

Exemples d'instruments optiques

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

20 septembre 2021

Exemples d'instruments optiques

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

20 septembre 2021

on va étudier :

- ▶ les caractéristiques d'un appareil fondamental, l'appareil photo, et l'effet des réglages d'exposition, ouverture, focale sur l'image produite
- ▶ les méthodes d'étude de systèmes complexes à plusieurs lentilles sur l'exemple de la lunette astronomique

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument **objectif**
- ▶ une loupe est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument **objectif**
- ▶ une loupe est un instrument **subjectif**
- ▶ une paire de jumelles est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument **objectif**
- ▶ une loupe est un instrument **subjectif**
- ▶ une paire de jumelles est un instrument **subjectif**
- ▶ un microscope est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument **objectif**
- ▶ une loupe est un instrument **subjectif**
- ▶ une paire de jumelles est un instrument **subjectif**
- ▶ un microscope est un instrument **subjectif**
- ▶ un appareil photographique est un instrument

Instruments objectif et subjectif

Définition (Instruments objectif et subjectif)

Un instrument est dit **objectif** s'il est utilisé pour former des images **réelles à distance finie**.

Un instrument est dit **subjectif** s'il est utilisé pour former des images au **punctum remotum** de l'observateur.

- ▶ l'œil est un instrument **objectif**
- ▶ une loupe est un instrument **subjectif**
- ▶ une paire de jumelles est un instrument **subjectif**
- ▶ un microscope est un instrument **subjectif**
- ▶ un appareil photographique est un instrument **objectif**

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant
- ▶ on rédigera selon :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} A'$$

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant
- ▶ on rédigera selon :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} A'$$

- ▶ A est l'objet par l'ensemble

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant
- ▶ on rédigera selon :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} A'$$

- ▶ A est l'objet par l'ensemble
- ▶ A' l'image par l'ensemble

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant
- ▶ on rédigera selon :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} A'$$

- ▶ A est l'objet par l'ensemble
- ▶ A' l'image par l'ensemble
- ▶ A_1 est l'image intermédiaire

Enchaînements d'instruments

On rencontrera des instruments **complexes** utilisant plusieurs lentilles/miroirs

- ▶ un faisceau incident rencontrera successivement chaque instrument élémentaire
- ▶ l'image formée par l'instrument n sera l'objet de l'instrument $n + 1$ suivant
- ▶ on rédigera selon :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} A'$$

- ▶ A est l'objet par l'ensemble
 - ▶ A' l'image par l'ensemble
 - ▶ A_1 est l'image intermédiaire
- ▶ on interprétera le principe en utilisant les zones de chaque lentille avant d'utiliser les relations de conjugaison

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

1. Généralités

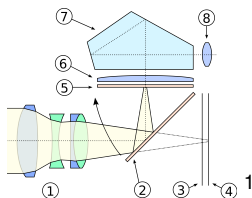
2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

2.1 Principe

2.2 Caractéristiques

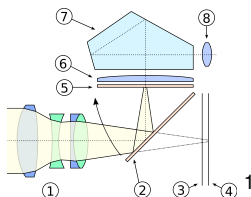
3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

Image réelle d'un objet réel



¹[commons.wikimedia.com](https://commons.wikimedia.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/) Par en :User :Cburnett — Own work with Inkscape based on Image :Slr-cross-section.png, CC BY-SA 3.0.

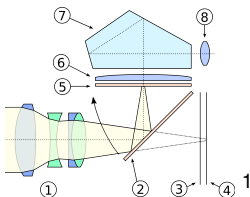
Image réelle d'un objet réel



► zone de projection d'une lentille réelle

¹commons.wikimedia.com Par en :User :Cburnett — Own work with Inkscape based on Image :Slr-cross-section.png, CC BY-SA 3.0.

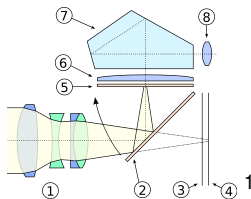
Image réelle d'un objet réel



- ▶ zone de projection d'une lentille réelle
- ▶ même principe que l'œil, vidéoprojecteur...

¹commons.wikipedia.com Par en :User :Cburnett — Own work with Inkscape based on Image :Slr-cross-section.png, CC BY-SA 3.0.

Image réelle d'un objet réel



modélisé en :

- zone de projection d'une lentille réelle
- même principe que l'œil, vidéoprojecteur...

objectif (1) une seule lentille convergente, de focale constante. Un diaphragme permet d'en régler le diamètre d'ouverture

pellicule ou capteur CCD (4) écran

obturateur (3) diaphragme dont on peut régler la durée d'ouverture

miroir escamotable (2) permet d'envoyer la lumière vers l'écran (4) ou vers le viseur

(5), (6), (7), (8) produisent l'image observée dans le viseur quand le miroir (2) est baissé

¹[commons.wikimedia.com](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slr-cross-section.png) Par en :User :Cburnett — Own work with Inkscape based on Image :Slr-cross-section.png, CC BY-SA 3.0.

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

2.1 Principe

2.2 Caractéristiques

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

Exercice : Mise au point

On modélise l'objectif d'un appareil photographique par une unique lentille convergent de distance focale $f' = 50\text{ mm}$.

- 1 On souhaite photographier un arbre de hauteur $H = 50\text{ m}$ situé à une distance $D_1 = 200\text{ m}$.
 - a Quelle doit-être la distance ℓ_1 entre l'objectif et le capteur CCD ?
 - b Quelle sera la taille de l'image formée sur le capteur ?
- 2 Mêmes questions quand on se rapproche jusqu'à une distance $D_2 = 30\text{ m}$. Préciser le déplacement de l'objectif par rapport à l'écran entre les deux situations.
- 3 Mêmes questions si on photographie la Lune.
- 4 Le terme « macrophotographie » désigne la photographie d'objets avec un grandissement supérieur à 1 en valeur absolue. Déterminer les distances entre l'objet et l'objectif quand il vaut 1 et 10 en valeur absolue.
- 5 Quelle distance focale d'objectif choisir pour que l'image de l'arbre de la question 1 soit deux fois plus grande sur le capteur ?

Correction

- 1 **a** Avec Descartes : $\ell_2 = D_1 f' / (D_1 - f') \simeq f' = 50,01 \text{ mm}$ car l'objet est pratiquement à l'infini
 b Descartes $h_1 = H \ell / D_1 \simeq H f' / D_1 = 1,25 \text{ cm}$.
- 2 De même $\ell_2 = 50,08 \text{ mm}$ et $h_2 = 8,3 \text{ cm}$. On a dû éloigner l'objectif du capteur de $70 \mu\text{m}$.
- 3 La Lune est à l'infini, $d_L = f'$. Elle a un diamètre angulaire de $\alpha = 30'$, soit $h_L = f' \alpha = 4,4 \cdot 10^2 \mu\text{m}$.
- 4 **a** $\gamma = -1$: $D = 2f' = 10 \text{ cm}$
 b $\gamma = -10$: Newton donne $\overline{FA} = f' / \gamma$ et donc $f' (1 + 1/|\gamma|) = 5,5 \text{ cm}$.
- 5 Un objectif de focale deux fois plus grande permettra d'agrandir deux fois plus.

Exposition

- ▶ il faut une quantité adaptée d'énergie lumineuse pour enregistrer une image sur un capteur, qu'il soit chimique (pellicule) ou électronique (CCD)
- ▶ on la règle avec :
 - ▶ la **durée d'exposition**, *ie* la durée d'ouverture de l'obturateur (de quelques ms *quelques*)
 - ▶ l'**ouverture**, *ie* le diamètre du diaphragme intégré à l'objectif (de quelques mm à quelques cm)
 - ▶ la **sensibilité ISO** du capteur.

Exposition

► Camerasim

Exposition

- ▶ **Camerasim**
- ▶ pour une même exposition, on peut augmenter la durée et diminuer l'ouverture ou diminuer la durée et augmenter l'ouverture

Exposition

- ▶ **Camerasim**
- ▶ pour une même exposition, on peut augmenter la durée et diminuer l'ouverture ou diminuer la durée et augmenter l'ouverture
- ▶ diminuer la durée évite les flous de « bougé »

Exposition

- ▶ **Camerasim**
- ▶ pour une même exposition, on peut augmenter la durée et diminuer l'ouverture ou diminuer la durée et augmenter l'ouverture
- ▶ diminuer la durée évite les flous de « bougé »
- ▶ diminuer l'ouverture augmente la **profondeur de champ**
femto-physique

Profondeur de champ

Définition (Profondeur de champ)

La **profondeur de champ** d'un instrument d'optique est la zone de l'espace objet dans laquelle les objets forment une image de netteté acceptable.

Profondeur de champ

Définition (Profondeur de champ)

La **profondeur de champ** d'un instrument d'optique est la zone de l'espace objet dans laquelle les objets forment une image de netteté acceptable.

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r
- ▶ mise au point à une distance D_0 , capteur à d_0

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r
- ▶ mise au point à une distance D_0 , capteur à d_0
- ▶ plage d'accomodation entre D_a, d_a et D_b, d_b

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r
- ▶ mise au point à une distance D_0 , capteur à d_0
- ▶ plage d'accomodation entre D_a, d_a et D_b, d_b
- ▶ Thalès donne :

$$\frac{r}{R} = \frac{d_0 - d_a}{d_a} = \frac{d_b - d_0}{d_b}$$

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r
- ▶ mise au point à une distance D_0 , capteur à d_0
- ▶ plage d'accomodation entre D_a, d_a et D_b, d_b
- ▶ Thalès donne :

$$\frac{r}{R} = \frac{d_0 - d_a}{d_a} = \frac{d_b - d_0}{d_b}$$

- ▶ Les relations de conjugaison donnent :

$$\frac{1}{D_a} + \frac{1}{D_b} = \frac{2}{D_0} \quad \frac{1}{D_b} - \frac{1}{D_a} = \frac{2r}{d_0 R}$$

Profondeur de champ

- ▶ focale f' , diaphragme de rayon R , rayon maximal de tâche acceptable r
- ▶ mise au point à une distance D_0 , capteur à d_0
- ▶ plage d'accomodation entre D_a, d_a et D_b, d_b
- ▶ Thalès donne :

$$\frac{r}{R} = \frac{d_0 - d_a}{d_a} = \frac{d_b - d_0}{d_b}$$

- ▶ Les relations de conjugaison donnent :

$$\frac{1}{D_a} + \frac{1}{D_b} = \frac{2}{D_0} \quad \frac{1}{D_b} - \frac{1}{D_a} = \frac{2r}{d_0 R}$$



$$\frac{1}{D_a} = \frac{1}{D_0} - \frac{r}{d_0 R} \quad \frac{1}{D_b} = \frac{1}{D_0} + \frac{r}{d_0 R}$$

Profondeur de champ

Profondeur de champ

- La plage d'accomodation est, quand D_a est finie ie quand $|\gamma| = d_0/D_0 > r/R$:

$$\Delta D = D_a - D_b = \frac{2(d_0 R/r) D_0^2}{(d_0 R/r)^2 - D_0^2} \underset{D_0 \gg f'}{\simeq} \frac{2(f' R/r) D_0^2}{(f' R/r)^2 - D_0^2}$$

Profondeur de champ

- La plage d'accomodation est, quand D_a est finie ie quand $|\gamma| = d_0/D_0 > r/R$:

$$\Delta D = D_a - D_b = \frac{2(d_0 R/r) D_0^2}{(d_0 R/r)^2 - D_0^2} \underset{D_0 \gg f'}{\simeq} \frac{2(f' R/r) D_0^2}{(f' R/r)^2 - D_0^2}$$

- pour $f' = 50 \text{ mm}$, $2R = f'/4$ et $D_0 = 30 \text{ m}$, et $r = 5 \mu\text{m}$ (pixels de côté $5 \mu\text{m}$) on calcule : $\Delta D = 15 \text{ m}$. On a :

$$\frac{1}{D_b} \simeq \frac{1}{D_0} + \frac{r}{f' R} \rightarrow D_b \simeq 24 \text{ m}$$

$$\frac{1}{D_a} \simeq \frac{1}{D_0} - \frac{r}{f' R} \rightarrow D_b \simeq 40 \text{ m}$$

Profondeur de champ

- La plage d'accomodation est, quand D_a est finie ie quand $|\gamma| = d_0/D_0 > r/R$:

$$\Delta D = D_a - D_b = \frac{2(d_0 R/r) D_0^2}{(d_0 R/r)^2 - D_0^2} \underset{D_0 \gg f'}{\simeq} \frac{2(f' R/r) D_0^2}{(f' R/r)^2 - D_0^2}$$

- pour $f' = 50 \text{ mm}$, $2R = f'/4$ et $D_0 = 30 \text{ m}$, et $r = 5 \mu\text{m}$ (pixels de côté $5 \mu\text{m}$) on calcule : $\Delta D = 15 \text{ m}$. On a :

$$\frac{1}{D_b} \simeq \frac{1}{D_0} + \frac{r}{f' R} \rightarrow D_b \simeq 24 \text{ m}$$

$$\frac{1}{D_a} \simeq \frac{1}{D_0} - \frac{r}{f' R} \rightarrow D_b \simeq 40 \text{ m}$$

- On vérifie que D_a et D_b sont d'autant plus proches que R est élevé : la profondeur de champ diminue quand l'ouverture augmente.

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

3.1 Principe

3.2 Caractéristiques

Grossissement d'un objet à l'infini

zone de projection une première lentille convergente forme une « grande » image d'un objet à l'infini

zone de loupe une deuxième lentille convergente en forme une image au punctum remotum de l'observateur

Figures animées pour la physique

Grossissement d'un objet à l'infini

zone de projection une première lentille convergente forme une « grande » image d'un objet à l'infini

zone de loupe une deuxième lentille convergente en forme une image au punctum remotum de l'observateur

Figures animées pour la physique

Définition (Lunette astronomique et système afocal)

Une lunette astronomique ou un télescope se compose d'un **objectif** et d'un **oculaire** dont les plans focaux image et objet **coïncident** en un plan dit **réticulaire** :

- ▶ l'objectif forme une image intermédiaire réelle d'un objet à l'infini dans le plan réticulaire.
- ▶ l'oculaire forme de cette image intermédiaire une image située au **punctum remotum** de l'observateur.

Il s'agit d'un système **afocal**, qui fournit d'un **objet à l'infini** une image elle **aussi à l'infini** (ou au PR de l'observateur).

Grossissement d'un objet à l'infini

Définition (Lunette astronomique et système afocal)

Une lunette astronomique ou un télescope se compose d'un **objectif** et d'un **oculaire** dont les plans focaux image et objet **coïncident** en un plan dit **réticulaire** :

- ▶ l'objectif forme une image intermédiaire réelle d'un objet à l'infini dans le plan réticulaire.
- ▶ l'oculaire forme de cette image intermédiaire une image située au **punctum remotum** de l'observateur.

Il s'agit d'un système **afocal**, qui fournit d'un **objet à l'infini** une image elle **aussi à l'infini** (ou au PR de l'observateur).

- ▶ un télescope utilise un miroir sphérique pour l'objectif, pour limiter les aberrations chromatiques (Newton 1672) {Figures animées pour la physique}
- ▶ lunette et télescope donnent une image renversée si l'objectif et l'oculaire sont convergents
- ▶ en utilisant un oculaire divergent, on obtient une lunette donnant une image droite (Galilée 1609) {Figures animées pour la physique}

1. Généralités

2. Un instrument objectif : l'appareil photographique

3. Un instrument subjectif : la lunette astronomique

3.1 Principe

3.2 Caractéristiques

Performances

Performances

Le **grossissement** d'un système afocal formé de deux lentilles (ou miroirs) successives de distances focales f'_1 puis f'_2 est :

$$G = -\frac{f'_1}{f'_2}.$$

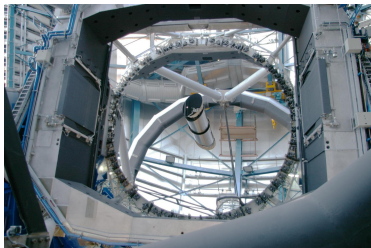
- ▶ f'_1 **grand** permet d'avoir une grande image intermédiaire
- ▶ f'_2 **petit** permet de l'observer sous un grand angle

Limitations

- ▶ pour utiliser f'_2 faible, on doit choisir un petit diamètre pour limiter les **aberrations géométriques** et l'**adapter à l'œil**
- ▶ f'_1 doit être élevé, on peut prendre un grand diamètre sans avoir trop d'aberrations mais les **turbulences atmosphériques** brouillent les images

Limitations

- ▶ pour utiliser f'_2 faible, on doit choisir un petit diamètre pour limiter les **aberrations géométriques** et l'**adapter à l'œil**
- ▶ f'_1 doit être élevé, on peut prendre un grand diamètre sans avoir trop d'aberrations mais les **turbulences atmosphériques** brouillent les images

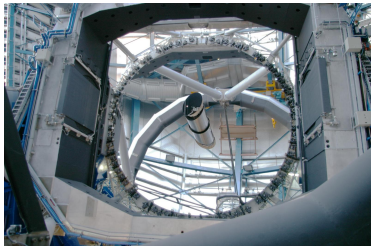


VLT (8 m) au Chili



SALT (10 m) Afrique du Sud

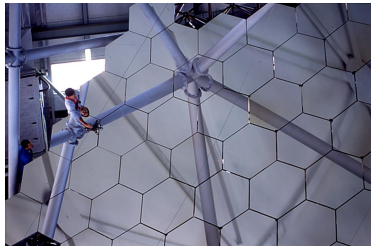
Limitations



VLT (8 m) au Chili
le pouvoir séparateur est limité par :

la diffraction à $0,015''$ d'arc

les turbulences atmosphériques à $0,1''$ d'arc. Elles prédominent sur Terre.



SALT (10 m) Afrique du Sud

Indispensable

- ▶ modélisation de l'appareil photographique
- ▶ principe de la mise au point en photographie
- ▶ calcul de la profondeur de champ
- ▶ définition d'un système afocal, constitution de la lunette astronomique
- ▶ calcul du grossissement d'une lunette astronomique