

Pour former l'image de la réalité, on utilise un système optique, généralement constitué d'un objectif (système réfractant).

Le système optique complet est plus complexe pour certaines applications. Il est fait usage d'un système réfléchissant (miroir courbe, sphérique, parabolique) ou la combinaison d'éléments réfléchissants et d'éléments réfractants (exemple du télescope Schmidt-Cassegrain fig 1)

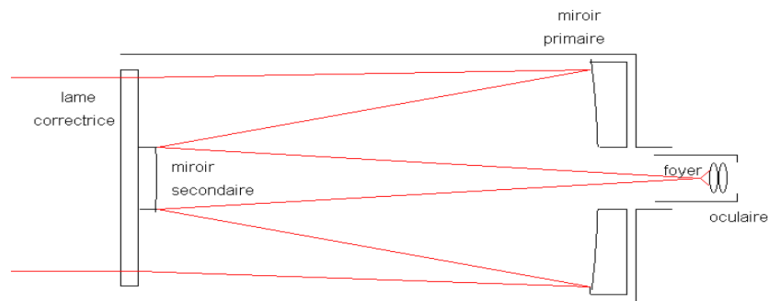


fig 1 - télescope Schmidt-Cassegrain

### Stigmatisme d'un système optique

Un système est dit *rigoureusement stigmatique* lorsque tous les rayons issus d'un point source et traversant le système sont *concourants* à la sortie du système.

Le point d'intersection de tous les rayons sortant du système est appelé *point image*

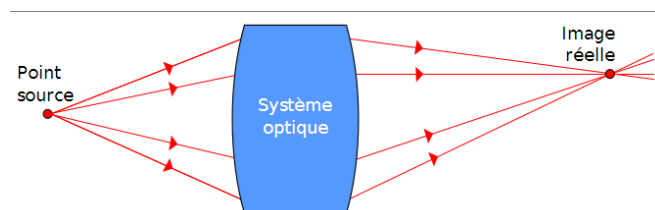


fig 2 - Système stigmatique à image réelle

Lorsque le point image est situé après le système optique, le point est dit *réel*. C'est le cas des objectifs classiques utilisés en photographie.

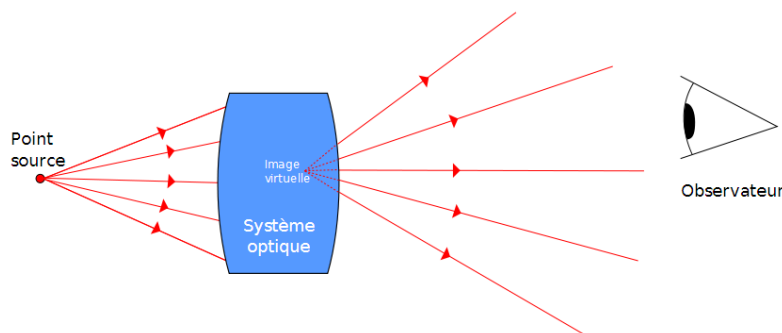


fig 3 - Système stigmatique à Image virtuelle

Lorsque le point image est situé avant le système optique, le point image est dit *virtuel*. C'est le cas des oculaires (microscope, télescope..) destinés à être complétés par une optique secondaire (cornée+cristallin de l'oeil) pour former l'image réelle sur le capteur (rétine)

### Sténopé

Le système stigmatique le plus simple permettant de former des images réelles est le *sténopé* ou *pin-hole*. Il s'agit d'un montage optique dans lequel tous les rayons optiques issus de la source doivent passer par un point unique supposé de surface nulle.

La géométrie de l'image d'un tel système est totalement maîtrisée (pas d'aberration géométrique du système de prise de vue).

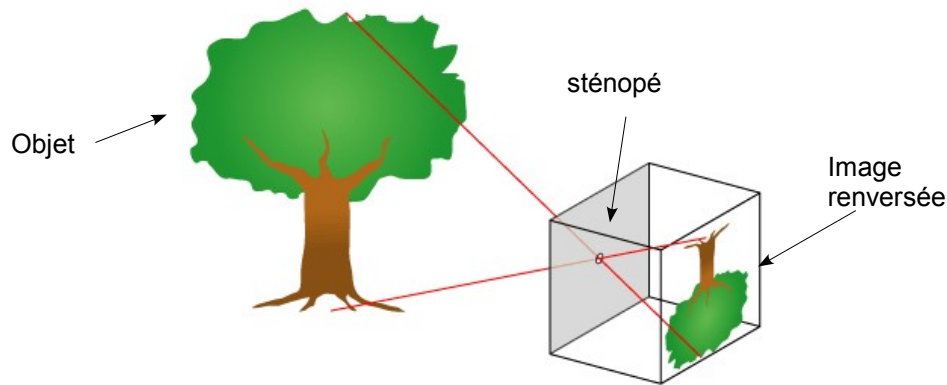


fig 4 - Principe du sténopé

Cependant, il n'est pas utilisable concrètement pour les raisons suivantes:

- le flux lumineux issu d'un point source et entrant dans le sténopé est nul si le trou est de taille nulle (l'angle solide issu de la source s'appuyant sur le trou est nul). L'élément photosensible formant le signal ne pourra pas former d'image, à moins d'augmenter la taille du trou.

Si le trou est de taille  $d$  et le sténopé de profondeur  $l'$ , l'image d'un point source situé à une distance  $l$  devient une tache [homogène en première approximation] de diamètre  $d \frac{(l+l')}{l}$ . L'image prend un aspect flou.

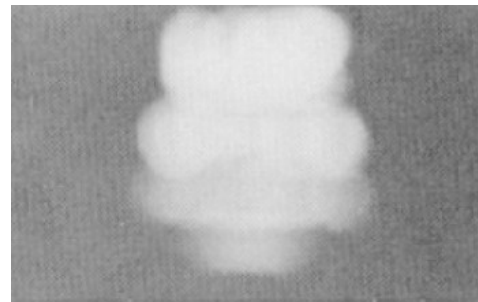


fig 5 - Image de sténopé pour un trou (a) optimal (b) trop gros

- pour un trou de très petit diamètre, le phénomène de *diffraction* apparaît. Il est lié à la nature ondulatoire de la lumière; plus la taille du trou diminue, plus l'effet de la diffraction est visible. Le cas particulier d'un trou parfaitement circulaire donne une figure de diffraction, appelée *tache d'Airy* présentant un disque central et des cercles concentriques de plus en plus atténués (la luminance suit une loi de Bessel de type  $J_1(\rho)/\rho$ ). Le rayon du 1er zéro (cercle sombre) est lié à la longueur d'onde  $\lambda$  et au diamètre( ouverture)  $d$  du dispositif d'entrée de la lumière:

$$\rho \simeq 1,22 \frac{\lambda}{d} l'$$

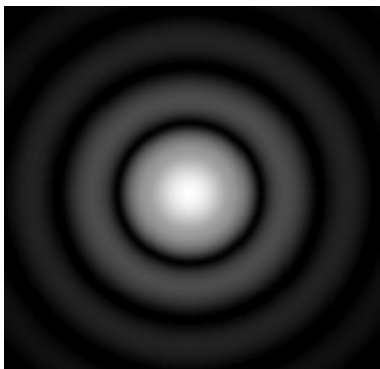


fig 6 - Diffraction: (a) Tache d'Airy (b) effet sur une image de sténopé

### Pouvoir de résolution d'un instrument d'optique

Lors leur cheminement à travers un système optique, les faisceaux lumineux sont diaphragmés par les montures des lentilles et donc diffractés.

L'image d'un point source n'est donc pas un point image mais une tache de diffraction. Les montures des lentilles ou miroirs étant la plupart du temps circulaires, la figure de diffraction obtenue est une tache d'Airy.

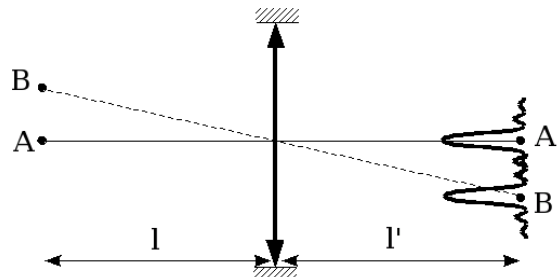


fig 7 - Diffraction de 2 points source

Soit le cas simple de la formation d'une image par une lentille assimilée à un trou de diamètre  $d$ . On note  $l$  la distance objet-lentille et  $l'$  la distance lentille-image. Les images  $A'$  et  $B'$  sont séparés si leurs taches centrale de diffraction ne se superposent pas.:  $A'B' > 1,22 \frac{\lambda}{d} l'$

Comme  $AB = A'B' \frac{l}{l'}$ , la condition précédente devient:  $AB > 1,22 \frac{\lambda}{d} l$

En pratique, le rapport  $l/d$  est souvent supérieure à 1. Il est d'autant plus défavorable que  $d$  est petit (objectif "miniature" de Webcam par exemple). La résolution est donc au mieux de plusieurs fois l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière utilisée ( $0,4-0,8 \mu m$  pour la lumière visible). Le pouvoir de résolution de telles caméras est donc faible. La diffraction apparaît sur les systèmes optiques de qualité lorsque l'utilisateur souhaite travailler à *faible ouverture* pour compenser une luminance de source trop forte.

### Modèle de la lentille mince

On se place dans l'hypothèse que le système n'a pas de défaut de stigmatisme et que la lentille n'a pas d'épaisseur (plans principaux confondus)

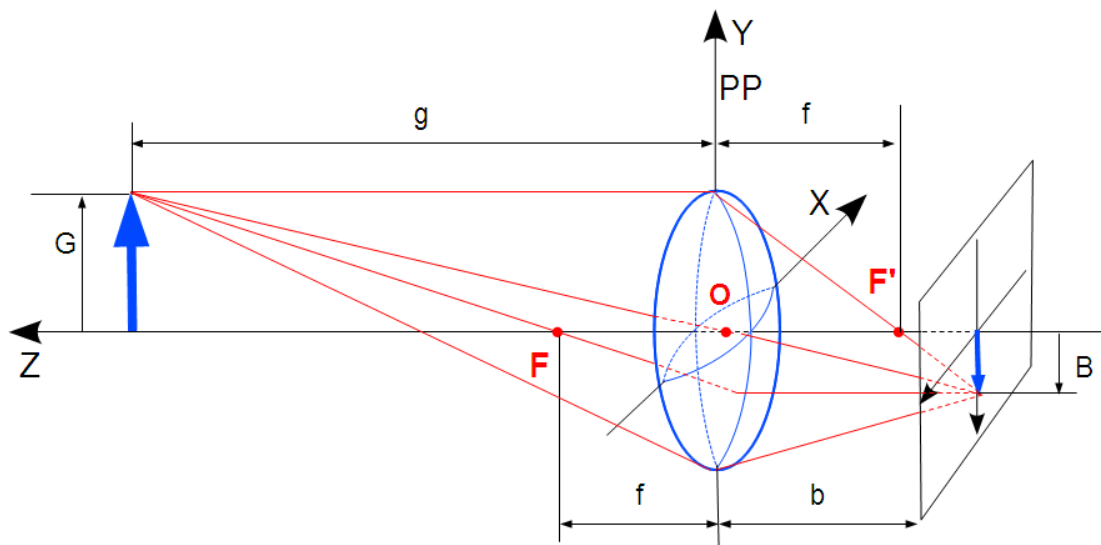


fig 7 - Formation de l'image

Soient  $F$  et  $F'$  les foyers resp. objet et image du système et la droite  $FF'$  l'axe optique passant par le centre optique  $O$  du système.

Les propriétés admises sont:

- un rayon passant par le centre optique  $O$  n'est pas dévié et ressort dans la même direction que l'incident

- un rayon passant par le foyer objet ressort parallèle à l'axe optique

- un rayon incident parallèle à l'axe optique passe par le foyer image

La loi de Descartes lie la position  $g$  de l'objet, la position  $b$  de l'image et la distance focale  $f$ :

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Le *grandissement* est le rapport entre la hauteur de l'objet et celle de l'image :

$$m = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

On remarque que le grandissement est lié à la distance de l'objet. Au plus l'objet est éloigné du plan principal objet, au plus l'image est petite. Lorsque le grandissement vaut 1, l'objet se trouve dans le *plan conjugué* objet.

Dans une application, il est fréquent que le grandissement soit imposé sous la forme d'un *champ* à couvrir avec un capteur de taille préfixée. La distance focale à choisir sera donnée alors par :

$$f = \frac{m}{1+m} g$$

Un tel calcul ne donne généralement pas une valeur usuelle de focale. La solution d'utiliser un zoom est peu conseillée car son "tirage" (sa focale) n'est pas connu avec précision.

Face à ces incertitudes, le grandissement sera évalué par *étalonnage* du système de prise de vue.

### Mise au point

L'image d'un point source est un point lorsque les conditions de Descartes sont respectées. Dans le cas contraire, l'image d'un point est l'intersection du cône des rayons images avec le plan du capteur.

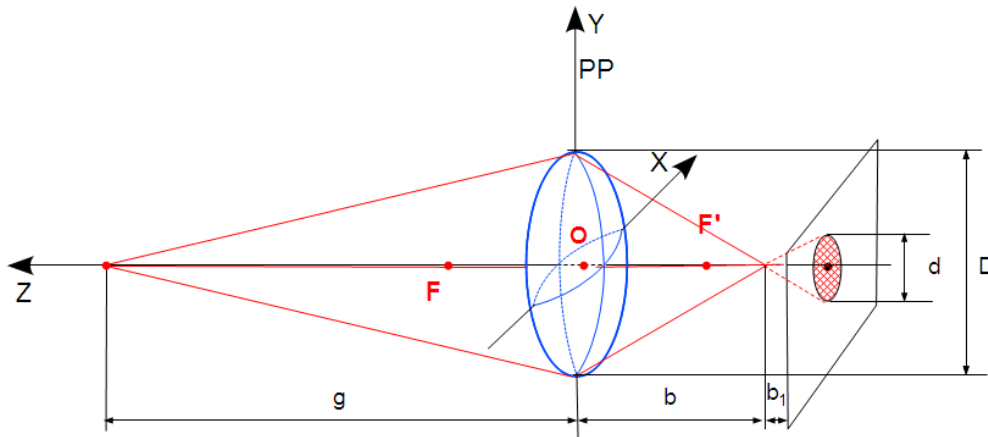


fig 8 - Image non focale

Soit  $b$  la distance de mise au point pour une distance  $g$  de l'objet telle que  $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

Si le capteur est placé à une distance  $b + b_0$  par un *défaut de mise au point*, l'image sera un disque de diamètre  $d$ . La luminance de ce disque est homogène si le coefficient de transmission du système optique est identique pour tous les rayons, la forme exacte du disque est celle du diaphragme de diamètre  $D$ . La relation entre le diamètre de l'image et l'écart de mise au point est :

$$d = D \frac{b_1}{b}$$

L'image globale d'une scène est alors composée d'une somme de disques (additivité des énergies); on peut montrer que l'image obtenue est le produit de convolution de l'image parfaite  $f(x,y)$  avec l'image imparfaite d'un point  $h(x,y)$  (notion de réponse impulsionnelle):

$$g(x, y) = \iint_{\text{voisinage}} f(x-u, y-v) h(u, v) du dv$$

Ce phénomène est ressenti comme un *flou* sur l'image. Les techniques modernes permettent d'améliorer une image dégradée par défocalisation, bien qu'il soit mathématiquement impossible de restaurer l'image parfaite.

Une autre application est la mise au point automatique faite sur les caméscope (utilisé aussi en microscopie). L'analyse du flou, basé sur des technique de mesure du contraste local, permet d'ajuster au mieux le réglage de l'objectif.

### Analyse fréquentielle d'un défaut de mise au point

Un défaut de mise au point provoque la dispersion de l'énergie d'un point source sur une surface approximativement circulaire.

Lorsque l'objet observé présente des informations périodiques (raies, motifs bidimensionnels...), la défocalisation peut induire le phénomène d'*inversion de contraste* : l'image présente localement une information périodique en *opposition de phase* avec l'original, c'est à dire que les extréma sont inversés (le minimum de niveau de gris image prend la place d'un maximum sur l'objet réel et réciproquement).

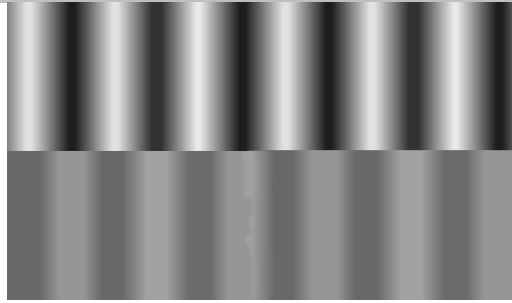


fig 9 - Inversion de contraste

Le phénomène s'explique par une étude de la réponse à un signal fréquentiel de forme sinusoïdale.

On suppose que la réponse impulsionnelle d'un défaut peut être modélisée par un profil carré (disque en 3D) :

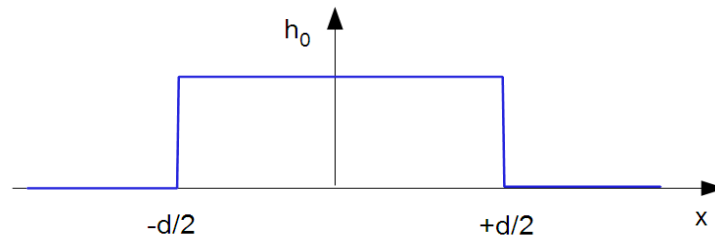


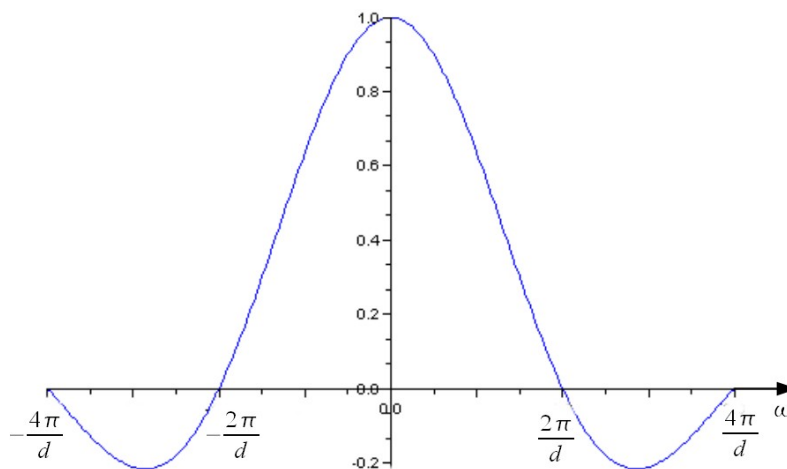
fig 10 - Profil de la réponse impulsionnelle d'une défocalisation

La réponse  $g(x)$  est le produit de convolution de la réponse impulsionnelle  $h(x)$  avec le signal  $f(x) = A + B \sin(\omega x)$  :

$$g(x) = \int_{-d/2}^{+d/2} h(u) \cdot f(x-u) du = \int_{-d/2}^{+d/2} h_0 \cdot [A + B \sin(\omega(x-u))] du$$

$$g(x) = A h_0 \left[ u \right]_{-d/2}^{+d/2} + B h_0 \left[ \frac{\cos(\omega(x-u))}{\omega} \right]_{-d/2}^{+d/2} \quad g(x) = A h_0 d + B d h_0 \frac{\sin(\omega d/2)}{\omega d/2} \cdot \sin(\omega x)$$

Le système étant à énergie constante:  $h_0 d = 1$  ; on remarque que le signal flou a le même niveau moyen A et qu'il est de forme sinusoïdale affecté d'un facteur d'amplitude réel  $\frac{\sin(\omega d/2)}{\omega d/2}$ . Ce facteur d'atténuation est caractérisé par le graphe suivant:

Fig 11 –  
Fonction de  
transfert du  
flou

On constate que pour un signal de période  $d$  (pulsation  $\omega = 2\pi/d$ ) soit la taille du flou, la réponse est nulle (le flou fait une moyenne sur une période de sinusoïde, d'où un résultat nul). Pour des signaux de période inférieure à  $d$ , le gain du transfert est négatif, d'où l'inversion des extrêmes du signal.

Bien remarquer que la présence d'un "zéro" dans la courbe de gain traduit la perte *irréversible* de l'information. Aucun traitement aussi sophistiqué soit-il, ne pourra restituer (*restaurer*) le signal initial. L'inversion de contraste ne pourra être corrigée qu'avec une connaissance de l'existence du phénomène (interprétation du contenu de l'image ou connaissance *a priori*).

### Fonction de transfert de modulation

Le calcul précédent a été simplifié à une dimension. La prise en compte des deux dimensions spatiales du signal conduit à des calculs similaires mais plus complexes. Elle permet de déterminer la *Fonction de Transfert Optique*, qui s'exprime en gain (*Fonction de Transfert de Modulation*) et phase (*Fonction de Transfert de Phase*) pour un système optique mis dans des conditions particulières (défocalisation dans l'exemple précédent).

De façon générale, la FTM caractérise la performance fréquentielle du système optique depuis l'objectif jusqu'au capteur. Elle inclut les contributions des éléments suivant:

- la qualité intrinsèque de l'objectif
- son stigmatisme
- sa diffraction
- la mise au point ou focalisation

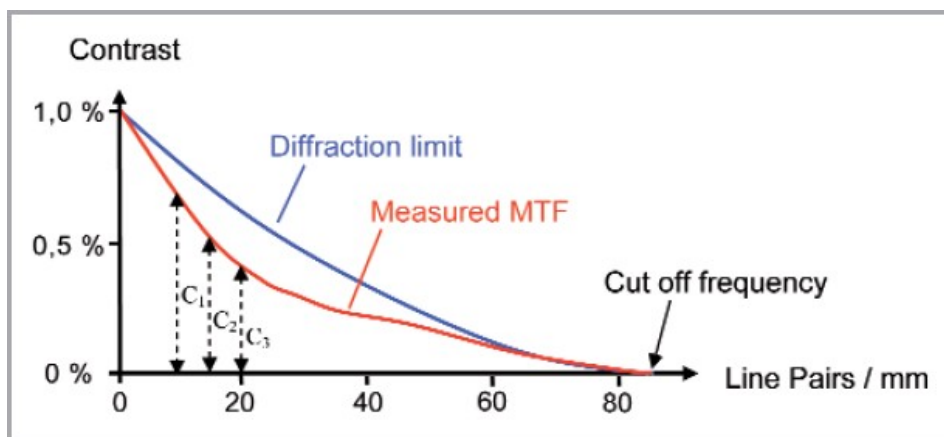


Fig 12 - Courbe caractéristique de la FTM

La même approche est menée pour l'ensemble objectif + capteur. Elle permet de prendre en compte la qualité du capteur pour sa partie optique (micro-lentilles, diffusion de la lumière dans les photosites...) et électronique (fuites latérales de charges, couplages parasites entre lignes ou colonnes...). Son évaluation est faite expérimentalement à partir d'une source du type mire. La mesure de l'amplitude de la réponse est faite par le capteur lui-même.



Fig 13 - Mesure de la FTM à partir d'une mire

## Profondeur de champ

La profondeur de champ est la tolérance sur la distance des objets telles que l'image soit considérée comme nette. La netteté s'apprécie par la diamètre maximum admissible de la tache de défocalisation dit *cercle de confusion* (donnée subjective). Pour les capteurs numériques, on admet souvent comme diamètre de confusion la taille du pixel du capteur.

Soit  $g$  la distance de l'objet dont l'image est un point, formée pour une position  $b$  du capteur.

Soit  $g_0$  et  $g_1$  les positions des objets pour lesquelles l'image est un disque de diamètre  $d$

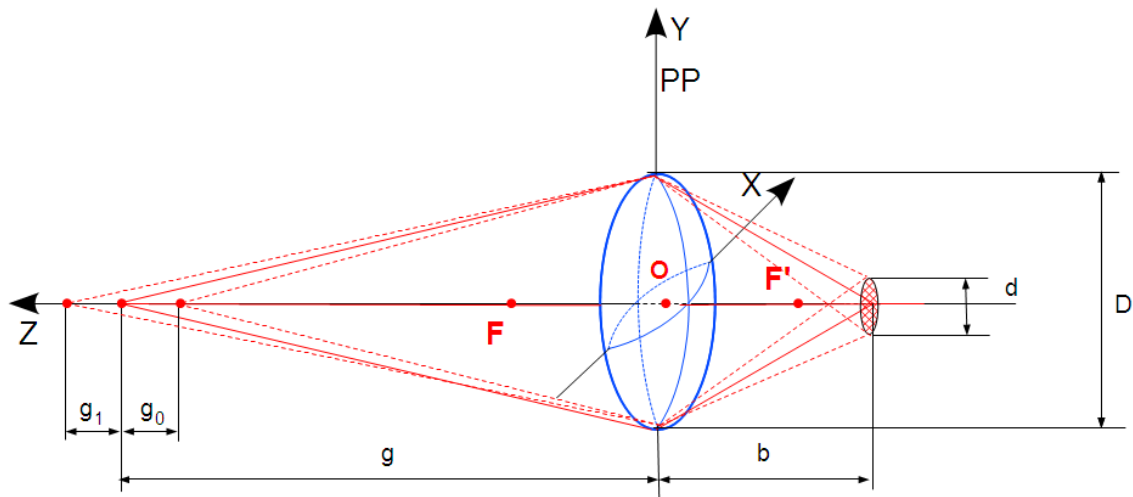


fig 10 - Profondeur de champ

La profondeur de champ est donnée par :

$$g_0 + g_1 = \frac{2 N d f^2 g (g - f)}{f^4 - N^2 d^2 (g - f)^2} \quad \text{avec} \quad N = \frac{f}{D} \quad \text{ouverture relative de l'objectif}$$

La profondeur de champ diminue lorsque le diamètre du diaphragme  $D$  augmente ( $N$  diminue) .

Un petit diaphragme simplifie l'opération de mise au point; de plus, les défauts comme le *vignettage* ou la *distorsion géométrique* sont diminués . C'est pourquoi de nombreuses caméras ou appareils photos sont livrés avec un objectif à faible ouverture. L'inconvénient est la faible quantité de lumière recueillie par un objectif de faible ouverture.

Les valeurs usuelles d'ouverture sont échelonnées en suite géométrique de facteur  $\sqrt{2}$  , le passage à la valeur suivante divise la surface, dont la quantité de lumière par 2 .

f/1.4 f/2 f/2.8 f/4 f/5.6 f/8 f/11 f/16 f/22 f/32