

VIII. L'appareil photo (*Approche documentaire*)

[**Approche documentaire :** *En comparant des images produites par un appareil photographique numérique, discuter l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image*]

Depuis une décennie, les appareils photos numériques ont remplacé progressivement les appareils argentiques. Les caractéristiques optiques de l'appareil restent inchangées.

VIII.1. Description et modélisation de l'appareil photographique

Un appareil photographique comprend :

➤ **Un objectif** pouvant être constitué d'une seule lentille (appareils bons marchés) convergente donne d'un objet une image réelle renversée dans le plan du film photographique. La plupart des objectifs sont constitués par des **associations de lentilles** différentes taillés dans des verres d'une grande homogénéité et d'indices bien déterminés. Cette association permet de corriger les aberrations chromatiques (absence d'irisation des images) et géométriques (absence de déformations). Pour les objectifs les plus élaborés, il peut y avoir jusqu'à 10 ou 15 lentilles. Ce groupe de lentilles sera modélisé par une lentille unique de distance focale f' .

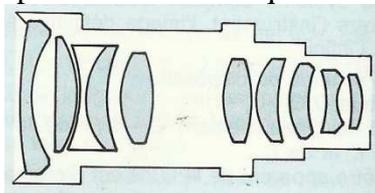
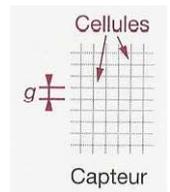


Figure VIII-1 : un objectif est formé de plusieurs lentilles

➤ **Un diaphragme** qui règle l'ouverture du faisceau lumineux et la quantité de lumière entrant dans l'appareil. Ce diaphragme permet à la lentille objective de se trouver dans les conditions de Gauss et d'assurer que l'image d'un objet soit relativement nette. Cette image se forme à proximité du plan focal image.

➤ **Un obturateur** situé derrière l'objectif qui permet de choisir la durée d'exposition de l'image sur le récepteur. Il règle la quantité de lumière qui impressionnera le film. Son ouverture est provoquée par le déclencheur. Le diaphragme (par son diamètre d'ouverture) et l'obturateur (par sa durée d'ouverture) permettent de faire entrer plus ou moins de lumière dans le boîtier.

➤ **Un capteur photosensible** constitué d'une matrice de cellules ou pixels (picture element). Les cellules sont composées de composants accumulant une charge électrique fonction de la quantité de lumière reçue. La quantité de lumière totale admise dans l'appareil est fonction de la luminosité ambiante, de l'ouverture du diaphragme et de la durée d'exposition.



On parle de capteur *CCD* pour "charge coupled device" ou composant à transfert de charge.

Remarque : sur les appareils les moins coûteux, on ne peut pas régler l'ouverture du diaphragme.

On obtient alors des photographies acceptables seulement si, par chance, les bonnes conditions se trouvent réalisées.

Chacun de ces dispositifs peuvent donner lieu à un réglage.

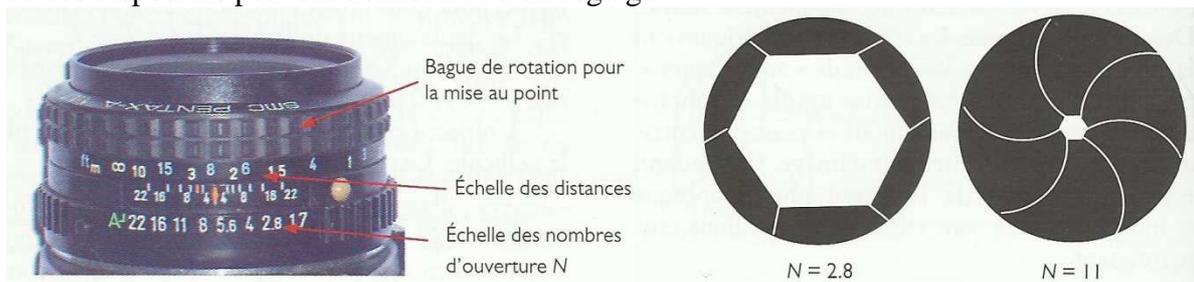


Figure VIII-2 : objectif standard de focale $f' = 50\text{mm}$

L'appareil photographique à focale fixe sera modélisé par l'association d'une lentille convergente unique modélisant l'objectif de distance focale f' ($f'=50\text{mm}$ pour un objectif standard), d'un diaphragme de diamètre D permettant de contrôler le flux de lumière et d'une pellicule.

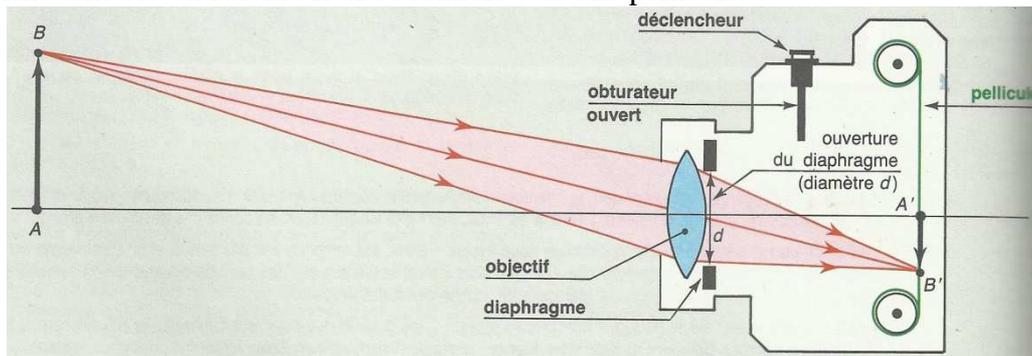


Figure VIII-3 : schéma de principe d'un appareil photographique

VIII.2. La distance focale de l'objectif et sa mise au point

VIII.2.a. La distance focale et le champ angulaire

Pour un format photographique donné, la distance focale correspond à un angle de champ α voisin de celui sous lequel l'œil (mobile dans son orbite) voit son environnement, soit 50° environ.

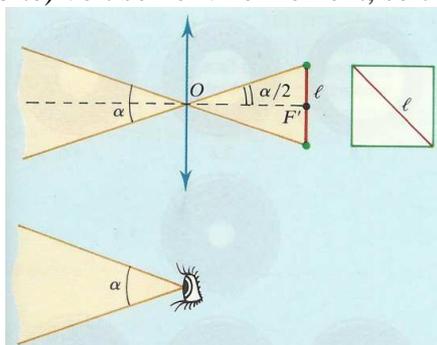


Figure VIII-4 : définition du champ angulaire

Soit l , la diagonale du film. Pour un film 24×36 , $l = \sqrt{24^2 + 36^2} = 43\text{mm}$. La figure précédente montre que

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{l}{2OF'}$$

$$\text{Donc : } \overline{OF'} = \frac{l}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{43}{2 \tan \frac{50}{2}} = 46\text{mm} . \text{ Dans le commerce, on a adopté : } f' = 50\text{mm} .$$

Un objectif est dit « **grand angle** » lorsque l'angle de champ atteint 70° et plus. Sa distance focale est plus courte que la distance focale standard (par exemple 28mm pour le format 24×36). On l'utilise si on souhaite photographier un monument alors qu'on a peu de recul. Les photographies de la figure suivante sont obtenues lorsqu'on photographie le même sujet depuis le même point avec des objectifs de distance focale croissante :



Figure VIII-5 : le champ angulaire diminue lorsque la focale de l'objectif augmente (ici 25, 55 et 105mm)

Le domaine de l'espace qui apparaît se réduit progressivement. On dit que le champ angulaire de l'objectif diminue. On note que le sujet principal grandit sur l'image nette obtenue.

Un **téléobjectif** a une distance focale beaucoup plus grande que la distance focale standard (par exemple 200mm). Le champ angulaire est réduit, mais l'image est plus grande qu'avec un objectif standard. On les utilise quand on n'a pas la possibilité de s'approcher suffisamment du sujet (scènes sportives, animaux sauvages, ...)

On retiendra :

- **Courte focale** : grand champ, mais image petite.
- **Longue focale** : grande image mais champ petit.

Ceci est illustré sur la figure ci-contre :

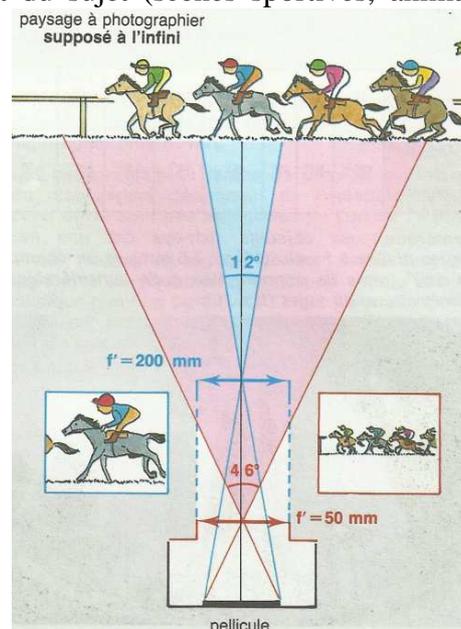


Figure VIII-6 : le champ angulaire dépend de la distance focale de l'objectif

On suppose qu'on photographie à l'infini une course de chevaux avec un objectif standard ($f' = 50\text{mm}$) puis avec un téléobjectif ($f' = 200\text{mm}$). La photographie est prise du même point et la taille de la pellicule reste inchangée.

Le champ angulaire d'un objectif est l'angle du cône dans lequel doivent se situer les objets à l'infini pour apparaître sur la photographie.

Remarque : les objectifs fish-eye ont une très courte distance focale (15 ou 7,5mm) et un champ de 180°, mais ils donnent lieu à de considérables déformations du sujet (voir figure suivante).

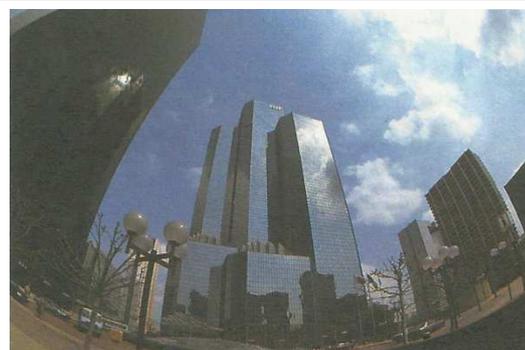


Figure VIII-7 : déformation très marquée avec un objectif fish-eye

Type d'objectif	Fish-eye	Grand angle		Normal	Téléobjectif		Super-téléobjectif	
Distance focale (mm)	15	24	35	50	135	200	400	1200
Angle de champ diagonal	180°	84°	63°	46°	18°	≈ 8°	≈ 6°	≈ 2°

Figure VIII-8 : relations entre distance focale et angle de champ pour différents types d'objectifs

Remarque : un **zoom** est un objectif à focale variable (par exemple pour le zoom 85/200 entre 85 et 200mm) qui permet un réglage très rapide et évite d'avoir à changer d'objectif. On le réalise en déplaçant un groupe de lentilles par rapport aux autres.

L'angle de champ change en fonction de la focale et de la taille du capteur.

Comparaison des différents formats de capteurs

Les appareils photos numériques ont des capteurs inférieurs ou égaux au format de l'argentique (24×36mm :taille de la pellicule).

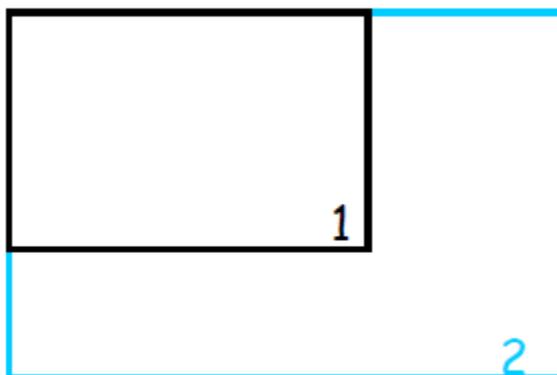


Figure VIII-9 1 : taille des capteurs CCD du Nikon D90 (15,8×23,6mm) ; 2 : taille d'une pellicule au format standard (24×36mm).

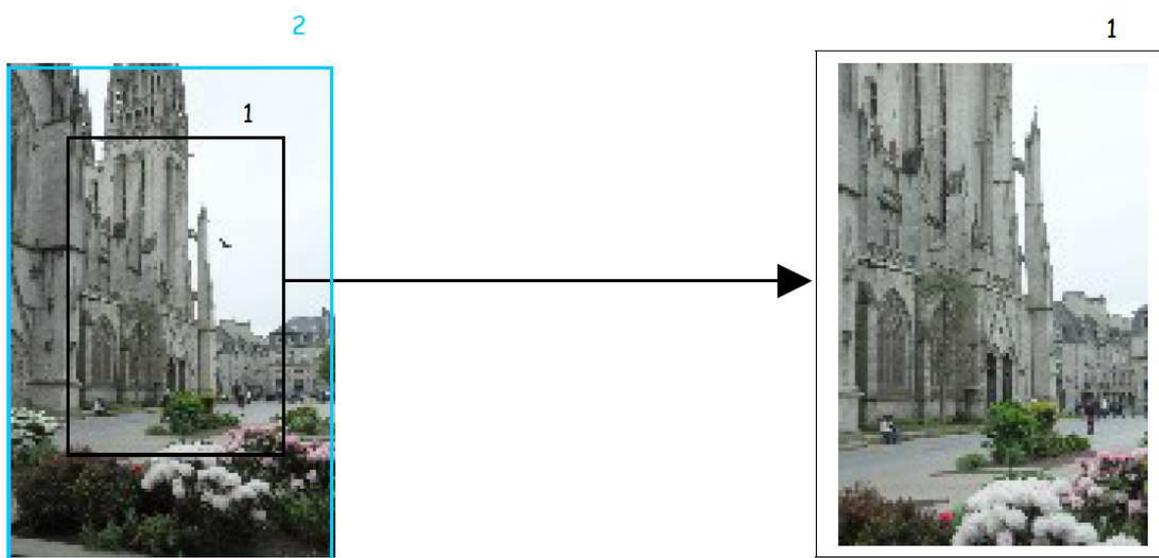


Image enregistrée avec un capteur 24 x 36 et une focale réelle de 33 mm
 Dans ce cas, la focale réelle est la même que la focale effective.

Image enregistrée avec un capteur 15,8 x 23,6 et une focale réelle de 33 mm.
 Dans ce cas, la focale effective est de 1,5 x 33 = 50 mm.

Figure VIII-10 Influence de la taille du capteur sur l'angle de champ et notion de focale effective.

Ainsi un appareil disposant d'un format 15,8 ×23,6 mm et d'une focale de 33 mm a le même angle de champ qu'un appareil de focale 50 mm pour un format standard de 24 × 36 mm.

On dit que la focale réelle de l'objectif est de 33 mm. (Lecture sur l'objectif) mais que sa focale effective est de 50mm.

On définit alors un facteur de correction de focale C_f :

$$C_f = \frac{\text{Focale effective}}{\text{Focale réelle}}$$

Dans le cas de l'exemple ci-dessus, le facteur de correction de focale est de ×1,5. (50/33=1,5)

VIII.2.b. La mise au point et le tirage

La mise au point consiste à régler l'objectif de façon que l'image d'un objet se forme dans le plan de la pellicule. A cette fin, on rapproche ou on éloigne l'objectif par rapport au film à l'aide d'un système de bagues coulissantes.

On appelle tirage Tr de l'objectif, la distance entre la monture de l'objectif et le plan de la pellicule (voir figure suivante).

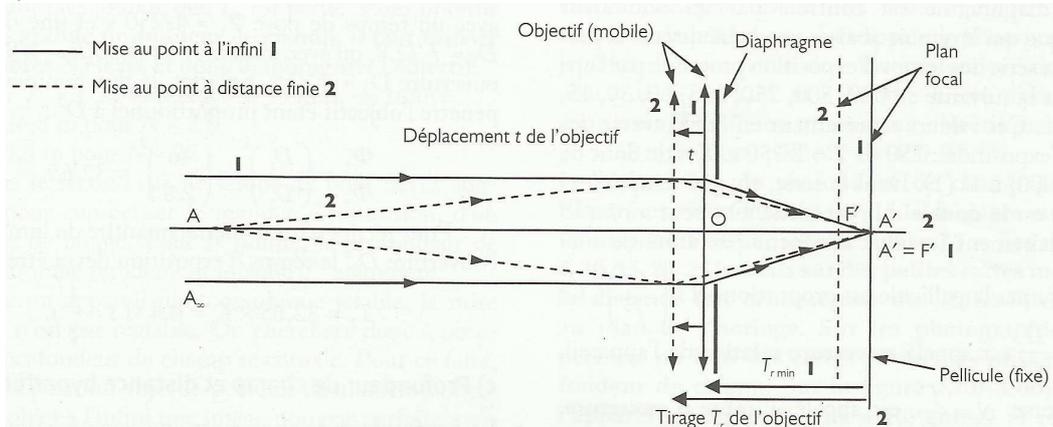


Figure VIII-11 : Mise à point à distance variable avec un appareil photo à focale fixe

- Lorsqu'on photographie un objet situé à l'infini, son image se forme dans le plan focal image de la lentille : $A'=F'$. Pour que l'image soit nette, la pellicule doit donc se trouver dans le plan focal de l'objectif : position 1 correspondant à Tr_{min} . On parle ici de **mise au point à l'infini**.
- Lorsque l'objet A est situé à distance finie, l'image A' se forme à une distance supérieure de l'objectif, un peu à droite de F' (position 2). La pellicule restant fixe, on doit avancer l'objectif pour que l'image reste nette dans son plan. Le déplacement de l'objectif $t = Tr - Tr_{min}$ est limité à **environ 5,5mm** pour un objectif standard de focale $f'=50mm$.

Application 34 : Tirage d'un appareil photo.

- 1) Montrer qu'il faut avancer l'objectif d'une distance $t \approx f'^2/L$ pour effectuer la mise au point sur un objet situé à une distance L depuis la mise au point à l'infini. Pour un objectif standard ($f'=50mm$) faire l'application numérique pour $L_i=10m$.
- 2) Jusqu'à quelle distance la mise au point est-elle possible pour un objectif standard ?

L'objectif conjugue le plan de l'objet A et le plan de la pellicule. La relation de conjugaison donne :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'} = \frac{f' + \overline{OA}}{f' \overline{OA}}$$

$$\text{D'où } \overline{OA'} = \frac{f' \overline{OA}}{f' + \overline{OA}} \quad \text{et si } \overline{OA} = -L \text{ on a alors : } \overline{OA'} = \frac{f' L}{L - f'}$$

Pour mettre au point sur un objet situé à une distance L de l'objectif, il faudra avancer ce dernier de :

$$t = \overline{OA'} - f' = \frac{f' L}{L - f'} - f' = \frac{f'^2}{L - f'} \approx \frac{f'^2}{L} \quad \text{car } f' \ll L$$

Pour passer d'une mise au point à l'infini à une mise au point à une distance $L_i=10m$, il faut avancer l'objectif de

$$t = \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{10} = 0,25mm$$

Avec un objectif de focale $f'=50mm$, la mise au point est possible jusqu'à la distance limite $L_{min} = \frac{f'^2}{t}$.

$$\text{Application numérique : } L_{min} = \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{5,5 \cdot 10^{-3}} = 0,45m. \quad (\text{valeur de } 5,5 \text{ prise dans le texte ci-dessus})$$

Déplacement t de l'objectif par rapport à la mise au point à l'infini	$t_1 = 0,25$ mm	$2 t_1$	$3 t_1$	$5 t_1$	$7 t_1$	$10 t_1$...	$22 t_1$
Distance de mise au point L_i	10,0 m	5,00 m	3,33 m	2,00 m	1,43 m	1,00 m	...	0,45 m
Échelle des distances sur la bague	10	5	3	2	1,5	1	...	0,45

Figure VIII-12 : déplacement t de l'objectif et distance de mise au point

VIII.2.c. Tolérance de mise au point

L'image a une **netteté absolue** lorsqu'elle se forme exactement dans le plan du film. Mais l'œil et le film étant des récepteurs imparfaits, on peut se contenter d'une netteté apparente.

Soient A et A', 2 points conjugués (voir figure suivante). Si le plan du film ne passe pas par A', le faisceau convergent issu de A et pénétrant dans l'objectif donne une tache circulaire de diamètre KH. Si KH est inférieur à la dimension du grain du film ou si KH ne peut être séparé par l'œil, la tache apparaîtra comme 1 point. Il y a alors **netteté apparente**.

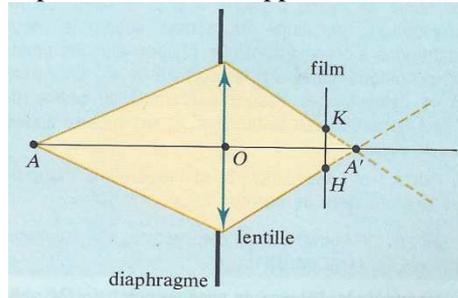


Figure VIII-13 : diamètre de la tache apparente $KH=d$

- **Tolérance de mise au point due aux imperfections de la pellicule photographique :**

Si on néglige le pouvoir séparateur de l'œil, il y a netteté apparente dès que les dimensions de la tache image $KH=d$ correspondent à la taille des cellules des capteurs (ou du grain d'une pellicule photographique), de l'ordre de $g=10\mu m$.

Notion de distance hyperfocale

Considérons un point A situé à une distance L devant l'objectif. Lorsque la mise au point est faite à l'infini, l'image A' de A se forme derrière le capteur. L'ensemble des rayons issus du point A forment alors une tache dans le plan du capteur. Nous noterons d son diamètre.

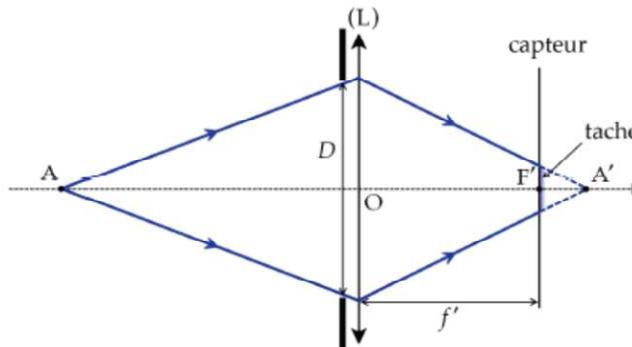


Figure VIII-14 Diamètre de la tache apparente dans le cas d'une mise au point à l'infini

Encadré VIII-1 Expression de la distance minimale de l'objet A pour avoir une netteté apparente

D'après le théorème de Thalès : $\frac{D}{OA'} = \frac{d}{F'A'} \Rightarrow d = \frac{F'A'.D}{OA'}$

D'après la relation de Newton, A et A' étant conjugués : $\overline{F'A'}.FA = -f'^2 \Rightarrow \overline{F'A'} = -\frac{f'^2}{f'-L}$

D'après la relation de Descartes $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{1}{OA'} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{L} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{Lf'}{L-f'}$

$\Rightarrow d = \frac{\overline{F'A'}.D}{OA'} = \frac{D f'}{L}$

La photographie de l'objet sera nette si $d < g \Rightarrow L > \frac{D f'}{g}$

On appelle $\Rightarrow L_o = \frac{D f'}{g}$ **la distance hyperfocale**

Ainsi, pour une mise au point à l'infini, tous les objets situés au-delà de la distance hyperfocale L_o seront photographiés de façon nette. En introduisant le nombre d'ouverture $N=f'/D$, on trouve l'expression: $L_o = \frac{f'^2}{g.N}$

- **Tolérance de mise au point due aux imperfections de l'œil :**

L'œil ne peut séparer 2 points dont l'écart angulaire est inférieur à une certaine limite ϵ , de l'ordre de 1 minutes d'arc ou 3.10^{-4} rad.

Pour que l'œil puisse séparer 2 points BC, il faut que la distance BC soit supérieure au produit ϵd (cf figure suivante) où d désigne la distance d'observation.

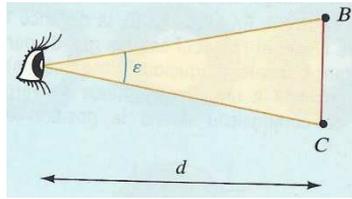


Figure VIII-15 : $BC = \epsilon.d$

Ainsi l'imperfection de l'œil est le seul facteur de netteté si la taille des cellules du capteur est inférieure à ϵd .

On adapte habituellement les valeurs de tolérances suivantes :

- Pour un négatif 24x36 : $KH < 20\mu\text{m}$
- Pour un négatif 6x6 ou 9x9 : $KH < 50\mu\text{m}$

Le contrôle de la mise au point peut se faire par viseur ou systèmes reflex :

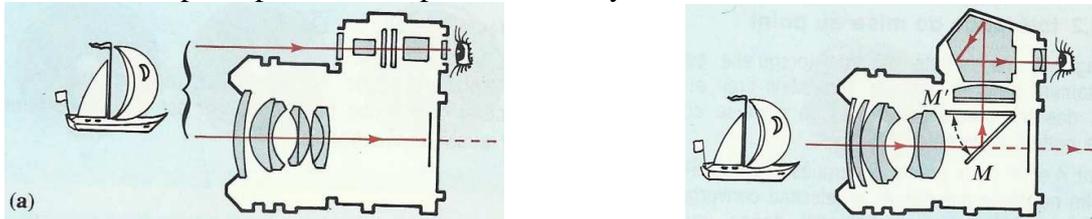


Figure VIII-16 : contrôle de la prise de vue a) par viseur (2 chemins optiques différents) ; b) par reflex (la lumière qui arrive à travers l'objectif est réfléchié par un miroir vers le viseur)

VIII.3. L'obturateur et durée d'exposition (ou temps de pose)

C'est un dispositif qui laisse pénétrer la lumière dans l'appareil pendant une durée déterminée appelée temps de pause (on parle aussi de vitesse d'obturation) notée T.

Cette durée varie couramment de plusieurs secondes à 1/2000 secondes.

La série des valeurs proposées par l'appareil est 1000, 500, 250, 125, 60, 30, 15, 8, 4, 2, 1. Ces valeurs représentent l'inverse des temps d'exposition : $250 \leftrightarrow T=1/250\text{s}$.

La vitesse d'obturation joue un rôle important lorsque le sujet bouge. Une grande vitesse d'obturation (temps de pose égal à 1/5s ou 1/1000s) fige le sujet. On ne peut distinguer s'il est en mouvement ou non.

Une faible vitesse d'obturation sera utilisée si on veut faire apparaître ou accentuer le « bougé », le flou suggérant le mouvement.



Figure VIII-17 : a) temps de pose=1/15s ; b) temps de pose = 1/500s

Remarques :

- une prise de vue « à la main » (sans pied) exige un temps de pose inférieur à 1/60s,
- une photo sportive se prend par exemple au 1/500s,
- un paysage ou un portrait se prend au 1/30s.

Lorsque les mouvements sont rapides, on choisit une faible durée d'exposition et l'ouverture est choisie en conséquence.

VIII.4. Le diaphragme et la profondeur de champ

VIII.4.a. Description et définition

C'est un écran métallique percé d'un trou. Un dispositif à iris est constitué d'un grand nombre de lamelles métalliques qui délimitent un trou central, sensiblement circulaire, qui contrôle la quantité de lumière.

On définit le nombre d'ouverture : $N = \frac{f'}{D}$: le nombre d'ouverture d'un diaphragme est inversement proportionnel à son diamètre.

Si le trou est grand (respectivement petit), on dira que le diaphragme est ouvert (respectivement fermé) et son nombre d'ouverture N est petit.

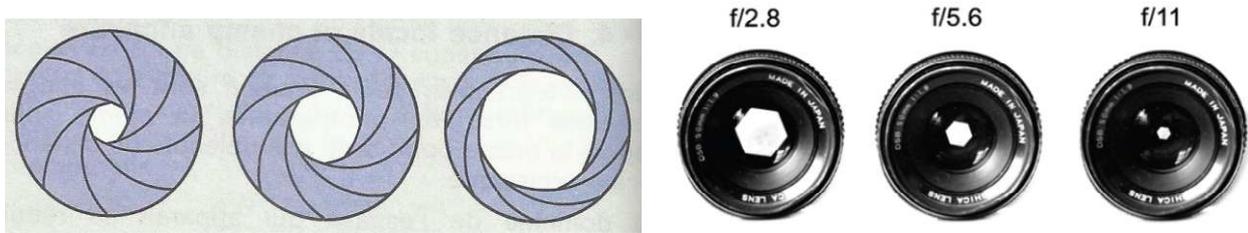


Figure VIII-18 : Diaphragme à iris, les valeurs de $D=f'/N$ sont indiquées

Les diaphragmes sont construits de telle façon que N ne peut varier de façon continue. N forme une suite géométrique de raison $\sqrt{2}$.

Les valeurs de N les plus courantes sont les suivantes :

N	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32
----------	-----	---	-----	---	-----	---	----	----	----	----

La surface offerte à la lumière lorsque l'obturateur est ouvert vaut donc :

$$S = \pi R^2 = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{\pi f'^2}{4} \cdot \frac{1}{N^2}$$

En conséquence, pour une focale donnée et pour un temps de pose déterminé, le flux lumineux qui pénètre dans le boîtier est proportionnel à $\frac{1}{N^2}$: $\Phi = k \frac{1}{N^2}$.

Pour un temps de pose déterminé, la quantité de lumière qui pénètre dans l'appareil est :

- Divisée par 2 quand on passe d'un nombre d'ouverture au suivant immédiatement supérieur,
- Multiplié par 2 quand on passe d'un nombre d'ouverture au suivant immédiatement inférieur.

Avec un grand nombre d'ouverture ($N = 16$), les rayons ne passent que par le centre de la lentille. La lentille est utilisée dans les conditions de Gauss, les aberrations géométriques sont minimisées.

Au contraire, avec un petit nombre d'ouverture ($N = 2,8$), les rayons passent par les bords de la lentille. Les rayons lumineux ne convergent pas tous en un point l'image est floue. Une conséquence est que la profondeur de champ est alors faible (voir paragraphe VIII.4.c).

VIII.4.b. Réglage temps de pose / ouverture de diaphragme

Pour être convenablement impressionnée, une pellicule doit recevoir une quantité de lumière bien déterminée :

- Si elle en reçoit trop, le cliché est surexposé
- Si elle n'en reçoit pas assez, il sera sous-exposé.

Cette quantité de lumière dépend :

- Du temps de pose,
- De l'ouverture
- De l'éclairement du sujet.

Remarques : ces réglages sont faits automatiquement par les appareils dits « autofocus ».

Pour une distance focale f' donnée, il existe une correspondance simple entre l'échelle des nombre d'ouverture $N = \frac{f'}{D}$ (où D est l'ouverture du diaphragme) et celle des temps d'exposition T . En effet, le flux

lumineux étant proportionnel au carré du diamètre :

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

Et pour récupérer une même quantité de lumière avec l'ouverture D_2 , le temps d'exposition devra être égal à

$$T_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 T_1.$$

Pour qu'une photo soit bien exposée, il faut donc choisir une certaine combinaison vitesse/ouverture qui soit appropriée à la luminosité de la scène que l'on veut photographier

VIII.4.c. Profondeur de champ

L'objectif étant assimilé à une lentille mince convergente accolée à un diaphragme, la pellicule est placée dans le plan de front A_0' point situé au voisinage de F' . Deux points objets A_1 et A_2 situés de part et d'autre de A_0 , point conjugué de A_0' ont pour image les points A_1' et A_2' situés de part et d'autre de A_0' et également très proches de F' .

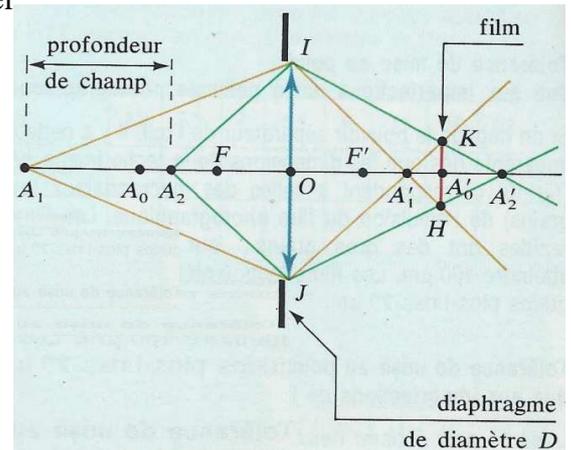


Figure VIII-19 : profondeur de champ

Si la valeur KH correspond à la **limite de netteté apparente**, alors tous les points objets situés dans le segment $[A_1A_2]$ donneront sur la pellicule des images conformes au critère de netteté apparente.

La distance A_1A_2 est appelée profondeur de champ.

Pour une mise au point à une distance donnée, la profondeur de champ est définie comme la plage de distance sujet-objectif pour laquelle une image nette est obtenue sur la pellicule.

Les 2 plans extrêmes ne sont pas nets, mais des plans de « flou toléré » ou netteté suffisante.

On peut montrer que la profondeur de champ vérifie la relation
$$\overline{A_1A_2} \approx \frac{2gL^2}{f'D} = \frac{2gL^2N}{f'^2}$$

Ainsi, pour une focale donnée, une grande ouverture (ou faible N) donne lieu à une petite profondeur de champ alors qu'une petite ouverture (ou faible N) donne lieu à une grande profondeur de champ

L'expérience permet de vérifier la dépendance des différentes paramètres dans l'expression ci-dessus.
La profondeur de champ dépend :

➤ De l'ouverture du diaphragme : elle augmente avec N (diminue avec D cf conditions de Gauss).

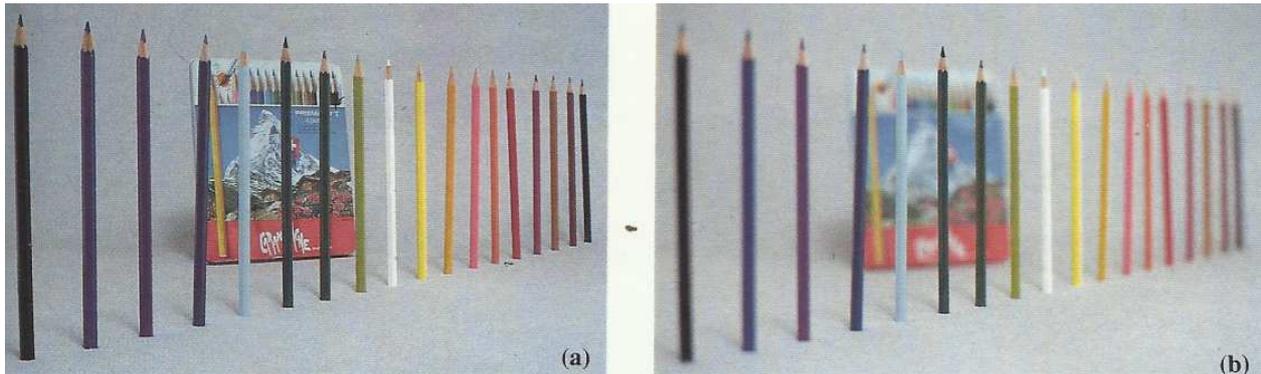


Figure VIII-20 : influence de l'ouverture du diaphragme : a) $D=f'/22$ (ou $N=22$) ; b) $D=f'/1,9$ (ou $N=1,9$)

➤ De la distance de mise au point : elle augmente avec la distance de l'objet

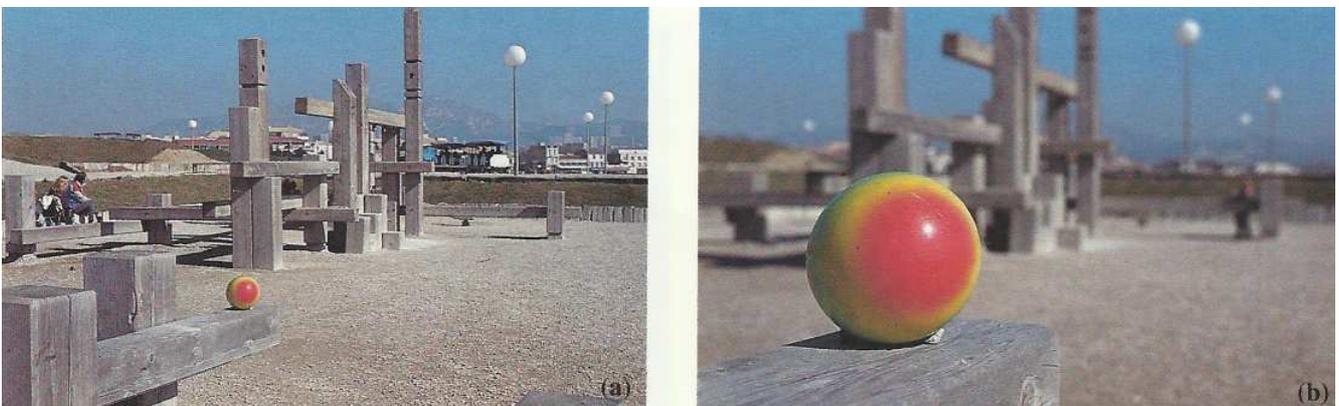


Figure VIII-21 : influence de la distance du sujet : a) $d = 5m$; b) $d = 1m$

➤ De la distance focale f' : elle diminue lorsque f croit.

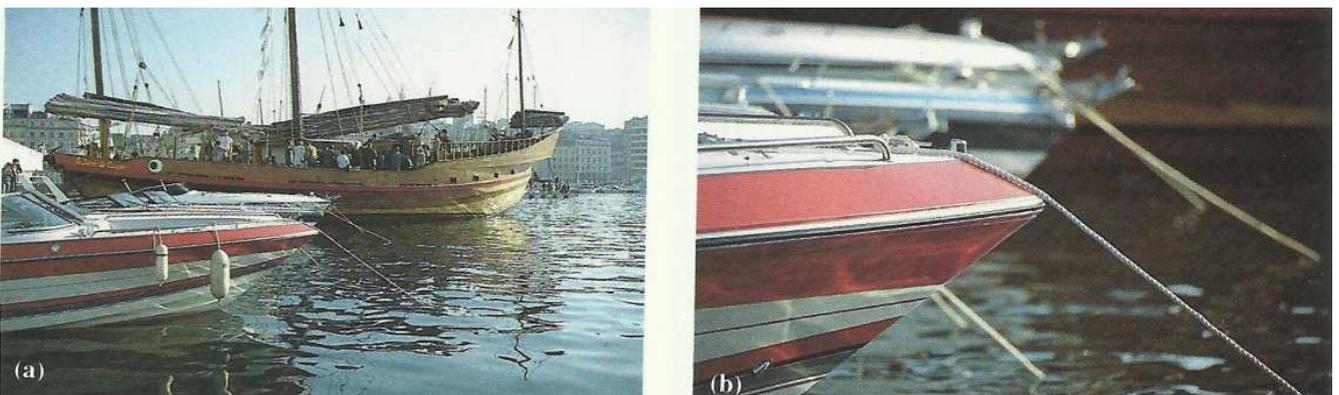


Figure VIII-22 : influence de la focale : a) $f = 35mm$; b) $f = 160mm$