

Film contre silicium : est-ce seulement une question de résolution ? (partie 1)

Emmanuel BIGLER

ENSMM, 26 chemin de l'Épitaphe, F-25030 Besançon cedex, mél :
bigler@ens2m.fr

Résumé

Il y a déjà plus de quatre ans que les courbes des ventes d'appareils photo numériques sont censées avoir dépassé celles des appareils à film, hors appareils jetables. Le succès de l'appareil numérique auprès du grand public est incontestable, entraînant une chute considérable de la demande de films. Faisant suite à notre article de 2002 sur galerie-photo [1], nous proposons ici d'examiner de plus près ce que signifie résolution, le lien avec la qualité d'image dans une comparaison entre la capture directe de l'image sur silicium et la prise de vue traditionnelle sur film. Il apparaît que les évaluations comparatives en termes de résolution seule, ou en termes de décomptes de pixels, étaient un peu trop optimistes en faveur du film. On essaie de comprendre pourquoi, et on examine également, par des modèles simples, quelles sont les limites de résolution des capteurs silicium échantillonnés. On verra que si le film de petit format semble avoir perdu la partie, le grand format sur film, au moins lorsqu'on n'est pas trop pressé par les nécessités de la production professionnelle, n'a rien perdu de son intérêt.

Introduction

En mars 2002, nous relations ici [1] notre expérience passée avec le traitement numérique des images à l'époque de l'informatique à cartes perforées et bandes magnétiques demi-pouce. Nous nous hasardions à quelques prévisions, et il était inévitable de donner à nouveau rendez-vous avec le lecteur quelques années plus tard pour faire le point sur les progrès rapides de l'image numérique dans le grand public. Parmi les idées évoquées dans cet article, il y avait une tentative pour estimer le nombre de pixels nécessaires à rendre la même impression qu'à partir d'une image analogique 6x6. Il apparaît que ces estimations étaient plutôt optimistes en faveur du film. Nous avons donc réexaminé ce décompte de pixels équivalents et trouvé qu'il était possible de proposer une comparaison film/silicium plus réaliste basée sur les courbes FTM publiées pour le film, et sur les paramètres estimés pour un capteur silicium échantillonné, à l'aide d'un modèle simple.

Un décompte de pixels équivalents par trop optimiste ?

Pour proposer un nombre de pixels équivalents à une image analogique, la démarche s'appuie sur la règle de l'échantillonnage minimum nécessaire pour qu'un signal électrique ou une image analogique dûment échantillonnés puissent être reconstitués parfaitement sans perte par un calcul mathématique *a posteriori*. Cette règle connue sous les noms de théorème de Shannon ou de Nyquist-Shannon [2] est « descendue » vers le grand public dès les années 1970 avec le CD audio, dans lequel il est nécessaire de prendre au moins 40 kilo-échantillons du son par seconde pour pouvoir reconstituer le son analogique jusqu'à 20 kHz (en réalité c'est plutôt 44 kHz [3]).

Le règle générale est simple : **il faut au minimum deux points par période pour « passer une sinusoïde »** (figure 1).

Sous réserve que le son enregistré de manière analogique avant échantillonnage ne contienne aucune haute fréquence au-delà de ces 20 kHz (voir annexe 1 b) : « Repliement de spectre et

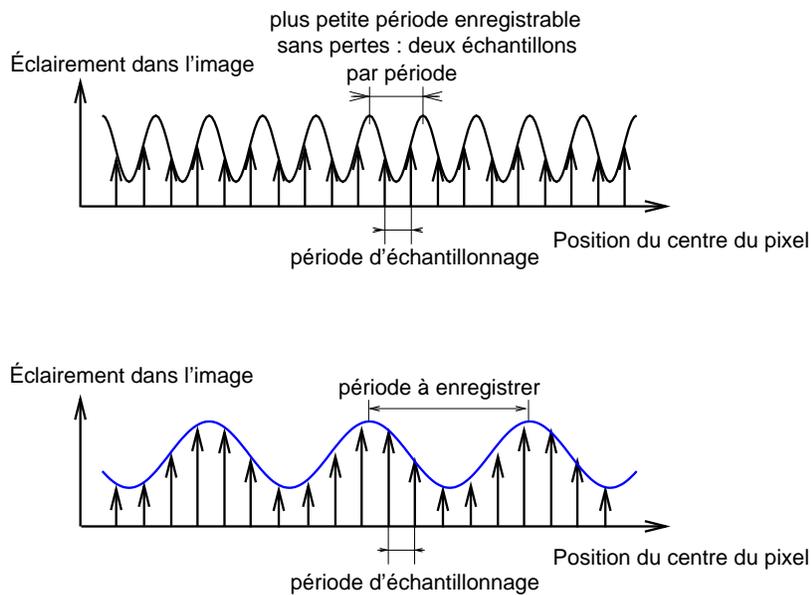


FIG. 1 – La règle d'échantillonnage de Nyquist-Shannon : il faut deux points pour passer une sinusoïde

moiré » b)), il est possible par une opération mathématique d'interpolation (qui peut être l'équivalent d'un filtrage passe-bas) de reconstituer le signal ou l'image analogique d'origine.

En pratique dans le monde du son audible par exemple, on peut admettre que le micro a une bande passante limitée à ces 20 kHz, le théorème s'applique donc, en principe, sans problème pour un échantillonnage à 44 kHz, bien que des fréquences d'échantillonnage jusqu'au mégahertz soient censées améliorer la restitution du son [4]. Certes, on peut dire également que les meilleurs microphones électrostatiques qui font rêver les amateurs de prise de son ont une courbe de réponse parfaitement plate montant jusqu'à 30 kHz, mais dans une technologie classique où on serait limité à ces 44 kHz, il est toujours possible d'interposer un filtre analogique électronique passe-bas entre le micro et l'enregistreur, on verra qu'il peut en être de même pour l'image analogique destinée à être échantillonnée.

Pour les images, l'application de ces principes est connue depuis les années 1960 [5], mais elle n'a finalement été portée à la connaissance des photographes qu'avec le développement de la numérisation d'images sur film et la capture directe sur silicium.

Le décompte optimiste du nombre de pixels équivalents, prenons l'exemple du 6x6, se base sur le test des meilleures optiques avec les films à grain fin et permet de montrer que 100 cycles par millimètre sont détectables [6], mais à la limite, avec au final un très faible contraste sur les plus fins détails. Il semble donc raisonnable de prendre cette limite de 100 cycles par millimètre, soit 10 microns par cycle, comme la borne supérieure des plus fins détails présents dans l'image analogique. Donc la numérisation de cette image devrait se faire selon la règle des deux points par période, soit deux points par cycle, donc il faut échantillonner avec un pas de 5 microns à 200 échantillons par millimètre, dans les deux directions en horizontal et en vertical bien entendu. Le décompte de pixels est donc vite fait pour l'image 6x6 de 56x56mm de surface, on trouve un total de $(200 \times 56)^2$ soit 125 mégapixels. Même en 2007 avec des capteurs à 39 millions de pixels, le film ne serait donc pas surclassé, et de loin !

Dans un très récent article du magazine « Le Photographe » [7], Bernard Leblanc explique de la même façon qu'il avait fait ce calcul dès 1981, en prenant 50 cycles/mm comme valeur limite, ce qui est plus réaliste, pour un total de 8,6 millions de pixels [8] sur une surface de 24x36mm, valeur

proche du nombre de pixels d'un grand nombre d'appareils actuels, sauf que très peu d'entre eux sont plein format 24x36, ce qui complique un peu l'analyse.

Le paradoxe est que dans la pratique on s'est aperçu qu'il suffisait d'un nombre de pixels nettement plus faible que prévu pour atteindre dans le tirage final, examiné visuellement, une qualité d'image identique sinon supérieure. Par exemple en appliquant ce calcul au format 24x36, en gardant cette limite très optimiste des 100 cycles par millimètre, on trouve 34 millions de pixels, alors qu'on s'accorde en ce début de l'année 2007 pour dire que les capteurs plein format 24x36 à 16 millions de pixels surclassent les meilleures images prises sur un film couleur de même surface.

Donc qu'est-ce qui ne va pas dans le raisonnement ? On peut faire confiance à ceux qui ont testé les bonnes optiques pour le 6x6 [9], et chez Carl Zeiss, une maison sérieuse s'il en est, on déclare tranquillement des limites de résolution dépassant 200 cycles par mm pour les meilleures optiques en vente au catalogue [10], et on confirme des valeurs de l'ordre de 150 cycles par mm pour les meilleurs films couleur [11]. Alors où est l'erreur ?

La règle empirique du facteur 2 à 4 équivalent en surface

Les professionnels utilisant la capture directe d'images numériques se sont rendu compte que, lorsque l'image est destinée, *in fine*, à être imprimée via une chaîne qui aujourd'hui est entièrement informatisée et numérisée, la surface de film à passer dans un scanner, permettant d'obtenir la même qualité que par capture d'images et échantillonnage direct, **cette surface de film devait être d'un facteur 2 à 4 supérieure à la surface de silicium donnant le même résultat** [12], [13].

Les valeurs limites au contenu effectif de pixels utilisables pour une surface de film *couleur* donnée (le problème est sans doute différent en noir et blanc, où existent des films à grain extra-fin) chiffres proposés par Henri Gaud, valeurs plutôt sévères pour le film, sont les suivantes (*je cite [13]*) :

- Le [film] 24x36 [mm, couleur] atteint péniblement et dans des conditions très particulières 8 Mpixels
- Le 6x8 [cm] atteint sans trop de problèmes et avec des optiques « de course » 16 Mpixel
- Le 4x5 pouces atteint péniblement 32 Mpixels
- Le 8x10 pouces peut dans certains cas atteindre 64 Mpixels

(*fin de citation*)

Même en majorant ces valeurs de 50%, on reste très loin de l'estimation basée sur 100 cycles par mm ; pour le 24X36 les 8 Mpix effectifs recourent assez bien l'estimation faite à partir des 50 cycles par mm comme limite du spectre de l'image.

L'examen de ces chiffres permet de proposer une règle empirique ; sachant que l'état de l'art actuel (début 2007, mais cela ne va pas durer !) pour les capteurs 24x36 plein format est de 16 Mpix (dans quelques mois, ce sera sans doute plus de 20 Mpix), pour les capteurs 4,5x6 c'est 39 Mpix, en mettant en regard la surface de film correspondante dans la liste proposée par Henri Gaud on voit qu'il faut numériser une surface de film au moins double pour arriver au même résultat que par capture numérique directe. Et encore, compte tenu de l'absence de bruit de granularité des capteurs silicium, ce facteur est peut-être situé entre 2 et 4. Avec le facteur 2, qui est aujourd'hui probablement très optimiste en faveur du film, on peut proposer une équivalence entre les formats sur film et sur silicium échantillonné :

- le demi-format 18x24mm silicium ferait jeu égal avec le plein format du film 24x36,
- le petit format silicium ferait jeu égal avec le moyen format sur film,
- le moyen format silicium étant aussi bon que le 4x5 pouces,
- un dos à balayage 4x5 pouces étant aussi bon qu'un 20x25 cm numérisé.

Peut-être cette équivalence est-elle encore conservatrice, peut-être faut-il accepter que le facteur est plutôt de 4, auquel cas même le plan-film 4x5 pouces n'aurait plus d'intérêt [14], mais accep-

ter cette équivalence explique (s'il était encore nécessaire début 2007 d'argumenter sur ce point) la désaffectation des professionnels pour le moyen format à film au profit des petits formats sur silicium, 24x36... et inférieurs. Si on ajoute tous les autres avantages en termes de productivité, la cause du film semblerait donc indéfendable, du moins à usage professionnel mais il faut tout de même tenir compte des problèmes d'investissement initial dans le capteur et son système d'acquisition, plus le délicat problème du stockage/archivage des images numériques !

Mais quelle est la limite de résolution d'un capteur ?

Pendant la montée en puissance des appareils numériques et des scanners en ce début de XXI-ème siècle, a été entretenue une certaine confusion entre le nombre total d'échantillons dans l'image, c'est à dire le nombre total de pixels (avec parfois des facteurs trois pour certains capteurs couleur tri-couches [15]) ou le nombre de points par pouce du scanner, confusion avec la résolution de l'image et donc l'un des éléments déterminants pour la qualité d'une image.

Pour proposer un modèle comparatif de résolution entre un film et un capteur silicium, il faut faire quelques approximations et faire choix d'un outil de comparaison. Nous proposons de regarder du côté des courbes de Fonction de Transfert de Modulation (FTM) des capteurs et du film. Bernard Leblanc souligne dans l'article déjà cité [7] à quel point il faut être prudent en pensant que les courbes FTM contiennent tout ce qu'il faut pour définir la qualité visuelle d'une image ; en particulier le fait que par définition la FTM ne mesure que les faibles modulations là où on sait que l'oeil est très sensible aux effets de bord et aux fortes modulations dans l'image, sans oublier les effets du bruit de granularité.

Néanmoins comme on peut combiner par simple multiplication plusieurs courbes FTM pour représenter l'enchaînement de plusieurs processus d'imagerie, et que ces courbes sont publiées pour le film, il nous a semblé qu'un modèle simple de FTM pour le capteur permettrait au moins d'attaquer le délicat problème qu'on peut résumer ainsi : **d'où vient ce paradoxe apparent du relativement faible nombre de pixels (par rapport au film numérisé) nécessaires à la fabrication d'un excellent tirage à partir d'un fichier numérique obtenu par acquisition directe sur capteur ?**

Un retour temporaire vers le microdensitomètre !

Le bon vieux microdensitomètre va nous fournir le modèle dont nous avons besoin pour essayer de voir ce qui se passe lorsqu'une image optique analogique est enregistrée par un capteur de type mosaïque. Pour commencer, on va ne prendre en compte qu'une image monochrome.

Avant que les capteurs d'images de type CCD (*Charge-Coupled Devices*, Dispositifs à Transfert de Charges, en français) n'existent, il était parfaitement possible, au moins en principe, d'enregistrer sous forme électronique une image analogique. Sans remonter jusqu'au bélinographe, synonyme, disait-on chez les photo-reporters d'autrefois, de qualité d'image abominable, on peut imaginer en remontant dans le temps, faire appel à une technologie qui pourrait presque être celle des années 1930 :

- on forme l'image derrière l'objectif comme d'habitude
- au lieu du film on déplace une fente carrée dans tout le champ-image ; derrière la fente carrée on place un photodétecteur et pour chaque position de la fente on mesure le flux lumineux passant à travers la fente (figure 2)

Cet mode d'enregistrement ne correspond pas en fait au microdensitomètre parce dans cet appareil on projette via une première optique de microscope une première fente sur le film à analyser, et on regarde ce qui sort à travers une deuxième optique symétrique de la première, suivie d'une deuxième fente conjuguée de la première. Notre dispositif est donc plus simple mais il conserve du

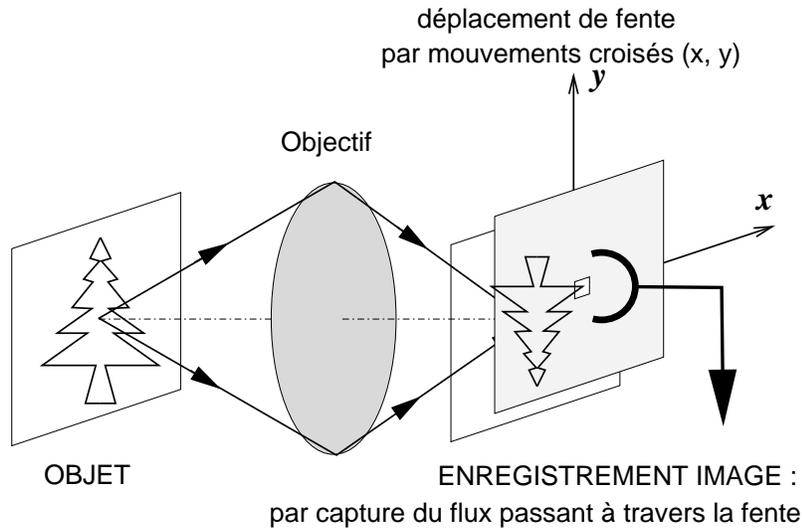


tableau de nombres
(transcrit manuellement ?)

$x \leftarrow$

$y \downarrow$

```

00000000000001000000000000
0000000000001111000000000000
0000000000001111000000000000
0000000000001100100000000000
0000000000001111100000000000
0000000000001111000000000000
0000000000001100110000000000
0000000000001100110000000000
0000000000001000011000000000
0000000000001000001100000000
000000000000100000001100000000
000000000000111111111100000000
000000000000111100111110000000
000000000000110000111000000000
000000000000110000001110000000
00000000000011000000000110000000
00000000000011000000000011000000
000000000000110000111111110000
00000000000011000000111000000000
00000000000011000000000011100000
0111000000000000000000001110
11111111111111111111111111111111
0000000000001111000000000000
0000000000001001000000000000
0000000000001001100000000000
0000000000001001100000000000
0000000000001000010000000000
0000000000001000011000000000
000000000000110000110000000000
000000000000111111100000000000
0000000000000000000000000000

```

FIG. 2 – Enregistrement analogique puis numérisation d’une image par balayage de fente... à la manière d’autrefois !

microdensitomètre l'idée d'analyser une image optique-analogique en balayant une fente et en faisant une mesure point par point.

En acceptant quelques progrès techniques qui nous amènent aux années 1970, on peut imaginer, pour déplacer la fente, des mouvements croisés commandés par des moteurs pas à pas ou par des moteurs continus asservis en position via des capteurs de précision. Et au lieu d'un assistant de laboratoire zélé qui noterait sur un cahier chaque valeur de flux pour chaque point après avoir tourné les molettes d'une table à mouvements croisés manuelle, comme on l'aurait fait dans les années 1930, un ordinateur qui pilote l'ensemble stocke dans sa mémoire une liste des valeurs ainsi détectées dans un tableau de chiffres à deux dimensions.

C'est à dire dans une image numérique, telle qu'on pouvait la fabriquer à partir d'un film il y a 30 ans [1] mais nous n'y sommes pas encore. On peut imaginer qu'un obturateur central fonctionne à chaque prise d'échantillons, ce qui rend le processus effroyablement lent, il serait plus astucieux de laisser se déplacer la fente en continu, le système se comportant alors un peu comme un obturateur à rideaux, peu importe ; cela ne change rien à notre propos qui est d'essayer de définir une limite de résolution latérale au processus.

On suppose que le photodétecteur est bien linéaire vis à vis du flux lumineux incident, pas de souci avec une photo-diode silicium, la linéarité est assurée sur un facteur au moins 10000 avec les bons composants opto-électroniques, certes c'est capital pour la sensitométrie, mais ce n'est pas fondamental pour la question de résolution latérale de l'image.

L'opération a donc consisté à enregistrer un tableau d'échantillons, non pas de la distribution des éclaircissements formés dans l'image analogique, mais une distribution des éclaircissements **pris en valeur moyenne sur la surface de la fente**. Or prendre la valeur moyenne de cette manière revient en fait à échantillonner non pas l'image initiale, mais une image brouillée d'une façon qui est parfaitement analogue à un défaut de mise au point. En effet, si on imagine un point-objet lumineux infiniment fin et une optique parfaite, la réponse de l'ensemble du processus de détection sera la même lorsque la fente se déplace de plus ou moins sa demi largeur par rapport au point d'impact de la lumière ; dans les échantillons enregistrés, on a donc exactement la même chose que si l'image d'un point lumineux était un petit carré dont la dimension est celle de la fente. On obtiendrait le même résultat en défocalisant une image parfaite derrière une optique munie d'un diaphragme carré.

Donc en résumé, le processus de détection se compose d'un effet de brouillage dû à la largeur de la fente, suivi de la prise d'échantillons sur cette image brouillée.

Un modèle simple pour la FTM du capteur

Or il est très facile de caractériser cet effet de brouillage par une courbe de FTM. Imaginons par exemple que la fente fasse 7 microns de côté, la courbe FTM correspondante se calcule classiquement (annexe 2), la courbe part de 100% de contraste à fréquence zéro et tombe à zéro pour une fréquence spatiale égale à l'inverse de la largeur de la fente soit $1000/7 = 140$ cycles par mm environ (figure 4). Autrement dit, avec cette fente de 7 microns, si on regarde l'image de grilles très fines, le pas de grille le plus fin qui n'est plus détectable ce sera également 7 microns. En réalité on peut percevoir l'image de grilles plus fines que cette limite de 140 cycles par millimètre, mais avec un contraste inversé et faible, ce qui n'est pas pour arranger les choses si l'optique placée devant le détecteur est vraiment très bonne.

On se reportera à l'annexe 2 b) pour la forme mathématique de cette courbe idéalisée.

Considérons maintenant un capteur silicium mosaïque monochrome idéal formé d'un pavage de photodétecteurs carrés de 7 microns de côté, ces pavés sont supposés parfaitement étanches à la lumière l'un par rapport à l'autre bien qu'ils soient adjacents. Grâce aux miracles de la micro-électronique, au lieu de déplacer péniblement notre fente unique avec son détecteur unique, par un processus qui peut être fort complexe on admettra facilement qu'un ordinateur va être capable de

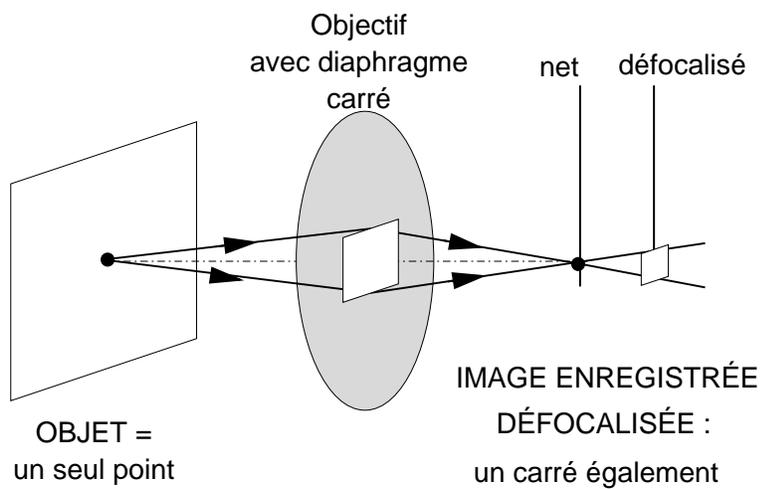
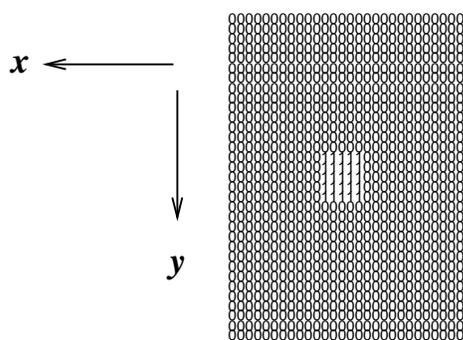
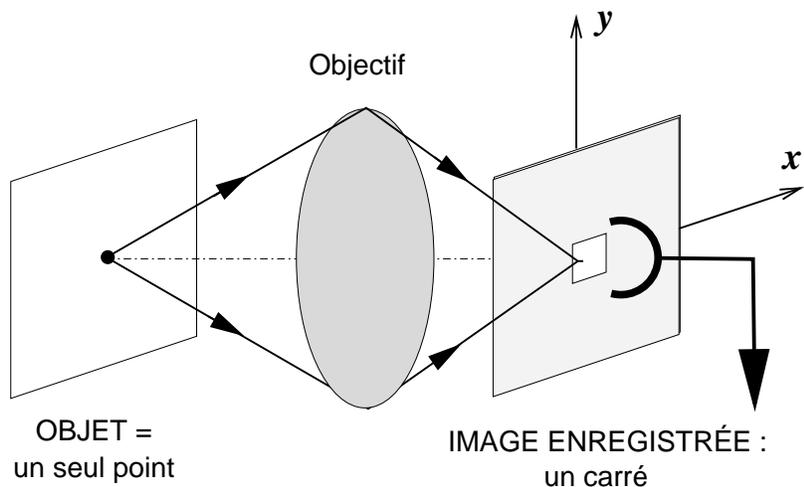


FIG. 3 – Dans le balayage de fente, l'image enregistrée d'un point est un carré égal à la dimension de fente

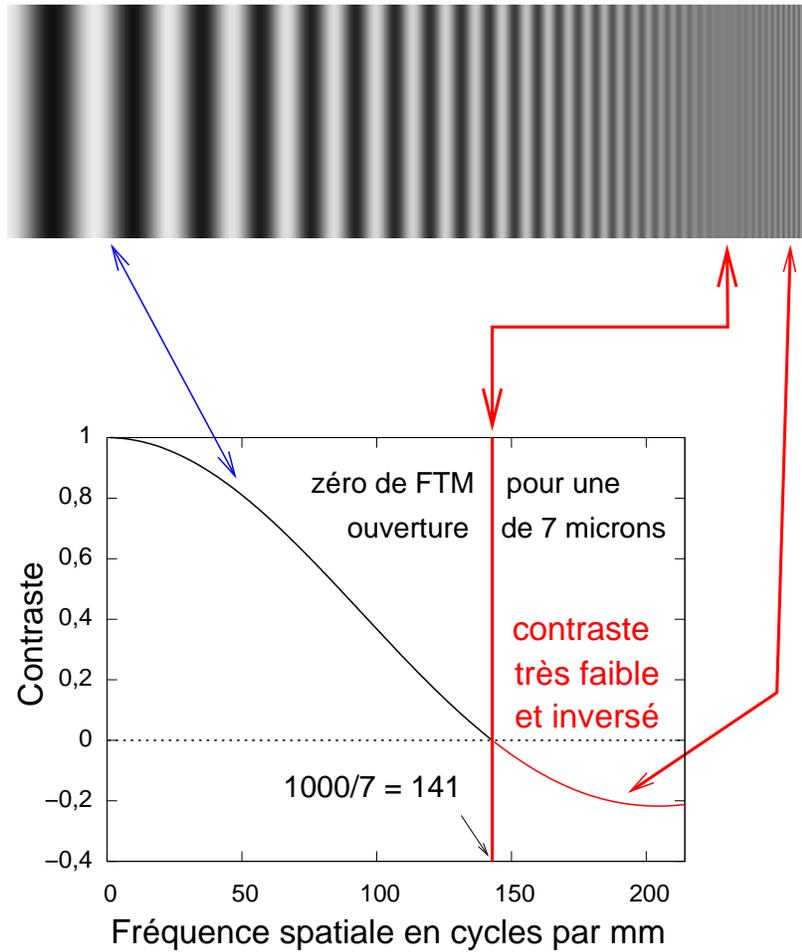


FIG. 4 – La détection d’une image analogique à travers une ouverture carrée de largeur a annule le contraste à $1000/a$ cycles par mm

stocker le tableau ce chiffres de la même façon que dans le pénible balayage de fente, mais **l'effet de brouillage dû à l'ouverture de la fente est exactement le même.**

Retour sur l'échantillonnage

Il faut échantillonner plus fin !

On sort alors du chapeau le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, qui nous rappelle qu'il faut au moins deux points de la grille d'échantillonnage pour passer une sinusoïde. Il faut donc pour garder le plus possible des détails de l'image échantillonner deux fois plus finement que ce zéro de la FTM dû à l'ouverture des pixels, et on sera capable de reconstituer, non pas l'image de départ mais au moins l'image brouillée par l'effet de fente dû à l'ouverture du pixel. En réalité c'est un peu plus compliqué parce que la FTM d'une fente se prolonge avec une inversion de contraste au-delà de ce premier zéro, admettons pour simplifier qu'il n'y ait plus rien au-delà.

Pour pouvoir reconstituer l'image sans problème de repliement de spectre donc sans perte, il faudrait échantillonner avec un pas égal à la moitié de l'ouverture du pixel, soit 3,5 microns dans notre exemple. Dans le système à balayage de fente, il n'y a pas de problème particulier si on possède des tables croisées suffisamment précises, l'ouverture de la fente et la grille choisie pour l'échantillonnage sont deux paramètres parfaitement indépendants. En gardant la fente de 7 microns rien n'empêche de quadrupler le nombre d'échantillons en faisant un relevé avec les tables croisées tous les 3,5 microns dans les deux directions, c'est à dire sur une grille plus fine de fréquence 280 échantillons par millimètre.

Mais avec notre pavage en silicium avec des pixels ouverts de 7 microns, ce n'est pas possible d'échantillonner au pas de 3,5 microns, sauf en déplaçant d'un demi-pixel l'ensemble du capteur dans les deux directions, une possibilité effectivement offerte par certains dos numériques et permettant de reconstituer en plusieurs prises successives déplacées très finement l'équivalent d'une grille de pas moitié [16].

D'autre part la surface active pour une mosaïque au pas de 7 microns, soit 140 échantillons par millimètre, a peu de chance de faire 7 microns de côté, elle sera nécessairement plus petite. Remarquons alors que de façon un peu paradoxale, le fait que l'ouverture des pixels soit plus petite que le pas de la grille n'est pas gênant pour l'effet de brouillage dû à la fente, bien au contraire : si l'ouverture du pixel n'est que de 3,5 microns, le premier zéro de la FTM sera repoussé à 280 cycles par millimètres, autant dire que l'effet d'ouverture du pixel va s'effacer devant d'autres effets physiques, par exemple des fuites de lumière ou de photo-électrons d'un pixel à l'autre.

Le problème, on le voit ici, n'est pas tant dans l'effet de brouillage dû à l'ouverture, qui intervient pour 140 cycles par mm ou plus haut, c'est qu'avec cette grille au pas de 7 microns le théorème d'échantillonnage nous interdit de reconstituer l'image analogique au-delà des 70 cycles par millimètre, alors que cette image a toute chances, si l'optique est bonne, et de nombreux tests sur mire l'attestent, de contenir des détails au-delà de cette fréquence-limite.

Un modèle de filtre anti-moiré

Pour éviter le repliement de spectre ou les effets de moiré, une solution consiste à brouiller l'image analogique un peu plus que ne le fait naturellement l'ouverture du pixel. C'est presque comme si lors d'un enregistrement audio on filtrait au préalable le signal analogique en sortie du micro avec un filtre passe-bas. Imaginons par exemple que par un procédé optique, on réussisse à « arroser » 4 pixels au lieu d'un seul lorsque le capteur est illuminé par un pinceau de lumière très fin. Ce qui revient à doubler l'ouverture du pixel sans changer le pas de la grille de prise d'échantillons. La FTM voit donc

son premier zéro tomber deux fois plus bas (figure 5) c'est à dire dans notre exemple à 70 cycles par mm, ce qui va constituer la nouvelle limite du spectre de l'image, mais cette fois l'échantillonnage va être assez fin pour ne plus menacer par les effets de moiré l'image reconstruite ultérieurement par interpolation.

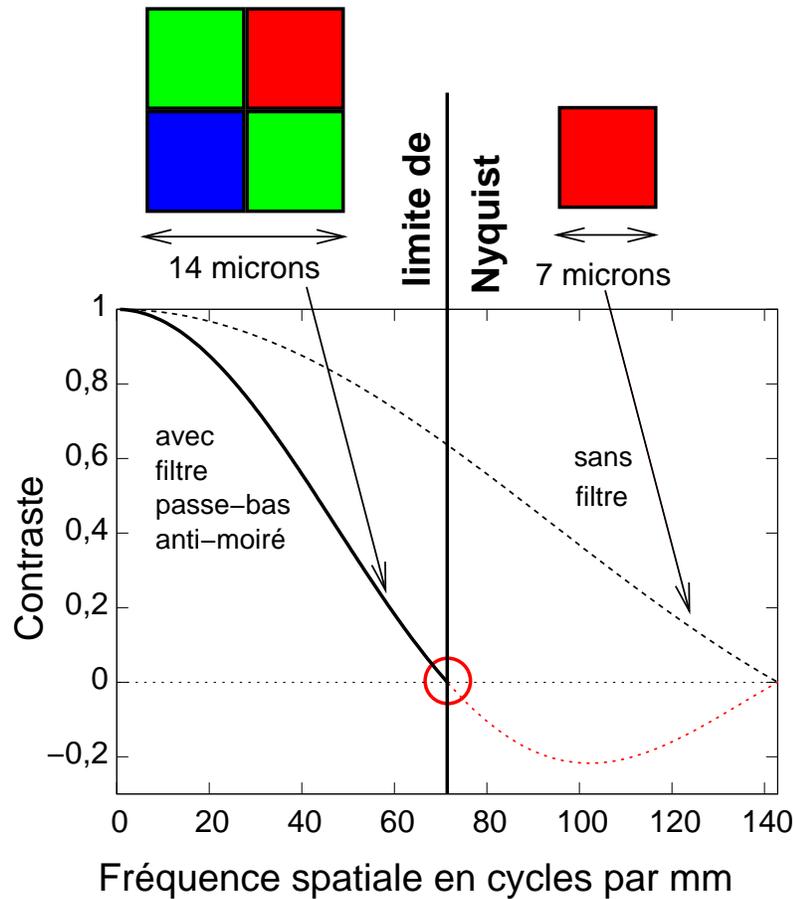


FIG. 5 – Un modèle simple pour la courbe FTM d'un capteur silicium échantillonné avec et sans filtre anti-moiré : si on « arrose » 4 pixels au lieu d'un, la FTM correspondant à l'effet d'ouverture doublée présente un zéro à la fréquence limite d'échantillonnage

Pour plus d'information sur les méthodes optiques employées pour fabriquer le filtre optique passe-bas anti-moiré, on se référera à la liste [17].

La réaction naturelle du photographe qui a toujours choisi les meilleures optiques, et qui a fait toute sa vie la chasse aux défauts de mise au point involontaires, c'est d'être atterré par un procédé qui revient, de fait, à un défaut de mise au point : arroser 4 pixels au lieu d'un, c'est un effet de brouillage à première vue insoutenable.

Mais attention. Dans le monde de l'image photographique analogique, on ne peut que subir stoïquement les dégradations successives du contraste des fins détails de l'image à chaque étape de la chaîne de fabrication sans pouvoir faire quoi que ce soit. Dans le monde numérique, comme on connaît parfaitement la forme de la courbe FTM associée au filtre anti-moiré, rien n'interdit, bien au contraire, de re-traiter le spectre de l'image enregistré pour « remonter » le contraste le plus possible jusqu'à l'ultime limite du théorème d'échantillonnage. C'est une simple opération mathématique équivalente à une accentuation, opération de routine dans la préparation des fichiers pour l'impression. Il y a certainement de multiples façons de faire cette retouche, et les constructeurs ne communiquent pas beaucoup sur les traitements appliqués à l'image avant que le propriétaire de l'appareil n'extrait, *in*

fine, un fichier utilisable.

La façon dont on aurait procédé traditionnellement par un traitement, disons, purement académique, de *Fourier linéaire* (cela fut fait dès les années 1950 par traitement optique analogique [5]), consisterait à partir du fichier échantillonné, à calculer le spectre de l'image par une opération mathématique appelée *transformée de Fourier*, à multiplier le spectre obtenu par une fonction de correction (figure 6), puis à calculer la transformée de Fourier inverse pour re-synthétiser l'image corrigée.

Tricherie ! s'exclameront ceux qui sont trop habitués à la photo sur film prétendument exempte de toute manipulation ! On sait que ce genre de traitement fut appliqué aux premières images du télescope spatial Hubble, on connaissait parfaitement le défaut qui était principalement une aberration de sphéricité de caractéristiques connues avec précision [18]. Mais on sait également que les images les plus belles furent obtenues après réparation de l'optique par une mission de navette spatiale et ajout d'un système optique correcteur.

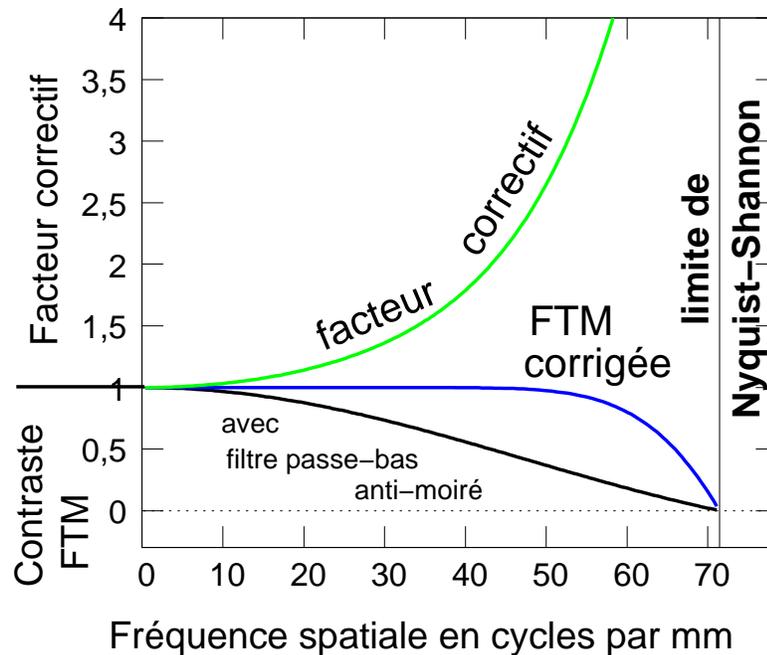


FIG. 6 – Comment il est possible, en principe, en multipliant le spectre de l'image par un facteur correctif, de récupérer une partie du contraste perdu par le filtre anti-moiré

Il est clair que les possibilités de restauration d'images intégrées dans l'appareil de prise de vue ne peuvent que se développer à l'avenir, par exemple Hasselblad [19] justifie un changement de format des fichiers pour le H3D par la nécessité de tenir compte des caractéristiques de chaque optique, paramètres qui entrent en ligne de compte avant la fabrication du fichier-image accessible à l'utilisateur.

Comparaison avec le film couleur

Et c'est en couleurs ! [20]

Maintenant que nous avons un modèle pour la FTM du capteur monochrome, comment passer à la couleur ?

Nous resterons très prudents. On sait que dans la majorité des capteurs, à l'exception notable du capteur Foveon® [21] équipant les appareils Sigma® [15], les pixels sont arrangés en damier de type

« Bayer » [22] (figure 7). En fait, on part d'un capteur monochrome et on ajoute sur certains pixels, soit un filtre rouge, soit un filtre vert, soit un filtre bleu [23].

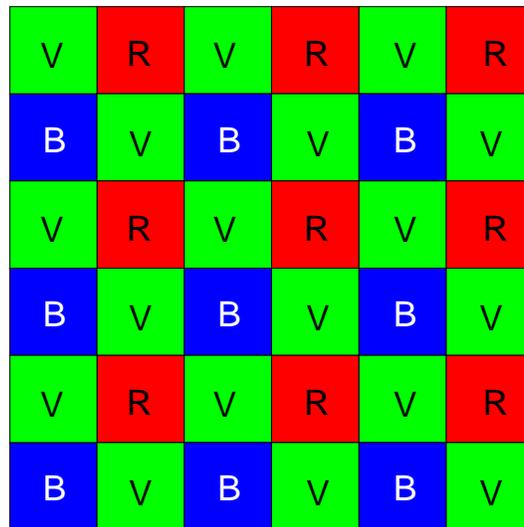


FIG. 7 – Principe de la mosaïque de type « Bayer » [22], d'après le texte du brevet original US N° 3971065, figure 6 page 4

Donc en fait on enregistre trois images : Rouge, Verte, Bleue (RVB) sur trois grilles d'échantillonnage entrelacées. Pour le rouge et le bleu, l'ouverture du pixel est donc au maximum égale à la moitié de la distance effective entre deux pixels de même couleur ; pour le vert on enregistre deux pixels en diagonale ce qui double la surface de collection du vert. On justifie en général cette préférence pour le vert en disant que l'oeil ayant un maximum de sensibilité dans le jaune-vert [24] est également capable de déceler plus de niveaux de luminance au centre du spectre visible (jaune-vert) que sur les bords (bleu et rouge).

Notons qu'au sens où on entend la périodicité d'un réseau à deux dimensions, composé d'un motif élémentaire qui se répète dans deux directions de l'espace (pas forcément orthogonales comme ici), la périodicité qui sous-tend la répartition des pixels R, des deux V et du B est la même, elle est égale au double du pas de grille de départ soit 14 microns dans les deux directions.

Quelle serait la FTM associée à deux petits carrés verts en diagonale... difficile à dire et plus difficile encore serait de proposer un modèle de FTM multicolore pour ce processus de détection. Dans les simulations FTM multicolores qui sont publiées pour les objectifs, le concepteur fait choix d'un certain nombre de longueurs d'onde où la FTM monochromatique est calculée, on donne ensuite un résultat qui est un modèle pour la réponse visuelle en spectre large en calculant la moyenne pondérée de ces différentes FTM pour les différentes couleurs. Nous n'allons donc pas rentrer dans cette complexité et nous allons pour simplifier prendre comme référence pour le capteur au pas de grille de 7 microns les deux FTM monochromes, celle qui va jusqu'à 70 pl/mm avec filtre anti-moiré et celle à 140 cycles sans filtre anti moiré.

a) Quelle période d'échantillonnage pour une mosaïque RVVB « Bayer » ?

On pourrait émettre l'objection suivante concernant le détecteur de type « Bayer » : si l'image enregistrée est rigoureusement monochromatique, par exemple un rouge provenant d'un éclairage laser et qui ne serait pas détecté par les pixels verts ou bleus, la grille d'échantillonnage serait donc partiellement vide, la période d'échantillonnage séparant deux pixels rouges étant égale au double

de la période nominale, dans notre cas : $2 \times 7 = 14$ microns. Il apparaît que les constructeurs de capteurs de type « Bayer » ou d'appareils équipés de ces capteurs annoncent effectivement un nombre total de pixels qui est celui de *tous* les pixels quelle que soit leur couleur. Est-ce illégitime ? En réalité il y a fort peu de situations photographiques où seule une sous-grille de pixels, par exemple rouge, serait uniquement sollicitée [25]. Donc la plupart du temps, si on imagine l'image d'une grille fine dont la couleur est telle qu'au moins deux pixels « répondent », pour ce qui est du théorème d'échantillonnage, la période à prendre en compte est bien la période de la grille de base avant dépôt des filtres, soit 7 microns et non pas la période d'un groupe de 4 pixels (R,VV,B), soit 14 microns.

Cette façon de présenter est un peu troublante si on pense à l'émission d'une image couleur par un écran de télévision ou d'ordinateur, dans lequel il faut impérativement compter les trois « phosphores » (R, V, B) pour constituer un pixel.

Lorsque l'utilisateur ouvre un fichier issu d'un appareil numérique donné pour 8 mégapixels, il compte effectivement 8 millions de points affectés des trois niveaux (R, V, B) dans son image alors que le nombre de pixels physiques de la matrice « Bayer » correspondante n'est que 2 millions pour le rouge, 4 millions pour les deux verts et 2 millions pour le bleu. Les valeurs manquantes sont calculées par interpolation.

Pour simplifier la comparaison avec le film, nous accorderons donc, au bénéfice du doute, au capteur « Bayer » dont la grille de base est au pas de 7 microns, le fait que la limite d'échantillonnage sur un objet monochromatique, qui devrait être en principe de 14 microns, sera considérée ici égale à 7 microns, c'est à dire la valeur qu'on aurait en ne photographiant qu'un monde gris sans nuances de couleurs, éclairé en lumière blanche.

En revanche dans le cas du capteur tri-couches Foveon® [15], lorsque le nombre total de pixels annoncés par le constructeur est donné par la somme des nombres de chaque couche, on peut réellement soulever l'objection de la légitimité de ce décompte. En effet, si une grille « grise » est détectée par une mosaïque « Bayer », on peut admettre que la période d'échantillonnage est effectivement celle du réseau détecteur de base, toutes couleurs confondues. Dans le capteur Foveon® dont le décompte nominal de pixels est de 14 millions, en fait il y a trois réseaux superposés de 4,2 millions de pixels, tous avec la même période de grille et tous superposés, sans le décalage latéral du capteur « Bayer ». La période d'échantillonnage de la grille grise est dans le cas « Foveon® » la même que pour une grille monochromatique, donc la même que pour un capteur « Bayer » de 4,2 millions de pixels.

b) Comparaisons avec la FTM du film

Après ce long préambule nécessaire à établir la comparaison entre le film couleur et le capteur, il est facile d'extraire des données des constructeurs la courbe FTM pour les films. On a un très bon article en anglais de Norman Koren à ce sujet [26]. Ces courbes sont en général tracées en échelles logarithmiques, nous allons ici les retracer en échelles linéaires pour rester le plus près possible du modèle proposé pour la FTM du capteur. Voici par exemple (figure 8) ce que donne la comparaison avec la FTM du film pour diapositives couleurs Provia 100F de chez Fuji ([27]) :

L'examen de la figure 8 fait ressortir que dans la plage de 10 à 50 cycles par mm, qui est sans doute la plus importante pour l'examen de tirages de qualité [28], il n'y a pas d'avantage franchement significatif du film diapo couleur moderne sur la détection numérique directe au pas de 7 microns, même si un filtre anti-moiré dégrade la FTM du capteur. Si on ajoute, pour le film, la perte liée au passage par l'optique de l'agrandisseur, la FTM finale estimée en multipliant celle du film par celle d'une optique (dans notre simulation, une optique idéale limitée par la diffraction à 100 cycles par mm, soit entre f/11 et f/16) on obtient au final un résultat moins bon par agrandissement optique traditionnel. La même dégradation due à un deuxième passage par une optique s'applique également lors de la numérisation du film dans un scanner, et bien que tous les scanners pour film ne soient pas égaux (loin s'en faut !), **on voit déjà une première raison très simple pour qu'à surface égale, le**

Comparaison des FTM entre film diapo couleur et capteur silicium échantillonné au pas de 7 microns

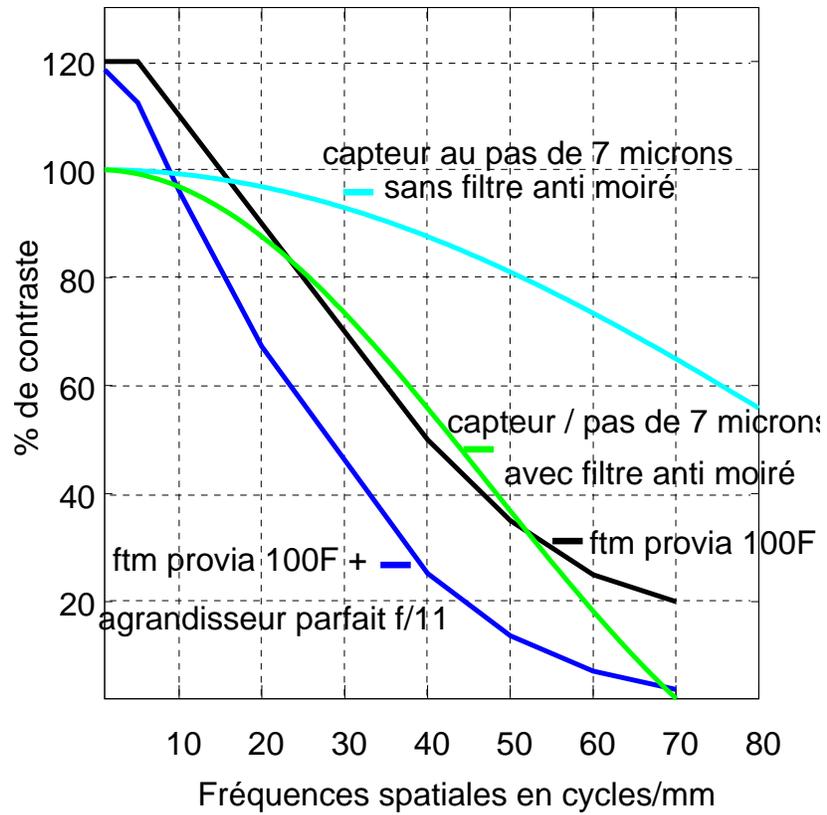


FIG. 8 – Comparaison des courbes FTM pour le film Provia 100F avec une simulation pour un capteur au pas de 7 microns : le film de petit format ne présente plus beaucoup intérêt... si on ne regarde que la résolution.

film couleur ne soit pas meilleur que la détection directe sur silicium.

Mais le film n'a pas dit son dernier mot, car il offre par rapport au silicium un avantage considérable, c'est de conserver sa performance FTM sur une surface qui n'est limitée que par les dimensions des machines servant à l'étendage des couches sensibles. Alors que pour l'instant les difficultés pour fabriquer de très grands capteurs silicium sont énormes, les prix (2007) restant extrêmement élevés dès qu'on veut une surface plus grande que 37x37 mm, la norme en capteurs photographiques professionnels étant plutôt de l'ordre de 4,5x6 cm (37x49 mm dans l'article de Charles Cramer [14]).

Il est donc intéressant de comparer ce que la *mise à l'échelle des courbes FTM* permet de conclure si on part d'un grand plan film enregistré avec une chambre grand format, pour un rapport d'agrandissement moindre que celui nécessaire avec le capteur silicium. Si on admet que l'image numérisée s'agrandit à volonté sans perte, pour ce qui concerne l'agrandissement optique classique il suffit de mettre à l'échelle la courbe FTM de l'objectif d'agrandisseur en ramenant les cycles par mm au niveau de l'image agrandie.

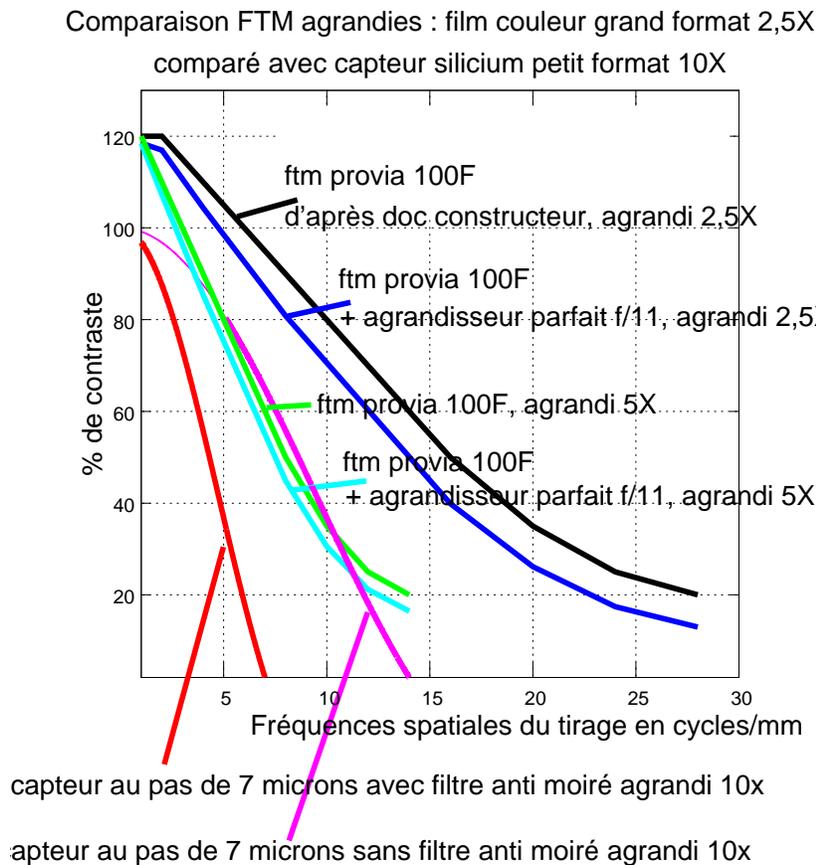


FIG. 9 – Comparaison des courbes FTM pour le film Provia 100F agrandi 2,5X avec une image de capteur au pas de 7 microns agrandie 10X : le film grand format l'emporte apparemment sans discussion !

Cette fois, si on tient compte du rapport d'agrandissement moindre requis par le plan film de grand format, on s'aperçoit qu'en termes de FTM, le film, à condition d'être agrandi 4 fois moins que l'image numérique, l'emporte clairement sur le capteur de petit format au pas de 7 microns. Sous ces conditions, comment se fait-il que les résultats observés visuellement [14] ne confirment pas cet avantage ? Qu'avons-nous oublié dans ce modèle ? Eh bien tout simplement, en se concentrant sur l'aspect de résolution du détecteur, nous n'avons pas pris en compte un aspect très fondamental dans l'évaluation de la qualité d'une image, c'est à dire la question du bruit et de l'efficacité de détection,

comparées entre le film et un capteur silicium.

Cette discussion fera l'objet d'un prochain article.

Une conclusion provisoire ?

Il est permis de rêver à ce que pourrait être la meilleure façon de coupler une optique à un capteur échantillonné. On a vu la nécessité d'un filtre anti-moiré pour respecter la condition de Nyquist-Shannon lorsque l'objectif délivre de fins détails au-delà de la limite. Il existe en effet une fréquence spatiale de coupure absolue pour toutes les optiques, c'est la limite de diffraction qui borne vers le haut toutes les courbes FTM. Cette limite, connue depuis bien avant l'ère de l'image numérique [5] vaut, en fréquences spatiales, $1/(N\lambda)$ ou en période, $N\lambda$, où N est le nombre d'ouverture de l'objectif et λ est la longueur d'onde de la lumière. Prenant pour λ la limite effective de sensibilité de l'œil à 0,7 microns, la fréquence de coupure de diffraction est donc en cycles par millimètres de l'ordre de $1400/N$. Imaginons que la technologie de fabrication limite la finesse de la grille d'échantillonnage du capteur à 5 microns, cela veut dire qu'on peut enregistrer sans aucune perte et sans risque de moiré une image optique dont la période de coupure est de 10 microns soit 100 cycles par millimètre. Le nombre d'ouverture correspondant à la règle des $1400/N$ est donc $N=14$, c'est proche du meilleur diaphragme des optiques de chambre actuelles de la classe $75^\circ/6$ lentilles prévues pour couvrir le format 9x12-4x5 pouces avec 40% de marge de décentrement.

En d'autres termes, dès aujourd'hui en déplaçant par balayage un petit capteur avec une grille de pixels au pas de 5 microns derrière une optique de chambre fermée à $f/11$ - $f/16$, on n'a plus besoin de se soucier des effets de moiré ; seuls risquent d'intervenir les effets de chromatisme transversal dont les nouvelles séries d'optiques de chambre conçues pour les petits capteurs sont pratiquement exemptes. Ces nouvelles optiques ont leur meilleur diaphragme à $f/8$, ce qui donne une période de coupure ultime de 5,6 microns ; Nyquist-Shannon nous demandent donc une grille de pixels au pas de 2,8 microns. Il est *a priori* plus réaliste d'imaginer une augmentation de la surface des capteurs avec une grille de pixels autour de 5 à 7 microns que de descendre à 2,8 microns. Reste à savoir si commercialement le jeu en vaut la chandelle... rendez-vous dans deux ou trois ans ?

Nous avons vu également que les problèmes de résolution et d'échantillonnage n'expliquaient pas complètement le facteur empirique 2 à 4 en surface entre film et silicium, **il faut donc tenir compte du bruit et de l'efficacité de détection...**

À SUIVRE !

Remerciements

Cet article fait suite à plusieurs discussions sur le forum technique de galerie-photo

<http://www.galerie-photo.info/forum/list.php?f=1>,

en particulier celle-ci, lancée par Guillaume Péronne :

<http://www.galerie-photo.info/forum/read.php?f=1&i=13613&t=13613>.

Nous sommes donc bien entendu redevables aux intervenants de ces discussions pour l'élaboration des idées contenues dans cet article.

Un grand merci bien entendu à Henri Gaud pour les remarques du photographe professionnel, en particulier pour la règle du facteur 2 à 4 équivalent entre film et capteur silicium qu'il a élaborée après

de longues heures passées à numériser une partie de son fonds d'images sur film. Merci à Dan Fromm pour ses objections constructives, en particulier pour avoir attiré mon attention sur les très efficaces traitements numériques (DSP) qui permettent à partir d'un petit capteur muni d'un filtre optique passe-bas de retrouver le plus de netteté possible sans risquer les effets de moiré. Remerciements à Yves Colombe et Pascal Miele pour avoir éclairé ma lanterne sur l'étrange décompte de pixels dans les matrices « Bayer ». Merci enfin à David Giancattarina pour avoir suivi de près les articles comparatifs cités ici entre les dos numériques professionnels et les plan-films numérisés.

Annexe 1 : Repliement de spectre et moiré

Après avoir échantillonné une image, on calcule *a posteriori* une estimation de l'image analogique d'origine à partir du tableau des échantillons. C'est l'opération d'interpolation. Lorsque le spectre de l'image est limité, il n'y a pas de problème à reconstituer parfaitement le spectre de l'image d'origine, et donc l'image elle-même. Lorsque le spectre de l'image s'étend au-delà de la fréquence limite donnée par le théorème de Nyquist-Shannon [2], le spectre calculé par interpolation n'est pas le spectre de l'image, mais un spectre constitué de la superposition des basses fréquences de l'image avec le **repliement des hautes fréquences** (figure 10).

Cet effet de *repliement de spectre*, appelé *aliasing* en terminologie anglo-saxonne est relié au phénomène de moiré de la façon suivante. Dans le spectre faussement reconstitué, les parties repliées sont affectées d'une fréquence qui est égale à la différence entre la fréquence d'origine et la fréquence d'échantillonnage. Par exemple si une grille de pas plus fin que le double de la période d'échantillonnage est présente dans l'image, après interpolation et reconstruction apparaîtra dans l'image reconstituée une grille de pas beaucoup plus large, l'inverse de ce pas étant égal à la différence entre les inverses du pas de grille d'origine et l'inverse du pas d'échantillonnage. La règle est la même pour le moiré classique, **la fréquence de moiré est égale à la différence des deux fréquences qui se superposent**, ou en acoustique, la fréquence du battement résultant de la superposition des sons à deux fréquences émises par deux tuyaux d'orgue différents est égale à la différence de ces fréquences.

Un exemple visuel du phénomène de moiré en imagerie numérique est proposé ici [29].

Annexe 2 : FTM pour le phénomène de brouillage par une ouverture carrée

Le problème est un classique de l'optique instrumentale, il se posait dans les spectrographes à fente et de façon générale dans tous les instruments où on détecte un éclaircissement en captant tout ce qui passe à travers une fente de largeur donnée a . On va faire ce calcul dans le cas d'une fente rectiligne, suivant une seule dimension d'espace x , il se généralise facilement au cas d'une fente carrée dans le plan (x, y)

L'intensité lumineuse à enregistrer sera représentée par :

$$I(x) = I_0(1 + c_1 \cos(2\pi x/p)) \quad (1)$$

où I_0 est la valeur moyenne de l'éclaircissement, c_1 un coefficient définissant une petite modulation de l'intensité de la lumière et p le pas de cette distribution, analogue à celle d'une grille mais à bords adoucis.

Ce qui est détecté / enregistré, I_{env} est tout ce qui passe à travers une fente de largeur a qu'on va déplacer dans la direction x , l'intensité enregistrée en un point fixé x_0 , qui correspond au centre de la

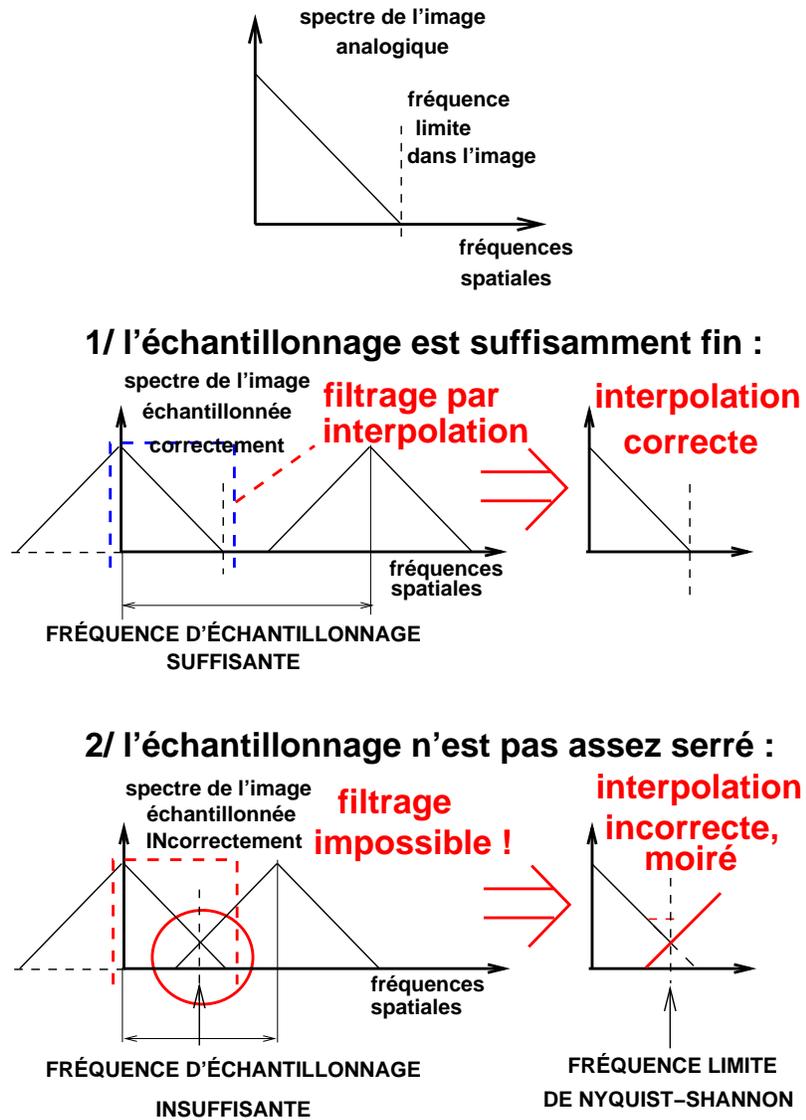


FIG. 10 – Spectre d'une image échantillonnée et repliement de spectre

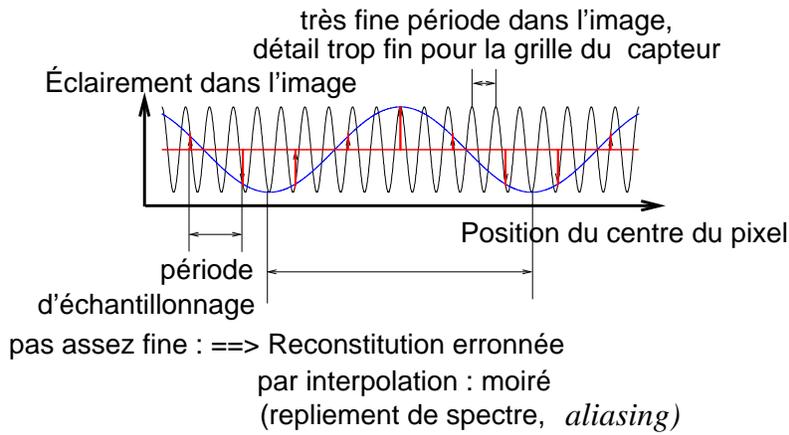
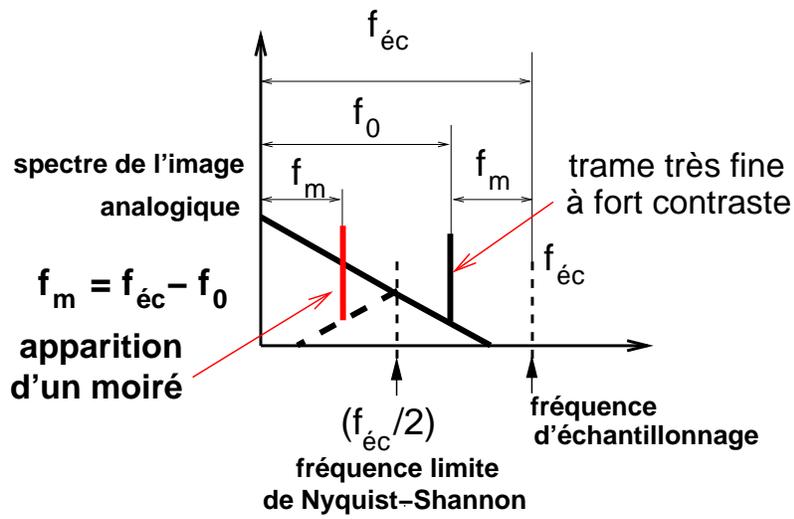


FIG. 11 – Lorsque l'échantillonnage n'est pas assez fin, le calcul d'interpolation reconstitue une sinusoïde de basse fréquence correspondant au phénomène traditionnel du **moiré**

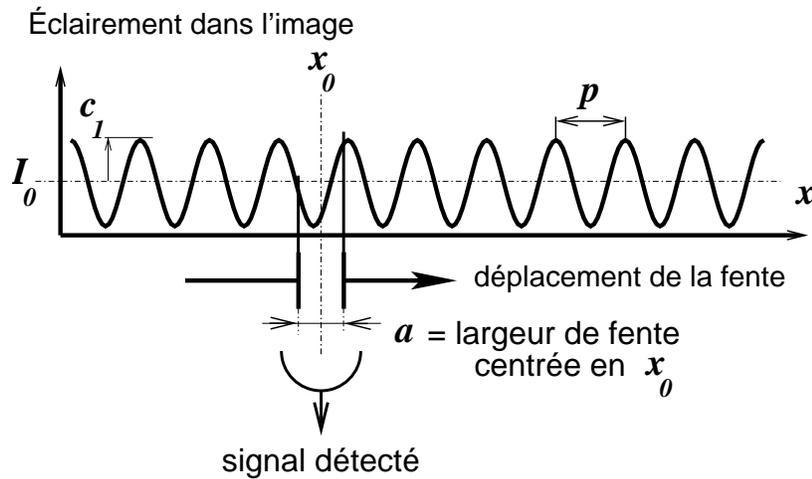


FIG. 12 – Effet de brouillage d'une distribution lumineuse sinusoïdale de période p par enregistrement derrière une fente de largeur a : si la largeur de fente devient égale à la période de la sinusoïde, il y a perte totale de contraste dans le signal détecté, ce qui correspond à un zéro de la FTM.

fente, est donnée par une intégrale de la fonction d'origine prise sur la largeur de la fente :

$$I_{enr}(x_0) = \int_{x_0-a/2}^{x_0+a/2} I_0 (1 + c_1 \cos(2\pi x/p)) dx \quad (2)$$

Le résultat ce de calcul ne fait appel qu'aux fonctions trigonométriques habituelles, et vaut :

$$I_{enr}(x_0) = a I_0 (1 + c_1 V(a) \cos(2\pi x/p)) \quad (3)$$

où $V(a)$ est une fonction donnant *visibilité* de la modulation, qui vient affaiblir le facteur de modulation c_1 , elle vaut :

$$V(a) = \frac{\sin(\pi a/p)}{(\pi a/p)} \quad (4)$$

Le tracé de cette fonction est donné sur la figure 13,

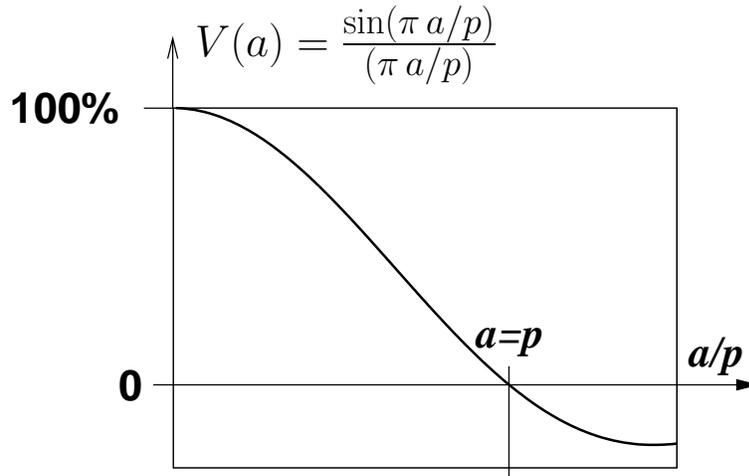


FIG. 13 – Courbe FTM correspondant à l'effet de brouillage par enregistrement derrière une fente de largeur a

cette visibilité de la modulation s'annule lorsque la condition $a/p = 1$, soit $a = p$ est satisfaite, c'est à dire lorsque la largeur de la fente d'analyse a est égale à la période du phénomène observé p . En termes de fréquences spatiales, le premier zéro de visibilité correspond à la fréquence $\frac{1}{a}$.

Si la largeur a est exprimée en microns, alors la fréquence-limite en cycles par mm vaut : $\frac{1000}{a}$ (en microns)

Un autre résultat d'importance pour la détection, et on s'en serait douté, c'est que le signal enregistré est proportionnel à la largeur de fente a , on a donc un compromis entre la visibilité et la luminosité du phénomène enregistré. Dans le cas d'un capteur silicium, la largeur de la fente d'analyse ne peut pas être plus grande que la période des pixels ; elle peut bien entendu être plus petite ce qui n'est pas au détriment de la visibilité des images de grilles de pas fin, bien au contraire, mais qui est au détriment de la sensibilité du détecteur. D'où l'usage de micro-lentilles pour collecter tout ce qui tombe sur une surface carrée dont le côté est égal à la période des pixels. Un filtre anti-moiré ajouté à tout cela est un dispositif supplémentaire indépendant des micro-lentilles qui répartit la lumière non pas sur un seul pixel mais sur quatre pixels, adjacents afin de respecter la condition d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, échantillonner deux fois plus fin que le motif le plus fin présent dans l'image.

Références

- [1] Emmanuel Bigler, *Du microdensitomètre à la photo numérique : contribution au débat « images argentiques contre images numériques »*, Mars 2002,
http://www.galerie-photo.com/du_microdensitometre.html
- [2] *Théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon*, Wikipédia,
http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Shannon
- [3] Andrés Vega García, *Mécanismes de contrôle pour la transmission de l'audio sur l'Internet*, Thèse, université de Nice-Sophia Antipolis, 1996 <http://www-sop.inria.fr/rodeo/avega/phd/phd-html/node10.html>
- [4] http://fr.wikipedia.org/wiki/Super_Audio_CD
- [5] Maréchal A., Françon M., *Diffraction, structure des images. Influence de la cohérence de la lumière* ISBN : 978-2-225-61215-2 (Masson, 1970)
- [6] Christopher M. Perez, tests des optiques pour moyen format et chambres
<http://www.hevanet.com/cperez/results.html>
<http://www.hevanet.com/cperez/testing.html>
<http://www.hevanet.com/cperez/test/fourcameras.html>
- [7] Bernard Leblanc, *Petite histoire de la sensitométrie argentique et numérique*, « le Photographe », n° 1642, juillet-août 2006, page 61.
B. Leblanc est professeur à l'École Nationale Supérieure Louis Lumière à Noisy-le-Grand.
- [8] Nous désignerons ici par « pixels » l'un ou l'autre des pixels Rouge Vert Bleu (RVB) permettant la prise de vues en couleurs directement, terminologie d'usage pour tous les appareils d'amateur. Il y a néanmoins une différence de terminologie ici par rapport aux pixels émetteurs de lumière d'un écran, dans ce cas chaque pixel doit contenir les trois sous-pixels RVB.
- [9] Christopher M. Perez, *Testing Four Cameras, or how I learned I am completely neurotic*
<http://www.hevanet.com/cperez/test/fourcameras.html>
- [10] *Resolving power of photographic films*, Zeiss Camera Lens News N° 19, mars 2003
- [11] « *Such a lens exists in the Hasselblad program. It is the Zeiss Distagon 3,5/60. In recent performance tests at Carl Zeiss it has managed to **resolve up to 240 line pairs per millimeter** which is far beyond the capability of today's best professional portrait films.* », Zeiss Camera Lens News N°9, 2000, page 3
- [12] *Réduction de format (6x7) et conséquence optique*, discussion sur le forum galerie-photo, contribution par Henri Gaud du 22 mars 2004
<http://www.galerie-photo.org/n-f-27898.html>
- [13] *Limites « raisonnables » au nombre de pixels d'un scan-film*, discussion sur le forum galerie-photo, à l'initiative de Guillaume Péronne, 23 mars 2004
<http://www.galerie-photo.org/n-f-28333.html>
- [14] Voir cet article de Charles Cramer, qui indique clairement, tests à l'appui, qu'un dos silicium 39 Mpix 37x49mm fait jeu égal avec un film 4x5 pouces numérisé avec une machine professionnelle. <http://www.luminous-landscape.com/essays/Cramer.shtml>
- [15] <http://www.sigma-photo.fr/site/article/affichageArticle.aspx?idSegmentation=0000014>
- [16] Pour un capteur monochrome simple, il suffirait dans le principe de déplacer l'ensemble de la mosaïque de (0,0 ; 0, +1/2 pixel ; +1/2 pixel, 0 ; +1/2, +1/2) ce qui fait 4 prises. En réalité pour enregistrer l'image couleur selon ce procédé, il faut, selon le constructeur, 16 prises pour avoir la meilleure qualité d'image possible : *Sinar multi-shot digital back with micro-scanning*
http://www.sinar.ch/site/index_gast-e-1778-50-1899.html

- [17] Une liste de documents en ligne et de brevets décrivant la manière de fabriquer un filtre optique passe-bas anti-moiré.

<http://www.astrosurf.com/luxorion/apn-anti-aliasing.htm>

pages techniques Canon :

http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/lowpass_filter.html

<http://www.google.com/patents?vid=USPAT5452129>

brevet Canon avec courbes FTM déposé en 1993

<http://www.google.com/patents?vid=USPAT5739855>

brevet Philips déposé en 1995

<http://www.google.com/patents?vid=USPAT6963448>

brevet Canon très intéressant avec courbes FTM déposé en 2000

<http://www.google.com/patents?vid=USPAT6392803>

brevet Nikon déposé en 2001

<http://www.google.com/patents?vid=USPAT7088510>

brevet JDS uniphase déposé en 2004

- [18] Hanisch, Robert J. ; White, Richard L., *Restoration of images for the Hubble Space Telescope*, Proc. SPIE Vol. 2029, p. 194-201, Digital Image Recovery and Synthesis II, Paul S. Idell ; Ed. 11/93

Le miroir du télescope spatial Hubble avait, dit la légende, été poli avec une forme de surface parfaite, mais parfaitement fautive, et néanmoins parfaitement connue donc parfaitement corrigible par traitement numérique des images *a posteriori*.

- [19] Lire dans la revue promotionnelle Hasselblad, « Victor by Hasselblad », numéro 1, hiver 2006, l'article sur la correction des aberrations par post-traitement numérique. On n'attachera pas, à la lecture de l'article, trop d'importance à cette lentille en apparence mince qui souffre de chromatisme transversal... en effet, si on peut blâmer la lentille pour ses nombreux défauts, il y a en a un dont elle est exempte, c'est le chromatisme transversal, propriété qu'elle partage à son modeste niveau avec toutes les optiques quasi-symétriques !

La revue promotionnelle : <http://victor.hasselblad.com>

Le site du constructeur suédois : <http://victor.hasselblad.com>

- [20] <http://pierredac.free.fr/sketch01.htm>

- [21] <http://www.foveon.com>

<http://www.foveon.com/article.php?a=67>

- [22] « Bayer », d'après le nom de l'inventeur, le Dr. Bryce Bayer, ingénieur chez Kodak, brevet US N° 3971065, 20 juillet 1976. On lira avec profit ce très intéressant article historique : *A Brief History of 'Pixel'*, par M. Richard F. Lyon de chez Foveon Inc. <http://www.foveon.com/files/ABriefHistoryofPixel2.pdf>

- [23] La documentation Kodak, par exemple pour le modèle KAF-39000 décrit la façon dont on procède pour transformer un capteur monochrome en capteur de type « Bayer » : *Each of the 6.8µm square pixels are selectively covered with red, green or blue pigmented filters for color separation*. <http://www.kodak.com/ezipres/business/ccd/global/plugins/acrobat/en/productssummary/FullFrame/KAF-8300ProductSummaryv1.1.pdf>
Certains modèles sont d'ailleurs livrables en monochrome (sans filtres colorés) ou en « Bayer ». <http://www.kodak.com/ezipres/business/ccd/global/plugins/acrobat/en/datasheet/fullframe/KAF-39000LongSpec.pdf>

- [24] Le maximum de sensibilité de l'oeil selon la courbe CIE de 1931 est donné pour 555 nm, ce qui correspond assez bien au maximum d'émission du spectre solaire à 530 nm pour une source de température de couleur 5500K :
- Introduction à la colorimétrie (1ère partie)*, CST, Dossier Technique N°7, Mai 1998
http://www.cst.fr/IMG/pdf/Introduction_a_la_colorimetrie_1ere_partie_.pdf
Eye sensitivity functions and color matching functions,
<http://www.rpi.edu/~schubert/Educational%20resources/Eye%20sensitivity%20and%20color%20matching%20functions.pdf>
- [25] En réalité, l'examen des courbes d'efficacité quantique de détection d'un capteur tel que le Kodak K1F-39000 [23] montre qu'une lumière rouge monochromatique à 650 nm est détectée avec 15% d'efficacité, mais qu'elle crée tout de même un signal bleu avec une efficacité de 2% et un signal vert avec une efficacité de 3%. Autrement dit, même une image de fine grille rouge à 650nm va donner un signal dans le vert, avec facteur d'atténuation de 1/5, soit une perte de 2,3 diaphragmes. Par rapport à l'étendue de mesure d'un capteur qui est au moins de 6 diaphragmes, on voit que l'image rouge est en fait plus ou moins détectée par tous les pixels malgré la présence des filtres de sélection trichrome.
- [26] Norman Koren, *Understanding image sharpness part 1A : Resolution and MTF curves in film and lenses*, <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF1A.html>
- [27] Courbe FTM du film Fuji Provia 100 F,
http://www.fujifilm.com/products/professional_films/pdf/Provia100F.pdf
- [28] Carl Zeiss publie les courbes FTM de ses optiques moyen format pour les valeurs de 10, 20 et 40 cycles par millimètre. Pour un agrandissement au rapport 10x, cela correspond sur le tirage à 1, 2 et 4 cycles par millimètre. On sait que pour les fins détails observés à la distance de vision courante de 25 à 30 cm, la limite de résolution de l'oeil est de l'ordre de 5 à 7 cycles par millimètre (si on prend une limite de résolution angulaire de 2 minutes d'arc par période ou soit 1/1720 radian par période discernable), donc les valeurs 10, 20 et 40 sur l'image initial tombent après agrandissement 10X dans une plage que l'oeil apprécie sans pertes. Une grille de pas 70 cycles par mm agrandie 10 fois tombe à la limite de résolution de l'oeil et aura donc *a priori* peu d'influence sur la perception générale de netteté de l'image. Il convient donc d'être très prudent, B. Leblanc rappelle dans l'article [7] qu'à résolution égale sur les fins détails, une image plus contrastée sur les grands aplats apparaît comme plus nette.
- [29] Un exemple visuel du phénomène de moiré en imagerie numérique
<http://www.wfu.edu/~matthews/misc/DigPhotog/alias/index.html>

Emmanuel Bigler 16 mai 2007