

Choix d'un appareil photo numérique : critères optiques

Mise à jour : 27/12/2009

Ce texte pédagogique décrit des critères optiques de choix d'un appareil photo numérique et de ses objectifs, en étudiant *l'ouverture* de celui-ci et les limites dues au *nombre de pixels*, à la *diffraction* et aux *aberrations*.

1. Cellule : choix du nombre de pixels

La distance entre pixels voisins, première condition physique de séparation

Deux points voisins d'un objet photographié sont vus comme distincts si et seulement si leurs images sur la cellule d'un appareil numérique sont sur des pixels (éléments de cellule photoélectrique) distincts. L'écartement des pixels de la cellule, assimilable à la taille d'un pixel, détermine donc la distance angulaire minimum entre deux points de l'objet photographié. Voici comment on calcule cette distance.

Soient c le champ angulaire de l'objectif et N le nombre de pixels de la cellule dans sa plus grande dimension. Exemple :

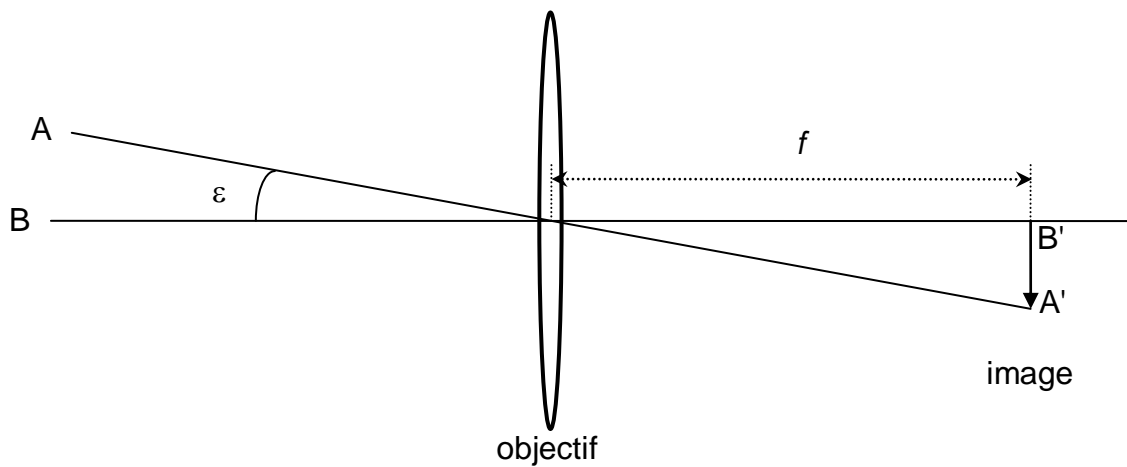
- L'objectif Sigma zoom grand angulaire 12-24 mm f4.5-5.6 utilisé à la focale $f = 12$ mm a un champ $c = 122$ degrés = 2.129 radians ;
- L'appareil Nikon D3 a une cellule de 24x36 contenant 2832x4256 pixels, donc $N = 4256$.

Un appareil ne peut séparer deux points voisins d'un objet photographié que si leurs images sont sur des pixels distincts. Leur distance angulaire minimum ε_m doit donc être au moins égale au champ angulaire par pixel c/N . Dans l'exemple précédent :

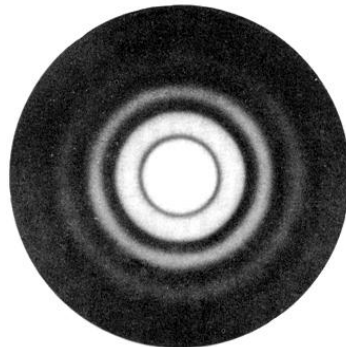
$\varepsilon_m = c/N = 2.129/4256 = 0.5 \cdot 10^{-3}$ radian ; deux points à 100 m apparaissent distincts si leur distance est au moins de $100000 \times 0.0005 = 50$ mm.

La diffraction, autre limite du pouvoir séparateur d'un instrument d'optique

Tout instrument d'optique, que ce soit un télescope astronomique ou un appareil photo, a un *pouvoir séparateur*, défini comme le plus petit angle ε qui doit séparer deux points A et B de l'objet vu à travers l'instrument pour que ces points apparaissent distincts en A' et B'. Nous avons vu au paragraphe précédent que l'écartement physique des pixels de la cellule impose déjà une première limite $\varepsilon > \varepsilon_m$. Nous allons à présent voir une seconde limite, due au phénomène de diffraction.



Cette limite existe parce que l'image d'un point lumineux P de l'objet donnée par l'instrument n'est jamais un point, c'est une suite d'anneaux d'interférence centrés en un point de luminosité maximum M, image théorique de P. Contrairement à un point géométrique, l'image M est une tache floue faite d'anneaux alternés lumineux et sombres, appelé « tache d'Airy » :



Tache d'Airy, image d'un point géométrique de l'objet réel

Selon le principe des surfaces d'onde de Huygens, les interférences proviennent de ce que la lumière arrivant en M est émise par chacun des points de la surface d'ouverture de l'instrument (appelée en optique « pupille d'ouverture » et résultant du diaphragme de son objectif dans le cas d'un appareil photo). Tous ces rayons lumineux interfèrent en M, y produisant des anneaux concentriques d'interférence. La seule manière d'éviter la diffraction qui produit ces interférences est d'avoir une surface d'ouverture infinie, c'est-à-dire une absence d'obstacle à la propagation de la lumière.

On admet que deux points voisins A et B de l'objet sont vus séparément à travers l'instrument comme des taches d'interférence annelées A' et B' lorsque le maximum d'intensité au centre de la tache A' coïncide avec le premier anneau minimum de B'. Le calcul montre alors que le pouvoir séparateur – l'angle ε - est donné par le critère de Rayleigh :

$$\sin \varepsilon \geq 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

Critère de Rayleigh de pouvoir séparateur dû à la diffraction

où :

- ε est l'angle minimum en radians entre deux points A et B de l'objet vus séparément. Cet angle est toujours minuscule, donc $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$;
- λ est la longueur d'onde, comprise entre 0.4 et 0.7 μm pour la lumière visible ;
- d est le diamètre du diaphragme (pupille d'entrée) de l'objectif, dont la focale est f ; avec une ouverture o , $d = f/o$. On peut donc écrire :

$$\sin \varepsilon \geq 1.22 \frac{\lambda o}{f}$$

en tenant compte de la petitesse de l'angle ε , équivalent à son sinus.

Le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique étant d'autant plus grand que l'angle ε est petit, à longueur d'onde lumineuse donnée λ on ne peut diminuer ε qu'en augmentant le diamètre d'ouverture de l'objectif d . C'est pourquoi les astronomes construisent des télescopes avec un miroir-objectif immense, 10 mètres de diamètre dans le cas des télescopes Keck de Hawaii.

Compte tenu de l'angle de champ c d'un objectif de focale f ouvert à f/o , chacun des N pixels de largeur de la cellule photoélectrique correspond à une distance angulaire sur l'objet photographié de c/N radians. L'angle minimum ε ci-dessus correspond donc à :

$$\frac{1.22 \lambda o N}{f c} \text{ pixels (arrondi au nombre entier de pixels supérieur si nécessaire).}$$

Pour un écartement de 1 pixel, cet angle correspond donc à une ouverture minimum o telle que :

$$\frac{1.22 \lambda o N}{f c} \leq 1, \text{ ou } o \leq \frac{f c}{1.22 \lambda N}$$

Dans le cas le plus défavorable, pour la lumière rouge où $\lambda = 0.7\mu\text{m}$, la formule ci-dessus devient :

$$o \leq \frac{c f}{0.85 N}$$

où la focale f est exprimée en microns (0.001 mm).

Exemple : pour un zoom Nikon 80-400 mm f/4.5-5.6, avec une focale $f = 400$ mm, un champ $c = 0.108$ radian ($6^\circ 10'$) et une largeur de cellule de $N = 4256$ pixels, l'ouverture f/o doit respecter :

$$o \leq \frac{0.108 * 400000}{0.85 * 4256} = 11.9 \text{ arrondi à } 12$$

Toute photo prise avec une ouverture plus grande que $f/12$ ne subit aucune diffraction visible en lumière rouge, donc a fortiori aucune diffraction à des longueurs d'onde plus petites correspondant aux autres couleurs du spectre.

Conséquences de cette limite d'ouverture

- La diffraction due à la pupille d'entrée de l'objectif, délimitée par son diaphragme, impose aussi une limitation. Celle-ci correspond pour un téléobjectif de $f = 400\text{mm}$ ouvert à $f/8$ à un angle minimum de :

$$\varepsilon \geq 1.22 \frac{0.7}{\frac{400000}{8}} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ radian.}$$

A 100 mètres de distance, on ne peut séparer des points de l'objet distants de moins de 1.7 mm, distance qui ne tient pas compte d'autres causes de perte de résolution, comme les aberrations dont nous parlerons [plus bas](#)...

- Avec une ouverture o respectant le critère $o \leq cf/0.85N$ ci-dessus, l'effet ε de la diffraction ne dépasse jamais 1 pixel.

Puisque $1.22 \lambda o N / f c \leq 1$, $1.22 \lambda o / f \leq c / N$, donc $\varepsilon \leq \varepsilon_m$: l'effet de la diffraction reste toujours moindre que celui imposé par le simple écartement des pixels. Dans l'exemple précédent, la distance limite de deux points séparables à 100 m imposée par la diffraction est de 1.7 mm contre $0.108/4256 * 100000 = 2.54$ mm pour l'écartement des pixels.

Mais avec une ouverture o inférieure, la diffraction peut produire un regroupement des pixels de la cellule par 2, voire plus.

- La limite minimum d'ouverture est inversement proportionnelle :
 - au nombre de pixels N : plus une cellule de taille donnée (comme 24x36mm) comporte de pixels dans une de ses dimensions, plus l'écartement entre deux d'entre eux est faible, et plus λ est petit, ce qui oblige à ouvrir davantage l'objectif ;
 - à la longueur d'onde λ : la diffraction affecte moins le vert et le bleu que le rouge.

Influence du filtre de Bayer

Il faut aussi tenir compte du *filtre de Bayer* situé devant la cellule. Ce filtre spécialise les divers photosites physiques de chaque pixel pour que chacun ne soit sensible qu'à une seule couleur : le rouge, le vert ou le bleu ; en général, il définit 2 photosites verts pour 1 photosite bleu et 1 photosite rouge, car l'œil humain est plus sensible au vert qu'au rouge ou au bleu.

Le filtre de Bayer permet à la diffraction de n'intervenir de manière sensible que lorsque le disque d'Airy image de chaque point de l'objet photographié est *plus grand* que l'écartement entre pixels théorique. *Cela retarde un peu l'apparition de la diffraction lorsque l'ouverture est voisine de la limite* : l'ouverture minimum $f/12$ de l'exemple précédent (zoom Nikon 80-400 à $f = 400$ mm) devient environ $f/16$.

Comparaison d'appareils basée sur la taille des photosites

- Dans un appareil photo d'entrée de gamme, dont l'écart entre pixels est minime, il est rare que l'objectif minuscule puisse ouvrir assez pour éviter la diffraction : les pixels sont souvent utilisés au moins par groupes de deux. ***Le nombre de Mpixels annoncé par le fournisseur est alors illusoire, il ne constitue qu'un argument marketing pour acheteurs non avertis.***
- Dans un appareil professionnel comme le Nikon D3, dont les pixels mesurent 8.4 μ m chacun, la diffraction ne se manifeste que pour des ouvertures très faibles : nous avons vu un exemple dans le cas du zoom 80-400 mm précédent. Les 12.1 Mpixels annoncés par le fournisseur sont le plus souvent utilisables.

Le tableau ci-dessous donne les tailles (écartements) des pixels de 5 appareils, rangés par risque croissant de diffraction. Pour chaque appareil, on trouve l'ouverture f/o minimum approximative pour éviter le flou par diffraction. Exemple : pour un Nikon D3, toute ouverture $f/o < f/16$ (comme $f/32$) confond des pixels rouges par diffraction.

Marque et type	Taille cellule en mm - rapport au 24x36	Nombre de Mpixels	Dimensions image (pixels)	Distance entre photosites (μm)	Ouverture f/o minimum pour éviter le flou par diffraction
Nikon D3	23.9 x 36 - 1/1	12.1	2832 x 4256	8.4	16
Sony Alpha 700	15.6 x 23.5 - 1/1.5	12.2	2592 x 3872	6.0	12
Pentax K-7	15.6 x 23.4 - 1/1.5	14.6	3120 x 4688	5.0	10
Olympus E-P1	13 x 17.3 - 1/1.8	12.3	3024 x 4032	4.3	8
Fuji Finepix Z20fd	8.9 x 13.3 - 1/2.7	10.0	2736 x 3648	3.3	6

Comparaison de 5 appareils numériques du point de vue de la diffraction

Combien faut-il de pixels pour une image bien nette ?

Cas de l'affichage sur écran

J'ai un excellent écran Hewlett-Packard LP3065 de 30" de diagonale pour travailler avec Photoshop ; ses pixels sont écartés de $0.01'' = 0.25 \text{ mm}$, et ses dimensions sont 1600×2560 pixels. Si les dimensions d'une photo (en pixels) sont supérieures à celles de mon écran, ce dernier ne pourra en afficher tous les détails, et diverses couches logicielles entre la photo en mémoire et l'écran supprimeront les détails non affichables. On voit sur le tableau ci-dessus que *tous* les appareils photo numériques peuvent, en théorie, produire des images plus piquées (plus fines, avec plus de détails) que ce que mon écran haut de gamme peut afficher !

Cas de l'impression sur papier

Il existe des imprimantes capables de reproduire des photos jusqu'à la taille A3 ($297 \times 420 \text{ mm}$) avec une résolution de 2400 points par pouce (près de 100 points par mm). Une telle imprimante a une résolution supérieure à celle de n'importe quel appareil photo : elle peut toujours imprimer des détails plus fins que ce qu'un appareil a capturé. Diverses couches logicielles dans l'ordinateur et l'imprimante devront alors produire les pixels manquants, par interpolation entre des pixels voisins de l'image en mémoire. Hélas, cette création de pixels artificiels ne sert à rien ou à peu près, car *un œil humain ne voit aucun détail plus petit que $1/9^{\text{ème}}$ de mm environ.*

Donc, sous réserve d'une reproduction fidèle des couleurs, une imprimante offrant 230 points par pouce (230 ppp, 9 points/mm) donnera une image A3 aussi parfaite qu'une imprimante à 2400 points par pouce. Elle pourra imprimer à 230 ppp une photo nécessitant moins de place en mémoire et sur disque, et moins de temps de calcul et de transmission depuis l'ordinateur.

Pour une image à 230 ppp de 10" x 15" pour papier A3, il faut une photo de 8 Mpix... si la diffraction, diverses aberrations, la précision de mise au point et le défaut de stabilité n'ont pas diminué la résolution initiale. C'est pourquoi Nikon, par exemple, a prévu « seulement » 12.1 Mpix pour ses modèles D3 et D3S, appareils de niveau professionnel.

Pour une photo sur papier A2 (420x594mm), par exemple de 15" x 22.5", il ne faut pas beaucoup plus de pixels que pour une photo A3, car l'œil doit la regarder de plus loin et il voit alors moins de détails fins. En admettant qu'il voit un peu moins de 8 points par mm (200 ppp), une photo de 15 x 22.5" a besoin de $15 \times 22.5 \times 40\,000 = 13.5$ Mpix. Il faut une photo de taille A1+ (environ 60x90 cm) pour qu'un appareil de 20Mpix ou plus s'impose ; *ces appareils sont destinés à des photos nécessitant un fort agrandissement*. C'est le cas, par exemple, de photos d'animaux ou d'oiseaux distants, qu'il faut agrandir pour bien les voir, sur imprimante comme sur écran.

Avec un appareil plus modeste que le Nikon D3 et une ouverture de l'ordre de 11, il ne faut pas espérer faire des photos parfaitement agrandissables jusqu'à A3. En fait, avec des appareils d'entrée de gamme ou des téléphones portables on n'obtient même pas un bon résultat au format A4, du fait de la diffraction et de diverses aberrations.

Reste-t-il assez de pixels malgré le groupage dû à la diffraction ?

Que la diffraction divise par deux ou plus le nombre de pixels revendiqué par le fournisseur n'est pas nécessairement grave. Pour s'afficher correctement sur mon écran de 30", une photo de 1500 x 2250 n'a besoin que de 3.4 Mpix s'ils proviennent d'une photo non floutée par la diffraction et des aberrations. Nous avons vu ci-dessus qu'une impression A3 de 10" x 15" à 230 ppp a besoin de 8 Mpix.

Donc si l'appareil a suffisamment de pixels demeurant distincts en cas de groupage par diffraction et d'aberration, il produira des photos aussi nettes que possible. Un appareil comme le Canon EOS 5D Mark II, qui offre 21.1 Mpix avec une cellule de même taille que celle du Nikon D3, regroupera plus souvent ses photosites par deux du fait de la diffraction ; mais il en restera alors 10.5 Mpix utilisables, ce qui suffit pour une photo A3 correcte.

Conclusion sur le choix de l'ouverture

Même un appareil photo professionnel peut donner une netteté limitée par la diffraction s'il est utilisé avec un diaphragme trop fermé. Si la photo à faire a besoin de tous ses pixels, il faut y songer et jouer éventuellement sur la vitesse et/ou la sensibilité ISO pour obtenir la quantité de lumière nécessaire.

Puisque les aberrations augmentent avec l'ouverture, on trouve souvent un bon compromis de netteté avec une ouverture inférieure au maximum de l'objectif, par exemple 8 dans le cas d'un téléobjectif ouvrant à 5.6 maximum. Mais attention : il s'agit là de netteté *au centre de la plage de mise au point et près de l'axe*, à une distance précise de l'appareil ; une ouverture importante peut réduire cette plage, produisant un flou esthétique plus près et plus loin.

Vérification par test de diffraction

Les trois photos ci-dessous du même morceau de dentelle fine de 5 x 3 cm environ ont été réalisées avec un Sony Alpha 700, objectif zoom 18-70 mm réglé à 22 mm de focale, sensibilité ISO 800 et priorité à l'ouverture, à :

- f/4 au 1/125^e de seconde ;
- f/11 au 1/10^e de seconde ;
- f/16 au 1/5^e de seconde.

La netteté identique des photos à f/4 et f/11 du premier groupe montre qu'aucune ne souffre de diffraction.

Dans le deuxième groupe, la netteté inférieure de la photo à f/16 par rapport à celle à f/11 (recopiée du groupe précédent) montre qu'on a franchi un palier de groupement de photosites par diffraction : les photosites sont groupés par 2, le nombre de pixels utilisables n'est plus 12.2 millions mais 6.1 millions.



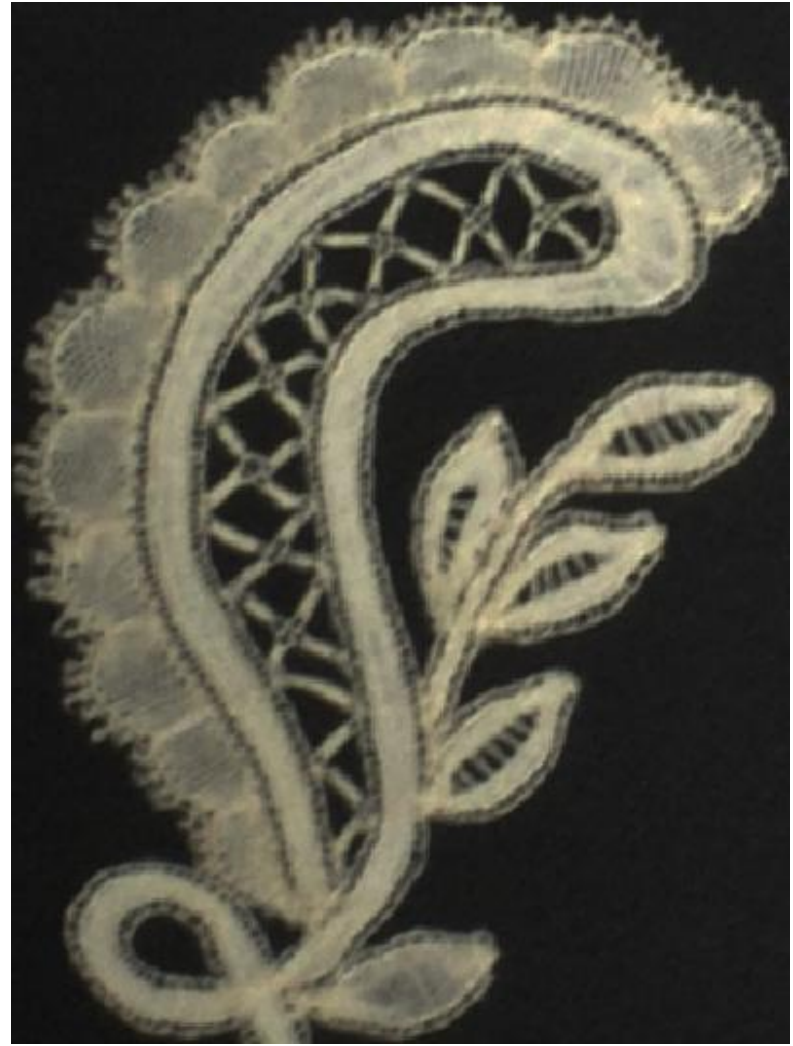
f/4



f/11



f/11



f/16

2. Les principaux types d'aberration d'un objectif

- Aberration sphérique
 - Origine : éloignements angulaires de l'axe de rayons distincts issus d'un même point de l'axe ; les rayons éloignés de l'axe convergent plus près de la lentille que les rayons proches.
 - Conséquence : foyer étalé le long de l'axe au lieu d'être ponctuel, l'image d'un point de l'axe est une tache.
- Coma
 - Origine : les rayons obliques par rapport à l'axe sont limités par le diaphragme.
 - Conséquence : l'image d'un point est une tache ovale.
- Astigmatisme
 - Origine : le pouvoir de réfraction d'une surface sphérique de lentille n'est pas le même dans deux directions perpendiculaires.
 - Conséquence : l'image d'un point hors de l'axe est une tache floue.
- Aberration chromatique
 - Origine : l'indice de réfraction d'un verre dépendant de la longueur d'onde, chaque couleur converge en un point focal distinct.
 - Conséquence : l'image est floue et présente des bords colorés.
- Courbure de champ
 - Origine : l'image d'un objet plan est une surface courbe au lieu d'un plan perpendiculaire à l'axe.
 - Conséquence : l'image d'un point est d'autant plus floue qu'il est loin de l'axe.

Conclusion sur le diamètre de l'objectif

Ces aberrations proviennent toutes de rayons éloignés de l'axe de l'objectif, qu'ils soient parallèles à cet axe ou obliques. Plus un objectif est de grand diamètre utile (diaphragme en place), plus un éloignement donné de l'axe est peu nocif : c'est pourquoi on voit si souvent les professionnels utiliser d'énormes objectifs et téléobjectifs.

Nous avons vu qu'un diamètre d'objectif plus important favorise aussi la netteté des images dans la plage de mise au point, parce qu'il permet un plus grand [pouvoir séparateur](#). Il y a, bien sûr, des cas particuliers où on veut produire un premier plan et/ou un fond flou(s), soit en faisant une photo de personne ou d'objet proche avec un objectif de focale longue, et/ou en ouvrant beaucoup le diaphragme pour limiter la plage de mise au point. Un sujet à l'infini peut se satisfaire d'une grande ouverture de diaphragme d'autant mieux qu'elle permet une vitesse plus rapide qui diminue l'effet de bougé. En pratique, on conseille une vitesse (en 1/100^e de seconde) au moins inverse de la focale (en mm) : 1/400^e pour f = 400, par exemple.

Exemple : comparaison de deux téléobjectifs

Le tableau ci-dessous compare les contrastes produits sur une cellule 24x36 par deux téléobjectifs Nikon le long d'une demi-diagonale allant du centre à un coin de la cellule. Il s'agit des contrastes entre des lignes parallèles distantes de $1/10^{\text{e}}$ de mm dans le cas représenté en rouge et $1/30^{\text{e}}$ de mm dans le « cas bleu ».

Zoom Nikon AF VR - 80-400mm f/4.5-5.6D ED	Téléobjectif Nikon AF-S VR 400mm f/2.8G ED
17 éléments en 11 groupes	14 éléments en 11 groupes
Diamètre externe de l'objectif : 91 mm	Diamètre externe de l'objectif : 159 mm
Pupille d'entrée f/o si ouverture maximum : 71 mm	Pupille d'entrée f/o si ouverture maximum : 142 mm
Poids : 1210 g	Poids : 4620 g
Prix TTC fin 2009 : 1304 €	Prix TTC fin 2009 : 8700 €

Comparaison des courbes de contraste FTM (fonction de transfert de modulation) de 2 téléobjectifs à focale 400 mm ouverts au maximum :
en abscisses : distance au centre de la cellule en mm le long d'une demi-diagonale ;
en ordonnées : rapport de contraste, d'autant meilleur que proche de 1
(rouge : 10 lignes/mm, bleu : 30 lignes/mm ;
traits pleins et pointillés : lignes parallèles à deux directions perpendiculaires)

On voit que :

- Le contraste se dégrade lorsqu'on s'éloigne de l'axe.
- Le contraste reste meilleur pour l'écartement de lignes représenté en rouge ($1/10^{\text{e}}$ de mm) que pour le bleu ($1/30^{\text{e}}$ de mm) : un contraste entre détails proches est plus difficile à obtenir qu'entre détails éloignés.
- Le zoom de la colonne gauche a un contraste acceptable seulement pour des lignes parallèles à une certaine direction et distantes de $1/10^{\text{e}}$ de mm. Dans tous

les autres cas, l'image des lignes voisines devient vite moins contrastée quand on s'éloigne de l'axe : l'image est alors moins nette.

- Le téléobjectif à focale fixe de droite a un contraste excellent dans tous les cas. Ceux qui le préfèrent au zoom de gauche acceptent de le payer presque 7 fois plus cher et de manipuler un poids presque 4 fois plus lourd...
- Les graphiques ci-dessus ne comparent que le contraste des objectifs. Mais la netteté d'une image dépend aussi du [pouvoir séparateur](#) de ceux-ci.

Or, à longueur d'onde égale et ouverture maximale, la pupille d'entrée du téléobjectif de droite est environ $142/71 = 2$ fois plus grande, d'où la possibilité de séparer des points 2 fois plus proches, et plus encore compte tenu des différences de contraste et d'aberrations bien plus faibles pour un objectif de diamètre supérieur et muni de lentilles au traitement plus fin ; en outre, une ouverture importante permet des flous inaccessibles à une ouverture plus petite.

[Daniel MARTIN](#)

[Retour page d'accueil](#)