

LP2020 – PHOTOGRAPHIE

10 juin 2021

Deleuze Julie & Jocteur Tristan

Niveau : L3

Bibliographie

- ↗ https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_instruments-photo/instru-ap-intro.html
- ↗ *Les instruments d'optique*, Detwiller
- ↗ *Optique*, Houard
- ↗ *Optique : fondements et applications*, Pérez
- ↗ <https://femto-physique.fr/optique/instruments.php>
- ↗ Sextant p31
- ↗ Duffait p113

Prérequis

- Changement de référentiel et formules de composition des vitesses/accélérations

Table des matières

1	Description d'un appareil photographique	2
1.1	Éléments constitutifs	2
1.2	De l'appareil argentique à l'appareil numérique	3
2	Caractéristiques de l'objectif	3
2.1	Grandissement transversal	3
2.2	Champ angulaire	5
2.3	Ouverture	6
3	Résolution et mise au point	6
3.1	Résolution	6
3.2	Profondeur de champ	7
3.3	Temps de pose	9

Remarques sur les leçons précédentes

Y en a pas huehue

Attention leçon turbo chiante susceptible de virer en catalogue de caractéristiques. Pour éviter ça trouver un fil conducteur : bijour je suis un photographe animalier vous me conseillez quoi comme appareil ? Viens par là mon petit gars on va tout t'expliquer. Et surtout faut faire des expériences pour illustrer les caractéristiques qu'on présente et pas faire que des calculs.

Aussi montrer des photos pour donner des exemples d'utilisation de grand angle ou teleobj ou de la profondeur de champ

Introduction

🔗 Houard

Historique avec la camera obscura ou comparaison à l'oeil vu que c'est la même chose techniquement. Présentation du fil conducteur.

1 Description d'un appareil photographique

1.1 Éléments constitutifs

🔗 Pérez p 191, femtophysique

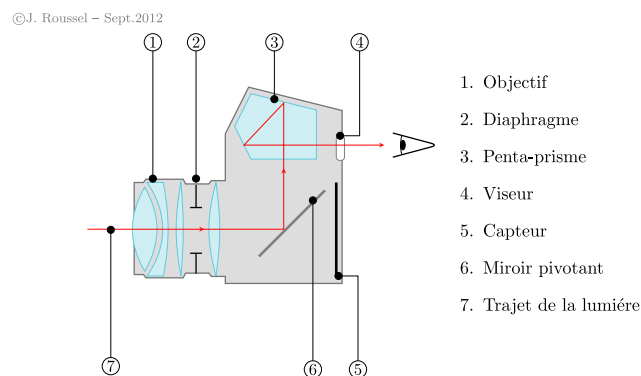


FIGURE 1 – Source : femtophysique

Les appareils photographiques modernes sont dotés d'un dispositif de visée de type réflex. L'appareil photo Réflex est constitué de trois éléments :

- **L'objectif** : C'est par là que rentre la lumière. La quantité de lumière est contrôlée par un diaphragme de diamètre variable D . L'objectif est un système centré convergent contenant plusieurs lentilles qui conjugue le plan de l'objet avec le capteur. Dans un souci de simplification, on réduira ce système à une lentille mince convergente de focale f .
- **Le miroir et le pentaprisme** : La lumière venant de l'objectif est réfléchi (reflex) par un miroir puis par un penta-prisme permettant de redresser l'image que voit le photographe à travers le viseur.
- **Le capteur** : Lors du déclenchement, le miroir pivote pour laisser passer la lumière qui arrive alors sur un film photosensible s'il s'agit d'un appareil argentique, ou d'un capteur CCD s'il s'agit d'un Réflex numérique.

Finalement dans une version simplifiée la structure de l'appareil photo et celle de l'oeil sont identiques :

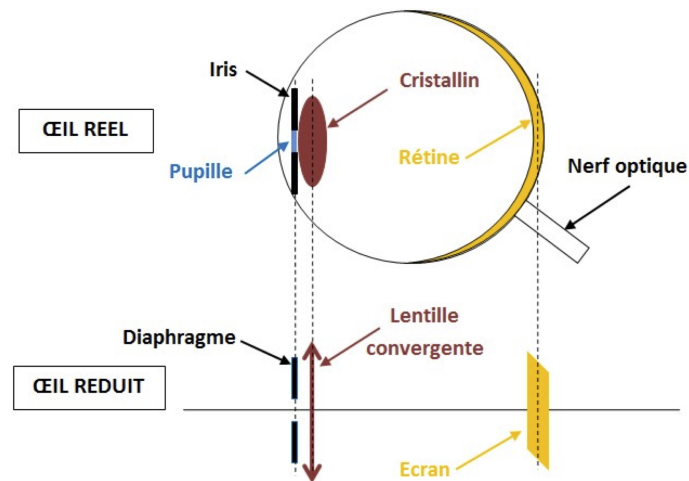


FIGURE 2 – Source : physagreg

La différence est que dans le cas de l'oeil, le cristallin est contracté ou dilaté par les muscles ciliaires pour former une image nette sur la rétine alors que pour un objectif de focale fixée, c'est la distance objectif-capteur qui varie par rotation d'une bague. L'objectif peut se déplacer d'environ 5,5 mm pour un objectif standard de focale $f' = 50$ mm.

↓ *Le capteur peut être de différentes natures.*

1.2 De l'appareil argentique à l'appareil numérique

Les appareils photographiques dits argentiques dans lesquels le détecteur est un film photographique ont été remplacés par des appareils équipés de capteurs CCD (Charge-Coupled Device), qui se prêtent plus facilement à un traitement numérique ultérieur de l'image.

La sensibilité d'un film photographique est mesurée par l'efficacité de la lumière sur les micro-cristaux de l'émulsion. Lorsque que les cristaux sont gros ($\sim 20 \mu\text{m}$) le film est impressionné par une faible quantité de lumière. Quand ils sont petits ($\sim 4 \mu\text{m}$) le film nécessite une plus grande quantité de lumière, mais sa résolution est meilleure.

La résolution des appareils photo numériques est définie par la taille élémentaire d'une cellule du capteur CCD. Une telle cellule est appelée pixel et est encore plus grande qu'un grain d'émulsion photographique ($\sim 7 \mu\text{m}$ pour les appareils numériques les plus performants).

↓ *La structure de l'appareil photo est finalement assez simple : ce qui détermine ses performances, c'est l'objectif. Pour pouvoir choisir l'objectif adapté, il faut caractériser l'image formée.*

2 Caractéristiques de l'objectif

2.1 Grandissement transversal

➤ Pérez p193, Houard p152

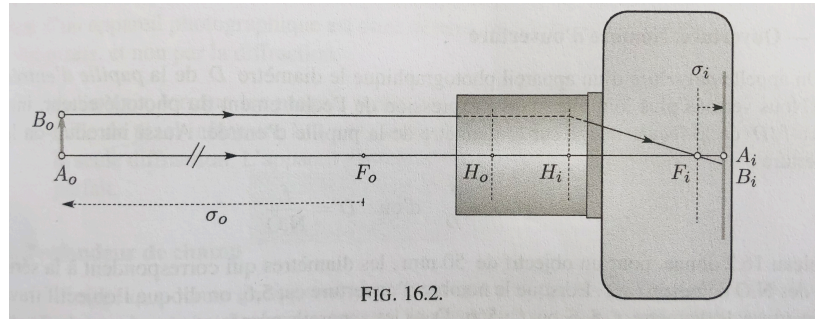


FIG. 16.2.

FIGURE 3 – Source : Pérez. À refaire au tableau ou sur inkscape avec une image à distance finie et en confondant les deux centres optiques

On sait que le grandissement transversal s'écrit (théorème de Thalès) :

$$G = \frac{A_i B_i}{A_o B_o} = \frac{-F' A_i}{f} = \frac{f}{F A_o}$$

La longueur algébrique σ_i qui sépare le foyer image F_i de l'image A_i est appelé tirage de l'appareil. σ_i est généralement faible devant la focale, contrairement à σ_o . Pour une valeur donnée de la distance objet-appareil, le grandissement augmente donc avec la focale : pour observer de petits détails, il faut donc un objectif de grande focale appelé **télé-objectif**. À focale fixée, on peut augmenter le grandissement en augmentant la distance objectif-écran en intercalant des allonges entre l'objectif et le boîtier.

Cependant, l'utilisation d'une lentille simple de grande distance focale présente un inconvénient majeur : pour qu'une tour de hauteur $h = 60\text{m}$ à une distance de 2 km forme une image de dimensions $h' = 1,5\text{cm}$ (taille typique du capteur) la lentille doit avoir une focale de $f' = \frac{1,5 \cdot 10^{-2} \times 2 \cdot 10^3}{60} = 0,5\text{m}$. L'encombrement d'un tel appareil n'est pas acceptable en pratique. Il est donc nécessaire d'utiliser une association de lentilles appelée **téléobjectif** pour obtenir un grandissement identique avec un encombrement réduit.

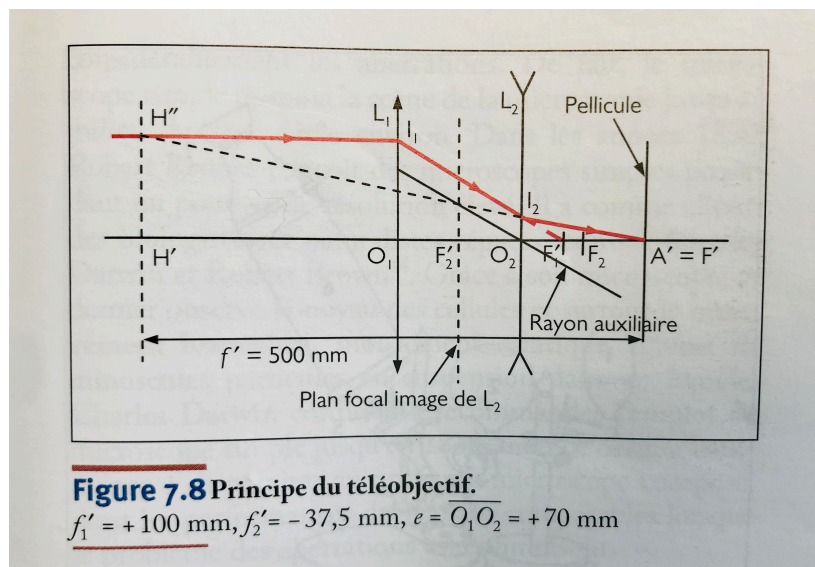


FIGURE 4 – Source : Pérez. À refaire au tableau ou sur inkscape avec une image à distance finie et en confondant les deux centres optiques

Le téléobjectif est constitué d'une lentille convergente L_1 , de focale f_1' et d'une lentille divergente L_2 de focale f_2' . Les deux lentilles sont séparées d'une distance e et constituent un doublet non-accolé.

Considérons un objet A_∞ situé à l'infini sur l'axe. Il donne par L_1 une image intermédiaire située en F_1' , foyer principal image de L_1 . Pour obtenir une image finale réelle de A_∞ sur la pellicule, F_1' doit constituer des lentilles divergentes⁹. La marche d'un rayon incident parallèle à l'axe est représentée figure 7.8. La direction du rayon émergeant de L_2 est déterminée par l'intersection d'un rayon auxiliaire passant par O_2 – parallèle au rayon émergeant

de L_1 - et du plan focal image de L_2 . Le rayon émergent intercepte la pellicule en F' , qui est à la fois l'image finale A' de A_∞ et le foyer principal image du doublet.

Le prolongement virtuel du rayon émergent de L_2 coupe le rayon incident en un point H'' (figure 7.8). Soit H' le projeté de H'' sur l'axe optique. Le plan $H'H''$ normal à l'axe, est appelé plan principal image du doublet. La distance focale image du téléobjectif est définie par $f' = H'F'$. Du point de vue du foyer image F' , tout se passe comme si une lentille équivalente de distance focale $f' = H'F'$ se trouvait dans le plan $H'H''^{10}$. F' est le conjugué image de F'_1 par la lentille L_2 :

$$F'_1 \xrightarrow{L_2} F' \cdot \text{On a donc } \frac{1}{O_2F'} - \frac{1}{O_2F'_1} = \frac{1}{f'_2}, \text{ d'où}$$

$$\frac{1}{O_2F'} = \frac{1}{f'_2} + \frac{1}{f'_1 - e}, \text{ puis } \overline{O_2F'} = \frac{f'_2(f'_1 - e)}{f'_1 + f'_2 - e} \quad (1)$$

Par ailleurs, les triangles rectangles ($H'H''F'$) et (O_2I_2F') sont homologues. D'après le théorème de Thalès, on a :

$$\frac{\overline{H'H''}}{\overline{O_2I_2}} = \frac{\overline{H'F'}}{\overline{O_2F'}} = \frac{f'}{\overline{O_2F'}} \quad (2)$$

De même, dans les triangles rectangles ($O_1I_1F'_1$) et En identifiant les relations (2) et (3), on obtient : En remplaçant $\overline{O_2F'}$ par l'expression (1), on obtient

$$\text{finalement : } f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}$$

En prenant $f'_1 = +100$ mm, $f'_2 = -37,5$ mm et $e = 70$ mm, on trouve $f' = +500$ mm, valeur identique à celle obtenue avec la lentille unique précédente. L'encombrement du téléobjectif est égal à :

$$\begin{aligned} \overline{O_1F'} &= \overline{O_1O_2} + \overline{O_2F'} = e + \frac{f'_2(f'_1 - e)}{f'_1 + f'_2 - e} \\ &= \frac{f'_1 f'_2 + e f'_1 - e^2}{f'_1 + f'_2 - e} \\ &= 220 \text{ mm} \end{aligned}$$

En faisant glisser le point principal image H' à gauche de la première lentille, on obtient un encombrement $\overline{O_1F'}$ inférieur à la distance focale $f' = H'F'$. Avec les valeurs choisies ici, l'encombrement est même inférieur à la moitié de celui obtenu avec une lentille simple.

En pratique, on réalise des téléobjectifs à focale variable (ex. : zoom 80 – 200 mm), par translation continue d'un ensemble de lentilles.

L'inconvénient du téléobjectif est qu'il possède une faible ouverture angulaire, ce qui nécessite un temps de pose plus important, d'où un risque de bougé. À l'opposé, les objectifs de macrophotographie utilisent des distances focales courtes, de 40 mm à 6 mm, et possèdent une ouverture angulaire pouvant atteindre 220°.

Les objectifs d'appareil photographique sont en réalité constitués d'un assemblage complexe de lentilles, qui permet de corriger la plupart des aberrations chromatiques et géométriques.

↓ Parfois ce ne sont pas des détails que l'on souhaite observer mais une image large. On s'intéresse alors au champ angulaire.

2.2 Champ angulaire

➤ Pérez p194 Le champ angulaire ou champ de netteté est la portion de conique de l'espace objet dont l'objectif photo donne une image nette. On l'exprime par l'angle $2\theta_c$ du cône qui a pour sommet le centre de la lentille de l'objectif et qui s'appuie sur les cercles dont les points intérieurs admettent une image acceptable. Ce champ est limité par la dimension maximale l du détecteur, c'est à dire la diagonale du format angulaire. Comme $OA_i \approx f$:

$$\tan \theta_c \approx \frac{l}{2f}$$

Le champ varie donc comme l'inverse de la distance focale. Un téléobjectif ne sera donc pas adapté pour prendre des photos qui nécessite un grand angle, comme des photos d'objets proches et étendus.

ODG dans le Pérez p 193 champ pour oeil dans son orbite, pour un grand angle et pour un téléobjectif.

✚ Detwiller p 190

Cependant, comme pour les lentilles simples de grandes focales, les lentilles simples de courte focale posent un problème d'encombrement mais cette fois-ci inverse : dans un appareil à visée réflex, le miroir placé à 45° devant la pellicule doit avoir la place de se relever, juste avant l'ouverture de l'obturateur, sans heurter la lentille de l'objectif. On veut donc fabriquer des objectifs qui ont une focale inférieure à la distance entre leur dernière lentille et le plan focal image : c'est le contraire des téléobjectifs, on les appelle **objectifs rétrofocus** (ou téléobjectifs inverses). On les obtient en réalisant la combinaison optique inverse des téléobjectifs : une lentille divergente suivie d'une lentille convergente. Calcul ah mince si on a une grande focale comme avec le téléobjectif le champ angulaire est pourri. Si on veut avoir un grand angle on utilise un objectif... grand angle

Réalisation expérimentale dans de Detwiller p 192

2.3 Ouverture

✚ Pérez p 194, Houard p 150.

On appelle ouverture d'un appareil photographique le diamètre D de la pupille d'entrée de l'objectif. Nous verrons plus loin que, dans l'expression de l'éclairement du photodétecteur, intervient le rapport f/D de la focale image sur le diamètre de la pupille d'entrée. Aussi introduit-on le nombre d'ouverture :

$$N.O = \frac{f}{D} \quad \text{d'où} \quad D = \frac{f}{N.O}$$

Plus N.O. est grand, plus l'éclairement reçu par le capteur est faible. Le tableau donne, pour un objectif de 50 mm, les diamètres qui correspondent à la trique des N.O de raison $\sqrt{2}$. Lorsque le nombre d'ouverture est 5,6, on dit que l'objectif travaille avec une ouverture de diamètre $f/5,6$ ou $f : 5,6$.

N.O	1,4	2	2,4	4	5,6	8	11	16
D (mm)	36	25	18	12,5	9	6,25	4,5	3,12

TAB. 16.2.

En choisissant le nombre d'ouverture en jouant sur le diaphragme, il faut prendre en compte les critères suivants :

- Dans les appareils numériques, qui sont de focale plus petite et donc d'ouverture maximale plus faible, les nombres d'ouverture ne dépassent pas 8 en général, car le flux lumineux défini par l'ouverture serait insuffisant.
- On évite généralement de travailler à très faible N.O. avec un objectif de courte focale en raison des aberrations géométriques,
- et à faible N.O. avec un objectif de longue focale car les grands diaphragmes sont encombrants.

↓ Nous venons de voir comment le choix de l'objectif influençait les dimensions de l'image formée et sa luminosité. Qu'en est-il de la netteté de l'image ?

3 Résolution et mise au point

3.1 Résolution

✚ Perez p 195

Comme pour l'œil, c'est la structure granulaire du détecteur qui limite la capacité de l'appareil photographique à séparer les détails d'un objet. Les films sensibles rapides à gros grains sont donc ceux pour lesquels la limite de résolution est la moins bonne. La tache image correspondant à un objet ponctuel a alors un diamètre qui peut atteindre $30\mu\text{m}$. Rappelons que, pour les détecteurs CCD, la taille minimale d'un pixel reste encore en moyenne supérieure à celle des grains argentiques.

Calculons l'ordre de grandeur du diamètre de la tache de diffraction due au diaphragme d'ouverture, précisément à la pupille d'entrée, de diamètre D . On sait que, du fait de la diffraction, la taille minimale d'un objet détectable est donnée par (cf. chapitre 7) : $\Delta x_0 \geq \frac{\lambda}{2n_o \sin u_o}$ soit $\Delta x_0 \geq \frac{D}{2|\sigma_o|}$ puisque $\sin u_o \approx \frac{D}{2|\sigma_o|}$ et $n_o = 1$. Il en résulte que :

$$\Delta x_i \geq |G_t| \frac{\lambda}{D} |\sigma_o| \quad \text{soit} \quad \Delta x_i \geq \frac{\lambda}{D} f = \lambda N.O$$

Cette limite, $\lambda f/D$, de la résolution spatiale définie par la diffraction apparaîtra naturellement dans l'étude de la diffraction (chapitres 21 et 30).

En prenant $\lambda \sim 0,5\mu\text{m}$ et $N.O = 4$, car on utilise des nombres d'ouverture assez faibles afin d'avoir un flux lumineux suffisant, on trouve la limite suivante de résolution spatiale définie par la diffraction :

$$\Delta x_i \geq 2\mu\text{m}$$

valeur qui est inférieure à la taille actuelle des grains argentiques et des pixels les plus petits. La résolution spatiale d'un appareil photographique est donc déterminée par la taille des grains de l'émulsion ou par celle des pixels, et non par la diffraction.

Remarque : À l'avenir, lorsque les progrès technologiques sur les CCD permettront d'atteindre une taille de pixel inférieure à $2\mu\text{m}$, la résolution des caméras numériques sera limitée par la seule diffraction. L'appareil photographique sera alors considéré comme un instrument parfait.

La diffraction n'est donc pas la limite de résolution de l'appareil photo, comme elle peut être celle du microscope ou des lunettes astronomiques par exemple. La résolution est donnée par le capteur. Sur quelle distance obtient-on une résolution satisfaisante ?

3.2 Profondeur de champ

➤ Houard p 150, Pérez p196

La profondeur de champ est une caractéristique essentielle d'une photographie. Pour une mise au point à une distance donnée, elle est définie comme la plage de distance sujet-objectif pour laquelle une image nette est obtenue sur la pellicule. Les deux plans extrêmes qui la définissent ne sont pas des plans de mise au point parfaite, mais des plans de "flou toléré" ou "netteté suffisante". Un point objet A appartenant à ces plans donnera pas une image ponctuelle A' sur la pellicule mais une tache de diamètre a . Si a est inférieur au grain g de la pellicule, ou si le diamètre apparent de la tache est inférieur à la limite de résolution de l'œil, alors l'image sera perçue nette par l'observateur.

Définition La profondeur de champ est la distance $A'_0 A''_0$ qui sépare les deux points extrêmes A'_0 et A''_0 de l'axe optique, dont les images sont encore vues nettement sur le détecteur. On admet généralement que la vision est nette lorsque le diamètre a_i de la tache image ne dépasse pas $100\mu\text{m}$. La profondeur de champ est telle que :

$$\overline{A'_i A''_i} \tan u_i = -a_i$$

u_i étant l'angle d'émergence des rayons et $\overline{A'_i A''_i}$ la longueur algébrique qui sépare les images de A'_0 et A''_0 ; sur la figure 16.4, $u_i < 0$ et $\overline{A'_i A''_i} > 0$. L'angle u_i est relié à l'angle d'ouverture u_o par la relation des sinus d'Abbe (cf. chapitre 3) :

$$n_o \overline{A_o B_o} \sin u_o = n_i \overline{A_i B_i} \sin u_i \quad \text{où} \quad \tan u_o = \frac{D}{2d_o}$$

D étant le diamètre de la pupille d'entrée $\mathcal{P}_e$. Les formules de Newton, appliquées aux couples de points extrêmes $A'_0 A'_i$, $A''_0 A''_i$ et au couple de points intermédiaires $A_o A_i$, permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} \overline{A'_i A_i} &= \overline{F_i A_i} - \overline{F_i A'_i} = -f^2 \left(\frac{1}{\sigma_o} - \frac{1}{\sigma'_o} \right) = -\frac{a_i}{2 \tan u_i} \\ \overline{A_i A''_i} &= \overline{F_i A''_i} - \overline{F_i A_i} = -f^2 \left(\frac{1}{\sigma''_o} - \frac{1}{\sigma_o} \right) = -\frac{a_i}{2 \tan u_i} \end{aligned}$$

Distance optimale de mise au point La distance optimale de mise au point est la distance intermédiaire $d \approx F_0 A_0 = |\sigma_0|$, comprise entre les distances $d' \approx |\sigma'_o|$ et $d'' \approx |\sigma''_o|$ pour lesquelles les images sont vues nettement. D'après ce qui précède, on a :

$$\frac{1}{\sigma_0} - \frac{1}{\sigma'_o} = \frac{1}{\sigma''_o} - \frac{1}{\sigma_o}$$

où la relation $\frac{1}{d'} + \frac{1}{d''} \approx \frac{2}{d}$

Si on veut photographier un objet, dont les distances axiales à l'objectif sont comprises entre et $d'' = 6$ m, la distance optimale de mise au point d doit être égale à :

$$d \approx \frac{2d'd''}{d' + d''} = 4 \text{ m}$$

Les appareils photographiques actuels sont autofocus, c'est-à-dire que la distance optimale d de mise au point est automatiquement évaluée et prise en compte. L'évaluation de d est réalisée grâce à un rayonnement infrarouge émis par l'appareil, réfléchi par l'objet puis détecté. Une fois cette distance connue, un petit calculateur détermine la profondeur de champ pour une ouverture donnée.

Expression de la profondeur de champ On a les deux expressions suivantes de $\overline{A'_i A''_i}$:

$$\overline{A'_i A''_i} = -\frac{a_i}{\tan u_i} \quad \text{et} \quad \overline{A'_i A''_i} = \overline{A'_i A_i} + \overline{A_i A''_i} = f^2 \left(\frac{1}{\sigma'_o} - \frac{1}{\sigma''_o} \right) = -f^2 \left(\frac{1}{d'} - \frac{1}{d''} \right)$$

Par conséquent :

$$\frac{a_i}{\tan u_i} = f^2 \frac{d' - d''}{d' d''} \quad \text{et} \quad A'_o A''_o = d' - d'' = -\frac{a_i}{\tan u_i} \frac{d' d''}{f^2}$$

La quantité $d' d'' / f^2 \approx \sigma'_o \sigma''_o / f^2$ représente le carré du grandissement transversal. Quant à $\tan u_i$, il s'écrit, puisque les angles sont suffisamment faibles et $n_i = n_o = 1$:

$$\tan u_i \approx \sin u_i = \frac{\sin u_o}{G_t} \approx \frac{D}{2dG_t}$$

Comme $f/d \approx -G_t$ et $N \cdot O = f/D$, il vient :

$$\tan u_i \approx -\frac{1}{2 N.O} \quad \overline{A'_i A''_i} \approx 2a_i N.O \quad \text{et} \quad \overline{A'_o A''_o} \approx 2a_i N.O \frac{d^2}{f^2}$$

Finalement, retenons l'expression suivante de la profondeur de champ :

$$\overline{A'_o A''_o} = 2a_i \frac{d^2}{Df}$$

La profondeur de champ augmente donc lorsque :

- le diamètre de la pupille d'entrée diminue ; les rayons marginaux sont alors moins inclinés à la sortie de l'appareil,
- la distance optimale de mise au point augmente,
- la distance focale est plus courte.



FIGURE 5 – sources : jardinier-malin.fr et Le Midi Libre

Il faut donc bien choisir la focale de son objectif et agir sur le diaphragme pour modifier la profondeur de champ, c'est à dire la plage de netteté de l'objet. Un dernier facteur peut limiter la mise au point : le temps de pose.

3.3 Temps de pose

✦ Pérez p190

Considérons à nouveau la figure 16.4 qui schématise un appareil photographique. Avec les notations habituelles, l'éclairement dans le plan image où se trouve le détecteur s'écrit :

$$\hat{E}_i = \frac{\delta\Phi_i}{dS_i}$$

Comme $\delta\Phi_i = \pi L_i \sin^2 u_i dS_i$ et $L_i = \tau L_o$, τ étant le facteur de transmission en intensité, il vient :

$$\hat{E}_i = \pi\tau L_o \sin^2 u_i$$

En tenant compte de la relation des sinus d'Abbe, on obtient :

$$\hat{E}_i = \pi\tau L_o \frac{\sin^2 u_o}{G_t^2} \approx \pi\tau L_o \frac{D^2}{4G_t^2 (A_o E)^2}$$

soit aussi, puisque $G_t^2 = f^2/\sigma_o^2 \approx f^2/(A_o E)^2$:

$$\hat{E}_i \approx \frac{\pi\tau L_o}{4 \text{ NO}^2}$$

Ainsi, l'éclairement de l'image, dans un appareil photographique, varie comme l'inverse du carré du nombre d'ouverture. Comme l'effet produit sur le détecteur ne dépend que de l'énergie reçue, et donc de l'exposition lumineuse $H = E \times T$, la quantité $T/\text{N.O}^2$ joue un rôle important en photographie, d'où la relation entre la progression géométrique des nombres d'ouverture, de raison $\sqrt{2}$, et celle de durées d'exposition T , de raison 2 (Tab. 16.3).

Cependant, en augmentant le temps de pose pour obtenir un bon éclairement, on s'expose à un flou de "bougé" : si l'objet photographié bouge pendant le temps où l'obturateur est ouvert, ses images successives se superposent et l'image obtenue est floue. Il faut donc un faible temps de pose pour photographier un objet en mouvement. On peut aussi tirer avantage de cet effet, par exemple pour représenter une trajectoire : on choisit alors un temps de pose long.

N.O	2,8	4	5,6	8	11	16	22
N.O ²	7,84	16	31,4	64	121	256	484
T (s)	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{125}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{15}$

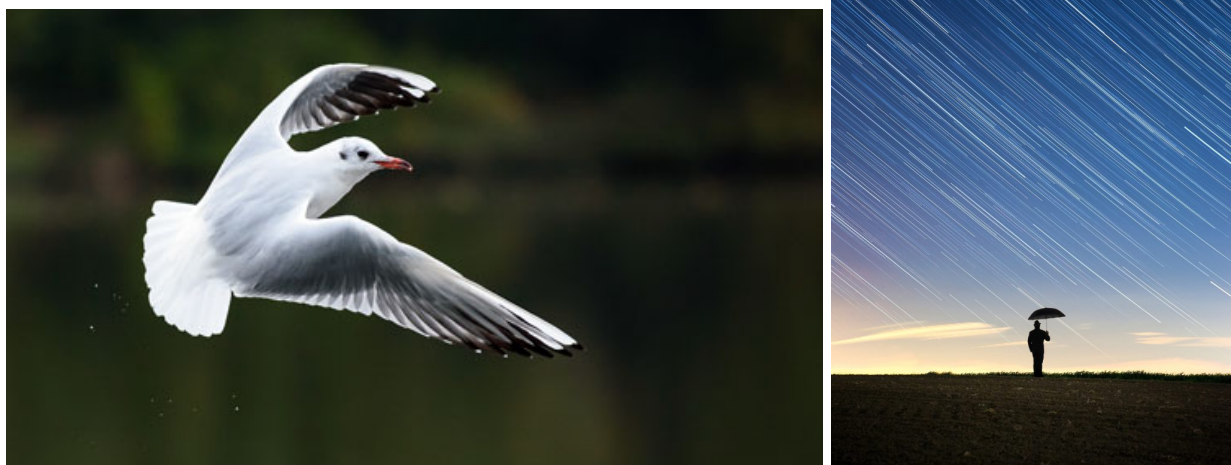


FIGURE 6 – sources : progresser-en-photo.com et photographe-en-herbe.com