

[35] Application des lois de l'optique à un système optique au choix : l'appareil photo

Gérald Gürtner - Nicolas Grisouard
Correcteur : Dominique Chardon

04 janvier 2006

Introduction : Motivation du choix de l'appareil photo : un des appareils les plus courants, à la fois simple et complexe.

Pré-requis : Toute l'optique géométrique de base (plans nodaux, principaux, diaphragmes, pupilles).

1 Description générale

1.1 Schéma

On décrit succinctement les éléments d'un appareil photo en s'aidant du transparent de la figure 1, en faisant une comparaison avec l'oeil :

Oeil	Appareil photo
Dioptres et cristallin	Objectif
Iris	Diaphragme
Pupille	Ouverture
Rétine	Détecteur
Accomodation	Mise au point

TAB. 1: Comparaison entre l'oeil et un appareil photo

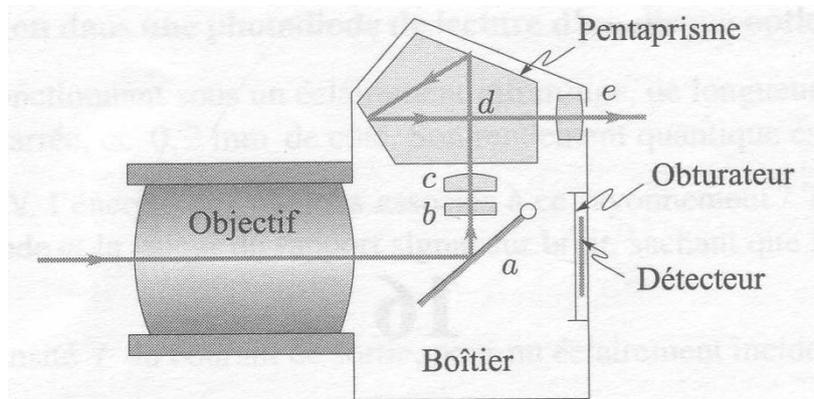


FIG. 1: Schéma de l'appareil photo (source : [3])

1.2 Caractéristiques

Parmi les caractéristiques optiques que l'on veut voir un appareil photo posséder, il se trouve :

- une image nette : notion d'aplanétisme et de stigmatisme,
- une image non-déformée : notion d'aberration (chromatiques, géométriques),
- une image visible : notion d'exposition,
- une image la plus précise possible : notion de résolution.

2 Dispositif de projection

2.1 Éléments cardinaux

Un objectif d'appareil photo peut contenir jusqu'à 10 lentilles. On va donc traiter l'objectif comme une boîte noire, et on travaillera avec les éléments cardinaux tels que l'on peut les définir pour un système optique quelconque. Un des paramètres pertinents à utiliser pour un appareil photo est le grandissement transverse, qui est donné par :

$$G_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{f}{\sigma_0}$$

Où $\sigma_0 = \overline{F_0A_0}$. Par exemple, si on veut un fort grandissement, il faut une grande focale (téléobjectif), ce qui peut poser d'autres problèmes d'ordre matériel (encombrement) ou optique, que l'on peut éviter par la ruse de la figure 2 (on fait la manip').

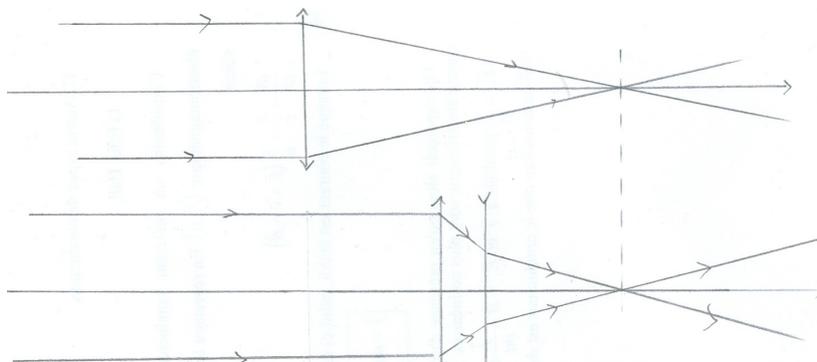


FIG. 2: *Reduction de l'encombrement par association de deux lentilles*

2.2 Champ angulaire

Le champ angulaire est la portion angulaire de l'espace objet tel que l'appareil peut en donner une image nette.

Comme expliqué sur la figure 3, il dépend avant tout de la taille du détecteur et pas des optiques, car on ne veut pas que le bord de l'image soit de moins bonne qualité que le centre. On classe usuellement les appareils en trois catégories :

- $2\theta_c \simeq 100^\circ$: objectif grand angle (“fish-eye”); $f \simeq 6$ mm,
- $2\theta_c \simeq 50^\circ$: objectif dit “normal” (l'œil en fait partie); $f \simeq 50$ mm,
- $2\theta_c < 20^\circ$: téléobjectif; $f \simeq 15$ cm

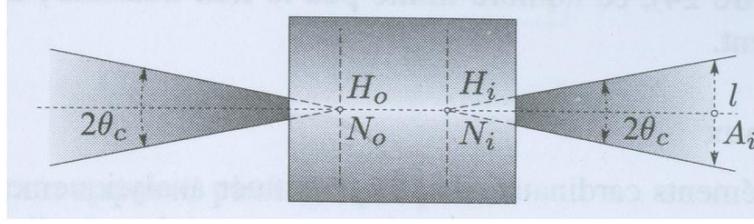


FIG. 3: Champ angulaire d'un objectif; l est la longueur diagonale du détecteur (source : [3]).

2.3 Nombre d'ouverture

On construit le nombre d'ouverture afin de comparer la quantité de lumière incidente avec le grandissement. Il est défini par :

$$N.O. = \frac{f}{D},$$

où D est le diamètre de la pupille d'entrée, qui est le conjugué du diaphragme d'ouverture (celui qui limite la lumière collectée) relativement aux optiques situées avant lui. On donne quelques exemples de N.O. avec le transparent de la figure 4

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

FIG. 4: Exemples de valeurs de nombre d'ouverture pour $f = 50$ mm (source : [3])

2.4 Aberrations

Les aberrations principales sont de deux types :

- Géométriques : pour y remédier, on augmente le nombre d'ouverture, car les angles sont alors plus faibles (on se rapproche des conditions de Gauss).
- Chromatiques : on peut les atténuer avec des doublets de lentilles.

2.5 Résolution théorique

Comme la pupille d'entrée possède une taille finie, elle donne lieu à de la diffraction, ce qui se traduit par une tache d'Airy, de demi-largeur $1,22 \frac{\lambda d}{D}$, où d est la distance entre la pupille d'entrée et la pellicule. Cette diffraction est-elle gênante dans notre cas? Pour le savoir, on fait un petit calcul pour obtenir la largeur de la tache dans le cas général. On a $d \simeq f$ car généralement, on prend en photo des objets situés à une distance grande devant la distance focale, d'où :

$$R \simeq 1,22 \frac{\lambda f}{D} = 1,22 \lambda N.O.$$

Si on prend $\lambda \simeq 500$ nm, $N.O. = 4$, il vient pour le rayon de la tache centrale : $R \simeq 2\mu\text{m}$. On explique le critère de Rayleigh, et on l'applique, ce qui implique que deux taches de diffractions (lisez : les deux centres des taches) doivent être à plus de $2\mu\text{m}$ l'une de l'autre pour être résolues. Mais si le grain du détecteur est plus gros que les $2\mu\text{m}$ en question, la résolution sera fixée par le détecteur et non par la diffraction.

Il faut donc à présent s'intéresser à la deuxième facette d'un appareil photo, à savoir le détecteur, que l'on va à présent étudier.

3 Le détecteur

3.1 Résolution liée au détecteur

Pour l'instant, les grains des détecteurs, argentiques comme numériques, n'atteignent pas la taille d'une tache de diffraction. La résolution de l'appareil ne dépend donc pas de la diffraction, mais de la taille des grains. Lorsque les grains atteindront la taille de la tache de diffraction, l'appareil sera dit "parfait"¹.

Le grain ρ des détecteurs est de l'ordre :

- Pour un appareil numérique : $\rho \simeq 6\mu\text{m}$,
- Pour un appareil argentique :
 - $\rho \simeq 20\mu\text{m}$, le film est alors dit "rapide", il est vite impressionné mais a une faible résolution,
 - $\rho \simeq 4\mu\text{m}$, le film est alors dit "lent", il est lentement impressionné mais sa résolution est meilleure.

En effet, si la taille des grains diminue, alors le film doit être plus longtemps exposé pour un même éclairage. On définit donc une échelle ISO : plus l'indice ISO est élevé, plus le film est rapide².

3.2 Profondeur de champ

La profondeur de champ est un défaut *lié au détecteur* qui s'avère très utile : en effet, il permet d'avoir une image nette non pas seulement dans le plan conjugué du détecteur mais également autour de ce plan, ce qui permet de voir nets des objets étendus *le long de l'axe optique* (cf. Fig.5).

Manip' : on montre avec la projection d'une grille penchée (selon un axe orthogonal à l'axe optique) que l'image est nette un peu autour du centre de la grille (on peut compter le nombre de carreaux) (cf. [4]). Faisons le calcul précis de cette profondeur de champ, en se basant sur les notations de la figure 5.

Soit R le rayon de la partie éclairée du plan principal objet (et image). ρ est toujours la taille d'un grain de détecteur. A_0 est le conjugué de A'_0 situé au centre de la pellicule, A_M et A_m sont les points de l'objet sur l'axe optique vus nets par l'appareil photo respectivement le plus éloigné et le plus proche de celui-ci, A'_M et A'_m sont leurs conjugués. Les points principaux objet et image sont P et P' , les DFs f et f' , les PFs F et F' . Il faut traiter séparément les cas de A_M (rayons bleus) et A_m (rayons rouges). Commençons par le trajet $A_m \rightarrow A'_m$.

On a, d'après Thalès :

$$\frac{\rho}{2R} = \frac{\overline{A'_0 A'_m}}{\overline{P' A'_m}}$$

¹Être conscient cependant que plus la taille d'un pixel dans un appareil numérique est petite, plus le bruit est important. La "course à la miniaturisation" des pixels s'accompagne donc de pertes de performances ailleurs.

²Cette échelle est construite sur une progression géométrique de raison 2 : deux films dont les sensibilités ISO sont dans un rapport 2 auront, pour une exposition donnée, des opacités dans le même rapport.

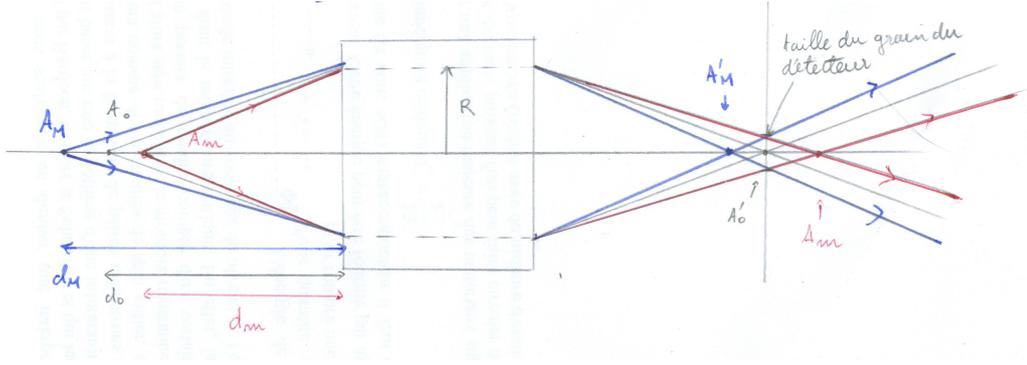


FIG. 5: Illustration de la notion de profondeur de champ

Or, dans la pratique photographique courante, $d_m \gg f'$, d'où :

1. $\overline{P'A'_m} \approx f'$, donc $\overline{A'_0A'_m} \approx \frac{\rho f'}{2R}$
2. $\overline{FA_m} \approx \overline{PA_m} \approx -d_m$

De plus, d'après la relation de Newton :

$$\overline{FA_m} \times \overline{F'A'_m} = -f'^2$$

D'où, en combinant le tout :

$$\frac{1}{d_m} \approx \frac{\overline{F'A'_m}}{f'^2} \approx \frac{\overline{F'A'_0}}{f'^2} + \frac{\rho}{2Rf'}$$

De même :

$$\frac{1}{d_0} \approx -\frac{1}{\overline{FA_0}} \approx \frac{\overline{F'A'_0}}{f'^2}$$

Ainsi, au final :

$$\frac{1}{d_m} - \frac{1}{d_0} \approx \frac{\rho}{2Rf'} \approx \frac{1}{H}$$

H est appelée distance hyper focale. De même, pour le trajet $A_M \rightarrow A'_M$, on a :

$$\frac{\overline{A'_MA'_0}}{\overline{P'A'_M}} = \frac{\rho}{2R} \approx \frac{\overline{A'_MA'_0}}{f'}$$

D'où (en supposant $d_0 \leq H$) :

$$-\frac{1}{\overline{FA_M}} \approx \frac{1}{d_M} \approx \frac{\overline{F'A'_M}}{f'^2} \approx \frac{\overline{F'A'_0}}{f'^2} - \frac{\rho}{2Rf'} \approx \frac{1}{d_0} - \frac{1}{H}$$

Au final :

$$\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_M} \approx \frac{1}{d_m} - \frac{1}{d_0} \approx \frac{1}{H} \approx \frac{\rho}{2Rf'}$$

On peut alors caractériser la distance hyperfocale H : si $d_0 \rightarrow \infty$ (mise au point à l'infini), alors la profondeur de champ s'étend à partir de la distance H et jusqu'à l'infini. En effet, en prenant la seconde égalité avec $d_0 \rightarrow \infty$, on a :

$$d_m = H$$

Il y a à ce propos une astuce qui permet de gagner de la profondeur de champ. En effet, si l'on fait la mise au point à la distance H au lieu de l'infini, alors la profondeur de champ s'étend de la distance $H/2$ jusqu'à l'infini. En effet, en prenant $\frac{1}{d_0} = \frac{1}{H}$, on obtient $\frac{1}{d_M} \rightarrow 0$, d'où $d_M \rightarrow \infty$, ainsi que $d_m = H/2$. Ceci est utilisé dans les appareils "instamatic" qui n'ont pas de réglage de mise au point.

Notons que la profondeur de champ augmente avec le *N.O.* (à voir sur le schéma : si les rayons deviennent moins inclinés par rapport à l'axe optique, on voit que $A'_m A'_M$ augmente), ce qui introduit un choix de compromis entre la profondeur de champ et la quantité de lumière (en plus, donc, du compromis entre cette dernière et le grandissement). Notons également que la profondeur de champ diminue lorsque d_0 diminue, c'est-à-dire lorsque l'on fait la mise au point sur un objet proche.

Manip' : On montre avec la grille que la fermeture d'un diaphragme placé après cette grille améliore la netteté sur l'écran (on peut comparer le nombre de carreaux nets).

Enfin, notons que les appareils numériques ont une profondeur de champ inférieure à celle des appareils argentiques, toutes choses égales par ailleurs. On interprète assez mal ce phénomène, bien que l'explication la plus courante fasse intervenir le fait que les pixels soient "ordonnés", contrairement aux grains de la pellicule.

4 Exposition

Sans le faire explicitement, on évoque le calcul de l'éclairement³ du plan image, sur quoi il repose, et on cite le fait remarquable que pour des objets éloignés, l'éclairement ne dépend pas de la luminance de la source⁴! Le fait le plus utile pour nous est qu'il varie comme $\frac{1}{(N.O.)^2}$. Le paramètre qui va ici guider les choix du photographe va être l'exposition lumineuse, définie par : $H = E.T$ en $J.m^{-2}$, où T est le temps de pose. H étant fixé par les exigences de la pellicule et du photographe, il faudra donc régler le temps de pose en fonction de nombre d'ouverture, ou le contraire. Par exemple, un photographe immortalisant le départ d'un 100m doit avoir un temps de pose très court. Ceci implique que le *N.O.* doit être lui aussi très petit, ce qui veut dire que la profondeur de champ sera très faible : il ne pourra photographier qu'un seul coureur (s'il est dans l'axe de la ligne de départ bien sûr).

On donne des exemples de nombres d'ouverture et de temps de pose correspondant sur le transparent de la figure 6.

Conclusion

On voit que prendre une photo nécessite de faire des choix : forte profondeur de champ et temps de pose court, résolution et temps de pose court, etc., autant de qualités recherchées qui se concurrencent.

³puissance lumineuse reçue par unité de surface du détecteur

⁴Ne pas développer le calcul est un choix qui n'a pas beaucoup plu au correcteur. Contrairement au calcul du chapitre précédent, il est aisé à trouver puisque dans le Pérez.

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)	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{125}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{15}$

FIG. 6: Source : [3]

On aurait pu prendre un autre appareil : le rétroprojecteur, ce qui aurait conduit à s'intéresser de plus près à la photométrie, le microscope, plus technique, la lunette ou le télescope, qui malheureusement se prêtent assez mal à des manip.

Références

- [1] L. Dettwiller, *Instruments d'optique*, éd. Ellipses.
- [2] L. Dettwiller, *Optique, exercices corrigés et rappels de cours*, éd. Dunod.
- [3] J.P. Pérez, *Optique, fondements et applications*, éd. Dunod.
- [4] Sextant, *Optique expérimentale*, éd. Hermann.