

Instruments d'optique

Plan du cours

I Œil	2
I.A Anatomie et modélisation	2
I.B Caractéristiques de la vision	3
I.C Hauteur apparente d'un objet observé à l'œil	4
I.D Complément culturel : défauts de vision	5
II Lunette astronomique	6
III Appareil photo	8
III.A Constitution et modélisation	8
III.B Champ	9
III.C Exposition	9
III.D Profondeur de champ	10

(R) Résultat à connaître par cœur.

(M) Méthode à retenir, mais pas le résultat.

(D) Démonstration à savoir refaire.

(Q) Aspect qualitatif uniquement.

Les paragraphes sans mention en marge sont là pour faciliter votre compréhension ou pour votre culture mais n'ont pas forcément besoin d'être appris en tant que tel.

Un **instrument d'optique** est un dispositif qui utilise les propriétés de la lumière afin de former, analyser ou enregistrer une image ou un signal lumineux. Ces instruments peuvent avoir pour but d'améliorer (au sens large) la vision humaine, d'analyser des phénomènes physiques, ou encore de mesurer des grandeurs liées aux systèmes observés. Ce cours se restreint aux instruments d'optique utilisant (ou modélisables par) des lentilles dans le cadre de l'optique géométrique.

On distingue les instruments d'optique **subjectifs**, destinés à former des images observées à l'œil, et les instruments d'optique **objectifs**, pour qui l'image finale est formée sur un capteur ou un écran.

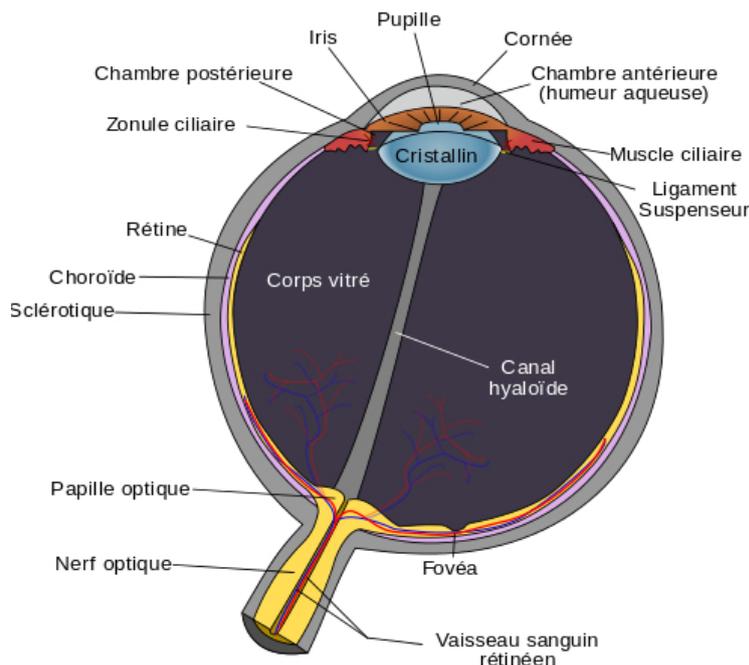
I - Œil

I.A - Anatomie et modélisation

Remarque culturelle : il existe dans le monde animal au moins quarante types d'organes visuels que l'on appelle des yeux, dont les plus simples permettent à peine de distinguer obscurité et pleine lumière.

Un schéma anatomique de l'œil humain est représenté figure 1. Sur le strict plan optique, les éléments les plus importants sont

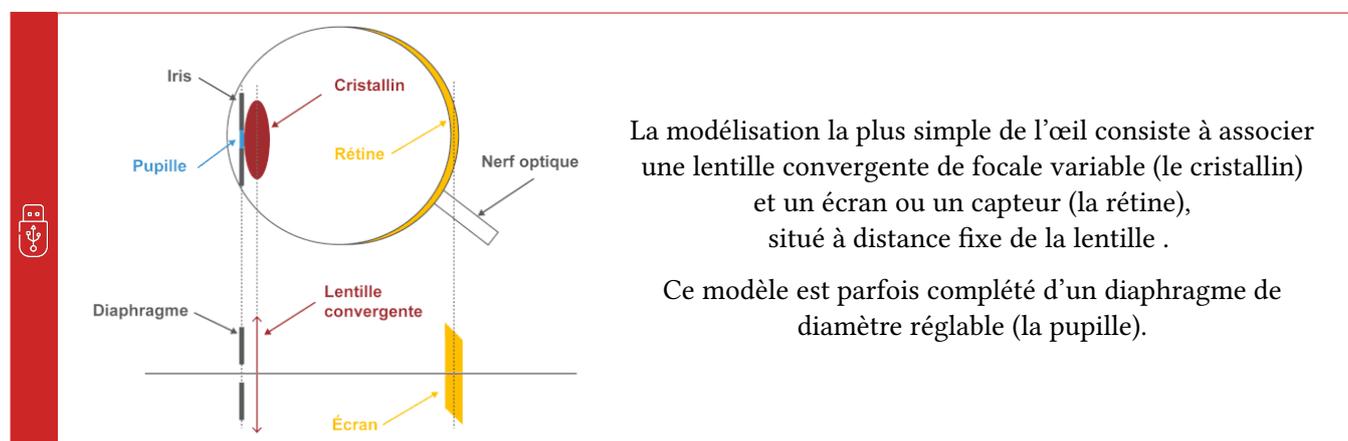
- l'**iris** et la **pupille**, qui jouent un rôle analogue à un diaphragme et permettent de contrôler la quantité de lumière entrant dans l'œil ;
- le **cristallin** dont les déformations servent à former l'image de l'objet sur la rétine : c'est l'**accommodation** ;
- la **rétine**, qui joue le rôle de capteur et envoie des signaux nerveux vers le cerveau, qui analyse l'image.



Source image : Wikipedia

Figure 1 – Schéma anatomique de l'œil humain. La lumière entre dans l'œil par la cornée, une pellicule protectrice transparente. Elle traverse ensuite un liquide, l'humeur aqueuse, qui permet de fixer la pression mécanique s'exerçant sur la face avant du cristallin. La pupille diaphragme cette lumière, qui arrive ensuite sur le cristallin. Il s'agit d'un petit disque fibreux, transparent et flexible qui permet de dévier les rayons lumineux et de les focaliser sur la rétine, la zone sensible de l'œil. La rétine est formée de cellules sensorielles, les cônes (vision diurne) et les bâtonnets (vision nocturne), et de cellules nerveuses, les neurones. Tous les neurones se regroupent au niveau du nerf optique, qui part ensuite vers le cerveau.

(R)



La modélisation la plus simple de l'œil consiste à associer une lentille convergente de focale variable (le cristallin) et un écran ou un capteur (la rétine), situé à distance fixe de la lentille .

Ce modèle est parfois complété d'un diaphragme de diamètre réglable (la pupille).

⚠️ **Attention !** C'est la focale du cristallin qui varie, mais pas la distance entre le cristallin et la rétine qui est fixée par l'anatomie à environ 2 cm.

I.B - Caractéristiques de la vision

• Champ visuel



Le **champ visuel** décrit la portion d'espace visible pour un capteur optique. Il est défini comme l'angle entre les rayons extrêmes accessibles au capteur.

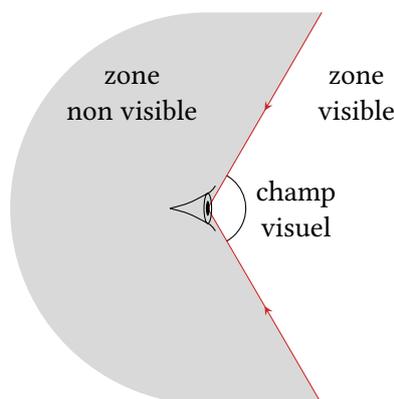


Figure 2 – Champ visuel. Les objets situés dans la zone grisée ne sont pas visibles, alors que ceux situés dans la zone blanche le sont.

Ordre de grandeur pour l'œil :

- ▷ en pivotant l'œil : 180° en horizontal, 150° en vertical ;
- ▷ pour un œil fixe : 3° pour une vision précise (lecture, etc.) mais 120° pour la perception du mouvement.



• Pouvoir séparateur ou acuité visuelle



Le **pouvoir séparateur** d'un capteur optique décrit sa capacité à distinguer deux points très proches. Il est défini comme l'angle minimal que doivent former deux rayons pour pouvoir être interprétés comme provenant de deux points différents.

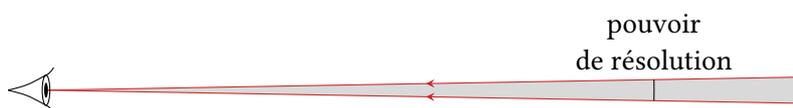


Figure 3 – Pouvoir de résolution. Tous les points situés dans la zone grisée ne sont pas discernables, c'est-à-dire qu'ils seront interprétés comme un seul et unique point.

Il est assez intuitif que le pouvoir de résolution soit défini par un angle plutôt que par une longueur : on ne voit pas avec la même précision les objets éloignés et les objets proches.

Ordre de grandeur pour l'œil : environ 1' d'arc ($= 1/60^\circ = 0,017^\circ = 3 \cdot 10^{-4}$ rad) au centre du champ visuel et dans des conditions d'éclairage optimales.



• Plage d'accomodation

L'œil ne voit net que si l'image se forme sur la rétine, ce qui impose d'adapter la focale du cristallin à la distance objet-œil : c'est l'**accomodation**. Ce processus est limité, ce dont il est simple de se rendre compte en approchant un crayon de son œil : il devient flou lorsqu'il est trop près !



On appelle **ponctum remotum** le point le plus éloigné de l'œil qui est visible nettement, et **ponctum proximum** le point le plus proche de l'œil qui est visible nettement.

Le ponctum remotum d'un œil **emmétrope** (sans défaut) se situe à l'infini.

Le ponctum proximum d'un œil emmétrope se trouve 20 à 25 cm devant l'œil.

Lorsque l'œil ne fait pas d'effort pour accommoder, il observe naturellement au ponctum remotum.



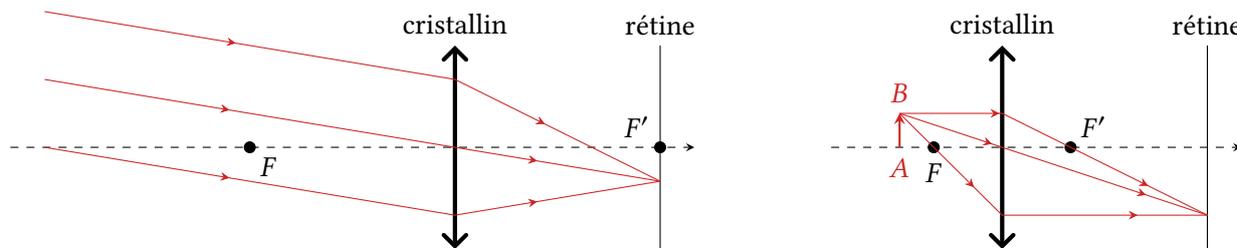


Figure 4 – Formation d'images vues au punctum remotum et au punctum proximum. Rappelons que la distance cristallin-rétine est fixe, seule change la focale du cristallin.

Remarque : En forçant volontairement, on peut voir jusqu'à une distance de l'ordre de 10 cm, mais cela entraîne une forte fatigue et n'est pas faisable dans la durée.

L'absence d'accommodation au punctum remotum induit une moindre fatigue visuelle.



→ conséquence pour les instruments d'optique :

un instrument subjectif est toujours conçu pour former une image à l'infini

Espace 1

I.C - Hauteur apparente d'un objet observé à l'œil

La taille d'un objet observé à l'œil n'est pas directement reliée à sa taille réelle : vous pouvez recouvrir le visage de votre voisin simplement en regardant votre pouce.

Application 1 : Illustration de la notion de hauteur apparente

Construire l'image sur la rétine des objets de la figure 5 observés à l'œil en accommodant. Lequel apparaît le plus grand ?

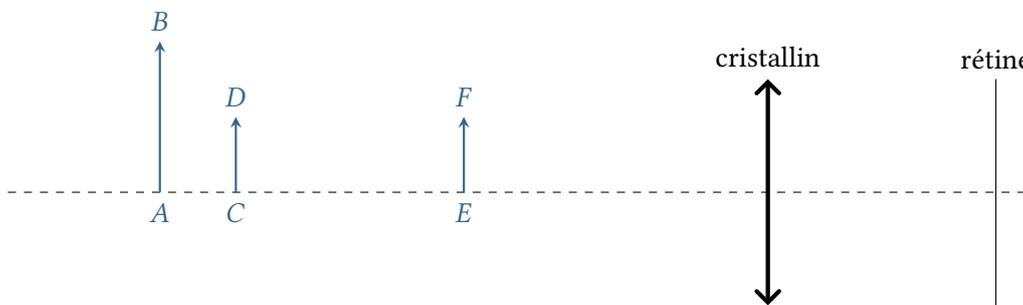


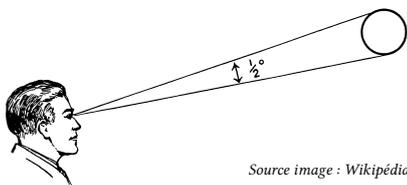
Figure 5 – Illustration de la notion de hauteur apparente.

→ paramètre pertinent pour décrire la hauteur d'un objet : angle

Espace 2



On appelle **hauteur apparente** (ou diamètre apparent, etc.) d'un objet observé à l'œil l'angle formé par les rayons issus de ses deux extrémités.



Source image : Wikipédia

Ordre de grandeur : le diamètre apparent de la Lune ou du Soleil observés à l'œil nu est de l'ordre de $0,5^\circ$. Pour des astres plus petits, l'unité usuelle est la **minute d'arc** : $1' = 1/60$, donc $0,5^\circ = 30'$.

I.D - Complément culturel : défauts de vision

• Myopie

Le cristallin d'un myope est trop convergent, si bien que le punctum proximum d'un myope se trouve plus près de l'œil que pour un emmétrype mais le punctum remotum n'est pas à l'infini, voir figure 6. En effet, contracter le cristallin ne peut que le rendre plus convergent que ce qu'il n'est au repos. Comme il faut rendre l'œil moins convergent, les verres de lunettes sont des lentilles divergentes dont la correction est exprimée par une vergence (le nombre de dioptries) négative. La myopie concerne 30 à 40 % de la population mondiale, avec de fortes variations géographiques (jusqu'à 80 % des jeunes adultes en Asie de l'Est).

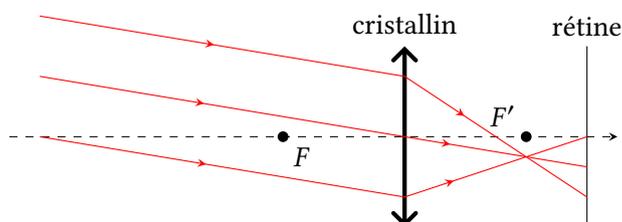


Figure 6 – Formation d'image du punctum remotum par un œil myope qui n'accommode pas.

• Hypermétropie

L'hypermétropie est l'opposée de la myopie : le cristallin d'un hypermétrope n'est pas assez convergent. Par conséquent, le punctum proximum d'un hypermétrope est plus éloigné de l'œil que celui d'un emmétrype, et un hypermétrope doit accommoder pour voir un objet à l'infini, voir figure 7. Cela entraîne une fatigue visuelle pouvant être importante et nécessiter une correction. Comme l'œil doit être rendu plus convergent, les verres de lunettes sont des lentilles convergentes, dont la correction est exprimée par une vergence positive. Ce défaut de vision touche 10 à 15 % des adultes, et une part un peu plus importante des enfants.

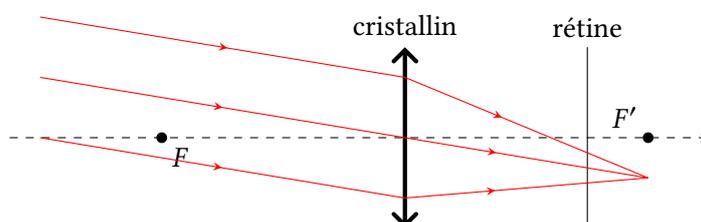


Figure 7 – Formation d'image du punctum remotum par un œil hypermétrope qui n'accommode pas.

• Astigmatie ou astigmatisme

Le cristallin d'un astigmatique n'est plus parfaitement sphérique mais a plutôt une forme de ballon de rugby. Comme le nom de la maladie l'indique, le cristallin n'est alors plus stigmatique et les images qu'il forme sont entachées d'aberrations géométriques. De 20 à 30 % de la population est concernée par l'astigmatie, en général couplée à la myopie ou l'hypermétropie.

• Presbytie

La presbytie, d'un mot grec signifiant « vieillard » ou « ancien », est un trouble de la vision qui rend difficile la focalisation du cristallin, et donc la vision de près. Cela a pour conséquence d'éloigner le punctum proximum. Ce n'est pas une maladie mais un processus de vieillissement normal de l'œil, qui commence dès la naissance mais se manifeste classiquement entre 40 et 45 ans.

• Daltonisme

Le daltonisme est un trouble de la vision des couleurs, qui empêche de distinguer correctement certaines teintes. Il résulte d'une anomalie des cellules photoréceptrices de la rétine appelées cônes, responsables de la perception des couleurs. On distingue trois types de cônes : les cônes L, sensibles au rouge, les cônes M, sensibles au vert, et les cônes S, sensibles au bleu. Selon le type de cônes affecté, la personne daltonienne aura des difficultés à différencier certaines gammes de couleurs. La cause la plus fréquente est génétique, liée à une mutation sur le chromosome X, ce qui explique qu'il touche 8 % des hommes mais seulement 0,5 % des femmes.

II - Lunette astronomique



Un peu d'histoire : La lunette astronomique fut inventée au début du XVII^e siècle, probablement par Hans Lippershey en 1608, puis rapidement perfectionnée par Galilée en 1609. Cet instrument permit des découvertes majeures : les satellites de Jupiter, les phases de Vénus, les reliefs de la Lune et une vision plus précise de la Voie lactée. Ces observations remettaient en cause le système géocentrique et confirmaient l'héliocentrisme copernicien. Toutefois, la lunette présente des limites techniques, notamment les aberrations chromatiques et la difficulté d'agrandir les lentilles. De nos jours, les télescopes à miroirs dominent la recherche scientifique, tandis que la lunette reste prisée des astronomes amateurs pour sa simplicité.

Q



R

Une lunette astronomique est un instrument d'optique subjectif, permettant d'observer à l'œil des objets très éloignés en les grossissant. Il s'agit d'un système optique composé de deux entités distinctes :

- un **objectif** (côté objet), par lequel entre la lumière : c'est un dispositif à plusieurs lentilles, modélisable par une unique lentille convergente (L_1) de grande focale f'_1 de l'ordre de 1 m pour une lunette amateur ;
- un **oculaire** (côté œil), par lequel sort la lumière : dispositif modélisable par une unique lentille convergente (L_2) de petite focale $f'_2 \sim 1$ cm.

L'image A_0B_0 de l'objet par l'objectif est appelée **image intermédiaire**, elle sert d'objet à l'oculaire. On note symboliquement :

$$AB \xrightarrow{(L_1)} A_0B_0 \xrightarrow{(L_2)} A'B'$$

Pour alléger les constructions de rayons, ceux issus d'une extrémité de l'objet sont très souvent supposés parfaitement parallèles à l'axe optique. Il ne reste à tracer que les rayons issus de l'autre extrémité.

• Étude d'une lunette astronomique

M

Application 2 : Lunette astronomique

- 1 - Déterminer la distance devant séparer les deux lentilles.
- 2 - Représenter la marche des rayons dans la lunette sur la figure 8.
- 3 - Le grossissement de la lunette est défini comme le rapport entre le diamètre apparent de l'astre observé avec et sans lunette. L'exprimer en fonction des focales de l'objectif et de l'oculaire. Analyser son signe.

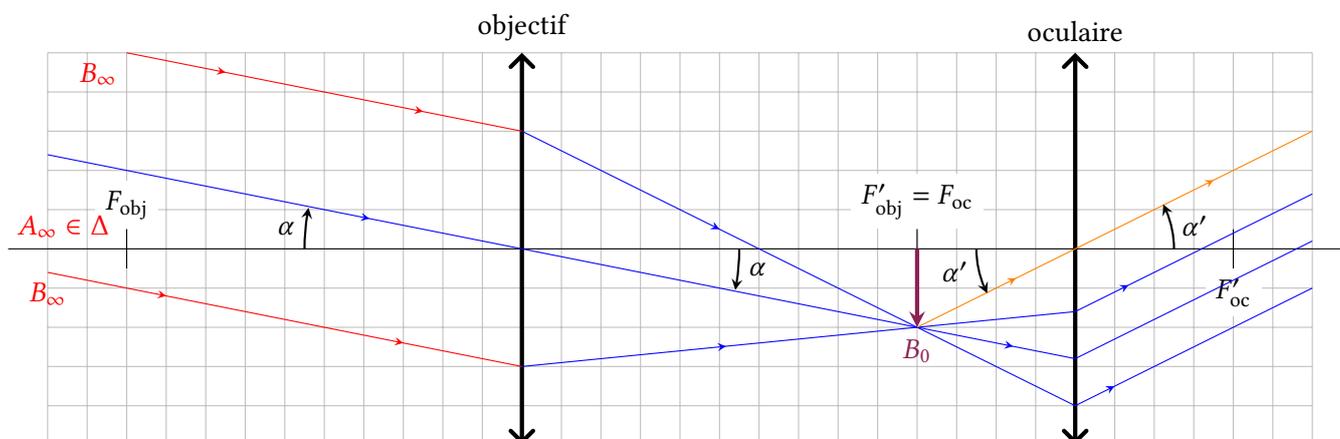


Figure 8 – Marche des rayons dans une lunette astronomique.

Approximation des petits angles :

Pour un angle **en radians** θ tel que $\theta \ll 1$, on peut utiliser les approximations suivantes :

$$\sin \theta \simeq \theta \quad \tan \theta \simeq \theta \quad \cos \theta \simeq 1$$

🚫🚫🚫 **Attention !** Ces approximations ne sont pas valables pour un angle exprimé en degrés !

Cette approximation est illustrée figure 9. C'est pour le sinus qu'elle est la meilleure (écart inférieur à 5 % pour des angles inférieurs à 30°), et pour le cosinus qu'elle est la moins pertinente.

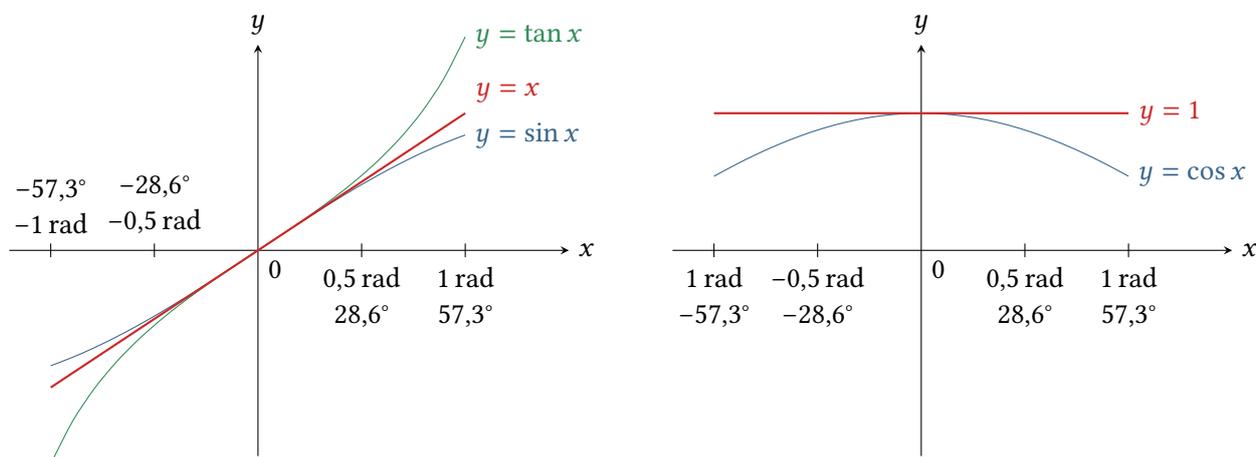


Figure 9 – Approximation des petits angles.

► **Pour approfondir** : L'approximation des petits angles revient à approximer la courbe de la fonction par sa tangente en $x = 0$. En effet, la tangente à la courbe représentative d'une fonction f en $x = a$ a pour équation

$$y = f(a) + f'(a)(x - a).$$

Appliquer cette relation aux fonctions trigonométriques en $a = 0$ conduit exactement aux résultats énoncés ci-dessus. Plus largement, ces approximations viennent de la théorie des développements limités, qui constituent des approximations d'une fonction quelconque par des polynômes : l'approximation des petits angles est ainsi un développement limité d'ordre 1. Vous étudierez les développements limités en cours de maths cette année, et nous aurons de nombreuses occasions de nous en ressuir. ■

• Bilan à retenir

Une lunette astronomique est un instrument **afocal** : elle forme une image à l'infini d'un objet à l'infini.

Le plan focal image de l'objectif est donc confondu avec le plan focal objet de l'oculaire.

Son **grossissement** est défini comme le rapport des diamètres apparents avec et sans lunette, il s'exprime en fonction des focales des lentilles par

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\frac{f'_{\text{obj}}}{f'_{\text{oc}}}$$

Le grossissement est négatif : l'image par la lunette est renversée.

III - Appareil photo



Un peu d'histoire : La première photographie permanente a été obtenue par Nicéphore Niepce en 1826. En 1839, Louis Daguerre invente le daguerréotype, qui produit des images très détaillées sur une plaque métallique argentée, uniques et non reproductibles. La même année, William Fox Talbot met au point le calotype, utilisant du papier sensibilisé et permettant de tirer plusieurs copies à partir d'un négatif, principe fondateur de la photographie argentique. En 1888, George Eastman démocratise la photographie avec le Kodak à film en rouleau. Au XX^e siècle, les progrès incluent la pellicule couleur, les appareils reflex et la miniaturisation. À partir des années 1990, la révolution numérique transforme la photographie, supprimant le film argentique et ouvrant la voie aux appareils compacts puis aux capteurs intégrés dans les smartphones.

III.A - Constitution et modélisation

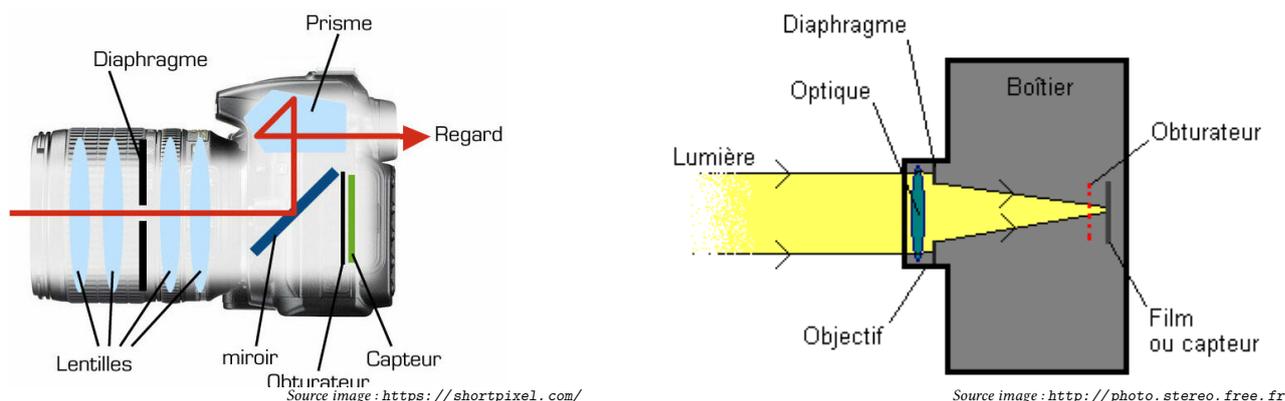


Figure 10 – Constitution d'un appareil photo. Le miroir permettant de dévier la lumière vers le viseur se soulève lors de la prise de la photo, juste avant que l'obturateur ne s'ouvre pour laisser la lumière atteindre le capteur.

(R)

- ▶ L'**objectif** est constitué d'un ensemble de lentilles pouvant se déplacer les unes par rapport aux autres. On le modélise par une unique lentille convergente de focale f' constante. La **mise au point**, c'est-à-dire le réglage de l'appareil permettant d'obtenir une photo nette, se fait en déplaçant l'objectif jusqu'à obtenir une image nette sur le capteur.
- ▶ Un **diaphragme** de diamètre réglable permet de modifier le diamètre apparent de l'objectif. Son diamètre D est souvent donné via le **nombre d'ouverture** $N = f'/D$. Dans la modélisation, le diaphragme est supposé accolé à la lentille modélisant l'objectif.
- ▶ Le **capteur** est constitué d'une matrice de cellules photosensibles : les **pixels**, abréviation de « picture element ». La précision de la photo prise est bien sûr due aux dimensions et à la disposition des pixels, quantifiées par le **cercle de confusion** qui définit la plus petite tâche que le capteur est capable de discerner. La durée pendant laquelle le capteur reçoit de la lumière par ouverture de l'obturateur est appelée **temps de pose** ou **durée d'exposition**.

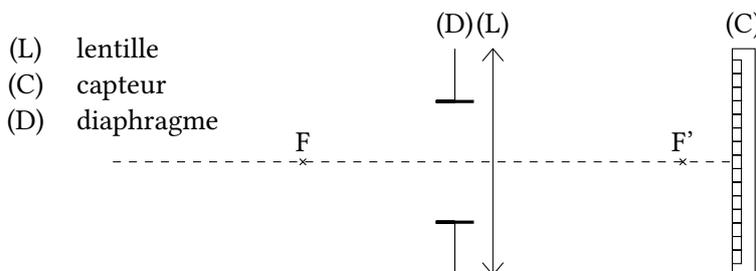


Figure 11 – Modélisation d'un appareil photo.

III.B - Champ



On appelle **champ** la zone de l'espace visible sur la photo, c'est-à-dire dont l'image se forme sur le capteur.



↪ le capteur étant de taille fixe, le champ est directement lié au grandissement par l'objectif : plus le grandissement est élevé, plus le champ est réduit.

Observation d'images : voir figure 12.



$$f' = 18 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$

$$f' = 50 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$

$$f' = 135 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$

Figure 12 – Influence de différents paramètres sur le champ.



Utiliser un objectif de plus grande focale permet d'obtenir un champ plus réduit.



Interprétation : voir figure 13.



impact de la focale sur le grandissement ↪ formule de grandissement

$\gamma = -f/\overline{FA} = f'/\overline{FA}$ avec $\overline{FA} = \text{cte}$ car déplacer l'objectif ne change quasiment pas la distance à la cascade.

Conclusion : $|\gamma|$ augmente si f' augmente.

Espace 3

Remarque : peut-on raisonner avec la deuxième formule de grandissement $\gamma = -\overline{F'A'}/f'$?

Non, car déplacer l'objectif pour refaire la mise au point change notablement la distance $\overline{F'A'}$.

Espace 4

III.C - Exposition



L'**exposition** représente la luminosité de la photo.

Elle est directement liée à la quantité de lumière ayant atteint le capteur pendant le temps de pose.



Observation d'images : voir figure 14.



Plus le temps de pose est grand, et plus le diaphragme est ouvert, plus la photo est exposée ... mais un temps de pose plus long peut générer un flou sur les sujets en mouvement, un compromis est alors à trouver.



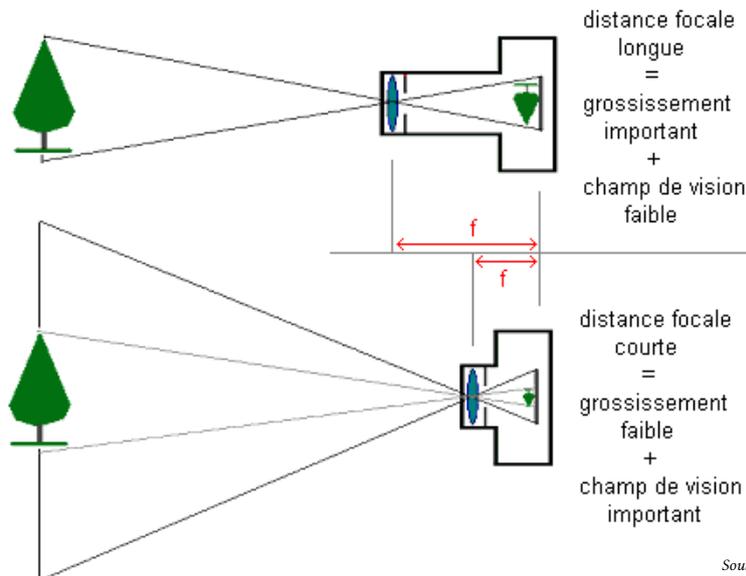
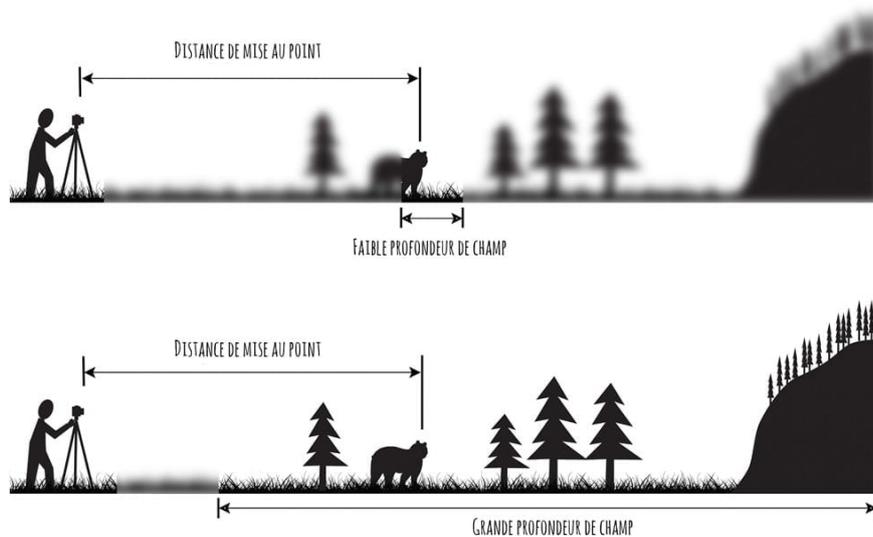


Figure 13 – Lien entre champ et focale de l'objectif.

III.D - Profondeur de champ

R

On appelle **profondeur de champ** la distance séparant le point le plus proche et le plus éloigné qui apparaissent nets sur la photo.



R

→ à quelle condition un point apparaît-il net ?

son image sur le capteur doit être perçue comme un point, c'est-à-dire la tâche lumineuse formée sur le capteur doit être de diamètre inférieur au cercle de confusion du capteur (\approx taille d'un pixel).

Espace 5

Observation d'images : voir figure 15.

- le flou de l'arrière plan peut-il être dû aux différents temps de pose ?
non car bâtiment fixe

Espace 6



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{1000} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{80} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 20, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



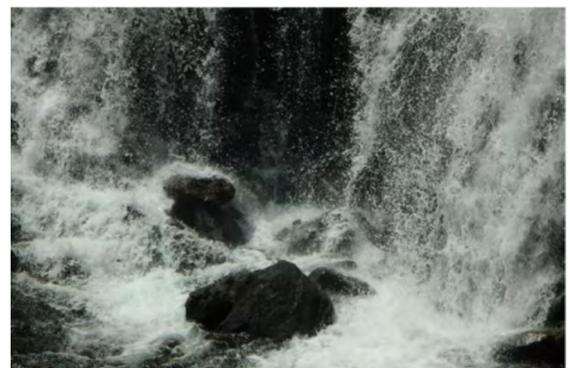
$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 3,5, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 135 \text{ mm}, N = 32, \tau = \frac{1}{6} \text{ s}$$



$$f' = 135 \text{ mm}, N = 5,6, \tau = \frac{1}{640} \text{ s}$$

Figure 14 – Influence de différents paramètres sur l'exposition d'une photo.



$$f' = 85 \text{ mm}, N = 5,6, \tau = \frac{1}{320} \text{ s}$$

$$f' = 85 \text{ mm}, N = 20, \tau = \frac{1}{160} \text{ s}$$

$$f' = 85 \text{ mm}, N = 36, \tau = \frac{1}{125} \text{ s}$$

Figure 15 – Influence de différents paramètres sur la profondeur de champ.

- ▷ quel paramètre semble déterminant sur la profondeur de champ ?
ouverture du diaphragme

Espace 7

- ▷ question subsidiaire : pourquoi modifier le temps de pose entre les photos ?
pour garder une exposition constante

Espace 8

R



Plus le diaphragme est fermé, c'est-à-dire plus le nombre d'ouverture $N = f'/D$ est grand, plus la profondeur de champ est grande.

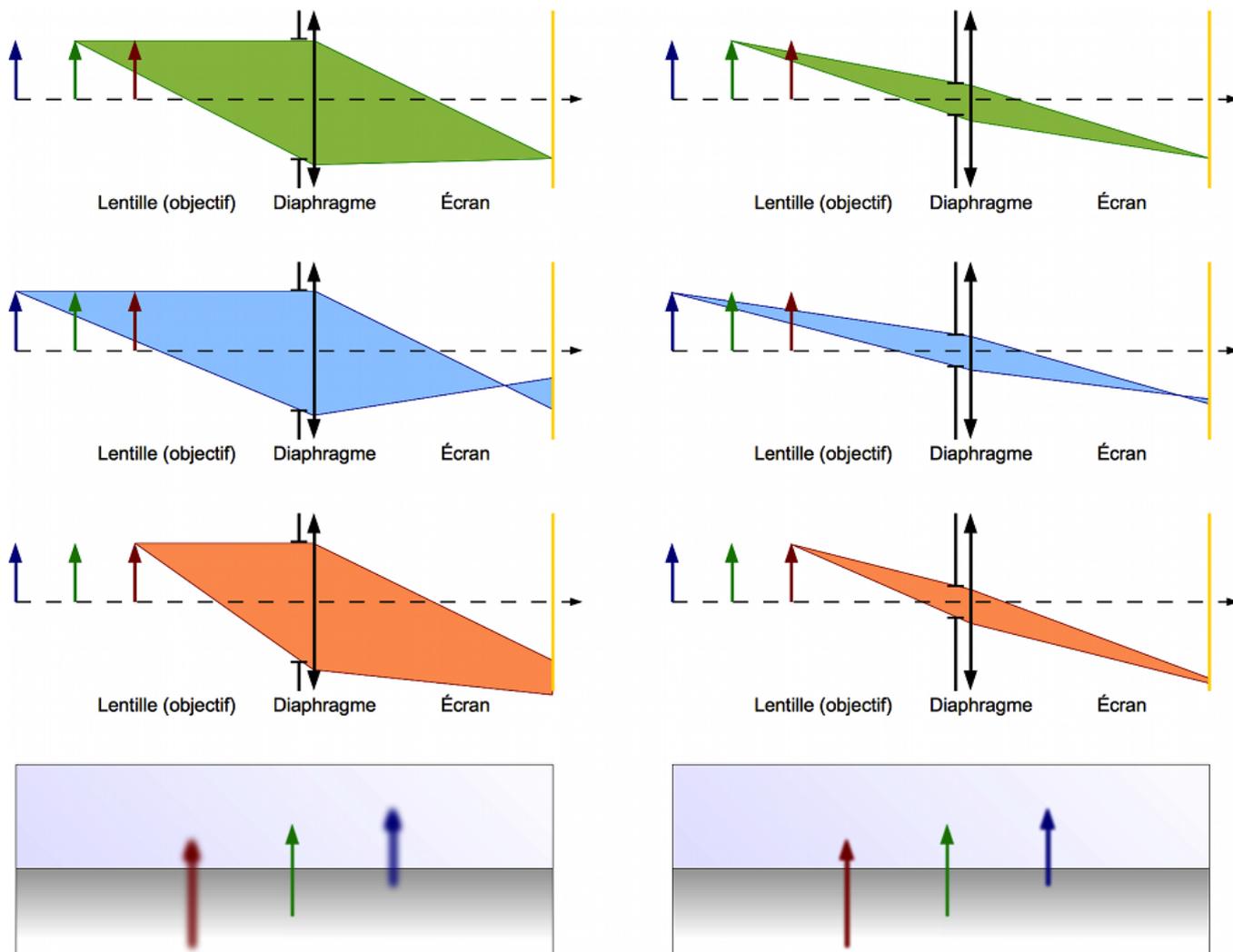
Q

Interprétation : plus le diaphragme est fermé, voir figure 16, plus la tâche formée sur le capteur par un point qui n'est pas dans le plan de mise au point est petite, et donc plus elle a de chance d'apparaître nette si son diamètre devient inférieur à celui du cercle de confusion.

Construction géométrique de la profondeur de champ :



L'animation Geogebra ci-contre (scanner ou cliquer) permet de tracer les rayons extrêmes issus d'un point objet A , et donc de comparer la tâche qu'il forme sur le capteur au cercle de confusion. Le diamètre de l'objectif et sa focale sont modifiables également.



Source image : <https://media4.obspm.fr>

Figure 16 – Lien entre ouverture du diaphragme et profondeur de champ.

Application 3 : Construction de la profondeur de champ sur un schéma

La figure 17 représente un appareil photo faisant la mise au point sur un objet AB (seul le point A est représenté). Le but est de construire graphiquement la profondeur de champ associée au réglage représenté.

- 1 - Notons A_1 le point de l'axe optique dont l'image A'_1 est située la plus loin *derrière* le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma *du haut*, placer A'_1 , puis construire son antécédent A_1 par l'objectif.
- 2 - Notons A_2 le point de l'axe optique dont l'image A'_2 est située la plus loin *devant* le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma *du bas*, Placer A'_2 , puis construire son antécédent A_2 par l'objectif.
- 3 - En déduire la profondeur de champ en combinant les deux schémas.

Méthode de construction des antécédents : les points A'_1 et A'_2 étant sur l'axe optique, il faut commencer par placer un point B'_1, B'_2 hors de l'axe, puis construire son antécédent B_1, B_2 puis en déduire A_1 et A_2 par projection ... ce que je n'ai pas fait sur la figure 17 où les points sont placés par le calcul.

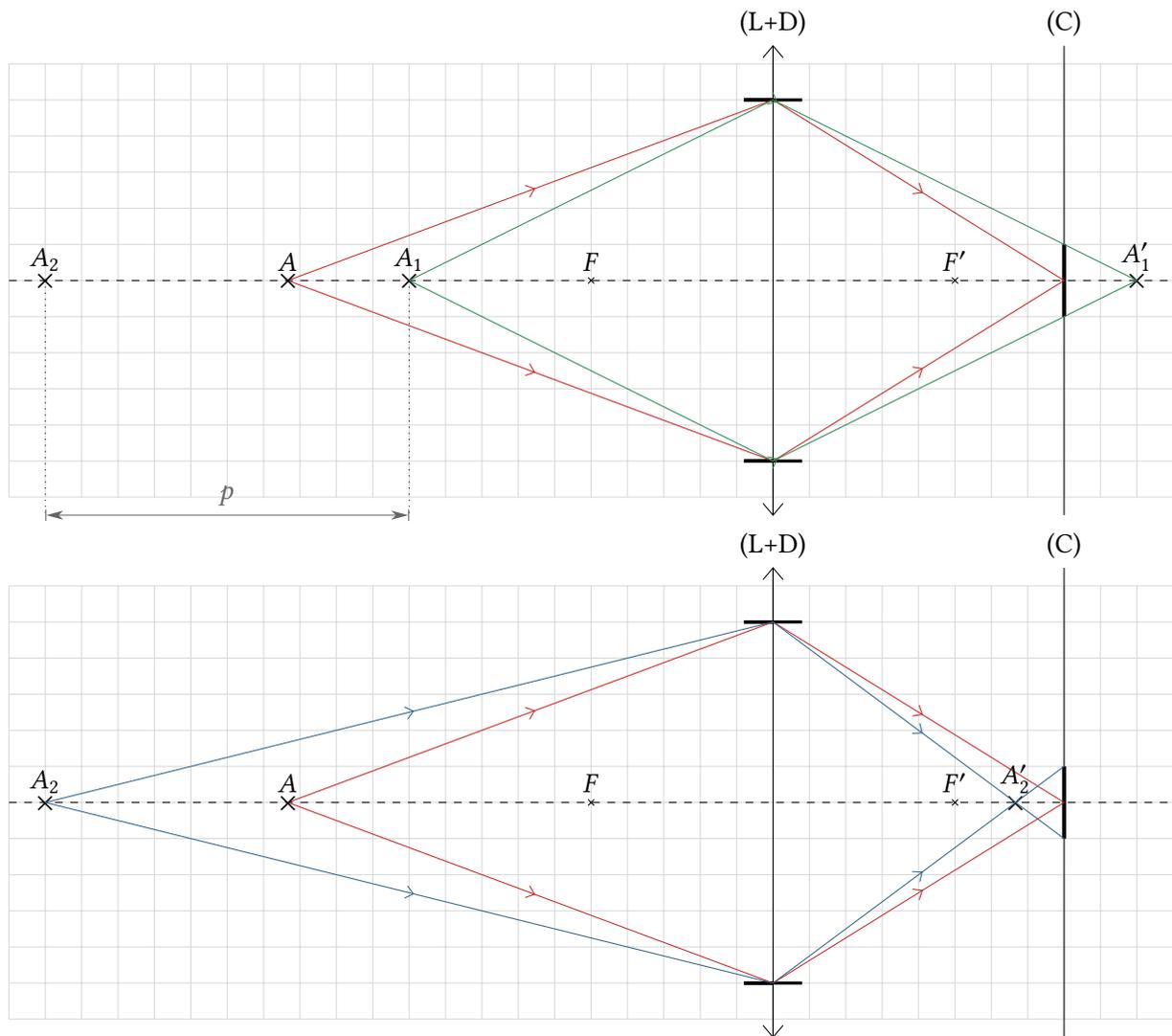


Figure 17 – Construction géométrique de la profondeur de champ. Le trait épais sur le capteur (C) matérialise le diamètre du cercle de confusion.