

Club Georges Méliès - Chambéry

Fiche Technique N° 2

ACQUISITION DE L'IMAGE COULEUR

Jean-Pierre GOUDARD

Révision du 11/01/2017

SOMMAIRE :

Acquisition de l'image photographique.	02
1 - Les signaux.	02
1 - 1 Qu'est-ce qu'un signal.	02
1 - 2 Différentes sortes de signaux.	02
2 - Numération.	02
3 - Convertisseur Analogique/Numérique.	03
4 - Fonctionnement simplifié d'un APN. (Appareil photo numérique)	04
5 - Acquisition de la couleur.	06
5 - 1 L'Acquisition.	06
5 - 2 Rudiments de Dématriçage.	07
5 - 2 - 1 Interpolation par copie de pixels	08
5 - 2 - 2 Interpolation bilinéaire	08
5 - 2 - 3 Interpolation par convolution	09
6 - Autres capteurs.	10
6 - 1 Le super CCD SR de Fuji.	10
6 - 2 Le FOVEON de Sigma.	11
6 - 2 - 1 Le Fonctionnement	11

Acquisition de l'image photographique.

1 - Les signaux.

1 - 1 Qu'est-ce qu'un signal.

Un signal est une grandeur physique variable porteuse d'informations. Ces informations doivent être décryptées pour délivrer le message du signal. Ainsi, l'enregistrement sonore d'une parole prononcée en allemand porte évidemment un message, mais nous Français devons connaître la langue allemande pour la décrypter. Pour tous signaux, il faudra décrypter le message pour en connaître le contenu.

1 – 2 Différentes sortes de signaux.

1 – 2 – 1 Signaux analogiques.

Nous sommes habitués par nos sens à des signaux analogiques, c'est-à-dire des signaux où l'intensité de la modulation est, à tout instant t , proportionnelle à l'intensité du signal. La transmission la copie l'enregistrement ou le traitement de ce signal entraînera toujours une perte de qualité.

1 – 2 – 2 Signaux numériques.

Le signal numérique est matérialisé par des niveaux de tension successifs qui ne peuvent avoir que deux valeurs différentes, représentées par les chiffres **1** et **0**, seuls chiffres utilisés dans le système de numération à base 2.

2 - Numération.

En numération décimale, les nombres sont composés de chiffres. Ces chiffres sont la plus petite unité d'information et peuvent prendre les 10 valeurs entières de 0 à 9

En numération binaire les nombres sont composés de bits qui sont l'équivalent des chiffres. Ces bits ne peuvent prendre que deux valeurs entières 0 ou 1. Ainsi : Un nombre d'**1** bit peut représenter deux valeurs ($2 \times 1 = 2^1$) : 0 ; 1. Un nombre de **2** bits peut représenter quatre valeurs ($2 \times 2 = 2^2$) : 00 ; 01 ; 10 ; 11. Un nombre de **n** bits peut représenter 2^n valeurs.

Les tableaux ci-joints explicitent les conversions nombre décimal vers nombre binaire et nombre binaire vers décimal.

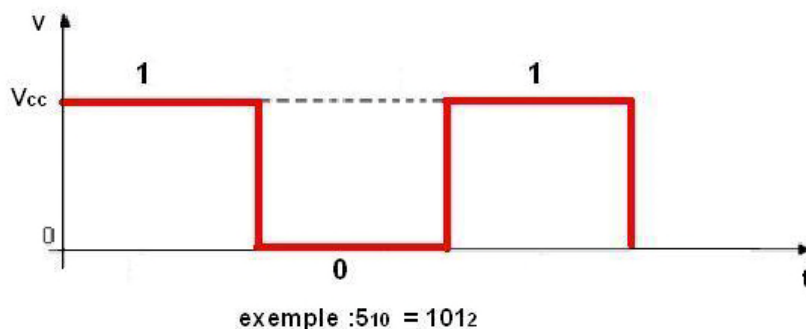
CONVERSION Nombre Décimal => Binaire										
		2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
On soustrait du nombre N à convertir, la plus grande puissance de 2, On fait ensuite pareil avec les restes,		256	128	64	32	16	8	4	2	1
Nombre Décimal N à convertir: N ₁₀ =	211		128	64		16			2	1
Reste 211 -128 =			83							
Reste 83 -64 =				19						
Reste 19 -16 =						3				
Reste 3-2 =									1	
Reste1 -1 =										0
Nombre Binaire N converti: N ₂ =	11010011		1	1	0	1	0	0	1	1

CONVERSION Nombre Binaire => Décimal										
		2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
		256	128	64	32	16	8	4	2	1
			x	x	x	x	x	x	x	x
Nombre Binaire N à convertir: N ₂ =	11010011		1	1	0	1	0	0	1	1
			=	=	=	=	=	=	=	=
Nombre Décimal N converti: Somme de la ligne N ₁₀ =	211		128	64	0	16	0	0	2	1

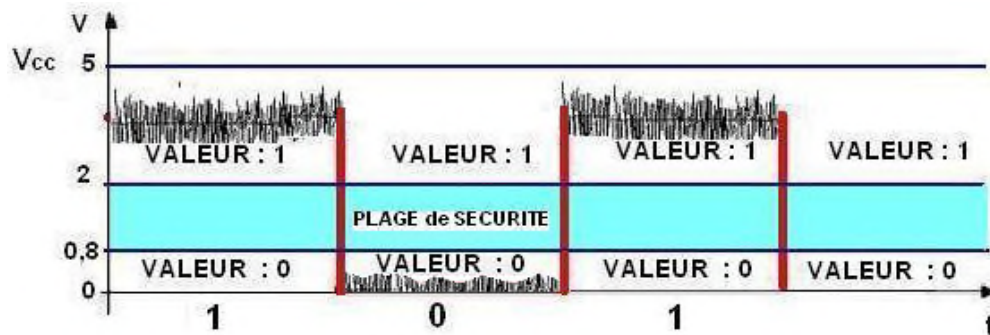
3 - Convertisseur Analogique/Numérique.

La numérisation d'un signal constant par un convertisseur consistera à évaluer la grandeur de ce signal et de calculer un nombre binaire composé uniquement des chiffres 0 et 1 correspondant à son évaluation. Cette émission se traduit par un signal formé par une série d'impulsions électriques reconnaissables par l'électronique des microprocesseurs.

Par convention, la valeur "1" est attribuée à la tension d'alimentation V_{cc} , la valeur "0" à la masse ou à l'alimentation zéro. Ainsi, la grandeur analogique représentée par le nombre décimal 5 se traduira par le nombre binaire 101 ($5_{10} = 101_2$) représenté par le signal ci-contre.



En fait, les valeurs de tensions de reconnaissance des niveaux "0" et "1" sont fixées par la technologie employée. Ainsi, la technologie TTL demande une alimentation du circuit en 5 V continu. Pour avoir une bonne discrimination des deux niveaux, on affectera la valeur "1" à une plage de tension variant de 2 V à 5 V et la valeur "0" à une plage de tension variant de 0 V à 0,8 V.



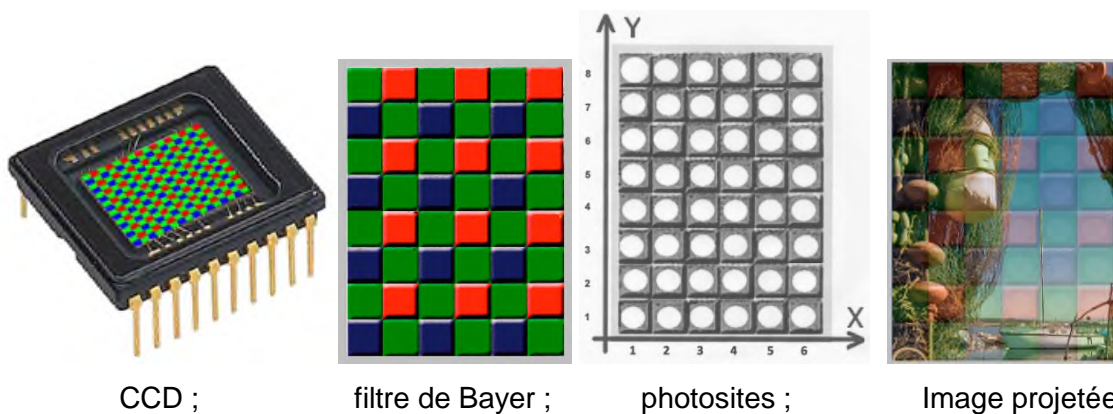
Sur ce graphe, les signaux bruités n'empêcheront pas la reconnaissance des niveaux «0» et «1» par le système. C'est une des forces du numérique.

Remarque générale : contrairement aux signaux analogiques, la copie, la transmission le traitement ou l'enregistrement de ce signal n'entraîneront pas une perte de qualité.

4 - Fonctionnement simplifié d'un APN. (Appareil photo numérique)

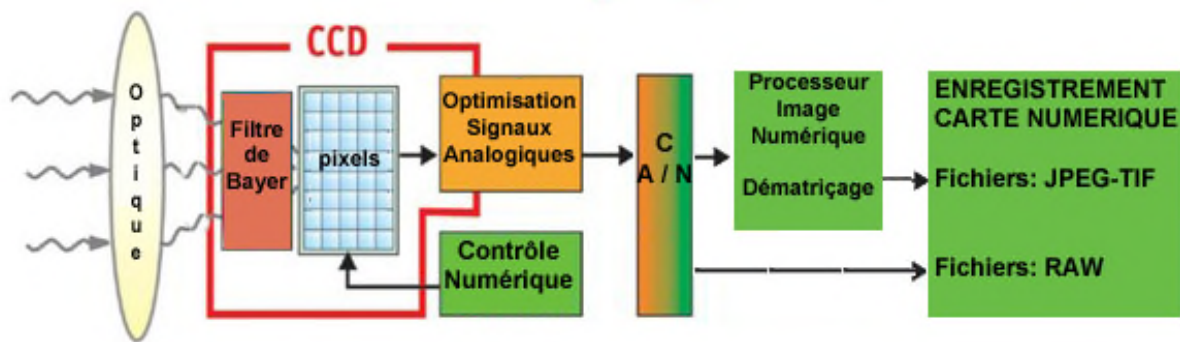
Lors de la prise de vues, au déclenchement, de l'appareil photo, la lumière réfléchiée par la scène photographiée pénètre dans l'appareil photo. Elle sera focalisée par l'optique d'entrée sur le capteur numérique **CCD** (Charge Couple Device = Dispositif à transfert de charge) **ou CMOS** (Complementary Metal-Oxyde Semiconducteur) placé au plan focal. Les rayons lumineux traverseront l'optique d'entrée, un filtre pour neutraliser l'infrarouge car les capteurs sont sensibles à cette longueur d'onde, un filtre passe-bas destiné à éviter les moirages, un filtre antipoussière s'il y a lieu et contre le capteur le filtre de Bayer.

Dans ces deux technologies 1 pixel = 1 photosite.



Le capteur est constitué par des photosites, incluant chacun une photodiode, qui réagissent à la lumière et produisent chacun une charge électrique proportionnelle à la quantité de photons qu'ils reçoivent. Chaque photosite carré est surmonté d'une microlentille qui est chargée d'augmenter le captage des rayons obliques lumineux. Ils sont disposés les uns à côté des autres et forment un plan rectangulaire où les coordonnées X, Y définissent la position du photosite.

Pour un CCD, ces charges vont être envoyées vers un module d'optimisation des signaux analogiques. Cette amélioration concerne les paramètres de la balance des blancs, de la correction du gamma, de la colorimétrie (Profil ICC), de la réduction du bruit et de l'accentuation, puis de celui-ci vers un convertisseur analogique numérique (CAN).



Pour un CMOS, ces charges seront traitées individuellement au niveau de chaque photosite afin de sortir aussi en données numériques.

Dans les deux cas, on obtient à la sortie les données numériques brutes de la future image.

Elles ont une certaine profondeur de bits (12,14) qui détermine le nombre de niveaux (4096,16384) de mesure de la luminance pour chaque couleur primaire (R, V, B).

Dans le cas de prise de vues en JPEG, ces données seront ensuite envoyées, en interne, à un processeur d'images contenant un logiciel "Maison" de traitement du signal numérique. Elles seront dématricées afin de donner les trois informations de chrominance pour la totalité des photosites. Ce traitement en interne optimisera par ailleurs les paramètres du développement de l'image, enfin ces données seront enregistrées en tant qu'image JPEG ou TIF sur une carte mémoire de l'appareil.

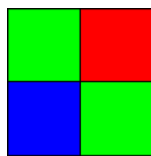
Dans le cas de prise de vues en Raw, ces mêmes données brutes seront stockées sur une carte mémoire afin de pouvoir être traitées par un logiciel de conversion externe à l'appareil photo qui s'appelle "dérawtiseur" et qui permettra de développer l'image à partir de son fichier.

5 - Acquisition de la couleur.

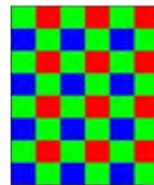
5 – 1 L'Acquisition.

Dans cette technologie 1 photosite du capteur correspondra après dématricage à 1 pixel de l'image et un seul. Les photosites du capteur produisent chacun des tensions proportionnelles au nombre de photons qu'ils reçoivent. Ils donnent les informations de luminance en niveaux de gris. Ces capteurs, logés côte à côte dans un rectangle aux dimensions connues, peuvent être repérés par leurs coordonnées cartésiennes X et Y. Leur coloration C dépend des attributs de luminance des trois couleurs primaires qui lui sont affectés : $C=f(r,R,v,V,b,B)$.

Pour cela, un **filtre de Bayer** de même dimension que le capteur est placé sur celui-ci. Ce filtre composé de filtres élémentaires aux couleurs des trois primaires rouge verte bleue va permettre de récupérer les indications monochromatiques de chrominance pour chaque photosite. En effet, un point de coordonnées X, Y définit un photosite du capteur associé à un filtre de couleur de la mosaïque de Bayer. Cette mosaïque contient 25 % de filtres rouges, 25 % de filtres bleus et 50 % de filtres verts. Ceci afin de se rapprocher au maximum de la sensibilité de l'œil humain à la lumière verte. Ce filtre de Bayer est constitué par une mosaïque obtenue par la répétition du motif de Bayer sur l'ensemble des photosites du capteur.



Motif de Bayer

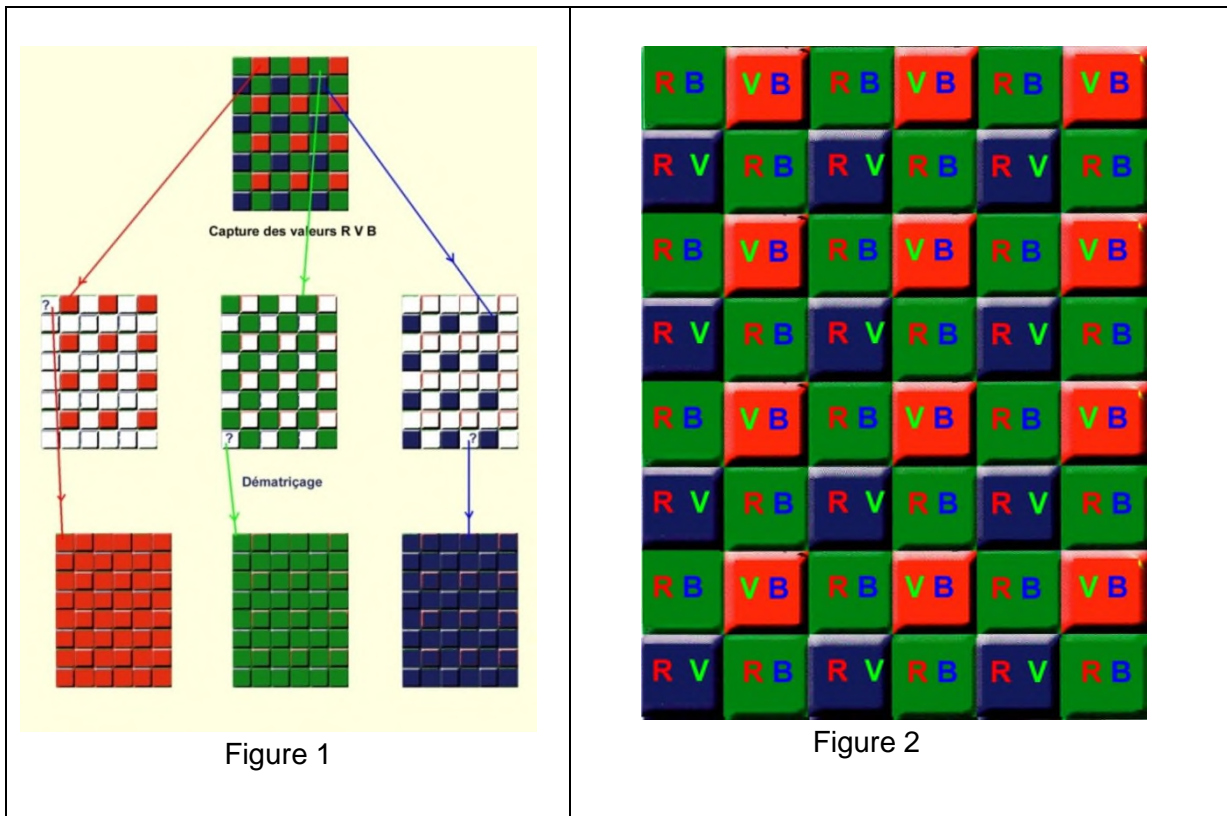


mosaïque de Bayer

À partir de cette construction géométrique du filtre, les attributs des différentes couleurs primaires des photosites de l'image ne seront pas entièrement connus. Chaque photosite et le filtre coloré qui lui est associé donneront une seule valorisation de chrominance (rouge, vert ou bleu) alors que le photosite doit contenir les informations des trois couleurs primaires. L'attribut rouge $r(R)$ ne valorise que 25 % des photosites du capteur de même pour l'attribut bleu $b(B)$. L'attribut vert, $v(V)$ ne valorise que 50 % des photosites du capteur. (Figure 1)

Ce qui veut dire que l'on ne connaît pas les deux tiers des attributs de couleur des photosites de l'image captée.

En conclusion chaque photosite comportera une seule valorisation de chrominance d'une couleur primaire et une seule sur 3. Pour connaître sa couleur, il faudra calculer les 2 autres valeurs manquantes de chrominance, R-V ou R-B ou V-B (Figure 2).



C'est l'opération de dématriçage qui fait ce travail, grâce à l'algorithme propriétaire du fabricant de l'APN qui évalue les attributs colorés de chaque pixel à partir d'un bloc de pixels voisins. On obtiendra alors une information complète sur les valeurs de luminances $r(R), v(V), b(B)$ de tous les photosites du capteur

5 – 2 Rudiments de Dématriçage.

La couleur d'un photosite est donnée par la somme des niveaux de luminances des trois couleurs primaires R, V, B. Or, la mosaïque de Bayer ne donne qu'une information de luminance (composante R par exemple). Il faudra alors calculer les deux autres informations manquantes de luminance (V et B). Cette opération de calcul s'appelle le dématriçage.

Le principe est de regarder aux alentours du photosite, dont la valeur de luminance R est connue, les valeurs de luminances V et B des pixels l'entourant afin de déterminer, par un algorithme d'interpolation approprié, les composantes V et B du pixel P_i . De nombreux algorithmes ont été développés selon deux approches différentes :

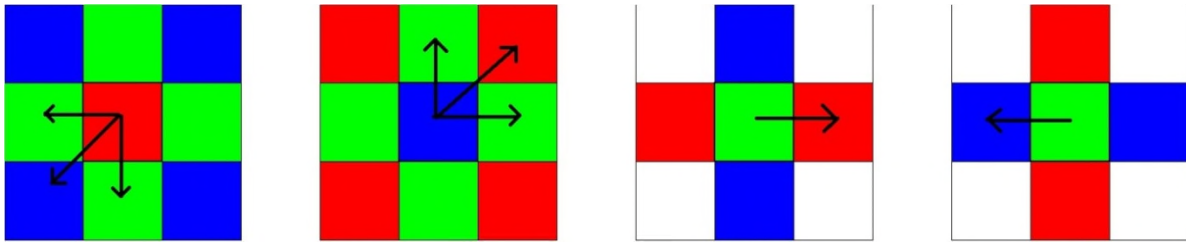
- **Les algorithmes adaptatifs** s'adaptent à l'image en calculant les informations manquantes de luminance de façon différente selon le contenu de la zone traitée de l'image, (textures, contours, fort contraste, ...). Ils sont employés par les logiciels comme PhotoZoom Pro ou Genuine fractals.

- **Les algorithmes non adaptatifs** calculent toute l'image avec le même algorithme. Ils sont en général employés par les logiciels de retouche d'images. Nous expliquons ici les plus simples.

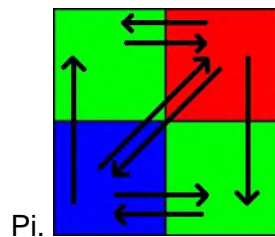
5 – 2 - 1 Interpolation par copie de pixels.

C'est la méthode la plus simple. Son algorithme recopie les composantes manquantes de couleur du pixel par les mêmes composantes de couleurs d'un pixel voisin.

Dans un souci de rationalisation de la recopie des composantes, on ne fera interférer celles-ci que sur les pixels avoisinants selon les schémas ci-dessous.



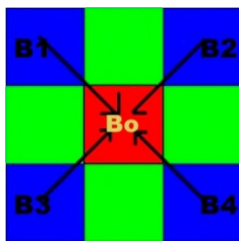
Elle est rapide, mais génère de nombreux artefacts. La qualité n'est pas au rendez-vous. Ci-dessous un motif de recopie itérative des composantes constituées par une matrice rectangulaire de 2 x2 Pixels.



5 – 2 - 2 Interpolation bilinéaire.

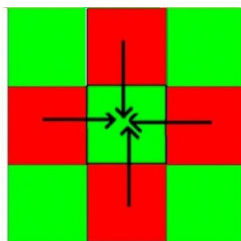
C'est une méthode simple. Son algorithme quantifie les composantes de couleurs manquantes du pixel central Pi, dans un rayon de 1 pixel (carré de 3X3 pixels), en calculant la moyenne sur les 2 ou 4 pixels voisins de ces mêmes composantes de couleurs. Selon la position du pixel central dans la matrice image, on utilisera une interpolation suivant :

2 axes différents (Bilinéarité) ou 1 axe unique horizontal ou vertical (linéarité).



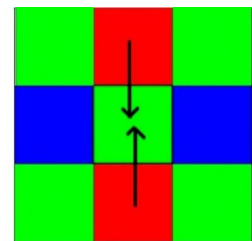
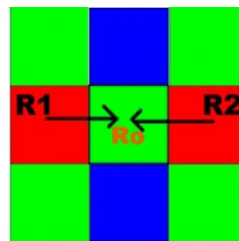
Valeur composante bleue

$$Bo = (B1+B2+B3+B4) / 4$$



Valeur composante rouge

$$Ro = (R1+R2) / 2$$



La méthode d'interpolation bilinéaire est peu complexe, mais elle introduit du flou, des Effets de moiré et des artefacts de couleurs.

150	0	140	0	125	0	0	145	0	130	0	115	0	0	0	0	0	0
0	130	0	130	0	112	0	0	0	0	0	0	140	0	130	0	111	0
125	0	120	0	115	0	0	125	0	120	0	107	0	0	0	0	0	0
0	110	0	105	0	95	0	0	0	0	0	0	120	0	110	0	100	0
115	0	110	0	105	0	0	110	0	105	0	100	0	0	0	0	0	0

- Filtrer les trois matrices avec les masques respectifs de convolution CR, CV, CB qui tient compte du fait que l'itération fait aussi une convolution sur les pixels de luminance connue, d'où la valeur 4 pour le pixel central de ces matrices. (Voir FT N°4 paragraphe 4)

CR = CB

CV

	1	2	1
R = B = 1/4 x	2	4	2
	1	2	1

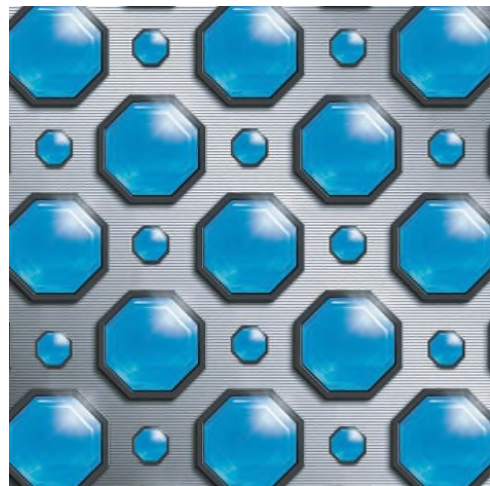
	0	1	0
V = 1/4 x	1	4	1
	0	1	0

Conclusion : Il faut se rappeler que le dématricage consiste à reconstituer les pixels de l'image à partir du tiers des informations de chrominance. Il n'y a pas de solutions-miracles mais simplement des meilleures et des moins bonnes en fonction du travail à réaliser.

6 - Autres capteurs.

6 - 1 Le super CCD SR de Fuji.

Fuji a essayé d'améliorer la dynamique des capteurs. Ses travaux de recherche ont abouti à la conception d'un capteur où les photosites sont dédoublés en une grande photodiode et une petite photodiode. Les hautes intensités lumineuses seront mesurées par la petite photodiode, les autres étant prises en compte par la grande photodiode. On multiplexera ces deux signaux afin d'obtenir une plus grande dynamique pour les signaux de luminance. Cela se traduira par des hautes lumières plus détaillées et des basses lumières plus précises.



6 – 2 Le FOVEON de Sigma.

Il a été Imaginé par Richard Merrill, ingénieur chez le fabricant de capteurs Foveon, racheté par Sigma qui bénéficie depuis d'un droit d'exploitation exclusif. Ce capteur est constitué de trois couches de silicium C1, C2, C3, superposées et isolées entre elles dans lesquelles sont incorporées respectivement à des profondeurs différentes, trois couches de photodiodes. L'épaisseur de silicium traversé joue le rôle de filtres colorés pour les photodiodes : C1 est transparent, C2 est un filtre jaune, C3 est un filtre rouge.

Ce système permet aux capteurs X3 de quantifier directement en interne les attributs rouge, vert et bleu, de la luminance sur chaque photosite par opposition aux capteurs CCD ou CMOS qui n'enregistre qu'une couleur par photosite à l'aide de filtres de Bayer.

Dans cette technologie 1 photosite du capteur correspond, à 1 pixel de l'image et un seul.

6 – 2 - 1 Le Fonctionnement

Un photosite est constitué de trois photodiodes superposées incluses respectivement dans les trois couches isolées d'un cristal de silicium. Il permet ainsi une capture verticale de la couleur.

Couche 1 : pas d'absorption en surface =====>

Informations sur les attributs de luminance $r(R),v(V),b(B)$ des couleurs primaires R,V,B , donnés par la première couche de photodiodes implantées en surface recevant de la lumière non filtrée.

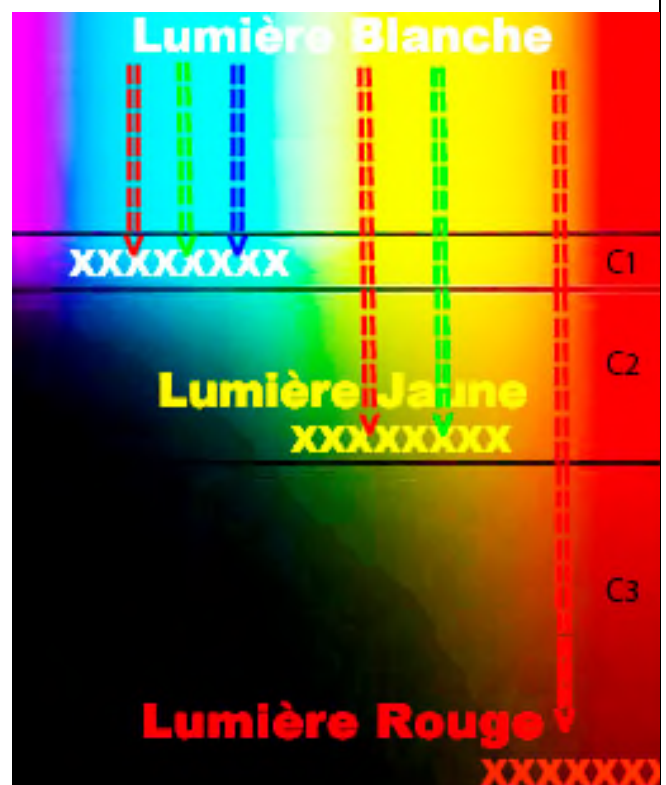
Couche 2 : Absorption du Bleu =====>

Informations sur les attributs de luminance $r(R),v(V)$ des couleurs primaires R,V , données par la deuxième couche de photodiodes implantée de telle façon qu'elle ne reçoit que la lumière filtrée jaune.

Couche 3 : Absorption du vert =====>

Informations sur l'attribut de luminance $r(R)$ de la couleur primaire R donnée par la troisième couche de photodiodes implantée de telle façon qu'elle ne reçoit que la lumière filtrée rouge.

Représentation de l'absorption des couleurs de la lumière blanche dans l'épaisseur du cristal de Silicium.



XXXXXXXXX = 1 Photodiode

Selon la Loi de Grassmann, l'obtention d'une couleur C donnée consiste à quantifier les attributs de luminance r, v, b , de chaque primaire R, V, B, qui additionnées induisent la même perception visuelle colorée que celle de la couleur à reproduire.

$$C \equiv r(R) + v(V) + b(B)$$

Pour obtenir alors la couleur des pixels de l'image donc une information complète sur les valeurs de luminances $r(R), v(V), b(B)$ de tous les photosites du capteur, on pourra calculer les attributs de luminance r, v, b , de chaque primaire R, V, B, à partir des données brutes des photosites en faisant le raisonnement suivant :

La couche 1 (c_1) en surface sera influencée par les longueurs d'onde rouge, vert et bleu. **Elle enregistre les valeurs de luminances du rouge, vert, bleue : $r(R), v(V), b(B)$**

$$Y_{C1} = r(R) + v(V) + b(B) \quad (3)$$

La couche 2 (c_2) sera influencée par les longueurs d'onde rouge et verte. **Elle enregistre les valeurs de luminances du rouge et vert : $r(R), v(V)$.**

$$Y_{C2} = r(R) + v(V) \quad (2)$$

La couche 3 (c_3), la plus profonde, sera influencée uniquement par les longueurs d'onde rouge qui sont les plus longues et qui pénètrent plus profondément. **Elle enregistre les valeurs de luminances rouges : $r(R)$.**

$$Y_{C3} = r(R) \quad (1)$$

On a obtenu directement les valeurs de luminances de la composante rouge :

$$r(R) = Y_{C3}$$

Pour avoir les valeurs de luminances des composantes vertes et bleues, il suffira de les calculer par soustraction :

$$v(V) = Y_{C2} - Y_{C3}$$

$$b(B) = Y_{C1} - Y_{C2}$$

On a ainsi calculé simplement, pour tous les pixels, les trois valeurs de luminances des couleurs primaires $r(R), v(V), b(B)$ que l'on retrouvera en sortie du capteur. On aura obtenu une information complète sur les couleurs des pixels de l'image.

Après ce calcul en interne au niveau du capteur, le Foveon paraît donc fonctionner avec trois couches de photosites capturants, pour la C1, couche superficielle, les informations relatives au bleu, pour la C2, couche intermédiaire, les informations relatives au vert et pour la C3, couche profonde, les informations relatives au rouge.

Pour simplifier, on peut dire que par un simple calcul, la couche supérieure donne les valeurs de luminances du bleu, du vert pour la couche intermédiaire et du rouge pour la couche inférieure.

C'est pour cela que les divers documents publicitaires de communication et de vulgarisation de sigma laissent à penser qu'il y a une émulation de la première couche par les rayons bleus, de la deuxième par les rayons verts et de la troisième par les rayons rouges.

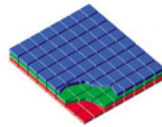


Figure 01

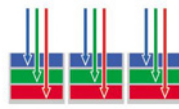


Figure 02



Figure 03

La figure 02 procède d'une vulgarisation exagérée qui ne représente pas la réalité physique des phénomènes.

Avantages

- Pas d'interpolation, rien que des pixels calculés à partir de données enregistrées par le capteur.
- Image plus nette car il n'y a pas de filtre passe-bas anti-moirage,
- Des couleurs plus vraies
- Moins d'artefacts car ceux normalement associés aux capteurs de Bayer sont éliminés.

Inconvénients

- Le capteur Foveon souffre de bruit chromatique. Pour connaître le signal vert, on retranche du signal de la deuxième couche le signal de la troisième couche. Ce procédé de soustraction augmente le bruit de fond, de même pour le signal bleu.
- Le Foveon donne d'origine des couleurs très peu saturées que l'on est obligé de corriger pour retrouver une saturation naturelle. Cette amplification importante de la saturation entraîne une amplification proportionnelle du bruit.
- Les rayons obliques qui rentrent dans le capteur ont un parcours plus long, ce qui entraîne une absorption plus prononcée des couleurs ce qui fausse en particulier le signal rouge
- La troisième couche du signal rouge reçoit peu de lumière d'où un bruit relatif non négligeable pour ce signal.
- La diffusion des rayons de lumière dans le cristal provoque un manque de définition.
- Chaque couche superposée n'est pas :
 - opaque à 100% pour sa propre couleur, bleu pour la première couche, vert pour la deuxième couche
 - transmissive à 100%.

Sigma y a fondé beaucoup d'espoir, mais les résultats sont-ils là !