

Le buzz reflex pro Nikon D800E...

Aliasing de luminance des nouveaux reflex pro Nikon : D4 et D800, face au D800E...

Éclairage sur le buzz...

Introduction :

Les modèles d'appareils reflex professionnels sont de plus en plus adaptés à un emploi spécifique. De ce fait certaines de leurs caractéristiques deviennent antinomiques.

En particulier sensibilité et résolution extrêmes s'opposent.

Ces trois reflex sont full frame = « pleine image » = plein format (par référence au 24 x 36 mm argentique) = FX pour les reflex Nikon numériques = capteur 36 x 24 mm.

Nikon D4 :

Il est conçu pour offrir une sensibilité maximale : **204.800 ISO exploitables !**

Fichier maximal : 4928 x 3280 pixels (16,2 Mp actifs sur 16,6).

Pixels # (= peu différent) de 7,3 μm de côté (36 mm = 36.000 μm : 4928), de très grande surface.

La sensibilité n'étant pas le sujet de ce Billet... ce D4, bien qu'extrêmement intéressant, d'une sensibilité extrême, est hors sujet...

Nikon D800 :

Il est conçu pour offrir une résolution extrême.

Fichier maximal : 7360 x 4912 (36,3 Mp actifs sur 36,8).

Pixels de : 35,900 mm (valeur exacte signalée par Nikon) : 7360 = 4,9 # **5 μm** de côté, une sacrée différence qui impose la présence d'un filtre passe-bas anti-aliasing. Ce filtre passe-bas qui supprime les fréquences extrêmes issues de l'objectif, réduit la résolution maximale possible de l'image, mais de façon très peu perceptible. C'est le sujet du débat.

Nikon D800E :

Il est conçu pour offrir une résolution maximale.

Fichier maximal identique : 7360 x 4912 (36,3 Mp actifs sur 36,8).

Pixels identiques : 35,9 : 7360 # 4,9 μm de côté. Filtre **passe-bas spécifique d'effet nul** (nécessaire pour le respect du trajet optique, ce qui, mal expliqué au départ par Nikon, a initié le buzz...), et, dicit Nikon, « logiciel anticrénelage adapté... » en raison de la densité très élevée en pixels.

Cette combinaison est parfaitement exploitable, car souvent, fait remarquer Nikon, les clichés de paysage et en studio entraînent peu de risque d'aliasing.

Ce boîtier nécessite par ailleurs un logiciel anti-aliasing de chrominance à effet fort.

(Il serait intéressant qu'un magazine publie une comparaison de demi-grandes images issues du D800 et du D800E... ; il est sûr que cela viendra dès qu'ils seront simultanément disponibles...).

Ces 3 boîtiers font que l'on n'a jamais tant parlé d'**aliasing** ! Or il n'existe quasiment pas de textes de référence !...

Lors des prises de vues, le photographe n'a pas à se préoccuper de l'aliasing, le photoscope le contrôle pour lui... mais la fiche technique du Nikon D800E est passée par là...

Aliasing :

(Extrait adapté du texte préparé pour mon Traité de photographie numérique... qui paraîtra peut-être aux Éditions Pearson).

Ce sous-titre va être contesté, va faire grincer des dents, me faire vouer aux gémonies par certains au vu des valeurs de résolutions optiques utilisées. Ce texte n'affirme pas. Ce n'est pas un sujet que je domine, et la littérature m'a très peu éclairé, car elle ignore superbement le problème !... Mon texte pose la problématique, situe les valeurs. Ce n'est pas une vérité révélée, mais une interprétation qui colle à la réalité.

J'ouvre une boîte de Pandore...

En fait les prises de vues peuvent subir de l'**aliasing** *largo sensu*... il n'y en a pas qu'un !
Il y en a 3 types...

- Le premier n'est lié qu'au nombre de pixels par ligne. C'est l'**aliasing** *stricto sensu* (auquel on n'associe aucun qualificatif). Il affecte des obliques et des courbes de l'image par un crénelage. Classiquement il est dû à une fréquence = nombre des pixels, insuffisante. Il pouvait aller pour les obliques, avec des photoscopes anciens, utilisés à peu de pixels, jusqu'au « déchiquetage » (jagging en anglo-saxon). Au besoin il peut être partiellement corrigé par interpolation de pixels = algorithme de lissage des contours.

Ce n'est plus qu'un souvenir avec le nombre de pixels du capteur du moindre photoscope compact actuel !

Même avec un cliché de 2006, ce n'est que sur un infime détail que l'effet d'une interpolation est visible.



1/.Cliché original complet de 2006 : 1600pi x 1200 # 2 Mp = 643 Ko.

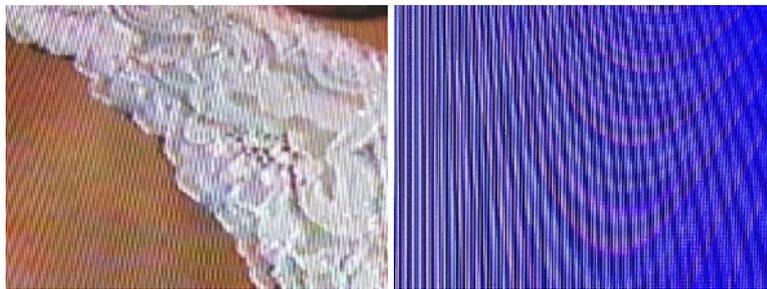
2/.Détail comportant pour la taille à l'écran trop peu de pixels : 448 x 336, 8 Ko.

3/.Détail interpolé en « sinc (Lanczos 3) », 32 Ko.

► Les deux autres aliasings sont liés à la structure régulière en damier du capteur.

• **L'aliasing de chrominance** est dû à l'interférence entre la fréquence = pas des pixels du capteur, et la fréquence identique d'un motif répétitif d'un objet (classiquement prise de vue d'un tissu Prince de Galles). C'est le moiré (y compris en anglo-saxon, et avec l'accent aigu !). Il est dû la répétitivité de la trame BVVR du capteur se superposant à une trame de l'objet. Il est corrigé par voie logicielle, de plus en plus efficacement, à tel point qu'avec mes clichés « normaux », depuis 2005, je n'en ai pas d'exemple... Pour obtenir un aliasing de chrominance visible, il m'a fallu photographier une image sur un écran de télévision, et l'écran lui-même... Lors de l'exploitation des fichiers, des restes de cet aliasing peuvent produire de fausses couleurs sur les tirages/impressions.

L'aliasing de chrominance ne pose donc plus de problème en prise de vue amateur (par contre il peut parfois en apparaître dans des détails à grossissement extrême, d'emploi irréaliste).



Aliasing de chrominance sur une surface de dentelle blanche, photographiée sur l'écran d'un téléviseur cathodique.

Aliasing de chrominance direct entre l'écran du téléviseur illuminé en bleu et le capteur du photoscope maintenu légèrement en biais.

• **L'aliasing de luminance** (notre sujet principal), lui, résulte du sous-échantillonnage (= analyse impossible) des fréquences les plus élevées de l'image provenant de l'objectif, par la fréquence trop proche de la maille du capteur (écartement répétitif constant des pixels) = le pas. Cet effet est détaillé plus loin avec schémas.

Lors de l'exploitation des fichiers, des restes de cet aliasing peuvent produire de fausses couleurs. Cet aliasing de luminance n'apparaît que si la taille des pixels est supérieure à $5 \times 5 \sim 6 \times 6 \mu\text{m}$. Il est alors supprimé avant prise de vue par le filtre anti-aliasing (AA) placé devant le capteur (cas du Nikon D4...).

L'aliasing de luminance naît des fréquences de plus en plus élevées fournies par l'objectif, au-delà de 80 paires de lignes par millimètre avec les capteurs de grande taille... Voyons d'abord côté objectif.

Analysons :

Lorsqu'il y a 30 ans nous testions des zooms en prise de vue réelle, par photographie sur pellicule, pour le magazine Phot'Argus, avec mon ami Ronan Loaëc, j'avais choisi une mire principale en couleur en demi-teintes à $\pm 18\%$ de réflexion. Les mires secondaires de résolution à traits sur papier photographique N&B brillant étaient à contraste élevé, environ 1 à 100. Nous exprimions les résultats photographiques en paires de lignes par millimètre = pl/mm. Cette valeur peut aussi être exprimée en fréquence = cycles par millimètre = cy/mm. Par exemple 80 pl/mm noires/blanches = 80 cy/mm = 80 alternances noir/blanc = 160 lignes.

Si les valeurs testées alors ont bougé, elles seraient plutôt inférieures, les formules optiques font appel à de moins en moins de lentilles et leur montage a été simplifié. Mais le calcul informatique des

zooms, les variétés de verres, les processus de fabrication des lentilles (polissage, moulage), le centrage des lentilles, comme celui de leurs doublets et triplets ont été très largement améliorés, comme le moulage plastique des barillets. De même l'emploi des verres spécifiques à dispersion faible ou anormale, la qualité et la multiplication des surfaces asphériques, l'emploi des traitements multicouche, etc., ont augmenté. Le numérique exige des résolutions plus élevées (avec des focales très courtes, mais qui donnent bien sûr des champs de prise de vue équivalents, les capteurs étant plus petits). En est-on au *statu quo* ou à mieux ? En raison de la taille très limitée des capteurs des compacts et des bridgecameras, par obligation face à la taille très réduite de leurs pixels, les fabricants ont été obligés de produire des zooms de résolution plus conséquente. Des ouvertures utiles élevées doivent être obtenues. Elles sont imposées par le risque de diffraction, afin de préserver les gains en résolution. Et le nano traitement des surfaces des lentilles, bien que très coûteux, s'impose !

À la plus grande ouverture de son diaphragme, en théorie, un zoom, comme toute optique, devrait donner sa résolution maximale, mais elle est contrariée par des résidus d'aberrations. Par ailleurs plus le diaphragme est fermé, plus la diffraction augmente. La résolution maximale apparaît de ce fait en général une ou deux valeurs de diaphragme plus fermées que sa pleine ouverture.

Valeurs maximales des résolutions alors mesurées :

- pour un bon zoom : 60 pl/mm, épaisseur d'une ligne # 8 μm ,
- pour un très bon zoom : 80 pl/mm (eh oui, seulement !), épaisseur d'une ligne # 6 μm ,
- exceptionnellement : 100 pl/mm, épaisseur d'une ligne 5 μm ,
- quelques focales fixes dépassaient parfois ces valeurs, jusqu'à ± 140 et très très exceptionnellement 200 pl/mm... elles montraient la voie actuelle !

Offrir aux D800/D800E un zoom / objectif à la hauteur de leur capteur, n'est pas chose aisée ! Très opportunément Chasseur d'Images (n° 344 Juin 2012) vient d'en dresser la liste, dans un très intéressant article de 14 pages !...

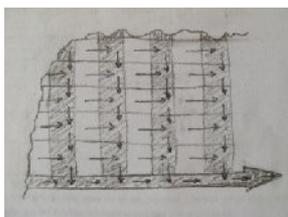
Côté capteur, comment se présente sa fréquence ? Et celle du filtre de Bayer ?
Comment ces 2 structures se superposent-elles ?

Sur les lignes des capteurs CCD-FF (Full Frame des reflex, nécessitant après exposition une obturation pendant le transfert des charges), les pixels carrés photocapteurs sont représentés coalescents. Leur disposition en damier est régulière.

Par contre, il y a encore peu de temps, chaque ligne d'un capteur CCD IT (Interligne Transfert majoritaire chez les compacts, utilisé en obturation électronique) était représentée par des pixels séparés par leurs cellules de transfert des charges.

Les éléments de la matrice de Bayer sont carrés comme les pixels, et toujours représentés jointifs. (Remarque : dans les compacts et les bridgecameras, au repos, un volet de protection est utilisé afin d'éviter l'altération des colorants de cette matrice par la lumière ; les reflex, eux, sont pourvus de leur obturateur mécanique).

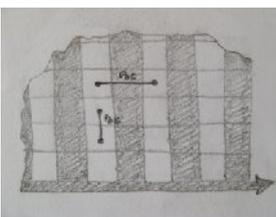
Ces dispositions étaient théoriques, et elles le sont devenues encore plus !



CCD-IT : pixels en blanc et cellules de transfert en gris.



Matrice de Bayer : BVVR.



CCD-IT : quel est le pas ?
(Schémas préparatifs pour mon Traité).

Dans le schéma habituel d'un CCD-IT, dans les lignes les pixels carrés sont donc séparés par leurs cellules de transfert carrées (masquées insensibles), mais les lignes dans le plan vertical sont la plupart du temps représentées coalescentes. Où est la symétrie horizontale / verticale du fichier dans cette représentation ?

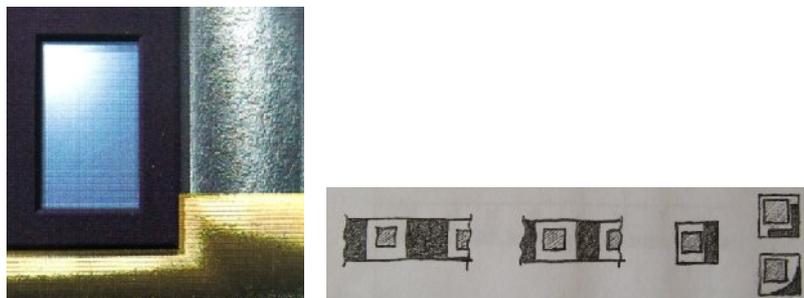
Comment superposer la matrice Bayer à celle du CCD ?

Le pas de ce CCD théorique est-il celui des lignes ou des colonnes ?

La réalité est souvent pire ! Nikon a utilisé pour les D1X un CCD à pixels rectangulaires axés en colonnes, formant 2 par 2 des carrés. Fuji a employé des pixels hexagonaux dédoublés pour ses capteurs Super SR/HR, petits et grands couplés, avec une matrice inclinée à 45° par rapport aux bords du capteur, dont le pas laissait des auteurs perplexes... Fuji convertissait les fichiers à sa façon (mais c'était réaliste), en fichiers orthogonaux classiques nécessaires pour toute exploitation, en particulier pour le tirage. D'après Fuji cette disposition accroissait la résolution de 60%!...

Quoi qu'il en soit, dans la pratique, le pas théorique du CCD classique est une réalité certaine : il suffit de diviser les dimensions de ses côtés par le nombre de ses pixels.

Mais quelle est la structure réelle des pixels actuels ? Les schématisations théoriques des vulgarisations ont des limites ! La cellule de transfert est désormais généralement intégrée à la surface du pixel suivant des géométries variées (les schémas de vulgarisation donnent une idée assez représentative de cette évolution). Par contre, ce qui est bénéfique, cela rend la mosaïque encore plus régulière et symétrique.



1/.Représentation très proche de la réalité d'un pixel : photosite en bleu, cellule de transfert en gris et circuits de contrôle en jaune. (Courtoisie Fuji).

2/.Schématisation de la compression progressive d'un pixel au cours des années...

Le pas (la fréquence) du capteur CCD, de pixel en pixel, est *de facto* une donnée de base.

Remarque de Paul Valéry : « Tout ce qui est simple est faux, tout ce qui ne l'est pas est inutilisable ! », on ne peut vulgariser que jusqu'à un certain niveau... *Duralex, sed lex*, la loi est dure, mais c'est la loi (avec le concours des pages roses du Petit Larousse... comme lui nous allons semer à tout vent !).

Pour un capteur C-MOS, la structure est aussi parfaitement répétitive, les pixels étant de la même façon jointifs, mais la proportion de la surface des photosites par rapport aux circuits annexes encore plus envahissants n'est jamais précisée (pourcentage sans importance pour l'aliasing).

En fait le pixel est une entité globale, dont seule la partie photosite est sensible à la lumière. La matrice (réseau) des photosites est donc plus lâche que celle des pixels *stricto sensu*.

Sensibilité du photosite :

En moyenne le photosite occupe moins de 40% de la surface du pixel (c'est le rapport d'ouverture), ce qui rend encore plus théoriques les schématisations... Je prends 30% : valeur moyenne

pour les CCD et les C-MOS dont les circuits périphériques des photosites sont encore plus envahissants. Cette surface est élargie par la microlentille du pixel qui augmente son taux de capture d'environ 50% (le fill factor augmente, dans un CCD un photon fournit 10 μ V, soit 1 V par pixel à saturation). Il s'agit de valeurs réalistes, mais non formalisées dans les documentations grand-public. La surface du photosite réduite à 30% puis augmentée de 50%, c'est comme si seulement environ la moitié de la surface du pixel participait directement à la capture de la lumière.

Plus la surface du pixel augmente, plus sa sensibilité augmente, un peu plus qu'au carré (c'est une surface) car l'occupation des circuits périphériques reste quasi constante.

Aliasing de luminance : comment évolue le signal représentant l'image, lors de la rencontre de l'image optique issue de l'objectif avec la matrice du capteur ?

Échantillonnage du signal, Aliasing de luminance :

La fréquence de récurrence = répétition périodique des pixels carrés d'un capteur est uniquement fonction de leur taille, soit 1000 μ m divisés par la taille du pixel en μ m = $x \text{ pi/mm} = \text{pas des pixels du capteur par mm} = N$. C'est une donnée invariable d'un capteur. (Remarque : ce pas est couramment appelé fréquence, comme pour le pouls, alors que classiquement cette notion s'applique à des cycles = périodes de 2 alternances...).

Les fréquences de plus en plus serrées issues de l'objectif sont analysées par les pixels du capteur et forment le signal image.

Lorsque l'on arrive à la concordance entre le pas fixe du capteur N et la fréquence identique N élevée résolue par un zoom/objectif, il y a interférence (battement, dissonance), c'est l'aliasing dit de luminance. Des erreurs d'échantillonnage apparaissent. On parle de repliement de spectre (aberration optique fréquentielle). Le signal de l'objectif est transmis ou non, et des fréquences parasites d'interférence sont générées. Ce sont des artéfacts qui se superposent au signal de l'objectif et le perturbent.

Au-delà de son pas N, le capteur ne peut plus analyser les fréquences plus élevées issues de l'objectif pour lesquelles il constitue un filtre passe-bas spatial (les fréquences plus élevées sont sous-échantillonnées, elles ne sont plus converties de photons en tensions).

Avec les pixels moyens de 2,3 x 2,3 μ m d'un compact, le pas du capteur en lignes est de 434. En l'arrondissant à 400, il peut donc analyser 200 pl/mm car il faut 2 pixels pour transmettre 1 information noire et 1 blanche (cette réduction de moitié fait souvent évoquer la loi de Nyquist...). Quelle que soit la résolution fournie par le zoom, le capteur peut l'analyser et la transmettre.

Un capteur de reflex à pixels de 5 μ m, présente un pas nominal N # de 200 lignes, qui peut analyser 100 pl/mm. Ce point très important sera traité plus loin, avec des schémas.

Problème : les schémas simples sont si simplificateurs qu'ils ne peuvent rendre compte de l'extrême complexité des situations !

Un tableau théorique peut être dressé sur la base du pas des pixels :

2 μ m \Rightarrow 500 pi(xels)/mm = 500 pas/mm, pouvant analyser \pm 250 pl/mm (fréquence moitié)
= \pm 250 cycles,

2,3 μ m classique \Rightarrow 434 pas/mm, pouvant analyser \pm 200 pl/mm,

3 μ m \Rightarrow 333 pas/mm, pouvant analyser \pm 160 pl/mm,

4 μ m \Rightarrow 250 pas/mm, pouvant analyser \pm 125 pl/mm,

5 μ m \Rightarrow 200 pas/mm, pouvant analyser \pm 100 pl/mm. Avec les objectifs actuels à résolution extrême, ce pixel représente une sorte « d'idéal » alliant résolution optimale, sensibilité, simplicité de mise en œuvre. C'est la charnière des valeurs en paires de lignes par mm.

6 μ m \Rightarrow 166 pas/mm, pouvant analyser \pm 85 pl/mm

6,5 μ m \Rightarrow 154 pas/mm, pouvant analyser encore plus de 80 pl/mm,

7 μ m \Rightarrow 142 pas/mm, pouvant analyser \pm 70 pl/mm.

Au-delà, les possibilités d'analyse deviennent faibles...

8 μm \Rightarrow 125 pas/mm, pouvant analyser \pm 60 pl/mm,

9 μm \Rightarrow 111 pas/mm, pouvant analyser \pm 55 pl/mm,

10 μm \Rightarrow 100 pas/mm, pouvant analyser \pm 50 pl/mm.

Ces valeurs approchées, très réalistes, sont plus que des ordres de grandeur. Elles sont représentatives de la pratique, en rien ésotériques. Mais elles ne sont pas à prendre au pied du chiffre !

Les compacts et les bridgecameras numériques sont équipés de capteurs de petite taille dont les pixels sont inférieurs à 5-6 μm de côté (même le Sony DSC-R1, avec des pixels exceptionnels de 5,5 μm), est-ce un hasard ? **Même pourvus d'un zoom de qualité particulièrement élevée, ils échappent à l'aliasing de luminance** (qui est absolument à éviter, car il polluerait l'image). Heureusement les combinaisons actuelles capteurs / zooms l'éliminent, car il ne serait pas visible sur l'écran de visée trop petit.

Remarque : les photographes professionnels utilisant un reflex à petit capteur, afin de visualiser les aliasings possibles, visionnent leurs prises de vues sur un moniteur à grand écran à résolution élevée (ressemblant à un téléviseur, mais sans tuner de réception), ou sur celui d'un ordinateur.

Taille des pixels et taille des tirages / impressions.

À ce stade, un point crucial est à nouveau à préciser. Nous venons de voir que la fréquence d'échantillonnage d'un capteur dépend de la seule taille de ses pixels.

Par contre sa Taille informatique est liée au nombre de ses pixels par ligne (= rangée) et par colonne. Il en faut, mais il en suffit au maximum pour des tirages / impressions parfaits, de 240 par pouce (ce que l'on écrit classiquement illégalement 240"). Ce chiffre est arrondi classiquement par léger excès de sécurité à 300, soit 300 dpi = dots per inch.

Par exemple pour obtenir un tirage 10 x 15 cm = 5" x 4", l'image doit présenter, et c'est suffisant, 5 x 300 = 1500 pixels x 1200 = 1,8 Mp, soit par léger excès 2 Mp. Un capteur de seulement 2 Mp est donc parfait !... Pour obtenir un tirage linéairement 2 fois plus grand, 20 x 30 cm, donc de surface quadruple, l'image numérique parfaite doit offrir 2 x 4 = 8 Mp (à croire que 8 est le double de 2 !).

Pour un tirage de format A4 = 29,7 x 21 cm # 12" x 8", à 300 dpi = 3600 x 2400 = 8,6 Mp suffisent ! Le moindre compact actuel en offrant plus, le recadrage est même possible !...

Remarque : les amateurs faisant tirer, très peu (hélas !) d'A4, les fabricants devraient produire des compacts de 8 Mp à grands pixels beaucoup plus sensibles !!

C.Q.F.D. !

Formats des tirages en cm		Mégapixels du Capteur (Taille du fichier non compressé)	Fichier compressé résultant en Mo, à la Compression JPEG 1/6
en 4/3	en 2/3		
10 x 13,5 11,5 x 15	10 x 15 11,5 x 17	1,8 # 2 Mp à 300 dpi 2,2 2,3 2,6	1
13 x 17 18 x 24	13 x 19 16 x 24	4 Mp à 300 dpi (ou recadrage de 70 % de l'image en 10 x 13/15 cm)	2
20 x 27 # A4	20 x 30 # A4	8 Mp à 300 dpi (surface x 4 par rapport au 10 x 13/15)	4
30 x 40 / A3	30 x 45	16 Mp à 300 dpi 8 Mp à 200 dpi	8 4
40 x 50	40 x 60	32 Mp à 300 dpi 8 Mp à 150 dpi	16 4

Formats des tirages / impressions en cm (ligne 1 rapport en 4 sur 3, ligne 2 rapport en 2 sur 3)											
Mp	Mo JPEG 1/6	• 10 x 13 10 x 15 ▪	11 x 15 11 x 17	13 x 17 13 x 19	15 x 20 18 x 24 (diagonale 30 cm)	• 20 x 27 20 x 30 ▪ A4	30 x 40 30 x 45 ▪ A3	• 40 x 50 40 x 60 ▪	50 x 70 50 x 75 ▪	• 80 x 100 80 x 120 ▪	Plus ...
2	1		# 300	200							
4	2	(Recadrage poss.70%)				200	150				
8	4					200	150	Interpol.			
16	8						200	150	Interpolation	Interp.	
32	16							200	150	Interp.	

Valeurs arrondies. Résolution 300 dpi permettant des recadrages ± importants (sauf indication contraire).
 Un tirage 18 x 24 cm observé à 30 cm couvre le champ binoculaire des yeux et nécessite 300 dpi.
 Les formats plus élevés ne nécessitent 300 dpi que pour leur observation en détail jusqu'à 30 cm.
 De signe ▪ en signe ▪ la surface de l'image double. De signe • en signe • elle quadruple (format de tirage double).

L'échantillonnage du signal image crnelé analogique issu du capteur assure sa numérisation.

Ensuite, de façon théorique, pour échantillonner sans défaut le signal, sans artéfacts créant des moirés c'est à dire de même un aliasing de luminance (appelé aussi repliement de spectre, fréquences parasites aberrantes apparaissant dans le signal), il faut respecter la Loi de Nyquist et Shannon : la fréquence d'échantillonnage doit au moins atteindre le double de la fréquence la plus élevée du signal. Il ne faut pas de sous-échantillonnage.

Les objectifs / zooms atteignent-ils facilement 100 pl/mm ?

En raison de la diffraction, un objectif parfait, en fait à résidus d'aberrations très limités, ne peut donner dans son plan image, d'un point lumineux sans dimension, qu'une tache *ipso facto* plus large. C'est un Disque d'Airy *largo sensu* = faux disque central brillant contenant environ 80 % de l'énergie, entouré d'anneaux de moins en moins brillants renfermant le reste de l'énergie. Le faux disque, plus la demi-largeur de l'étroit premier anneau noir (dépourvu d'énergie, un peu trop large sur ma simulation) constituent le Disque d'Airy *stricto sensu*.

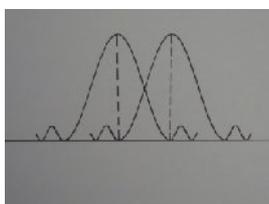
En 1835, Airy, astronome royal, a établi que le diamètre de ce disque est égal à $2,44 \lambda N$ (λ = longueur d'onde) soit pour le vert et pour $N = f/2,8$ $2,44 \times 0,56 \times 2,8 \approx 4 \mu\text{m}$.

Vers 1870, Lord Rayleigh, astronome, 3^e Baron, a démontré qu'avec un très bon polissage des lentilles, dès que le pic central contient ± 80 % de l'énergie et le premier anneau clair ± 16 %, l'image est de très bonne qualité, condition de Rayleigh.

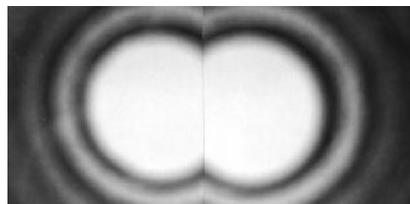
Deux disques d'Airy sont visuellement / photographiquement séparés dès que le centre du pic du deuxième est placé au sur le premier anneau noir de l'autre. Leurs centres sont alors séparés d'un demi-pas, critère de Rayleigh, ce qui correspond pour l'exemple à 500 cy/mm de résolution maximale théorique.



Disque d'Airy (simulation).



Critère de Rayleigh.



Deux Disques d'Airy résolus, car leur écart est juste supérieur au Critère de Rayleigh (simulation).

Le calcul optique par la formule approchée de Zeiss ($1600 : N$), permet d'établir plus simplement le pouvoir de résolution limite absolu théorique en cycles par mm imposé par la diffraction pour le vert. Valeurs arrondies. Elles décroissent rapidement :

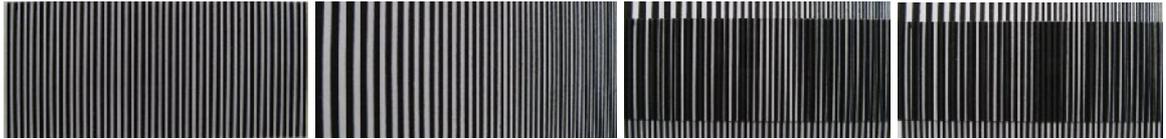
Dans la pratique, les opticiens sont très très loin de pouvoir atteindre ces **valeurs théoriques**, et ce, particulièrement aux grandes ouvertures !

- pour $f/2$ résolution 800 cy/mm = 800 pl/mm
- pour $f/2,8$, 600 cy/mm
- $f/5,6$, 300 cy/mm
- $f/11$, 150 cy/mm
- $f/22$, 70 cy/mm
- $f/4$, 400 cy/mm
- $f/8$, 200 cy/mm
- $f/16$, 100 cy/mm
- etc.

Visualisation optique de l'aliasing de luminance...

En reflex les informations fines de fréquences élevées, issues de l'objectif, voisines de la taille d'un pixel, sont systématiquement éliminées. Car, proches de la fréquence de récurrence du capteur (le pas de sa maille), elles interfèreraient avec elle, créant un moirage, l'aliasing de luminance, qui polluerait le signal (comme nous l'avons vu au préalable). Il faut empêcher cet aliasing avant d'enregistrer l'image.

Les interférences entre une mire à pas fixe représentant le capteur, et une mire à pas croissant simulant les fréquences issues de l'objectif (présentant la même fréquence un peu à droite de son centre) en donnent une image.



Simulation d'aliasing :

Fréquence du capteur.

Mire à fréquence croissante.

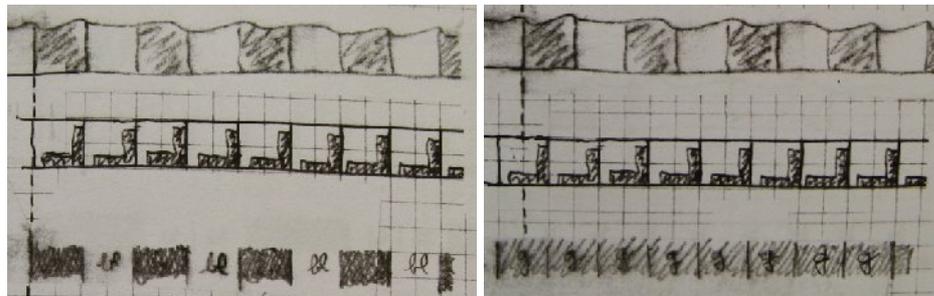
Aliasing entre les 2...

et avec décalage de la mire
d'un pas de capteur...

Les schémas simples d'aliasing de luminance (lorsqu'exceptionnellement on en rencontre dans la littérature... en Français et en Anglais je n'en connais que 2...) sont si simplificateurs qu'ils ne peuvent rendre compte de l'extrême complexité que doivent représenter les situations réelles.

Nous avons vu qu'il faut, afin que le signal d'une mire à traits (objet simple) soit complet, transmettre l'information d'un trait noir, puis d'un espace blanc... Et ce n'est pas aussi simple que cela semble de prime abord !!

Les schémas d'aliasing voisins, un peu plus recherchés, mais aussi très théoriques, montrent que cet effet, comme sur les clichés qui précèdent, est très complexe (pour l'instant, hélas, ils ne sont qu'ébauchés pour le Traité...).



Première ligne : traits noir et blanc d'une mire.
Deuxième ligne : pixels schématisés.
Troisième ligne : signal image noir et bl(anc).

Avec un décalage d'un demi-pixel,
le signal image devient g(ris) uniforme !

Pour une fréquence plus faible que la fréquence de coupure, ils montrent aussi que suivant le chevauchement des éléments avec ceux du capteur, des interférences variables peuvent apparaître. Dans une image réelle, elles doivent donc être plus ou moins locales et souvent multiples (elles sont évoquées dans la profondeur de champ numérique de mon Traité sous le vocable de semi-aliasing local).

L'interprétation des éléments de l'image par un capteur numérique n'est donc pas continue comme en argentique, qui duplique pour nos yeux la continuité de la réalité.

Afin de supprimer ce risque parasite, les fréquences élevées issues de l'objectif sont éliminées un peu avant la fréquence de récurrence du capteur (nous y reviendrons plus loin avec schémas). On évite ainsi l'interférence entre les deux fréquences. On parle d'anti-aliasing optique de luminance. À cette fin est employé un filtre anti-aliasing (AA), biréfringent, dit passe-bas, qui supprime les fréquences supérieures fournies par le zoom. [Ce filtre est en niobate de lithium, maintenant multicouche polarisé complexe (Canon 350D), etc., autrefois en lames de quartz superposées]. Son rôle est de dédoubler les trop fins détails fournis par le zoom, dont les fréquences sont trop élevées (de l'ordre de la largeur d'un peu moins de 1 pixel), grâce à ses deux rayons de sortie, ordinaire et extraordinaire (caractéristique de la biréfringence). Un premier élément du filtre disperse le pixel suivant l'un des axes du capteur. Un deuxième élément le disperse suivant l'axe orthogonal. Globalement le pixel de fréquence litigieuse, est ainsi dispersé sur environ 4 pixels réels (les schémas préalables d'aliasing montrent que l'on ne peut pas vraiment parler de couples de pixels). Le moirage optique de luminance de l'image est ainsi éliminé. Ce filtre, (très) cher, est parfois escamotable afin de pouvoir retrouver la résolution maximale du capteur lorsque les micro-contrastes peuvent être traduits par des couples de pixels jointifs recevant l'information

sombre et l'information claire (par exemple en astrophotographie ; des ateliers de bricolage s'en sont fait une spécialité...).

Comme ce filtre introduit donc une mollesse de l'image aux hautes fréquences, celle-ci est compensée par la correction de contour appelée correction d'ouverture.

Retour à aliasing de chrominance.

Aliasing de chrominance :

Par contre, l'aliasing de chrominance peut apparaître avec tous les capteurs (compacts, bridgecameras et reflex), quand la fréquence du motif de l'objet interfère avec la fréquence de récurrence du capteur. Nous avons vu que l'élimination de ce moirage ne peut être que logicielle, car on ne peut percevoir celui-ci sur l'écran, alors qu'il suffirait de modifier d'épsilon la taille de la prise de vue de l'image pour le faire disparaître. Un pro qui contrôle ses prises de vues sur moniteur ou sur ordinateur peut le faire en zoomant très très légèrement ou bien il peut éventuellement faire pivoter légèrement l'objet, donc ses motifs.

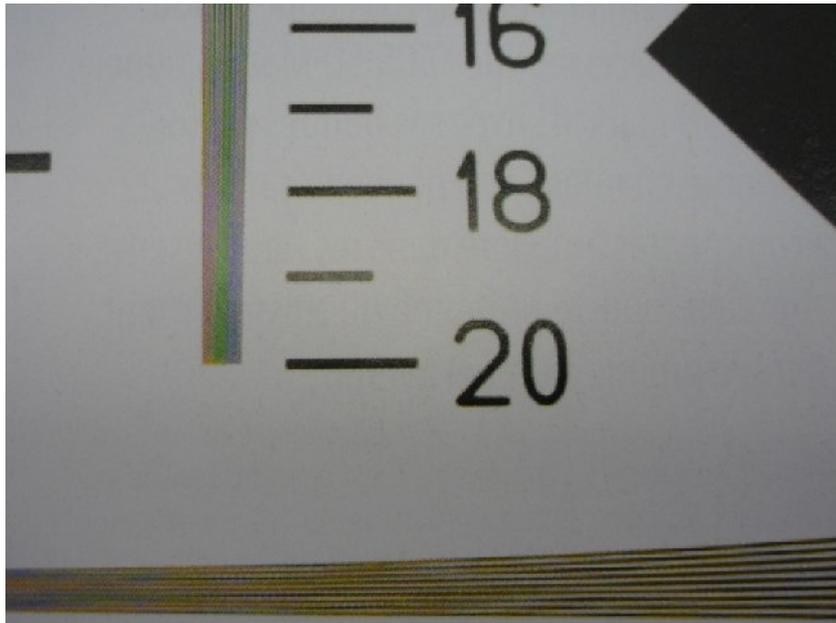
La disposition nouvelle particulière des filtres BVVR des capteurs Fuji EXR réduit ce risque d'aliasing de chrominance.

Aliasing de chrominance et aliasing de luminance : fausses couleurs.

Fausses couleurs :

Lors de la prise de vue, les pixels sont employés par groupes de 4 (BVVR, quadruplet). Leur dématriçage dans le fichier de sortie image par interpolation réattribue à chaque pixel la teinte, la luminosité et la saturation de l'objet original. Si des traces d'artéfacts d'aliasing de chrominance ou de luminance sont présents lors de ce traitement par groupe de 4, de fausses couleurs néfastes locales apparaissent... (illustrations en début de texte). Elles sont très difficiles à éliminer...

Cas particulier de la prise de vue de mires à traits...

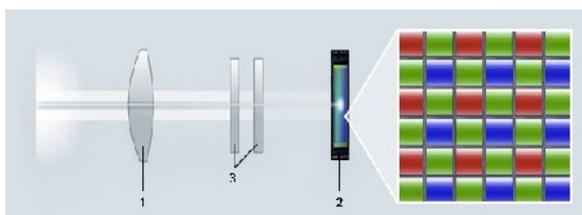


Les artéfacts colorés, qui sur un cliché de mire à traits, apparaissent au-dessus de la fréquence que peut transcrire le capteur en raison de la présence du filtre anti-aliasing AA, relèvent de l'aliasing de chrominance. Le pas du capteur interfère avec le pas de la mire à partir de l'égalité des fréquences.

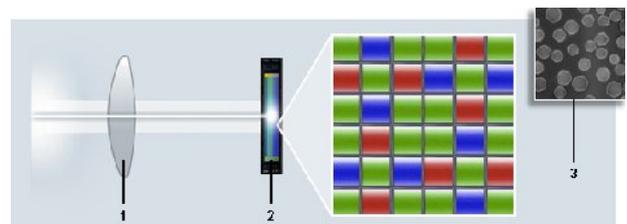
Dernière minute : aliasing de chrominance et aliasing de luminance du tout nouveau capteur Fuji X-Trans CMOS.

Le capteur X-Trans CMOS APS-C16M équipe le compact nouveau-né très haut de gamme Fuji X-Pro1 à objectif interchangeable (au passage doté d'un EVF des plus performants !). Ce capteur de 16 Mp, de grande taille 23,6 x 15,6 mm, fichier maximal 3/2 4896 x 3264, offre des pixels de 4,8 μm de côté. Il n'a donc pas besoin de filtre AA... mais pas en raison de la structure Fuji de son nouveau filtre de Bayer, comme le suggère le site Fuji Japon (en Anglais, rassurez-vous !)... il n'en a pas besoin tout court !

Par contre son nouveau filtre de Bayer, de conception Fuji, ne présente pas de périodicité égale en horizontal et en vertical (voir illustration, Fuji le compare même à la répartition aléatoire des grains d'argent d'une émulsion argentique... ce serait l'idéal, mais on n'en est pas encore là !). Néanmoins face à la capture de la lumière, les éléments de ce filtre se comportent comme s'ils étaient répartis au hasard (les trames B, V et R différent). Donc absence d'aliasing de chrominance, pas de moiré, pas de fausses couleurs ! Fuji dit que ce capteur se comporte comme s'il n'était pas filtré... Non ! Mais bravo !!



Filtre de Bayer classique : 1/objectif, 2/capteur, 3/filtre AA.



Nouveau filtre de Bayer Fuji : 1/objectif, 2/capteur, 3/ grains d'argent d'une émulsion argentique, répartis au hasard...
(Courtoisie Fuji).

Un nouveau progrès convaincant à l'actif de Fuji...

CONCLUSIONS :

Nikon D4 :

Avec ses grands pixels ultra-sensibles de 7 μm , le D4 a besoin d'un filtre passe-bas...

Nikon D800 :

Par sécurité face aux objectifs à résolution extrême, le Nikon D800, avec ses pixels de 5 μm , à la charnière de l'aliasing de luminance, est doté d'un filtre passe-bas classique, ce que Nikon, lors de son introduction, n'avait pas besoin de spécifier...

C'est un boîtier pour les tirages / impressions de résolution optimale bien au-delà du mètre carré (au-delà du A3), et les recadrages très élevés.

Nikon D800E :

Afin d'atteindre sa résolution maximale, le Nikon D800E est doté d'un filtre passe-bas spécifique **sans effet** (afin de maintenir la constance du trajet optique, car c'est une lame à faces parallèles). Ceci implique par ailleurs des adaptations logicielles, ce que Nikon lors de son introduction a logiquement spécifié : « *Il est doté d'un filtre passe-bas dont certaines propriétés d'anticrénelage (anti aliasing) ont été supprimées.* »... Vague, d'où la naissance du buzz... Il est livré avec le logiciel CaptureNX2 permettant en RAW les corrections fines des fichiers de sortie image.

La résolution d'un tel boîtier n'est mise en évidence que par des tirages / impressions dépassant le mètre carré ou par des recadrages extrêmes.

Un appareil pour les spécialistes des formats immenses.

C.Q.F.D !

Gérard BOUHOT
Docteur ès Sciences Appliquées.
Professeur Honoraire Université Paris XII.