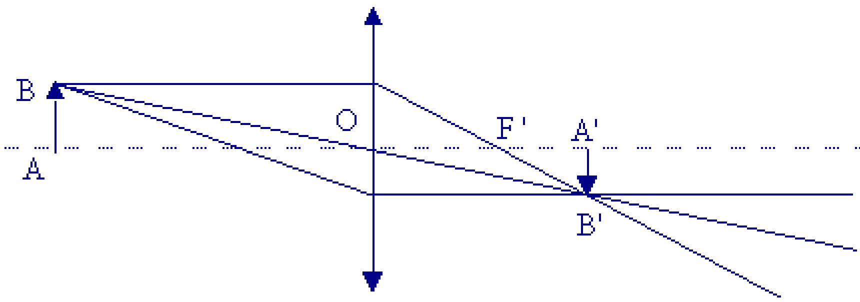
Animation Animation

La photographie

par Gilbert Gastebois

1.Les lentilles minces dans les conditions de Gauss

1.1 Schéma des rayons lumineux dans une lentille stigmatique.



p = - OA (p < 0)

p' = OA' (p' > 0)

f ' = OF ' (f ' > 0)

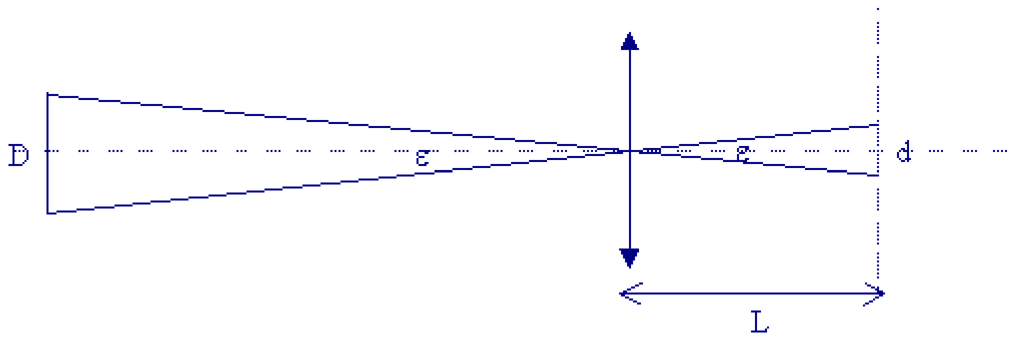
1.2 Relation de conjugaison des lentilles

1 /p' - 1/p = 1/f '

p < 0 donc on a : 1 /OA' + 1/OA = 1/OF '

2. L'angle de netteté

2.1 Schéma



L profondeur de l'appareil photo (distance objectif-pellicule)
D distance séparant 2 points qui ne peuvent être séparés à l'œil nu
ε angle de netteté
d taille de l'image de D sur la pellicule

2.2 Angle de netteté

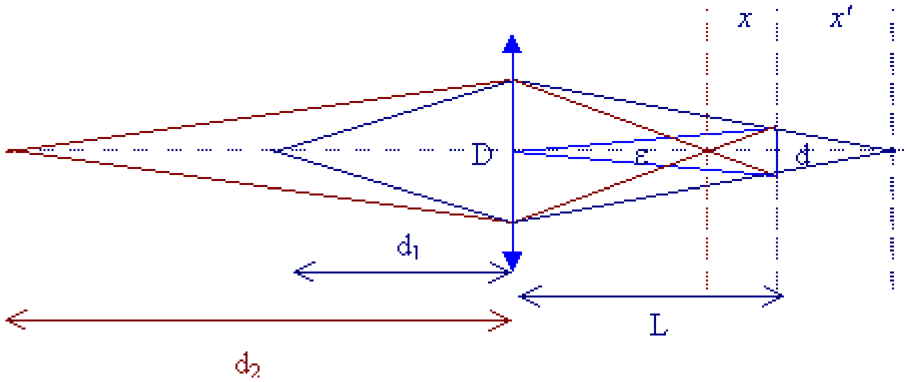
L'œil ne peut séparer deux points qui sont trop proches. S'ils sont vus sous un angle ε inférieur à une certaine limite appelée pouvoir séparateur de l'œil, ils sont confondus. Dans ces conditions, si un point forme une image qui est une tache de diamètre d inférieur à Lε sur la pellicule, cette image sera vue comme nette.
Pourquoi, un point donnerait une image non ponctuelle ?
Une première possibilité serait que l'objectif serait de mauvaise qualité (conditions de Gauss non respectées, notamment à grande ouverture du diaphragme). On oubliera cette possibilité en considérant un objectif parfait.
L'autre possibilité est que la mise au point n'est pas parfaite.
La profondeur de champ représente la zone où un objet peut se trouver en donnant une image considérée comme nette sur la pellicule.

Le pouvoir séparateur de l'œil est voisin de 1' = 1/3400 rd pour des points très contrastés, mais supérieur pour des points peu contrastés. On a donc pris une valeur moyenne
ε = 1/1500
Ex : Pour un objectif de 50 mm, on a d = Lε = 1/30 mm = 33 µm, ce qui n'est pas visible à l'œil nu.

Remarque : Il existe un autre phénomène qui fait que l'image d'un point n'est pas ponctuelle, même pour un objectif parfait et une mise au point parfaite, c'est la diffraction de la lumière entrant par le diaphragme.
L'angle sous-tendu par la tache image est égal à 2 λ/Φ (λ étant la longueur d'onde de la lumière voisine de 0,5 µm et Φ le diamètre utile de l'objectif).
Pour que cet angle dépasse ε, il faudrait que Φ soit inférieur à 3000 λ = 1,5 mm. Dans ces conditions la diffraction n'est jamais un problème à prendre en compte.

3. La profondeur de champ : Réglage de l'ouverture

3.1 Schéma



ε angle de netteté
d diamètre de la tache image : d = Lε
D diamètre de l'ouverture = f '/n (n : "ouverture" du diaphragme)
L profondeur de l'appareil photo (distance objectif-pellicule)
d_1 distance minimale de netteté
d_2 distance maximale de netteté
$d_2 - d_1$ profondeur de champ
$x + x'$ est la profondeur de foyer.Tout objet placé à une distance l comprise entre d_1 et d_2 donne une image nette. Chaque point de l'objet donne une image de diamètre inférieur à d sur la pellicule. La distance de mise au point parfaite est d_0.
La valeurs de l'ouverture n sont des nombres qui se suivent de manière que, en général, chacun soit le précédent multiplié par racine de 2. On a des valeurs comme 2 ; 2,8 ; 4 ; 5,6 ; 8 ; 11 ; 16 ; 22 ; 32, ce qui correspond à une surface de diaphragme qui est divisée par 2 à chaque valeur successive :
$S = \pi D^2/4 = \pi f'^2/(4n^2)$

3.2 Expressions de la profondeur de champ.

Théorème de Thalès :
$x'/d = (L + x') /D$ donc $x' (1/d - 1/D) = L/D$ et $x' = Ld /(D - d)$
$x/d = (L - x) /D$ donc $x (1/d + 1/D) = L/D$ et $x = Ld /(D + d)$

$1/d_1 = 1/f' - 1/(L + x') = 1/f' - 1/(L + Ld /(D - d)) = 1/f' - (D - d)/LD)$.

$1/d_0 = 1/f' - 1/ L$ donc $1/f' = 1/d_0 + 1/ L$

$1/d_1 = 1/d_0 + 1/ L - (D - d)/LD) = 1/d_0 + D/ LD - (D - d)/LD) = 1/d_0 + d/LD = 1/d_0 + n\varepsilon/f'$

$\mathbf{d_1 = d_0 f'/(f' + n\varepsilon d_0) = d_0 /(1 + n\varepsilon d_0/f')}$

$1/d_2 = 1/f' - 1/(L - x)$

$1/d_0 = 1/f' - 1/ L$ donc $1/f' = 1/d_0 + 1/ L$

$1/d_2 = 1/d_0 + 1/ L - (D + d)/LD) = 1/d_0 + D/ LD - (D + d)/LD) = 1/d_0 - d/LD = 1/d_0 - n\varepsilon/f'$

$\mathbf{d_2 = d_0 f'/(f' - n\varepsilon d_0) = d_0 /(1 - n\varepsilon d_0/f')}$ Si $n\varepsilon d_0/f' > 1$, d_2 est négatif. Ca n'a pas de signification physique. La zone de netteté va alors jusqu'à l'infini comme quand $n\varepsilon d_0/f' = 1$.

Profondeur de champ :

$d_2 - d_1 = d_0 /(1 - n\varepsilon d_0/f') - d_0 /(1 + n\varepsilon d_0/f') = 2n\varepsilon d_0^2/f'/(1 - n^2\varepsilon^2 d_0^2/f'^2)$

$\mathbf{d_2 - d_1 = 2n\varepsilon d_0^2/(f' - n^2\varepsilon^2 d_0^2/f')}$

$1/d_1 + 1/d_2 = 2/d_0$

$1/d_1 + 1/d_2 = (d_2 + d_1)/ d_1 d_2 = 2/d_0$

$\mathbf{d_0 = 2 d_1 d_2 /(d_2 + d_1)}$

$1/d_1 - 1/d_2 = 2n\varepsilon/f'$

$1/d_1 - 1/d_2 = (d_2 - d_1)/ d_1 d_2 = 2n\varepsilon/f'$

$\mathbf{n = f'(d_2 - d_1)/ (2\varepsilon d_1 d_2)}$ **n est l'ouverture à utiliser pour obtenir une certaine profondeur de champ** $\mathbf{d_2 - d_1}$

Expression approchée.

$d_1 d_2 = d_0^2/ (1 - n^2\varepsilon^2 d_0^2/f'^2)$

Si $n^2\varepsilon^2 d_0^2/f'^2 << 1$ (On peut prendre $n^2\varepsilon^2 d_0^2/f'^2 < 1/10$ ou $d_0 < 500 f'/n$) on a $d_1 d_2 = d_0^2$

$\mathbf{n = f'(d_2 - d_1)/ (2\varepsilon d_0^2)}$ si $d_0 < 500 f'/n$ ce qui correspond à un portrait.

Ex : Photo avec une focale de 50 mm d'une personne placée à 2 m avec une profondeur de champ de 30 cm pour bien isoler le portrait du fond.

$n = 0,05 \times 0,3/(2 \times 4/1500) = 2,8$ ($n^2\varepsilon^2 d_0^2/f'^2 = 5,6.10^{-3}$ ce qui est très inférieur à 1: l'approximation est donc valable)

Remarque :

En macrophotographie, on se place très près du sujet, d_0 est très faible donc n peut être grand, même pour une faible profondeur de champ, si f' est petit. Il faut alors beaucoup fermer le diaphragme. Cela entraîne un manque de lumière et la nécessité d'un temps de pose long.

Prenons par exemple le cas d'une image sur la pellicule de taille égale à l'objet, on a alors $d_0 = 2 f'$

$n = (d_2 - d_1)/ (8\varepsilon f')$ ou $d_2 - d_1 = 8n\varepsilon f' = 5,3.10^{-3} nf'$ (La profondeur de champ est proportionnelle à la focale à ouverture donnée et est plutôt faible en général : 2 mm pour une focale de 50 mm ouverte à 8)

Par exemple : Photo d'un insecte placé à 100 mm avec une focale de 50 mm. On a ainsi une image de taille égale à celle de l'insecte. On veut une profondeur de champ de 6 mm pour que l'insecte soit entièrement net (difficile de faire moins!).

$n = (d_2 - d_1)/ (8\varepsilon f') = 0,006/(8 \times 0,05/1500) = 22,5$ (On prendra donc n = 22, c'est très fermé)

Maintenant, on prend un petit téléobjectif : insecte placé à 270 mm avec une focale de 135 mm.

$n = (d_2 - d_1)/ (8\varepsilon f') = 0,006/(8 \times 0,135/1500) = 8,33$ (On prendra donc n = 8, ce qui est beaucoup plus confortable)

3.3 La profondeur de champ du point de vue du photographe.

d_1 et d_2 dépendent de f ', mais pour un photographe, il ne semble pas qu'elles en dépendent quand $d_0 >> f'$. Pourquoi ?

Le photographe s'intéresse à son cadre, il choisit une focale qui correspond à sa distance par rapport à son sujet ou il se place à une distance correspondant à sa focale, bref, il choisit un grandissement $\gamma = H'/H$ (H ' hauteur de la pellicule ou de la plaque de capteurs et H taille du cadre à photographier) et adapte la distance d_0 à sa focale f '.

$1/d_0 = 1/f' - 1/L$ et $g = H'/H = L/d_0$ donc $L = \gamma d_0$

$1/d_0 = 1/f' - 1/(\gamma d_0)$ donc $1/f' = 1/d_0 + 1/(\gamma d_0) = (\gamma + 1)/(\gamma d_0)$

$d_1 = d_0 /(1 + n\varepsilon d_0/f') = d_0 /(1 + n\varepsilon(\gamma + 1)/\gamma)$

$d_2 = d_0 /(1 - n\varepsilon d_0/f') = d_0 /(1 - n\varepsilon(\gamma + 1)/\gamma)$

$\mathbf{d_1 = d_0 /(1 + n\varepsilon(\gamma + 1)/\gamma)}$

$\mathbf{d_2 = d_0 /(1 - n\varepsilon(\gamma + 1)/\gamma)}$

donc $d_2 - d_1$ ne dépend plus de f ' mais seulement du grandissement choisi.

Remarque : Pour un cadre donné, γ dépend de la taille de la pellicule ou de la plaque de capteurs. La profondeur de champ dépend donc de cette taille. Comme en général, $\gamma << 1$, on voit que $d_2 - d_1$ diminue avec cette taille. C'est la raison pour laquelle les photos numériques ont plus de profondeur de champ à réglage identique que les photos argentiques. Pellicule : 24 x 36 mm et plaque 6 x 9 mm. γ est donc 4 fois plus petit pour un appareil numérique et la profondeur de champ est 4 fois plus grande !

4. L'hyperfocale : Réglage " tout venant "

4.1 Définition

L'hyperfocale est la distance de mise au point d_0 qui donne la plus grande profondeur de champ pour un réglage donné. C'est la valeur d_0 qui donne d_2 à l'infini. On la note en général h.

$d_2 = d_0 /(1 - n\varepsilon d_0/f')$ est infini si $1 - n\varepsilon d_0/f' = 0$ donc si $d_0 = h = f'/n\varepsilon$

$\mathbf{h = f'/(n\varepsilon)}$

4.2 Distance minimale de netteté à l'hyperfocale

$d_1 = d_0 /(1 + n\varepsilon h/f') = h /(1 + 1) = h/2$

$\mathbf{d_1 = h/2 = f'/(2n\varepsilon)}$

$n = f'(d_2 - d_1)/ (2\varepsilon d_1 d_2)$, d_2 est infini donc $n = f'/ (2\varepsilon d_1) = f'/ (\varepsilon h)$

$\mathbf{n = f'/ (\varepsilon h)}$

L'intérêt de l'hyperfocale est d'obtenir une zone de netteté maximale allant jusqu'à l'infini. C'est le réglage des appareils bon marché non réglables et aussi le choix d'un photographe qui veut pouvoir prendre des photos inopinées qui ne laissent pas le temps de faire la mise au point.

4.3 Relations en fonction de l'hyperfocale h

$1/d_1 = 1/d_0 + n\varepsilon/f' = 1/d_0 + 1/h$

$\mathbf{1/d_1 = 1/d_0 + 1/h}$

$\mathbf{d_1 = d_0 /(1 + d_0/h)}$

$1/d_2 = 1/d_0 - n\varepsilon/f' = 1/d_0 - 1/h$

$1/d_2 = 1/d_0 - 1/h$

$d_2 = d_0/(1 - d_0/h)$

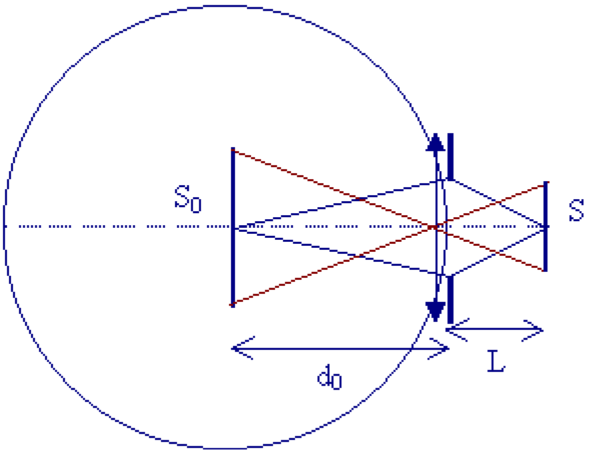
$d_2 - d_1 = 2hd_0^2/(h^2 - d_0^2)$

Remarque : Si on fait le point sur l'infini, d_0 est infini, ce qui donne $d_1 = f'/(n\varepsilon) = h$

Si on fait le point sur l'infini, la distance minimale de netteté est à l'hyperfocale.
Si on fait le point sur l'hyperfocale, la distance minimale de netteté est à la moitié de l'hyperfocale.

5. Luminosité : Réglage du temps de pose (ou de la "vitesse")

5.1 Schéma



S_0 Surface du cadre photographié

S Surface de la pellicule ou des capteurs

d_0 Distance de mise au point

L Profondeur du boîtier

$D = f'/n$ Diamètre de l'ouverture

t_p Temps de pose est le temps d'ouverture de l'objectif

5.2 Détermination du temps de pose

Le temps de pose t_p est la durée d'exposition de la pellicule ou des capteurs. On l'appelle aussi "vitesse d'obturation", mais c'est un abus de langage car il s'agit bien d'une durée : 1/1000 s, 1/500 s, 1/250 s, 1/125 s, 1/64 s, etc...

La surface S_0 émet une intensité lumineuse I_0, c'est la puissance lumineuse émise par une unité de surface.
La puissance lumineuse P_0 vaut donc $P_0 = I_0S_0$.
Une partie de cette puissance pénètre dans l'appareil, c'est
$P = P_0 \pi D^2/4/(4\pi d_0^2) = P_0 D^2/(16d_0^2) = I_0S_0D^2/(16d_0^2)$
L'intensité lumineuse I arrivant sur la pellicule sera donc $P/S = I_0S_0D^2/(16d_0^2) /S$
$S_0/S = d_0^2/L^2$ donc $I = I_0d_0^2D^2/(16d_0^2L^2) = I_0D^2/(16L^2)$
Chaque unité de surface de la pellicule doit recevoir une énergie moyenne
$E = I\, t_p$ (t_p est le temps de pose)
$E = I_0D^2/(16L^2)\, t_p$ E dépend de la sensibilité de la pellicule
$D = f'/n$, donc $E = I_0f'^2/(16L^2n^2)\, t_p$

$t_p = 16L^2E/(I_0f'^2)\, n^2$ Au passage d'une valeur de n à la suivante, n est multipliée par $2^{1/2}$ donc tp est multiplié par 2.

Expression approchée :
Si l'objet photographié est à une distance "normale", $d_0 \gg f'$ donc L est très proche de f' et

$t_{pn} = 16E/(I_0)\, n^2$

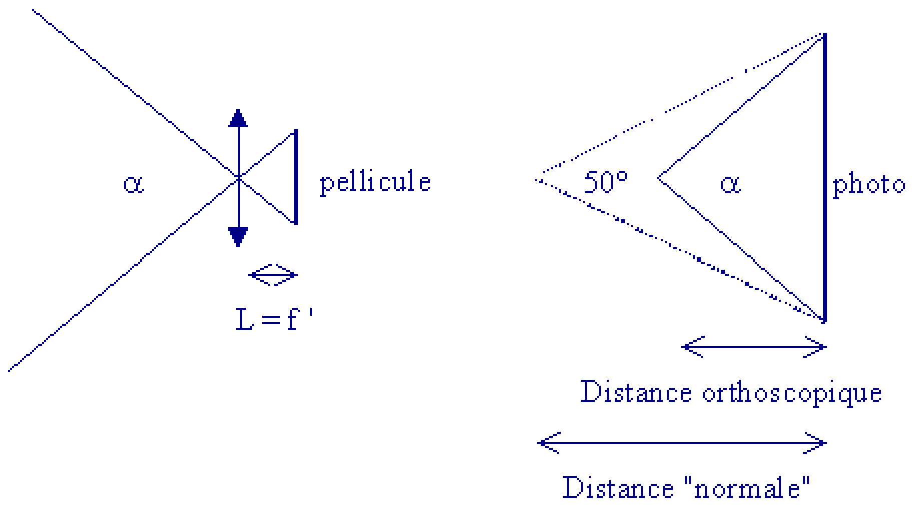
Remarque :
En macrophotographie, on peut avoir par exemple L = 2f ', on a alors $t_p = 64E/(I_0)\ n^2 = 4\ t_{pn}$, ce qui est 4 fois plus long que le temps de pose pour un objet éloigné émettant la même intensité lumineuse I_0.
La macrophotographie demande une ouverture assez fermée pour avoir assez de profondeur de champ, ce qui augmente le temps de pose t_{pn} et en plus ce temps est multiplié par le rapport $(L/f\,')^2$! Alors utilisez un pied et demandez à votre sujet de ne pas bouger..

6. Profondeur de champ et luminosité

Pour obtenir une grande profondeur de champ, il faut fermer le diaphragme (n élevé). Cependant en fermant le diaphragme, on augmente la diffraction, ce qui peut nuire à la netteté et on diminue l'intensité lumineuse qui atteint la pellicule ou les capteurs, ce qui oblige à augmenter le temps de pose ou à utiliser une pellicule plus sensible, ce qui augmente le grain ou le bruit de fond pour les capteurs.
Pour obtenir une faible profondeur de champ, par exemple pour bien dégager le sujet photographié du fond, il faut ouvrir le diaphragme (n faible). On a alors beaucoup de lumière et un temps de pose faible. En revanche, si on a un objectif médiocre, on peut se retrouver en dehors des conditions de Gauss et obtenir une image dégradée. Tout est affaire de compromis.

7. Distance orthoscopique

7.1 Schéma

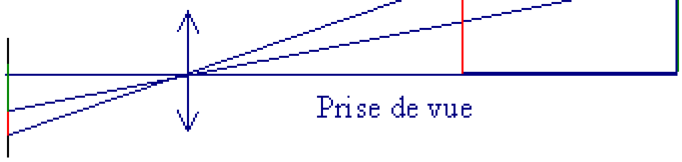


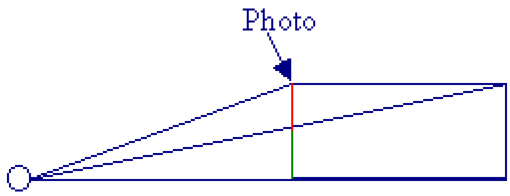
Diagonale de la pellicule D
Diagonale de la photo D_p
Distance orthoscopique L_o
Distance "normale" L_n

7.2 Distance "normale" d'observation d'une photo

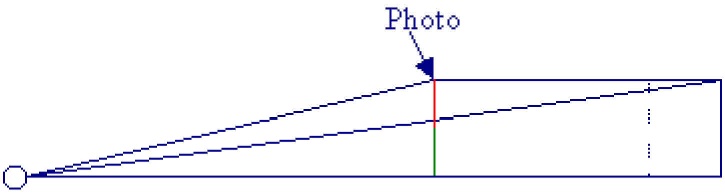
Pour observer une grande photo (diagonale > 30 cm), on se place spontanément à une distance un peu supérieure à sa diagonale. Le champ occupé par la photo fait alors un angle voisin de 50°. C'est la distance "normale" d'observation.

Le problème, c'est qu'à cette distance, l'angle d'observation est en général différent de l'angle α de prise de vue. La conséquence est une déformation de la perspective. Si α est plus grand que 50° (objectif grand angle), la perspective est exagérée et si α est plus petit que 50° (téléobjectif), la perspective est écrasée.

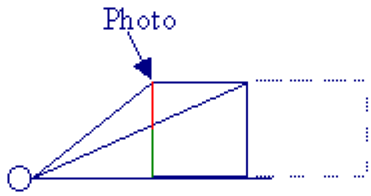




Distance orthoscopique. Perspective respectée



Grand angle. Perspective exagérée



Téléobjectif. Perspective écrasée

7.3 Distance orthoscopique d'observation d'une photo

Pour que la perspective soit respectée à l'observation, il faudrait se placer à une distance de la photo telle que l'angle occupé par la photo soit identique à l'angle α de prise de vue. Cette distance est appelée la distance orthoscopique. La perspective est respectée, mais le confort d'observation n'est pas optimal, trop près avec un grand angle et trop loin avec un téléobjectif.

On a $D/L = D_P/L_o$

L est voisin de f ' donc $D/f' = D_P/L_o$ et $\mathbf{L_o = D_P/D\ f'}$

Exemple : Photo de diamètre D_P = 60 cm tirée à partir d'une pellicule 24 x 36 mm (diagonale D = 43 mm).

Grand angle f ' = 28 mm : $L_o = D_P/D\ f'$ = 39 cm On a le nez sur la photo.

Téléobjectif f ' = 200 mm : $L_o = D_P/D\ f'$ = 2,8 m On est vraiment loin.

En pratique, on préfèrera se placer à 70 cm de la photo, même si la perspective est alors faussée.

7.4 Objectif orthoscopique

Un objectif orthoscopique est un objectif qui donnera la bonne perspective sur la photo observée à la distance "normale".
Ce sera le cas si α = 50°. Il faudra donc que D/(2f ') = tan 25° et donc
f ' = D/(2 tan 25°) = 1,1 D
Pour une pellicule 24 x 36 mm (D = 43 mm), f ' = 47,5 mm (On prend 50 mm)
Pour les formats 24 x 36 mm, l'objectif orthoscopique est l'objectif de 50 mm.
Pour un capteur 6 x 9 mm, c'est un objectif de12 mm