS-C de 16 millions de photosites. Il captera plus de lumière et sera plus efficace. L'image sera de meilleure qualité.

La montée en sensibilité d'un capteur est en fait une amplification électronique du signal d'origine. Ce signal comportant du bruit, il sera amplifié également. Plus la sensibilité affichée sur l'appareil est grande, plus le bruit est présent.

Avec de plus grands photosites, le bruit est plus faible. Il augmente considérablement avec des photosites plus petits. Ceci explique que les capteurs comportant de grands photosites sont moins bruités que ceux faits avec des photosites plus petits.

En d'autres termes, à haute sensibilité ISO, les appareils à petit capteur seront plus bruités que les appareils à grand capteur.

5 - CCD et CMOS

Deux technologies de capteurs numériques existent. Le CCD (Charged Couple Device) et le CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Les deux premiers appareils numériques étaient équipés de capteurs CCD. Mais rapidement la technologie CMOS a pris le dessus.

Le CCD a une meilleure sensibilité à la lumière et un bruit plus faible que le CMOS. Mais ce dernier est plus rapide, moins énergivore, et a une dynamique plus élevée.

Aujourd'hui, le CCD est plus particulièrement adapté au cinéma, et le CMOS à la photo. Mais le CCD est meilleur en vidéosurveillance, et en astrophotographie du ciel profond, du fait de sa meilleure sensibilité et de son faible bruit.

La très grande majorité des appareils photo possède un capteur CMOS.

Les deux technologies utilisent l'effet photoélectrique qui transforme la lumière en courant électrique. Plus précisément, un photon de lumière génère un électron. Un photosite emmagasine ainsi les électrons en fonction directe de son éclairement.

6 - La lecture des photosites

La différence entre les deux technologies se situe au niveau de la lecture du contenu des photosites.

Dans un CCD, le contenu des photosites est lu ligne après ligne.

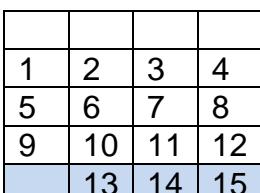
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Voici une partie d'un capteur ne comportant que 16 photosites numérotés de 1 à 16. Les 4 cases du bas vont servir au transfert du contenu en électrons des 16 photosites. C'est le registre de lecture (en bleu clair).



1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

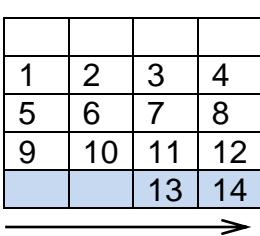
Une fois la photo prise, le contenu des photosites 13 à 16 descendant dans le registre de lecture. Puis les 9 à 12 descendant d'une case, ainsi de suite jusqu'à libérer entièrement la première ligne.



1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Le contenu du photosite 16 est décalé vers la droite et amplifié. La valeur obtenue, analogique, est convertie en valeur numérique pour être stockée en mémoire.

16



1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
		13	14

Puis c'est au tour du photosite 15 à être vidé en mémoire, puis au 14 et ainsi de suite jusqu'à vider et mémoriser toute la ligne du registre de lecture.

15

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12

Lorsque toute la ligne est vidée, la ligne suivante (9 à 12) descend, puis celle du dessus, jusqu'à libérer la deuxième ligne.
Le travail d'amplification et de mise en mémoire reprend avec le photosite 12, puis le 11...

La séquence est interrompue lorsque toutes les lignes et tous les photosites de chaque ligne sont amplifiés et mémorisés. La grille est ainsi vierge et peut accueillir de nouveaux électrons (une nouvelle image).

Dans la réalité, et pour accélérer encore la lecture de l'image, le registre de lecture est constitué de plusieurs lignes, et les photosites sont lus en parallèle sur chacune de ces lignes.

Dans un CCD, le contenu en électron d'un photosite est amplifié individuellement à chaque sortie du système. Dans un CMOS, chaque photosite possède son propre amplificateur, ce qui simplifie grandement les opérations et les accélère. Ceci explique la rapidité du CMOS.

D'autre part dans un CCD, toute la surface du photosite est utilisée pour capter les photons et les transformer en électrons. Dans un CMOS, une partie est dédiée au traitement du signal. À la sortie d'un photosite, c'est un courant électrique qui est directement exploitable. Toute la surface du photosite n'est donc pas dédiée à la réception des photons. Cette différence technologique explique la supériorité du CCD en termes de sensibilité.

7 - La matrice de Bayer

Chaque photosite reçoit des photons en fonction de l'éclairage de la scène photographiée. Le rôle du capteur est de transformer ces photons en courant électrique exploité judicieusement pour recréer la scène.

Mais chaque photosite reçoit une quantité de lumière indépendamment de sa couleur. La surface du photosite est sensible à toutes les longueurs d'ondes de la lumière reçue, donc à toutes les couleurs.

L'image obtenue en fin de compte est en noir et blanc.

La matrice de Bayer sert à reconstituer une image en couleurs.

Monsieur Bryce E. Bayer (1929-2012), ingénieur américain de la société Eastman Kodak, a inventé ce système très ingénieux, qui fut breveté en 1976.

Cette matrice est composée d'autant de filtres colorés qu'il y a de photosites sur le capteur. Elle est positionnée devant le capteur.

Toutes les couleurs que captent nos yeux peuvent être reconstituées en dosant correctement du bleu, du vert et du rouge. C'est le principe de la trichromie.

La matrice de Bayer utilise cette faculté. C'est une mosaïque de filtres de ces trois couleurs.

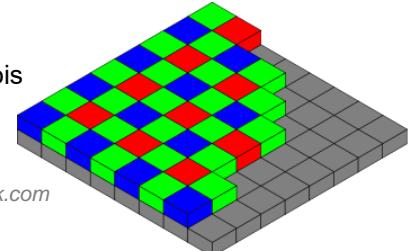


Illustration : andrewkrysiek.com

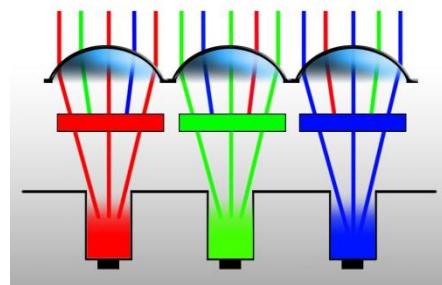


Illustration : posepartage.fr

Chaque filtre de la matrice est placé devant un photosite, et ne laisse passer que sa couleur. Par exemple, le filtre bleu absorbe le rayonnement vert et le rouge, ne laissant passer que le bleu.

Ce que reçoit le photosite placé derrière est la quantité de photons bleus. Il est représentatif de la quantité de bleu dans cette minuscule partie de l'image.

Il en est de même pour les filtres rouges et verts.

Une matrice de Bayer possède 50% de filtres verts, 25% de bleus et 25% de rouges. Le groupe élémentaire de la matrice est un carré de 2×2 soit 4 filtres. Un bleu, un rouge et deux verts. Ce motif est répété autant de fois qu'il est nécessaire pour couvrir tous les photosites du capteur.

Pourquoi plus de vert que de rouge et de bleu ? Tout simplement parce que notre œil est plus sensible au vert qu'aux autres couleurs. Au passage, nous pouvons noter que l'œil s'est adapté au rayonnement du Soleil qui nous éclaire. Il émet justement plus de lumière verte que des autres couleurs.

Mais alors, me direz-vous, nous ne connaissons le bleu d'une image qu'un photosite sur quatre ! De même pour le rouge, et un photosite sur deux pour le vert.

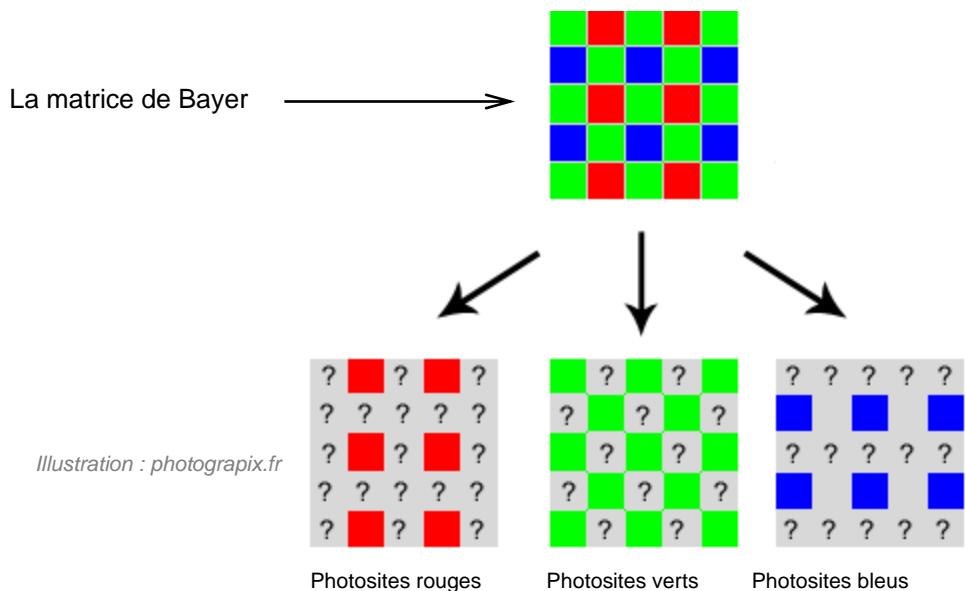
C'est exact. Mais une astuce permet d'y remédier.

8 - Le dématriçage

Cette astuce s'appelle le « *dématriçage* », ou « *débayerisation* », ou « *dérotisation* ». C'est en quelque sorte le « *développement* » de l'image, pour reprendre le terme utilisé naguère en argentique.

Le dématriçage est la première phase du traitement du signal brut issu de la lecture du contenu des photosites d'une image.

Il consiste à évaluer les couleurs manquantes de chaque photosite.



Prenons par exemple un pixel situé sous un filtre rouge. Nous connaissons sa valeur en rouge mais pas en bleu ni en vert.

L'opération de dématriçage consiste à « calculer » le contenu en vert et en bleu manquant. Ce calcul est une moyenne pondérée du contenu des photosites adjacents.

De fait, chaque marque d'appareil pondère à sa façon, en utilisant les photosites plus ou moins éloignés, et en tenant compte du contexte du photosite.

L'algorithme utilisé est le secret de fabrique de la marque. C'est lui qui fait la différence entre deux modèles différents, même s'ils sont équipés du même capteur.

On voit bien que le nombre et la taille des photosites d'un capteur n'est pas suffisant pour obtenir une image de qualité. La méthode de dématriçage est tout aussi importante, sinon plus.

L'algorithme de dématriçage ne fait pas que calculer les valeurs de couleurs manquantes. Il traite aussi la réduction du bruit selon la sensibilité affichée, l'accentuation de l'image (sa netteté), l'équilibre de ses couleurs, son contraste, sa luminosité, gère le moirage, et j'en passe...

Après ces traitements, l'appareil fournit un fichier appelé JPEG (Joint Photographic Experts Group).

Ce type de fichier est prêt à l'affichage, et donnera le même rendu sur un écran d'ordinateur, sur une télévision, sur un téléphone ou une tablette. Le JPEG permet aussi la compression (réglable) de l'image, c'est-à-dire la réduction de son encombrement en mémoire, moyennant une perte plus ou moins importante de sa qualité. C'est un format très utilisé.

Certains appareils permettent d'enregistrer des fichiers image « RAW ». Ce terme signifie que les données issues de chaque photosite sont brutes, non traitées. Le RAW est en fait la combinaison, après calcul des couleurs manquantes dans un logiciel spécialisé, des images rouges, vertes et bleues. Les traitements complémentaires cités plus hauts sont faits par le photographe, en s'aidant de logiciels dédiés, comme Photoshop, Lightroom, Paint Shop pro, Capture NX (chez Nikon), DPP (chez Canon), DxOphotolab, Photofiltre, Faststoneviewer, ACD See...Comme on peut le voir, ces logiciels de dématricage et de traitement d'image sont très nombreux.

9 - Le rendement quantique

Le rendement quantique d'un capteur est le taux de conversion des photons en électrons. Avec un rendement de 100%, 100 photons généreront systématiquement 100 électrons.

Le rendement théorique d'un capteur électronique est de 99,9%, ce qui est presque parfait.

La réalité est moins efficace. La matrice de Bayer absorbe certains photons, même de sa couleur. Les filtres ne sont pas rigoureusement sélectifs, et l'électronique génère des anomalies. Dans un appareil photo numérique grand public à capteur CMOS, le rendement quantique du capteur plafonne à 60%, et varie selon la couleur.

Les capteurs des appareils dédiés à l'astronomie, équipés en CCD, atteignent et dépassent les 80% de rendement quantique.

Les capteurs professionnels de haut de gamme peuvent atteindre et dépasser les 90% de rendement quantique. À noter que le rendement d'une émulsion photographique (taux de conversion des photons incidents en grains d'argent développables) ne dépassait pas 15% pour les meilleures !

10 - La linéarité des capteurs

Qu'il soit CMOS ou CCD, un capteur numérique a une réponse linéaire.

Les émulsions argentiques avaient l'inconvénient de voir leur sensibilité chuter drastiquement lors des poses dépassant la seconde. Autrement dit, au bout de quelques minutes, l'émulsion ne capte plus de lumière !

Un capteur numérique n'a pas cet inconvénient. Même au bout de 10 mn, 30mn, 1h de pose ou plus, le rendement quantique reste le même. C'est un énorme avantage pour les applications professionnelles et pour l'imagerie astronomique, qui utilise des poses de cet ordre.

JP. Maratrey - septembre 2018