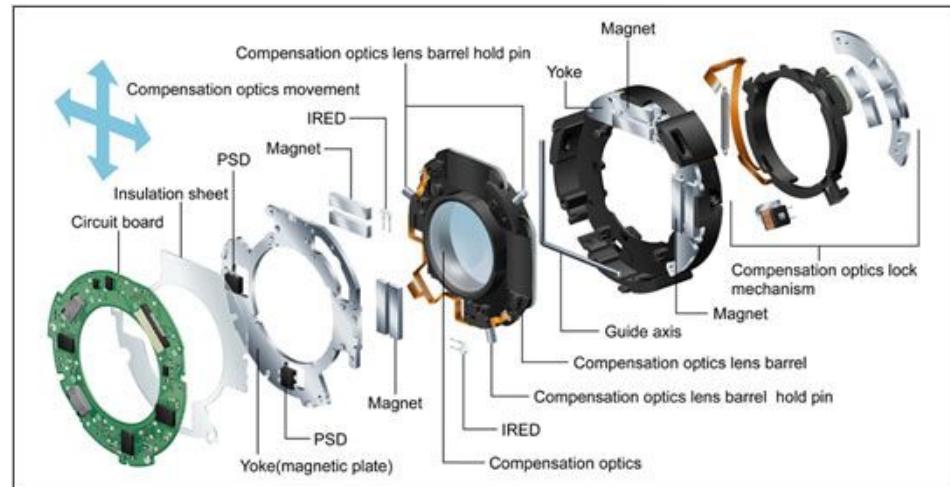
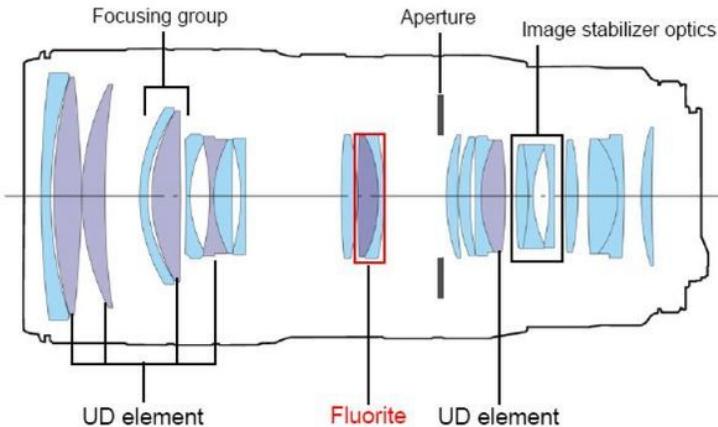


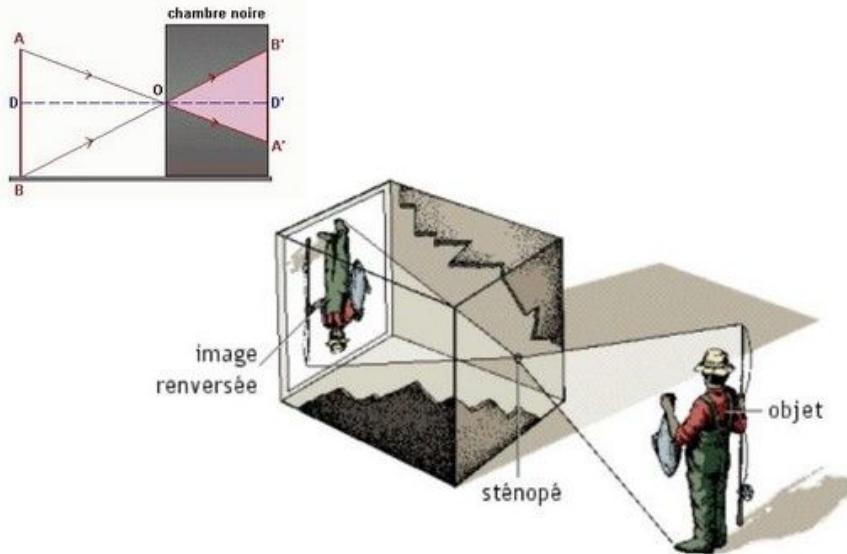
## Les optiques de caméra:

Le système optique d'une caméra est l'ensemble des composants de la caméra qui sont traversées par la lumière arrivant sur le capteur. Ces composants sont réels. Comme les capteurs, ils possèdent un certain nombre de défauts qui donnent une signature particulière à chaque constructeur et chaque gamme d'optiques. La géométrie et les matériaux de l'optique déterminent les caractéristique de l'image arrivant sur le capteur.



## la chambre noire:

Connu dès l'Antiquité, il s'agit d'un instrument optique objectif qui permet d'obtenir une projection de la lumière sur une surface plane, c'est-à-dire d'obtenir une vue en deux dimensions très proche de la vision humaine. Elle servait aux peintres avant que la découverte des procédés de fixation de l'image conduise à l'invention de la photographie.



## les optiques: historique

1839: l'objectif du Daguerrotype par Chevalier

1859 Iris variable par Charles Harrison and Joseph Schnitzer

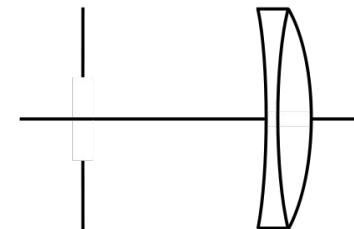
1890 optique corrigées en aberration, Anastigmat Zeiss

1939 Zeiss commercialise des optiques traitées en surface

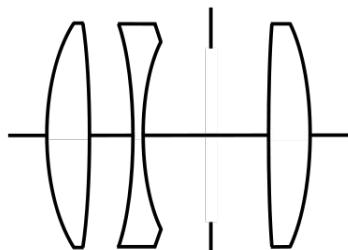
1959 1er Zoom moderne

1977 Autofocus par Konica

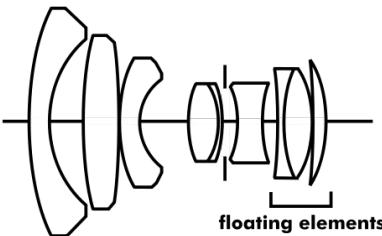
1995 Zoom à image stabilisée optiquement par Canon



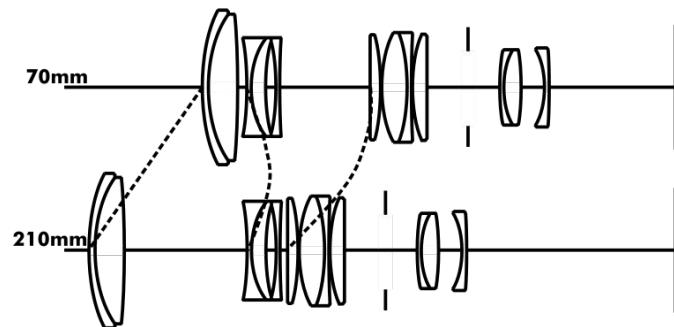
**Chevalier Achromat Landscape, 1839**



**Taylor, Taylor & Hobson  
Cooke Triplet  
1893**



**Nippon Kogaku (Nikon)  
Nikkor-N Auto 24mm f/2.8  
1967**



**Tokina SZ-X 70-210mm f/4-5.6 SD, 1985**

## l'ouverture

L'**ouverture**  $O$  d'un objectif photographique est le réglage qui permet d'ajuster le diamètre d'ouverture du diaphragme.

Elle est caractérisée par le **nombre d'ouverture** ou **ouverture géométrique**, plus fréquemment notée «  $f/N$  ».

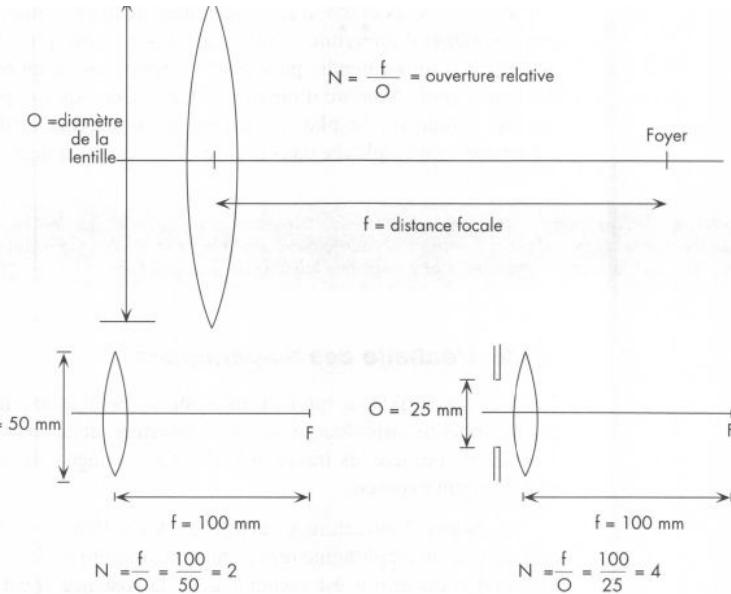
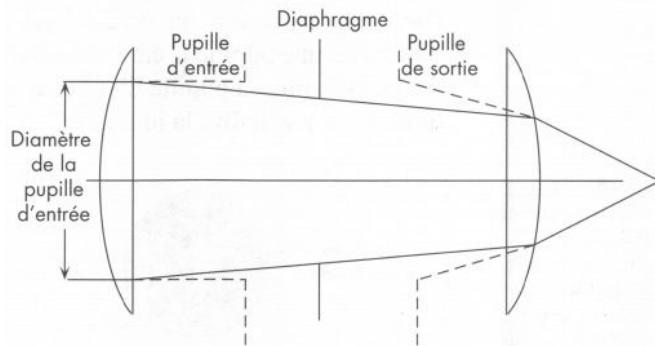
L'ouverture relative: ce nombre sans dimension est défini comme le rapport de la focale  $f$  au diamètre  $O$  de la pupille d'entrée.

L'ouverture relative  $N$  est  $N = f/O$ .

*Dans la pratique on dit que  $f/2$  est une grande ouverture, sous-entendu grand diamètre de diaphragme et petit nombre d'ouverture. et  $f/4$  est une ouverture plus petite, sous entendu un plus petit diamètre de diaphragme et un nombre d'ouverture plus grand.*

*C'est une erreur sur le plan théorique mais elle est constamment utilisée dans tous les métiers de l'image.*

## l'ouverture



On dit que la lentille ouvre à  $f/2$ .

$f/4$  est une ouverture deux fois plus petite que  $f/2$ , et laisse passer quatre fois moins de lumière.

## l'ouverture

L'**ouverture**  $O$  d'un objectif photographique est le réglage qui permet d'ajuster le diamètre d'ouverture du diaphragme.

Elle est caractérisée par le **nombre d'ouverture** ou **ouverture géométrique**, plus fréquemment notée «  $f/N$  ».

L'ouverture relative: ce nombre sans dimension est défini comme le rapport de la focale  $f$  au diamètre  $O$  de la pupille d'entrée.

L'ouverture relative  $N$  est  $N = f/O$ .

Sur les objectifs vidéo et cinéma cette ouverture est continuement variable. Sur une optique photo on perd 1 diaphragme par pas ( 1 pas = quantité de lumière diminuée de moitié = - 1 diaph = -6dB gain)



## l'ouverture

Sur les objectif vidéo et cinéma cette ouverture est continuement variable. Sur une optique photo on modifie la valeur d'un diaphragme par pas.

$$+1 \text{ diaph} = \frac{N}{\sqrt{2}} = 2 \times \text{plus de lumière} = +6 \text{ dB}$$

Le nombre d'ouverture **N** est proportionnel à la distance focale et inversement proportionnel au diamètre d'ouverture. Un "diaph" ne représente pas une mesure de la quantité de lumière mais une mesure de la variation de quantité de lumière.

L'**ouverture photométrique T** tient compte des pertes due au passage à travers les lentilles.

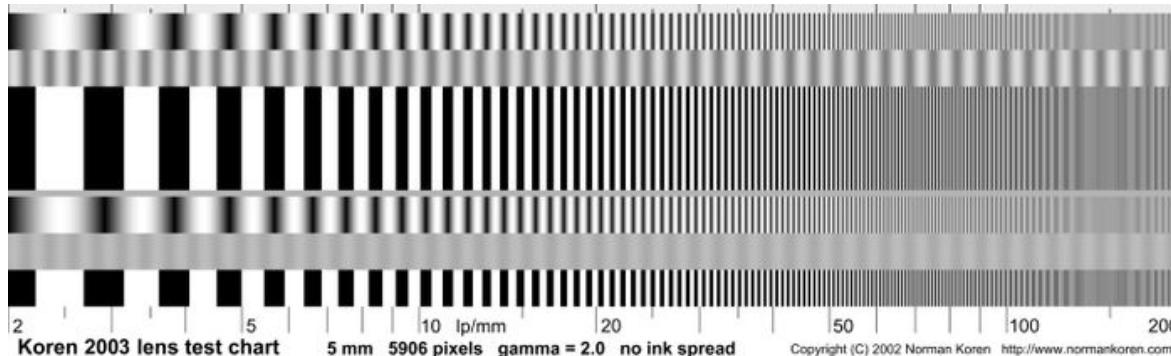
Elle est donnée par l'équation  $T = \frac{F}{\sqrt{\text{transmittance}}} \cdot 10$  où la transmittance est donnée en %.

Deux objectif à même ouverture photométrique donnent toujours la même luminosité alors que ce n'est pas vrai pour les ouvertures géométriques.

## le pouvoir de résolution ou de séparation

Le **pouvoir de résolution**, ou **pouvoir de séparation**, ou **pouvoir séparateur**, ou la **Résolution spatiale**, exprime la capacité d'un **système optique** de mesure ou d'observation – les microscopes, les télescopes ou l'œil, mais aussi certains détecteurs, particulièrement ceux utilisés en imagerie – à distinguer les détails. Il peut être caractérisé par l'angle ou la distance minimal(e) qui doit séparer deux points contigus pour qu'ils soient correctement discernés. Il peut, de façon équivalente, être caractérisé par la fréquence spatiale maximale que le système permet de mesurer ou restituer : il est alors exprimé en cycles par millimètre (cy/mm) ou en paires de lignes par millimètre (pl/mm).

Pour un capteur photographique, la résolution est limitée par la définition du capteur. Selon le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, pour un capteur  $24 \times 36$  mm de  $3\,840 \times 5\,760$  pixels, la résolution est de  $80$  pl/mm ; il faudrait pondérer cette valeur à la baisse par un **facteur de Kell** (réduction de la résolution effective entre 0,7 et 0,9 pour diminuer le moiré ou aliasing) prenant en compte l'ouverture des pixels (le fait qu'il ne soit pas ponctuels). De plus, les capteurs sont souvent précédés d'un filtre passe bas (filtre antialiasing ou anticrénelage) qui permet la formation d'une image légèrement floue afin d'éviter le moiré mais qui diminue la résolution. Cependant, bien souvent, l'objectif est le facteur limitant.



## le cercle de confusion

En photographie, le **cercle de confusion** (CdC) est le plus gros disque lumineux circulaire qui puisse se former sur la surface photosensible et qui sera néanmoins perçu comme un point sur le tirage final. Caractérisé par son diamètre, il permet de déterminer la limite entre ce qui est perçu flou (comme un ensemble de taches) et ce qui est perçu net (comme un ensemble de points) : il peut être utile pour évaluer par le calcul la profondeur de champ.

Dans le cas de la vidéo, on considère souvent que l'observateur est à la distance la plus proche de son moniteur lui permettant tout de même de ne pas distinguer deux pixels voisins. Pour un même format de capteur, on considère que le diamètre du cercle de confusion dépend de la définition. Par exemple pour un capteur 2/3" (11,0 mm de diagonale) couramment utilisé pour les caméras professionnelles :

- en haute définition (TVHD) ( $1080 \times 1920$ ), le capteur a pour dimensions  $5,4 \times 9,6$  mm : un pixel est un carré de 0,005 mm ;
- en ultra-haute définition (TVUHD1) ( $2048 \times 3840$ ), le capteur a pour dimensions  $5,4 \times 9,6$  mm : un pixel est un carré de 0,0025 mm ;
- en définition standard (TVSD) ( $576 \times 720$ ), le ratio est de 4/3 et le capteur a pour dimensions  $6,6 \times 8,8$  mm : un pixel est un rectangle de dimensions  $0,011 \times 0,012$  mm.

Par ailleurs, pour éviter le moiré, les capteurs sont précédés d'un filtre passe-bas optique, dit filtre antialiasing ou anticrénelage, qui dégrade volontairement et légèrement les images : chaque image qui devrait se former exactement comme un point viendra former un léger flou autour du pixel correspondant. C'est pourquoi le diamètre du cercle de confusion peut être alors considéré comme une valeur entre la taille d'un pixel et son double.

Une formule utilisée est

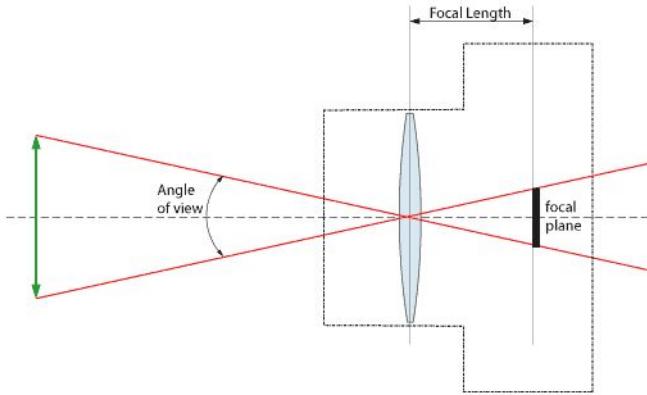
$$\text{CdC} = (\text{diagonale capteur}) / 1500$$

## le cercle de confusion quelques valeurs standard

Format	Dimensions (mm)	CoC ( $\mu\text{m}$ )	Format	Dimensions (mm)	CoC ( $\mu\text{m}$ )
<b>Photographie</b>					
Four Thirds	13,5 × 18,0	15	2/3"	6,6 × 8,8	22
APS-C Canon numérique	14,8 × 22,2	18	1/2"	4,8 × 6,4	16
Nikon DX	16,0 × 24,0	19	1/3"	3,6 × 4,8	12
APS-C argentique	16,7 × 25,1	20			
APS-H Canon	19,0 × 28,7	23			
Plein format numérique 35 mm argentique	24,0 × 36,0	29			
<b>Cinématographie</b>					
16 mm	7,5 × 10,3	8,5	2/3"	5,4 × 9,6	10
Super 16	7,5 × 12,35	10	1/2"	3,9 × 7,0	7,2
35 mm Academy	16,0 × 22,0	18	1/3"	2,9 × 5,2	5,4
ANSI Super 35 mm	18,7 × 24,9	21			
Les valeurs fournies sont issues de l'approximation $c = d/1500$ où $d$ est la diagonale de la partie utile de la surface sensible ; les valeurs alternatives sont données entre parenthèses.			Les diamètres des cercles de confusion sont calculés comme approximativement égaux au double de la taille d'un pixel.		

## la distance focale ou “focale”

c'est la distance en mm entre le capteur (plan focal) et le centre optique de l'objectif. Sur certain boîtier de caméra le plan "0" du capteur est indiqué pour faire une mise au point en mesurant la distance manuellement. Cette définition ne tient pas compte de la taille du capteur, mais le facteur d'agrandissement dépend de la distance focale et de la taille du capteur. La focale normale ( agrandissement = 1) est la focale qui donne la même dimension que la vision humaine. C'est approximativement la focale qui est égale à la diagonale du capteur ( pour un format 24x36, la diagonale est égale à 43mm)



## la distance focale ou “focale”

effet sur la perception.

Les optiques “grand angle” engendrent de plus grandes déformations sur l'image mais sont plus lumineuses que les télesobjectifs. Le fond apparaît plus large par rapport au sujet sur les courtes focales.



## la profondeur de champ

La **profondeur de champ PDC ou DOF (depth of field)** correspond à la zone de prise de vue dans lequel doit se trouver le sujet à photographier pour que l'on puisse en obtenir une image que l'œil (ou un autre système optique) acceptera comme nette.

L'étendue de cette zone dépend de plusieurs paramètres de la prise de vue – notamment l'ouverture du diaphragme de l'objectif, la distance de mise au point et les dimensions de la surface qui reçoit l'image (dépoli d'une chambre noire, surface sensible, argentique ou numérique) qui induit le choix de la longueur focale de l'objectif – mais aussi des conditions d'observation de l'image finale. La distance du sujet, l'ouverture et le choix de la longueur focale de l'objectif, sont les principaux réglages qui permettent de modifier la profondeur de champ. Ces réglages sont limités par les conditions réelles de prise de vue, luminosité et capacité de compenser une grande ouverture par une vitesse rapide d'obturation, possibilité de bouger par rapport au sujet, objectifs dont on dispose.

**grand capteur = PDC réduite**

**grande focale = PDC réduite**

**grande ouverture = PDC réduite**

**faible distance de mise au point = PDC réduite**

**petit cercle de confusion = PDC réduite**

**PDC =  $\frac{1}{3}$  à l'avant et  $\frac{2}{3}$  à l'arrière du plan de mise au point**



## la profondeur de champ

### **distance hyperfocale**

l'ouverture du diaphragme permet aussi de calculer la valeur de l'hyperfocale :

$$H = \frac{f^2}{N \cdot c}$$

où **f** est la distance focale de l'objectif, **c** le diamètre du  cercle de confusion admissible, et **N** l'ouverture.

- En faisant la mise au point sur l'infini, le premier plan net correspond à la distance hyperfocale.
- En faisant la mise au point sur la distance hyperfocale, le photographe obtient une profondeur de champ s'étalant de la moitié de cette distance à l'infini.

L'intérêt est ici d'avoir la plus grande profondeur de champ, en ne connaissant pas la distance exacte du sujet.

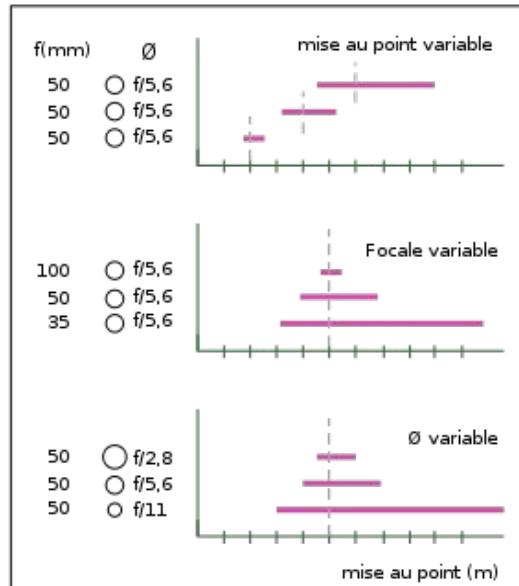
Pour le même boîtier cette fois équipé d'un 35 mm à f/8 (plus adapté au reportage), l'hyperfocale est à environ 5 m puis en divisant par deux, la distance mini est d'environ 2,5 m.

La bague de mise au point réglée aux environs de 5 m assurera une mise au point, tant que la distance avec le sujet principal sera supérieur à 2,5 m).

L'intérêt de l'hyperfocale prend toute son importance pour les adeptes de la mise au point manuelle ou pour les utilisateurs d'appareils démunis d'autofocus : le réglage de l'hyperfocale permet de s'assurer d'une mise au point nette pour tout objet au-delà de la distance hyperfocale. Cependant, la profondeur de champ étant très importante, les sujets photographiés ne se détacheront pas de l'arrière-plan.

## la distance de mise au point

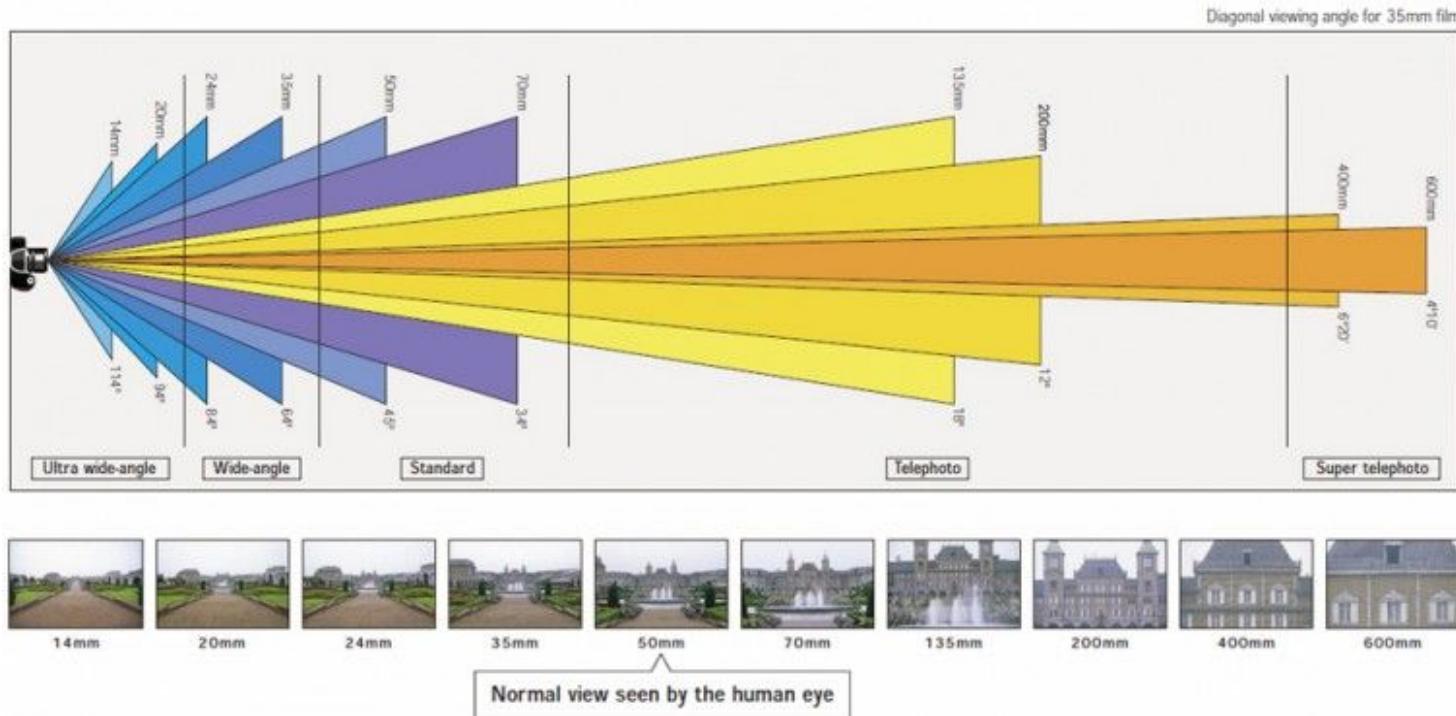
Pour un capteur donné, la profondeur de champ ne dépend que de la focale  $f$ , de l'ouverture  $N$  et de la distance de mise au point  $P$ .



<b>Hyperfocale</b>	$H = \frac{f}{\epsilon N} \simeq \frac{f^2}{c N}$
<b>Premier plan net (PPN)</b>	$P_1 = \frac{P H}{H + P}$
<b>Dernier plan net (DPN)</b>	$P_2 = \frac{P H}{H - P}$ si $P < H$ , sinon le dernier plan net est rejeté à l'infini : $P_2 \rightarrow \infty$ .
<b>Profondeur de champ (PDC)</b>	$\Delta P = \frac{2 H P^2}{H^2 - P^2}$ si $P < H$ , sinon la profondeur de champ s'étend jusqu'à $\Delta P \rightarrow \infty$ .

## l'angle de prise de vue

il dépend de la focale et de la taille du capteur.

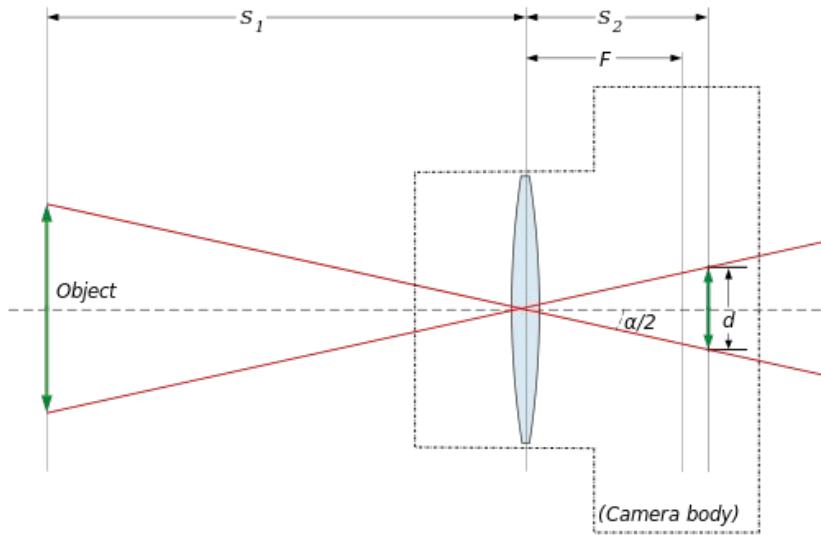


## I'angle de prise de vue

Calcul:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d}{2F}$$

l'angle de prise de vue est égal à la tangente inverse du rapport de la taille du capteur à la distance focale.



## la largeur de champ

exemple de calcul de largeur de champ.

Soit un boîtier Canon 5d de capteur full frame (36mmx24mm) équipé d'une optique 50mm.

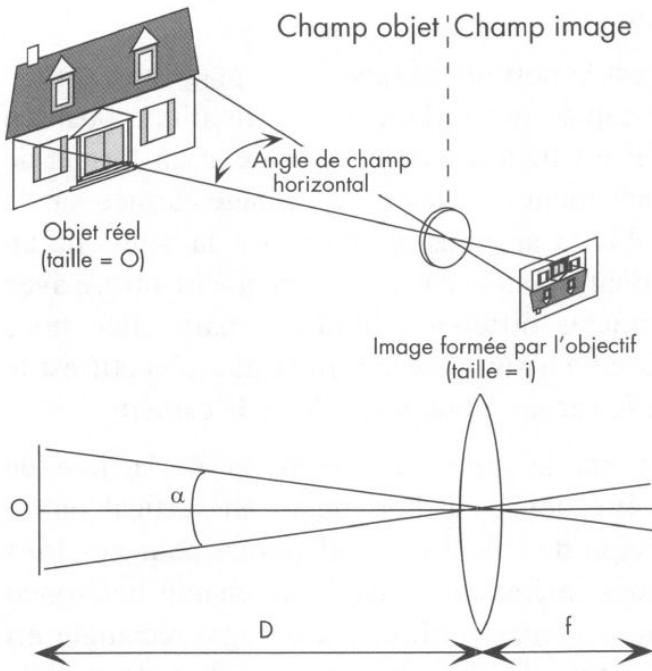
questions:

- 1) quel est l'angle de prise de vue?
- 2) à 100 mètres quelle est la largeur de champ?
- 3) pour avoir une largeur de champ de 10m quelle est la distance nécessaire?

réponses:

- 1) l'angle de prise de vue est  
 $a = 2 \arctan (36/(2 \times 50)) = 40^\circ$  environ
- 2) à 100 mètres, la largeur de champ est  
 $L = 100m \times (36mm / 50mm) = 72m$  environ
- 3) pour avoir une largeur de champ de 10 mètres, je dois me placer à  
 $D = 10m \times (50mm / 36mm) = 14$  mètres de distance environ

## Calcul d'optique simple



$$\frac{\text{Format A}}{\text{Format B}} = \frac{\text{Focale A}}{\text{Focale B}}$$

$O = \frac{i \cdot D}{f}$	= taille de l'objet (en horizontal, vertical ou diagonale)
$D = \frac{O \cdot f}{i}$	= distance de mise au point (distance objet-caméra)
$i = \frac{O \cdot f}{D}$	= taille de l'image (en horizontal, vertical ou diagonale)
$f = \frac{i \cdot D}{O}$	= distance focale
$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{i}{2f}$	= angle de champ (horizontal, vertical ou diagonale)

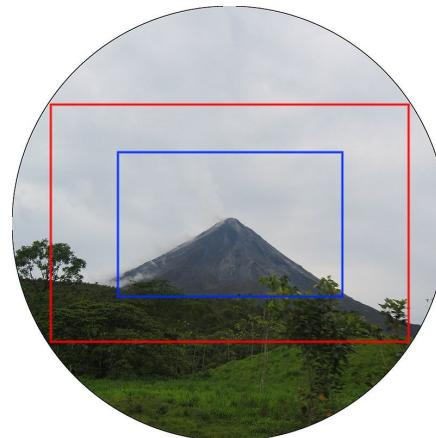
(approximation pour distance objet/caméra supérieure à 3 m)

## le facteur de format ou [crop factor](#)

le crop factor est le rapport de taille entre deux capteurs: en général on l'exprime par rapport au capteur full frame (36x24mm).

**crop factor = rapport des largeurs = rapport des hauteurs = rapport des diagonales de capteurs**

Si on utilise les mêmes optiques sur des capteurs de tailles différente, cela modifie la valeur apparente de la “focale” (la distance focale est identique mais la taille de l'image utile est modifiée). C'est la même valeur pour la largeur, la hauteur et la diagonale de l'image.



## le facteur de format ou crop factor

example sur Canon 5D (full frame) et Canon 7d (APS-C)



**Canon 5d MkIII:** capteur 36x24mm (full frame 35mm) 5760x3840 (22,3 Mpixels)

**Canon 7dMkII:** capteur 22,4x15mm (APS-C) 5472x3648 (20,2 Mpixels)

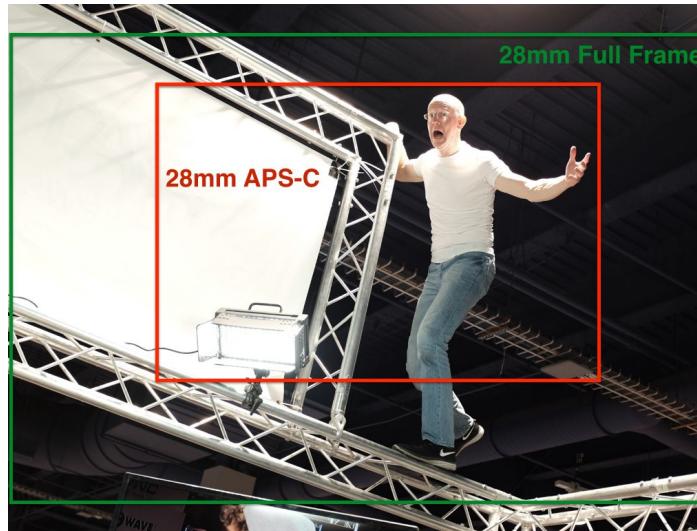
## le facteur de format ou crop factor

exemple sur Canon 5D (full frame) et Canon 7d (APS-C).

Que se passe-t-il lorsque on monte un objectif 28mm pour 24x36 sur le 7d?

La focale équivalente devient

$$\text{Feq} = \text{F fullframe} \times \text{Crop Factor} = 28 \times 1,6 = 45\text{mm}$$



## le facteur de format ou [crop factor](#)

Le facteur de format est un paramètre très utile. Il joue sur:

- l'angle de champs: diviser la focale du plus grand format par le facteur de format. Exemple, pour  $\frac{2}{3}''$  et  $\frac{1}{3}''$  le facteur de format est de 1,8.
- l'ouverture: ex une ouverture de f/8 en  $\frac{2}{3}''$  sera équivalent à f/4,4 en  $\frac{1}{3}''$
- la profondeur de champ: exemple la profondeur de champ d'un objectif  $\frac{2}{3}''$  de 20mm ouvert à f/8 sera équivalent à celle d'un objectif  $\frac{1}{3}''$  de 11mm ouvert à f/4,4 et couvrant le même champ visuel.
- la diffraction: exemple la diffraction d'un objectif  $\frac{2}{3}''$  à f/8 sera équivalente à la diffraction d'un objectif  $\frac{1}{3}''$  à f/4,4
- la résolution linéaire: multiplier la résolution en paires de ligne / mm (pl/mm) du plus grand format par le facteur de format. exemple si on veut un objectif HD pour un capteur  $\frac{2}{3}''$  qui a une résolution linéaire de 100pl/mm, il faudra un objectif de résolution 180pl/mm pour un capteur  $\frac{1}{3}''$ .

macrophotographie: le mode macro sur les optiques

En se rapprochant d'un sujet pour le photographier en gros plan, il faut augmenter la distance entre le film (la pellicule photo/capteur numérique) et l'objectif, afin de conserver le sujet net. La distance ainsi allongée s'appelle le tirage. La plupart des objectifs non spécialisés ont un tirage maximal qui ne permet pas de s'approcher d'un sujet à moins de 10 fois leur distance focale environ. Il est donc en général impossible de faire des photographies en gros plan sans utiliser des accessoires ou un objectif spécial.

Pour augmenter le grossissement de l'image, divers accessoires permettent d'augmenter le tirage des objectifs standards ou de diminuer la distance focale. On peut encore, par l'usage d'un multiplicateur de focale, multiplier la focale sans changer la distance de mise au point minimale, d'où une prise de vue en un peu plus gros plan.

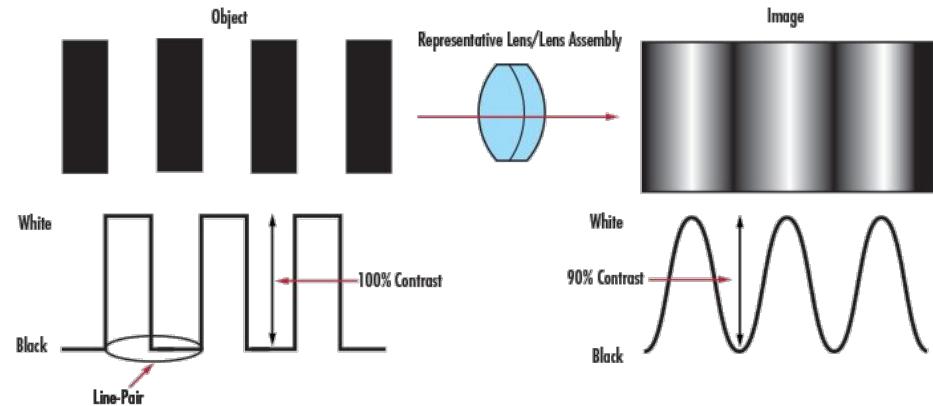
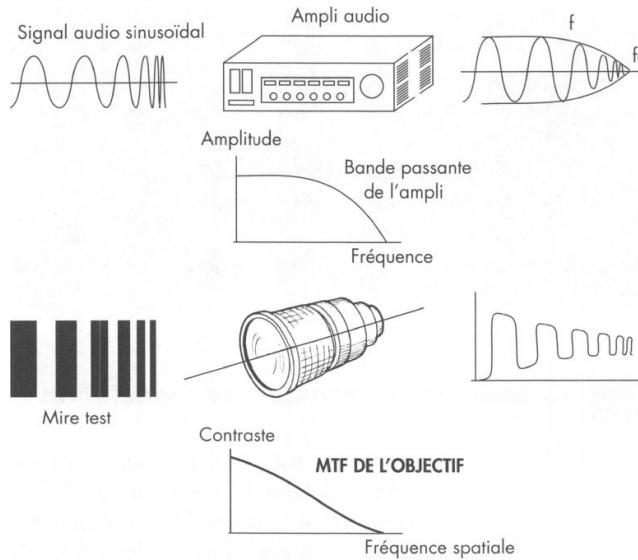
Le mode macro sur les optiques permet de faire la mise au point sur des distances très courtes. (moins de 10 fois la focale).



## La MTF ou fonction de transfert de modulation.

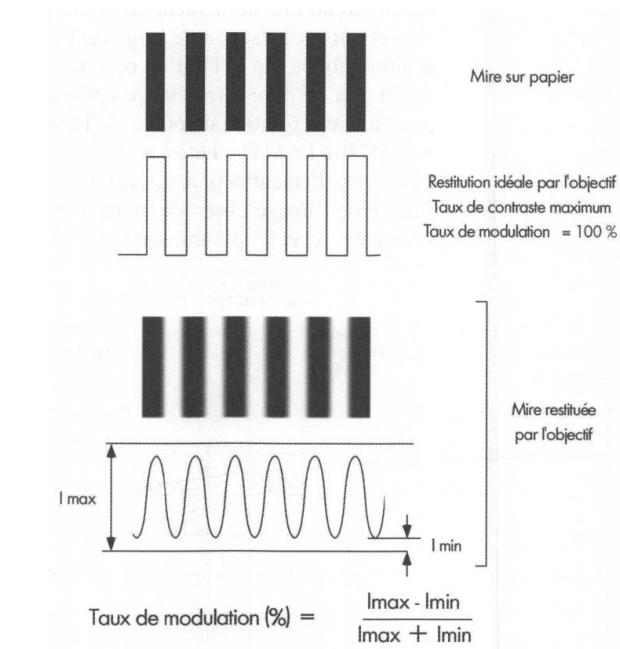
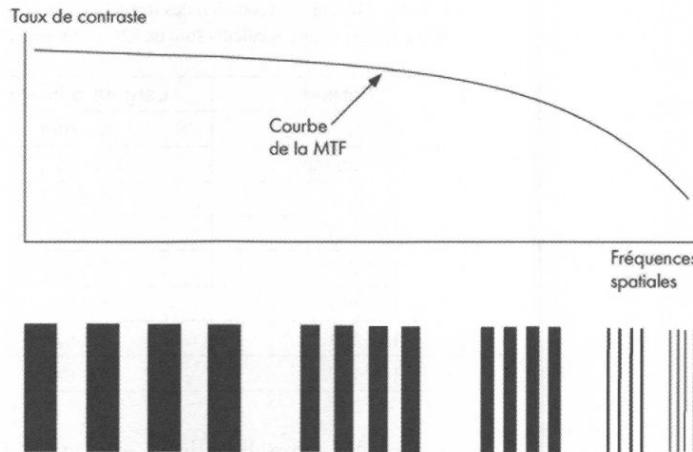
C'est l'équivalent en optique de la bande passante en audio.

La résolution des optiques ou la capacité à restituer des détails fins est limitée.



La MTF ou fonction de transfert de modulation.

Le **taux de modulation** en sortie de l'objectif s'exprime en % en fonction de la fréquence spatiale.  
L'unité est la **paire de ligne par mm (pl/mm)**



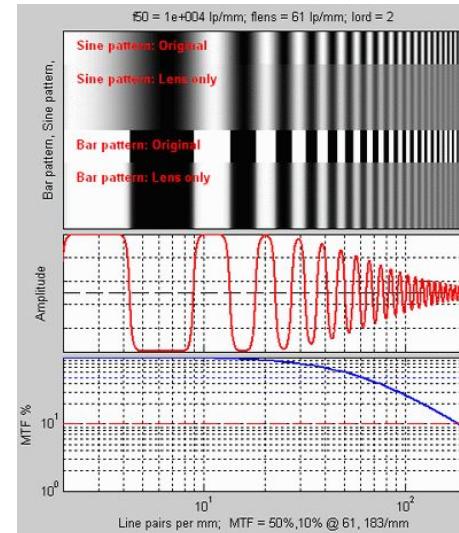
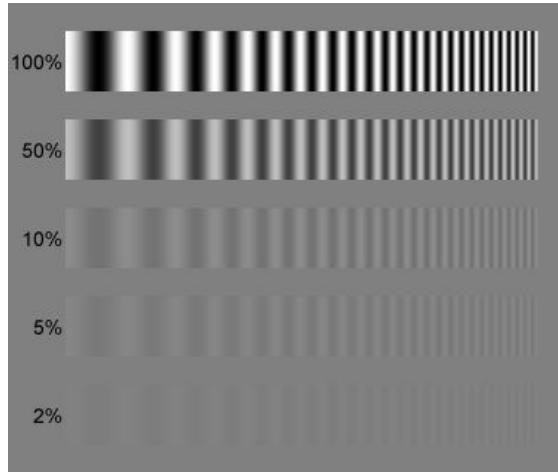
La MTF ou fonction de transfert de modulation.

Appliquée à la résolution des signaux vidéo et la dimension des capteurs, la résolution des optiques **R** est définie par:

$$R(\text{pl/mm}) = \frac{\text{nombre de points par ligne}}{2 * \text{taille image}}$$

Par exemple, soit un capteur HD  $\frac{2}{3}$ " de dimension 9,6mm de large qui délivre un signal à 1920 point par lignes.

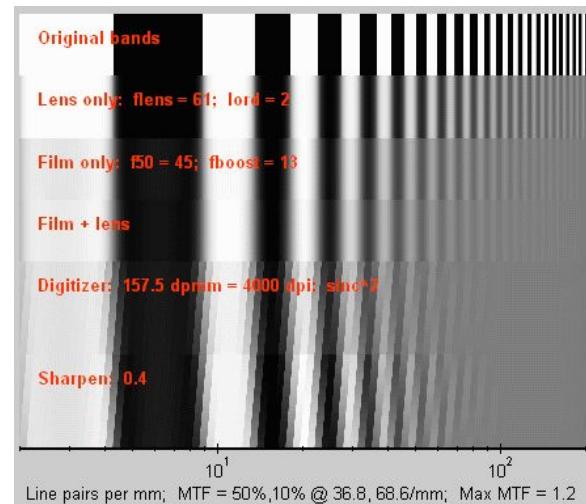
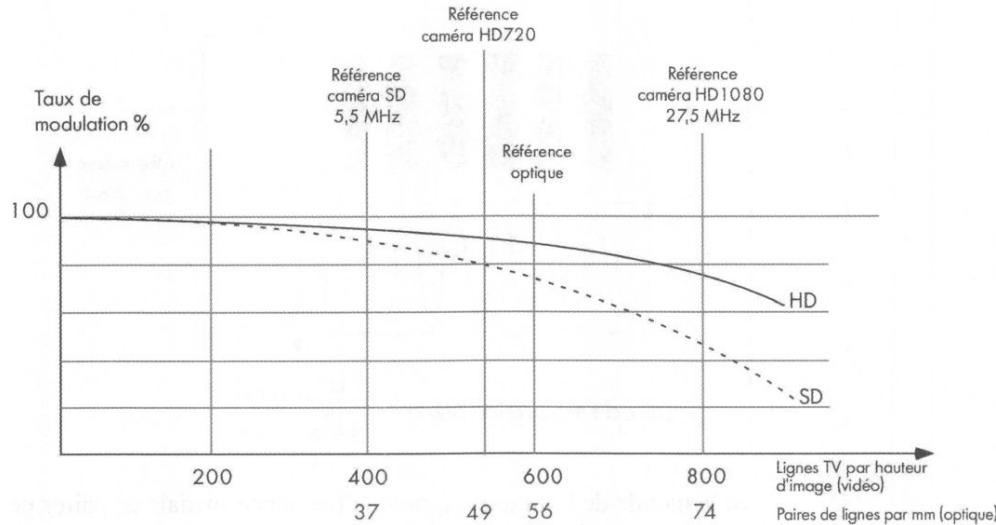
La formule donne 200 points par mm, il faut donc des optiques avec au moins une résolution de 100 pl/mm pour utiliser la pleine définition du capteur.



## La MTF ou fonction de transfert de modulation.

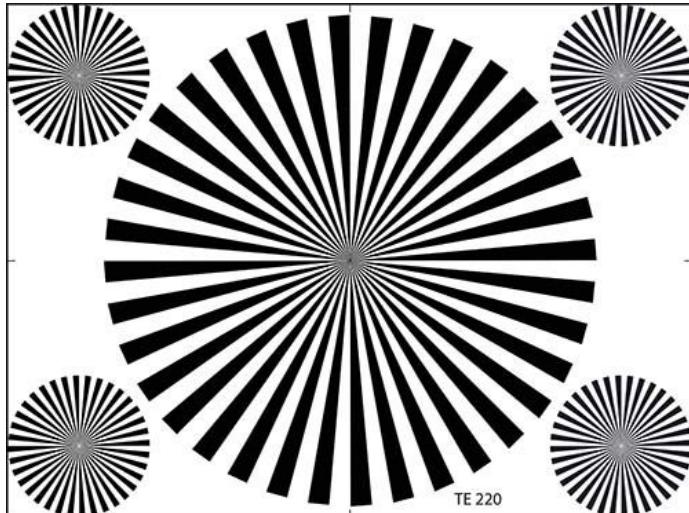
Pour les systèmes optiques, la résolution s'exprime en paires de lignes par mm.

Pour le reste de la caméra (électronique) et la restitution, on exprime en général la résolution en **lignes tv / hauteur (LTV/Ph)** d'image.



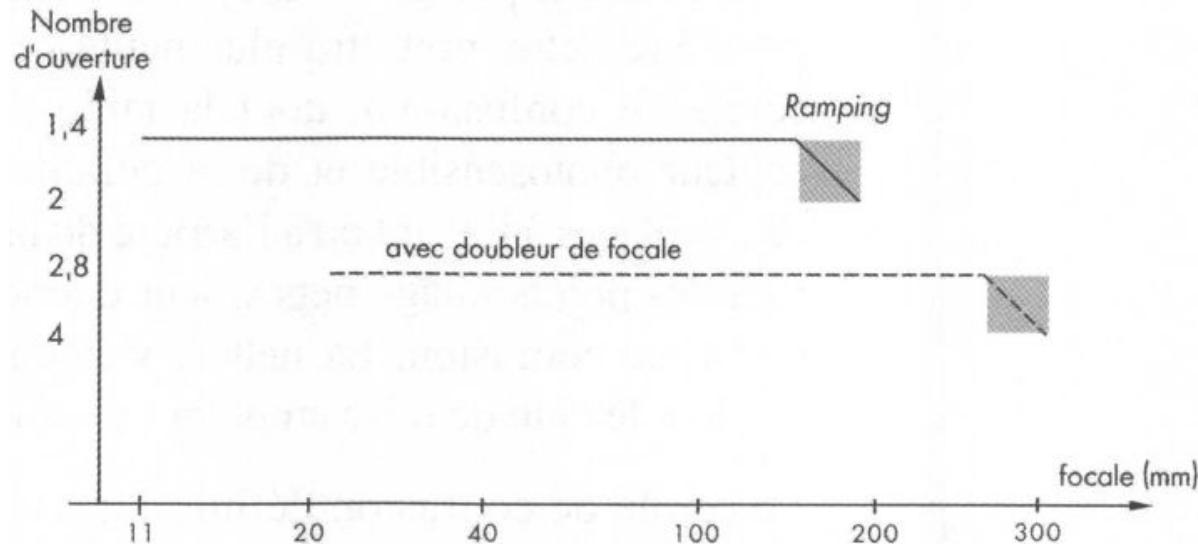
## le tirage ou back-focus:

Sur les zooms, il existe un réglage mécanique permettant d'avoir une mise au point constante sur toute la plage de focale. Ce réglage doit être fait à chaque installation sur une caméra en utilisant une mire, une faible profondeur de champ et en faisant varier la valeur de la focale. Cela permet d'assurer que la formation du plan focal de l'optique coïncide toujours au plan du capteur.



## le ramping

A pleine ouverture la luminosité de l'image diminue lorsque le zoom est en longue focale. C'est le phénomène de le **ramping** ( ou **F drop**).



**le pompage de point ou focus breathing**  
video

Avec ce défaut, la focale dépend de la distance de mise au point.

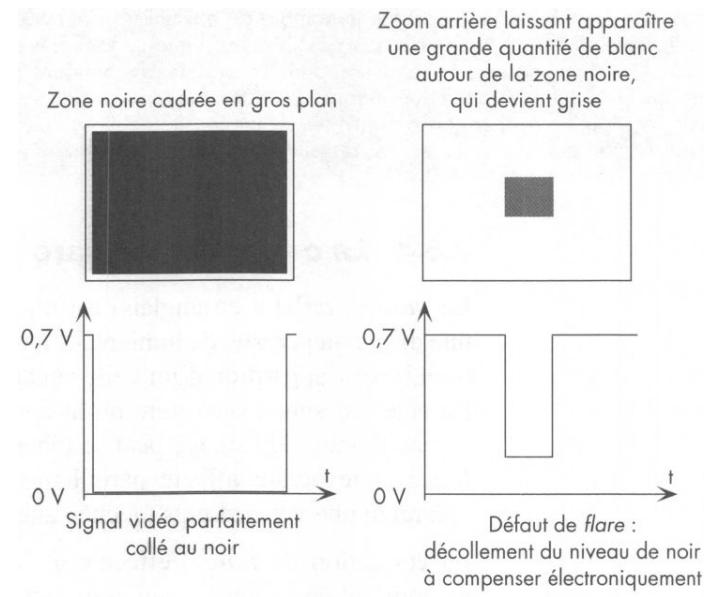
Lorsqu'on modifie la distance de m



## le flare

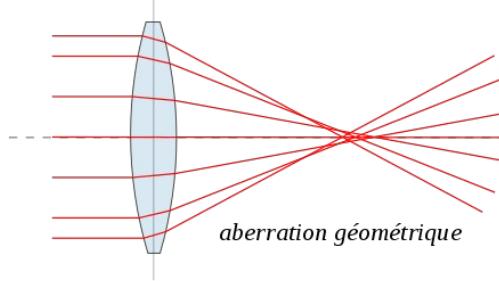
ce défaut est causé par une diffusion parasite de lumière aux travers des multiples lentilles de l'objectif. Il se traduit par une baisse de contraste dans les parties sombres de l'image et parfois par l'apparition de taches colorées.  
Ce défaut augmente lorsque l'ouverture diminue.

On appelle également flare les halos lumineux qui se forment sur l'image lorsque une source de lumière ponctuelle et intense se trouve à la périphérie du champ de l'objectif. Il peut être compensé électroniquement.

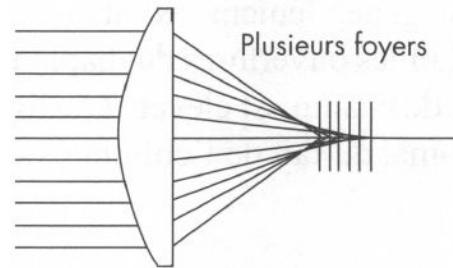


## I'aberration sphérique

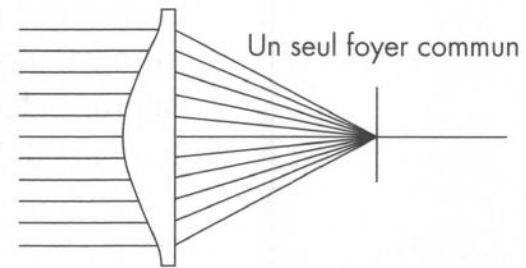
les rayons périphériques ne focalisent pas sur le même plan que les rayons centraux. Si on est net au centre on est flou sur les bords et inversement. Diminue avec les faibles ouvertures.



Lentille sphérique

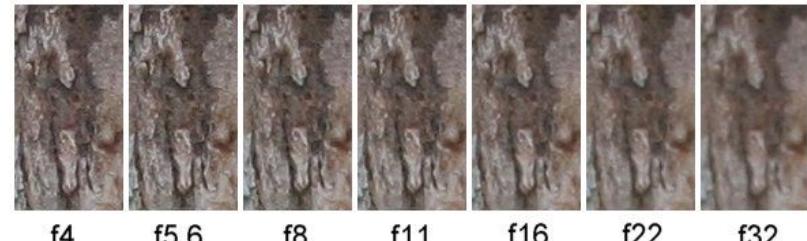
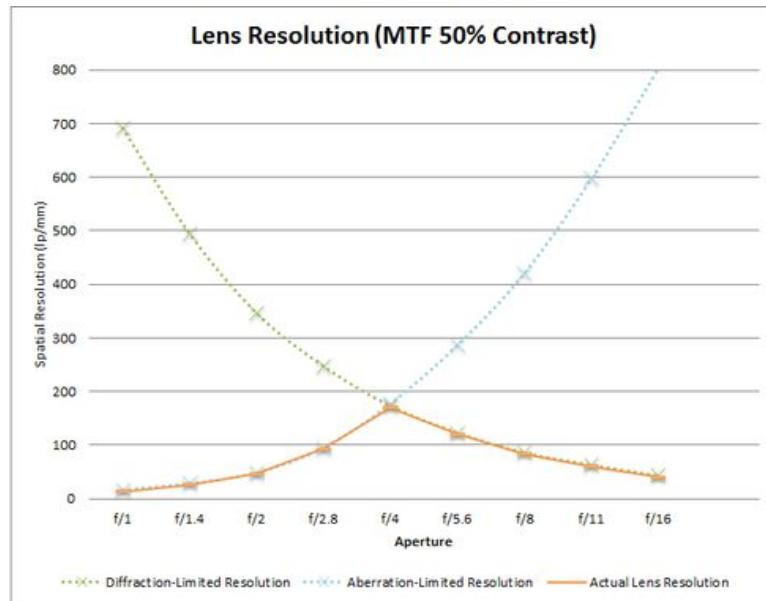


Lentille asphérique



## la diffraction

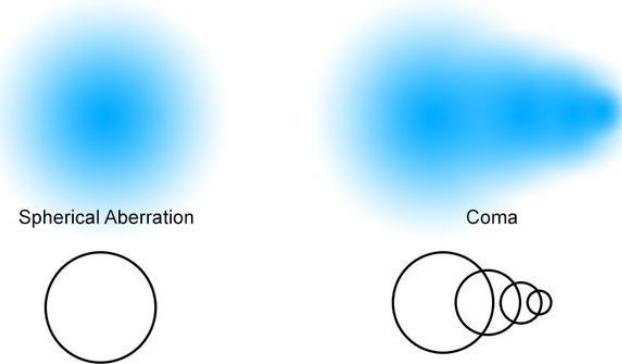
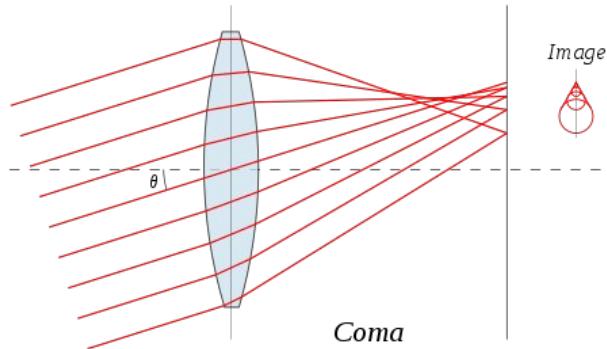
c'est une perte de résolution à faible ouverture due à la diffraction de la lumière passant par une ouverture. Elle augmente avec les faibles ouvertures.



EF300/4L 300mm infinity focus

## le coma

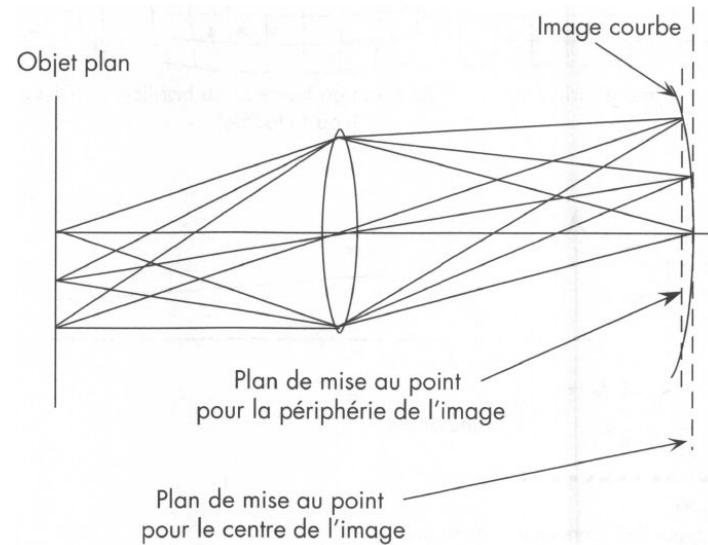
Comme les aberrations sphériques, ce sont des déformations en traînées qui affectent les points à la périphérie de l'image.



Copyright © Sareesh Sudhakaran 2013

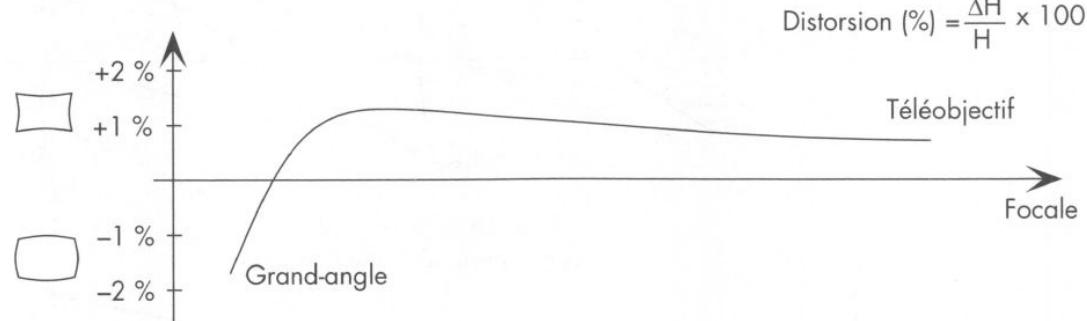
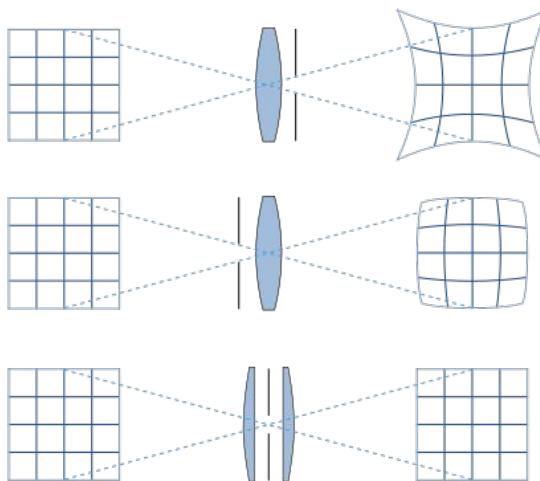
## la courbure de champ

l'image plan est en fait un plan incurvé du fait de la concavité des lentilles. Cela implique qu'il est difficile d'être à la fois net sur le centre et sur les bords.



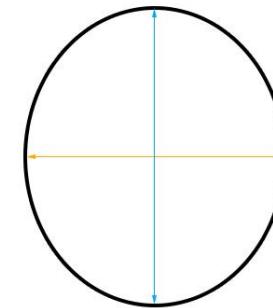
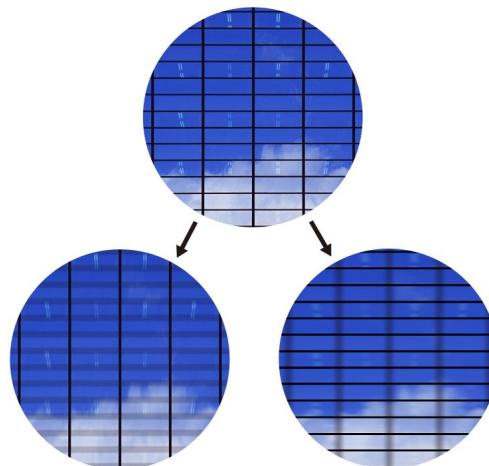
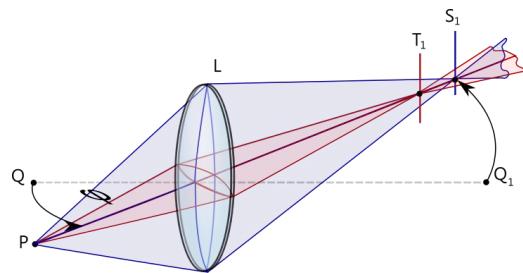
## la distorsion

elle provient du fait qu'une lentille forme l'image des rayons obliques à une distance différents des rayons centraux. C'est une déformation géométrique, en coussin ou en tonneau, qui affecte principalement les bords de l'image. Les focales courtes présente une déformation en tonneau, les longues focales en coussinet. Cette déformation varie avec la mise au point et la focale.



## l'astigmatisme

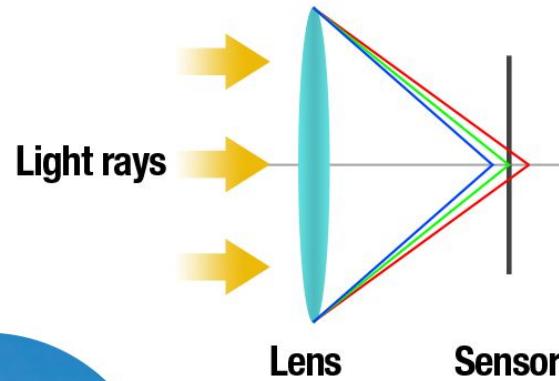
la netteté est différente en vertical et horizontal et l'image d'un cercle est une ellipse.



Blue diameter  
is not equal to  
Orange diameter.

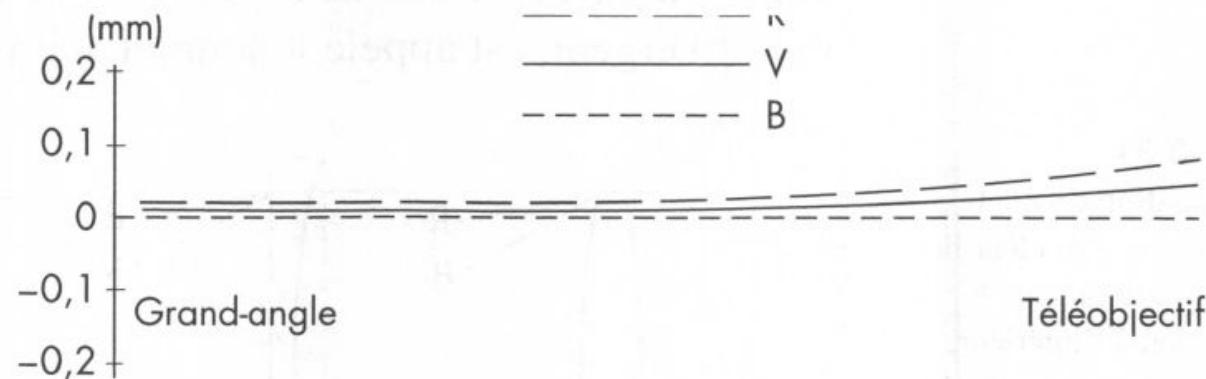
## I'aberration chromatique longitudinale

les différentes composantes chromatiques de la lumières ont des trajectoires différentes dans les optiques. Les images des différentes couleurs sont décalées.



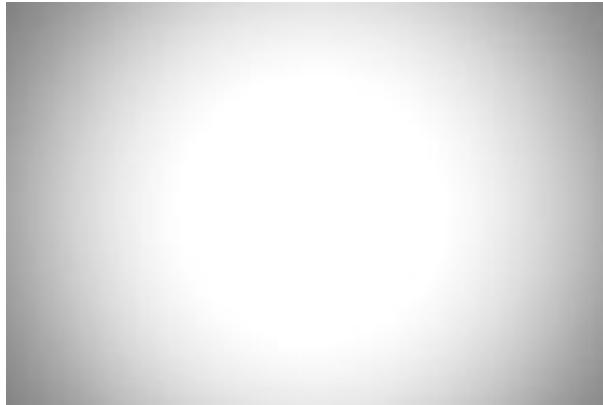
## I'aberration chromatique latérale

l'agrandissement des optiques est différent pour chaque longueur d'onde. L'image du rouge est plus grande que l'image du bleu. Les images des différents couleurs sont de taille différentes.



## le vignetage

l'image est moins lumineuse sur les bord. C'est dû à la géométrie des optiques sur les rayons obliques et centraux. Ce phénomène est accentué en grand angle.



## Quand l'ouverture diminue

les aberrations qui se réduisent

- l'aberration sphérique
- l'aberration chromatique latérale
- le coma
- l'astigmatisme
- la courbure de champ

les aberrations qui augmentent

- la diffraction
- le flare

les aberrations qui ne changent pas

- l'aberration chromatique longitudinale
- la distorsion

Les performances maximales d'un objectif sont en général à 2 diaphs en dessous de son ouverture maximale.