CHAPITRE 6B

Caractéristiques des lentilles minces

Le sens de la vue nous apporte des informations sur notre environnement à travers la perception des couleurs, des formes, des distances et du mouvement. Cependant, même dans le cas optimal où un individu est dépourvu de défaut de vision, il ne peut pas percevoir les détails d'objets trop lointains ou trop petits.

L'emploi d'un simple morceau de verre poli en forme de lentille peut améliorer considérablement la vision de petits objets, qui apparaissent grossis à travers lui : nous voici en possession d'une loupe.

Ce même instrument, utilisé différemment, permet de projeter sur un écran l'image d'un objet émetteur de lumière. C'est le principe sur lequel se fondent les vidéoprojecteurs et le cinématographe, qui permettent d'observer une image fortement agrandie par rapport à l'objet.

L'image projetée peut être enregistrée par des procédés électroniques avec un capteur, comme dans un appareil photographique, une caméra ou un téléphone. Ce principe n'est en fait pas si éloigné de celui du fonctionnement de l'œil, où le cristallin joue le rôle de lentille et la rétine celui d'un écran. Une lentille de contact ou un verre de lunette placé devant le cristallin peut d'ailleurs corriger un défaut de vision.

Afin de comprendre le fonctionnement d'un grand nombre d'instruments d'optique, nous allons étudier physiquement les lentilles. Les lois de Snell-Descartes vues dans le chapitre précédent permettent de comprendre leur fonctionnement, mais il est relativement pénible de les appliquer dans ce contexte. C'est la raison pour laquelle on étudie traditionnellement les lentilles en s'appuyant sur quelques lois empiriques (déduites de l'expérience). Nous suivrons cette approche dans ce chapitre.

1 Lentilles minces

1.1 Modèle de la lentille mince

En optique, une **lentille** désigne un milieu transparent délimité par deux surfaces dont l'une au moins n'est pas plane.

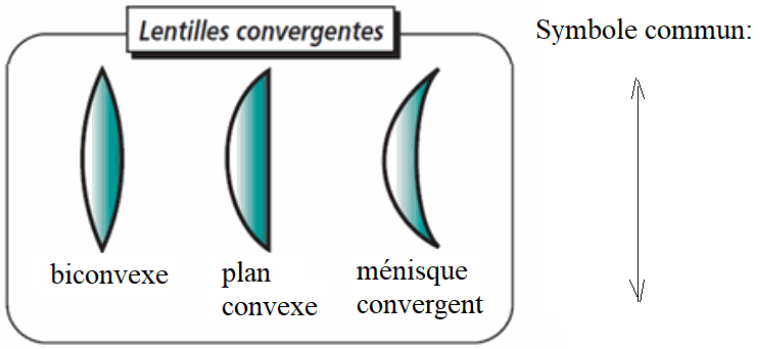
Elle est souvent sculptée dans du verre, et utilisée dans l'air. Il y a alors deux dioptres traversés par la lumière : un dioptre air-verre, et un dioptre verre-air. Les indices de réfraction de l'air et du verre étant différents, les rayons lumineux qui traversent la lentille sont réfractés au niveau des deux interfaces.

C'est cette déviation de la lumière qui fait l'intérêt des lentilles : en faisant se croiser plusieurs rayons, elle permet de produire des **images**.

Les lentilles que nous étudierons sont **minces**, autrement dit nettement plus hautes qu'épaisses.

1.2 Lentilles minces convergentes

Certaines lentilles minces sont **à bords minces**. Les principales géométries, vues en coupe par la tranche, sont représentées ci-dessous.



Les lentilles minces à bords minces sont **convergentes** : des rayons lumineux incidents parallèles à l'axe optique (issus d'un objet situé "à l'infini" en amont de la lentille) émergent de la lentille en direction d'un même point appelé **foyer image**, noté F' sur les schémas.

Un rayon lumineux passant par le **centre optique** O de la lentille n'est pas dévié par cette dernière.

Par le centre optique on fait passer l'**axe optique**, une droite perpendiculaire à la lentille et orientée de gauche à droite par convention. La source lumineuse se trouve à gauche de la lentille sur les schémas, la lumière se propage dans le sens de l'axe optique.

Le point symétrique du foyer image par le centre de la lentille s'appelle le **foyer objet**, noté F. Le principe de retour inverse de la lumière implique que les rayons lumineux issus d'un point objet situé au niveau du foyer objet émergent de la lentille parallèlement à l'axe optique. L'expérience montre que c'est bien le cas.

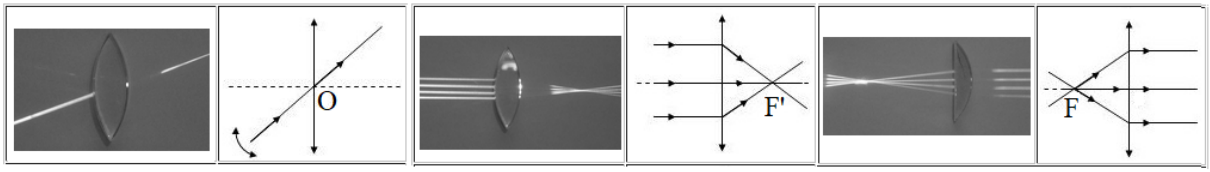
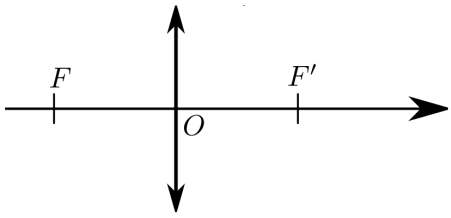


FIGURE 1 – Les trois points caractéristiques d'une lentille mince convergente

La **distance algébrique** $\overline{\mathrm{OF}'}$, appelée **distance focale** de la lentille, est notée f'.

Ainsi, le schéma de base pour une lentille convergente est le suivant :

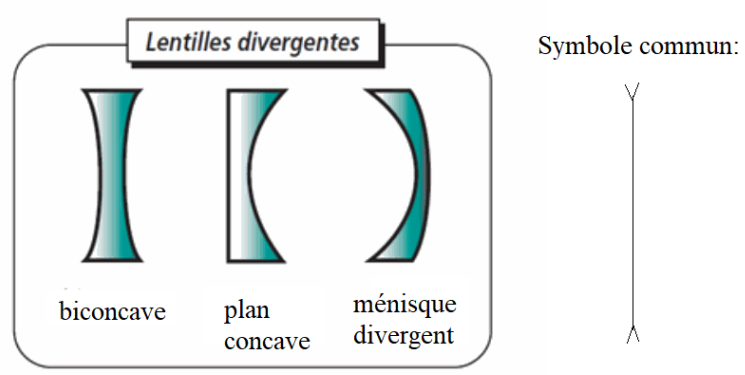


L'expérience montre que les lentilles convergentes permettent de former une image sur un écran.

https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/lentille_mince.php

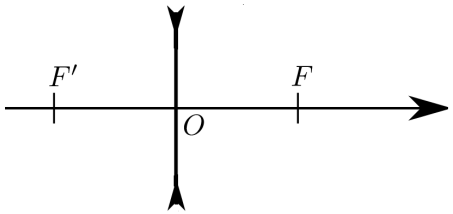
1.3 Lentilles minces divergentes

Certaines lentilles minces sont **à bords épais**. Les principales géométries, vues par la tranche, sont représentées ci-dessous.



Ces lentilles sont **divergentes** : des rayons lumineux incidents parallèles à l'axe optique émergent de la lentille en semblant s'éloigner d'un même point : le foyer image F', qui se trouve avant la lentille. Tous les rayons incidents dirigés vers le foyer objet F ressortent de la lentille parallèlement à l'axe optique.

Le schéma de base pour une lentille divergente est le suivant :



https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/lentille_sorte.php

L'expérience montre que les lentilles divergentes ne permettent pas de former une image sur un écran.

1.4 Stigmatisme approché, conditions de Gauss

Contrairement à un un **miroir plan**, une lentille mince n'est pas rigoureusement **stigmatique** : l'image d'un point par une la lentille n'est pas un point, mais une tache avec une certaine étendue, comme on peut le visualiser sur l'animation ci-dessous :

https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/stigmatisme_lentille.php

Cela n'est pas gênant, à condition que la taille de la tache lumineuse ne dépasse pas celle du plus petit élément du détecteur : cellule rétinienne (cône ou bâtonnet) pour un œil, pixel pour un capteur électronique. Dans ce cas, l'image reste aussi nette que le permet la résolution du détecteur. Pour observer une image nette, il suffit donc en pratique de se placer dans des conditions de **stigmatisme approché**.

L'expérience montre qu'une lentille mince permet un stigmatisme approché à condition de se placer dans des conditions particulières, appelées **conditions de Gauss**.

Pour les satisfaire, les rayons lumineux doivent être **paraxiaux**, autrement dit :
▷ proches de l'axe optique ;
▷ peu inclinés par rapport à l'axe optique.
Les conditions de Gauss permettent aussi l'**aplanétisme** : un objet plan perpendiculaire à l'axe optique donne une image plane et perpendiculaire à l'axe optique.

https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/stigmatisme_lentille.php

1.5 Règles de construction des rayons

On pourrait trouver la position de l'image en utilisant les lois de Snell-Descartes, mais cela s'avérerait laborieux. L'expérience montre que quand on se place dans les **conditions de Gauss**, on peut utiliser des règles empiriques simples pour déterminer la position de l'image d'un point objet à travers une lentille.
https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/construction_lentille.php

On suppose que l'objet est plan et perpendiculaire à l'axe optique. Il s'étend d'un point A situé sur l'axe optique à un point B en dehors de l'axe optique. On se place dans les conditions de Gauss afin de bénéficier du stigmatisme approché. L'image de B par la lentille mince est un point, noté B', situé à l'intersection des rayons issus de B, ou de leurs prolongements s'ils ne se croisent pas.

Les **règles de construction** permettent de tracer trois rayons particuliers partant de B, et donc de déterminer la position de B' comme intersection de deux d'entre eux au choix du fait du stigmatisme approché :
▷ Le rayon issu de B, passant par le centre optique O, n'est pas dévié par la lentille.
▷ Le rayon issu de B, passant par le foyer objet F, émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique.
▷ Le rayon issu de B et parallèle à l'axe optique, émerge de la lentille en direction du foyer image F'.

L'image est perpendiculaire à l'axe optique si l'objet l'est (condition d'**aplanétisme**), on trouve donc la position du point A', image de A par la lentille convergente, en repérant le point à la verticale de B' (sa projection orthogonale) sur l'axe optique.

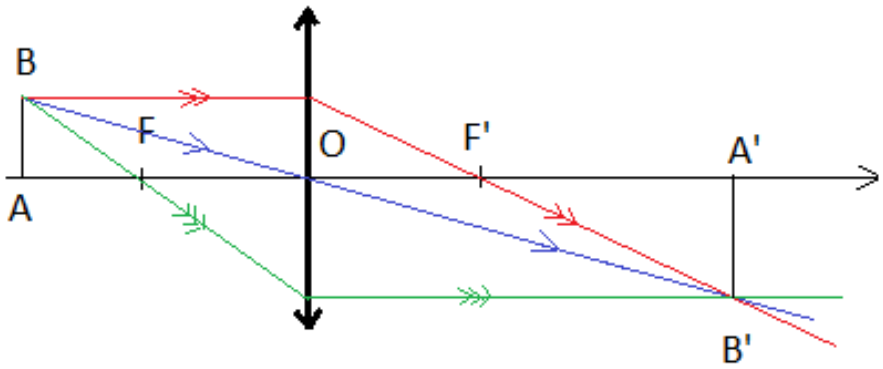


FIGURE 2 – Illustration des règles de tracé de rayons dans le cas d'un objet AB situé avant le foyer objet d'une lentille convergente

Si les règles de construction ne peuvent pas être appliquées telles quelles, il faut éventuellement adapter leur énoncé pour dire qu'un rayon pointe vers B au lieu d'être issu de ce dernier, ou semble provenir d'un foyer, ou encore que c'est le prolongement virtuel du rayon qui vérifie la règle, comme l'illustre l'exercice d'application ci-dessous.

Les **rayons réels** sont tracés en trait plein et les **rayons virtuels** en pointillés.

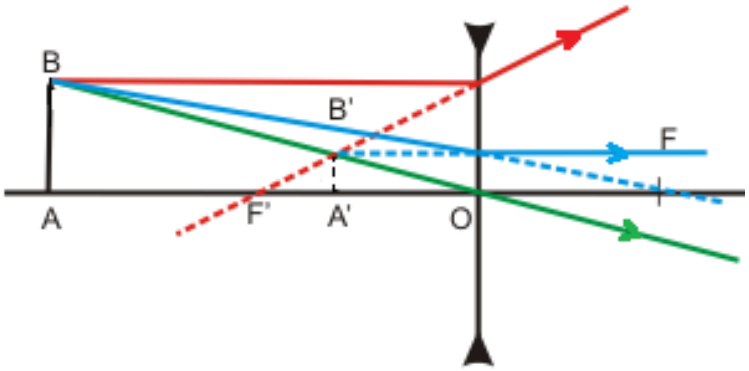


FIGURE 3 – Illustration des règles de tracé de rayons dans le cas d'un objet AB situé avant le foyer image d'une lentille divergente

Exercice d'application 1 :
CAPACITÉS TRAVAILLÉES :
Utiliser les définitions et les propriétés du centre optique, des foyers, de la distance focale. Construire l'image d'un objet réel ou virtuel situé à distance finie ou infinie à l'aide des rayons lumineux

1. Pour une lentille convergente, faire la construction par tracé de rayons de l'image d'un objet plan AB perpendiculaire à l'axe optique dans les configurations suivantes :
- ▷ objet situé avant le foyer objet ;
- ▷ objet situé au niveau du foyer objet ;
- ▷ objet situé entre le foyer objet et le centre optique ;
- ▷ objet situé entre le centre optique et le foyer image ;
- ▷ objet situé au niveau du foyer image ;
- ▷ objet situé après le foyer image.

2. Faire la construction dans toutes les configurations possibles dans le cas d'une lentille divergente. Attention : le foyer image est alors situé avant la lentille !

3. Un objet situé à l'infini donne lieu à un faisceau de rayons parallèles les uns aux autres. Faire la construction des rayons après la lentille pour une lentille convergente et pour une lentille divergente, pour un faisceau incident parallèle à l'axe optique.

Dans certaines situations expérimentales, un faisceau de rayons parallèles entre eux mais inclinés par rapport à l'axe optique entre dans une lentille. Pour tracer les rayons après la lentille, on se sert de la propriété suivante : tous les rayons issus de la lentille se croisent dans le **plan focal image**, qui est le plan perpendiculaire à l'axe optique contenant le foyer image. La clé du tracé est la suivante : on se sert du rayon

de ce faisceau passant par le centre optique et on détermine son intersection avec le plan focal image, ce qui permet ensuite de tracer les autres rayons.

4. Faire la construction dans le cas d'une lentille convergente, puis dans le cas d'une lentille divergente.

1.6 Caractériser une image

On introduit du vocabulaire pour caractériser l'image obtenue. Elle est :

▷ **droite** si elle est dans le même sens que l'objet, sinon elle est dite **renversée**.

▷ **réelle** si elle se situe après la lentille, **virtuelle** si elle se situe avant la lentille.

▷ **agrandie** si elle est plus grande que l'objet, **rétrécie** si elle est plus petite.

Une image réelle peut être observée sur un écran. Elle y apparaît nette si elle est dans le plan de l'écran. Sinon, il faut **faire la mise au point**. On peut, au choix :

▷ modifier la géométrie du montage : on déplace l'objet ou la lentille pour ramener l'image sur l'écran, ou on déplace l'écran jusqu'à-ce qu'il se superpose à l'image (principe d'un projecteur) ;

▷ modifier les propriétés physiques de la lentille (indice de réfraction, courbure des faces) pour modifier la distance focale (principe de l'accommodation par l'œil humain), ou changer de lentille.

Une image virtuelle ne peut pas être observée sur un écran. Pour la voir, on place l'œil de l'autre côté de la lentille et on regarde l'image. Dans le cas d'une loupe, elle apparaît grossie par rapport à l'objet.

Une grandeur permettant de caractériser quantitativement ces différents aspects est le **grandissement transversal**, noté γ (lettre grecque qui se prononce "gamma"). C'est une grandeur sans unité définie comme le quotient de la taille algébrique $\overline{A'B'}$ de l'image et de la taille algébrique $\overline{AB}$ de l'objet :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}.$$

Pour rappel, une **distance algébrique** entre deux points est comptée positivement si les deux points sont rencontrés dans l'ordre où ils sont notés, suivant le sens positif conventionnel (de gauche à droite le long de l'axe optique et de bas en haut perpendiculairement à ce dernier), et négativement sinon.

	$\gamma > 0$	$\gamma < 0$
$\lvert\gamma\rvert < 1$		
$\lvert\gamma\rvert > 1$		

FIGURE 4 – Caractéristiques de l'image en fonction de la valeur du grandissement

En appliquant le théorème de Thalès, on démontre la propriété suivante :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}.$$

Ainsi, le signe du grandissement permet aussi de prévoir le caractère réel ou virtuel de l'image, connaissant celui de l'objet.

1.7 Relation de conjugaison de Descartes

On attribue à Descartes une formule qui permet de prévoir par le calcul la position de l'image, connaissant celle de l'objet et la distance focale $f' = \overline{OF'}$ de la lentille.

La **relation de conjugaison de Descartes** s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} = V$$

où la **vergence** V désigne l'inverse de la distance focale de la lentille :

$$V = \frac{1}{f'}.$$

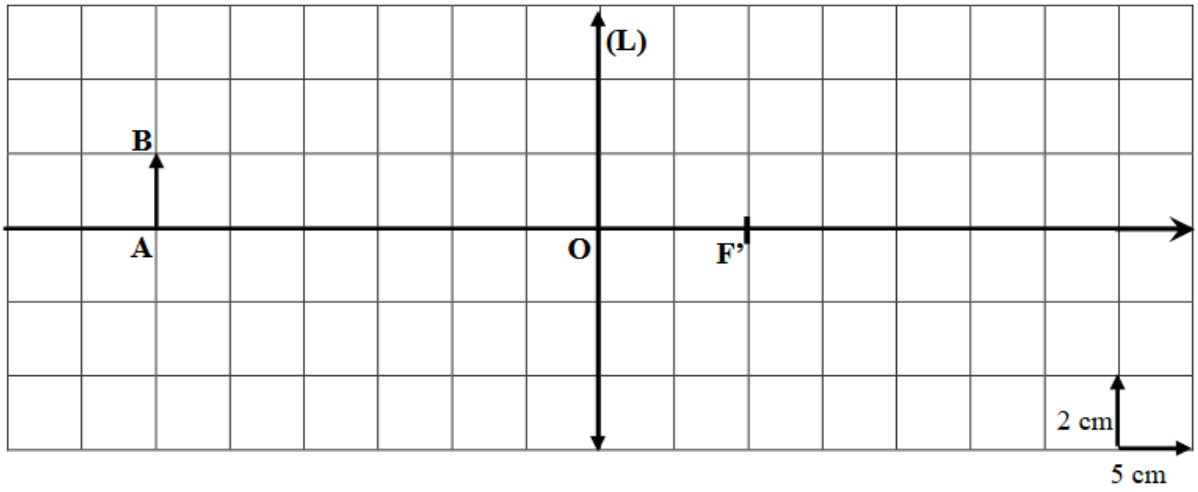
Elle s'exprime en dioptrie (δ) si f' est exprimée en mètre.

Exercice d'application 2 :

CAPACITÉS TRAVAILLÉES :

Construire l'image d'un objet réel situé à distance finie à l'aide des rayons lumineux, identifier sa nature. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal.

Le schéma ci-dessous représente une lentille convergente (L), son axe optique, son centre optique O, son foyer image F' et un objet plan AB. L'échelle est indiquée en bas à droite.



1. Placer sur le schéma le foyer objet F de la lentille. Déterminer la distance focale f' de la lentille à partir du schéma.
2. Construire $A'B'$, l'image de AB par la lentille convergente.

3. Donner trois adjectifs qui qualifient l'image $\mathrm{A'B'}$.
4. Définir, puis calculer le grandissement γ.
5. Déterminer la distance algébrique $\overline{\mathrm{OA'}}$ à partir de la construction graphique.
6. Donner la relation de conjugaison de Descartes et la transformer pour exprimer $\overline{\mathrm{OA'}}$ en fonction de $\overline{\mathrm{OA}}$ et f'.
7. Calculer $\overline{\mathrm{OA'}}$. Commenter.
8. Calculer le grandissement à partir de la relation $\gamma = \frac{\overline{\mathrm{OA'}}}{\overline{\mathrm{OA}}}$. Commenter.

2 Modèles de quelques dispositifs optiques

Les instruments d'optique comportent souvent une ou plusieurs lentille(s). Les connaissances acquises sur ces dernières vont nous permettre d'étudier :
▷ un instrument d'optique naturel : l'**œil humain** ;
▷ un instrument d'optique artificiel : l'**appareil photographique** ;
▷ un instrument d'optique comportant deux lentilles : la **lunette astronomique**.

2.1 L'œil humain

2.1.1 Modèle anatomique de l'œil

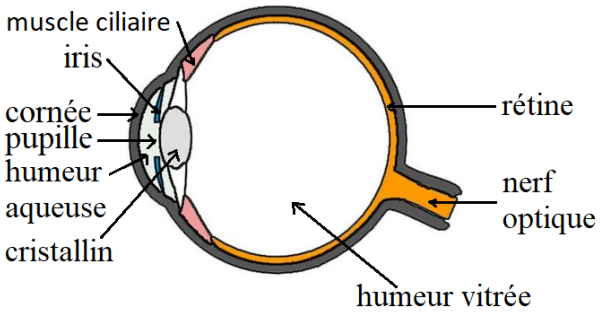
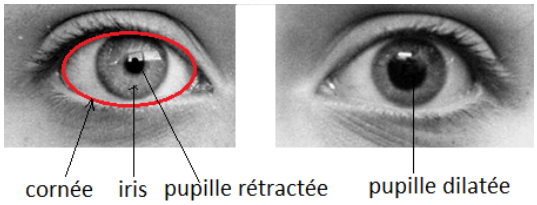


FIGURE 5 – Schéma d'un œil humain vu de dessus, en coupe

▷ La cornée est la membrane transparente qui délimite l'entrée de l'œil.
▷ L'humeur aqueuse et l'humeur vitrée sont des milieux liquides transparents, de propriétés proches de celles de l'eau.
▷ L'iris est la partie colorée de l'œil, visible de l'extérieur.
▷ La pupille est une ouverture circulaire dans l'iris, vue noire depuis l'extérieur. L'iris permet de dilater ou rétracter la pupille afin de laisser plus ou moins de lumière entrer dans l'œil. Cette fonction a pour but d'éviter les éblouissements tout en maintenant l'œil ouvert, ou de faciliter la vision nocturne.



▷ La cornée et le cristallin dévient les rayons lumineux pour former une image sur la rétine.

▷ La rétine est le fond de l'œil, elle est recouverte de cellules photosensibles (sensibles à la lumière) de plusieurs types : les cônes qui permettent la vision des couleurs et les bâtonnets qui permettent la vision nocturne en nuances de gris.

▷ L'information reçue par ces cellules est transmise au cerveau via le nerf optique.

▷ Les muscles ciliaires peuvent déformer le cristallin, ce qui permet de former l'image d'objets proches sur la rétine et donc de voir net.

2.1.2 Modèle physique de l'œil

Une modélisation de l'œil souvent utilisée en optique, appelée **œil réduit**, est constituée des trois éléments suivants :

▷ un diaphragme, obstacle creux circulaire d'ouverture réglable, qui modélise l'iris ;

▷ une lentille mince convergente de vergence variable, qui modélise l'association cornée-cristallin ;

▷ un capteur à une distance fixe de cette lentille, qui modélise la rétine.



FIGURE 6 – Schéma d'un diaphragme : trou circulaire de taille réglable

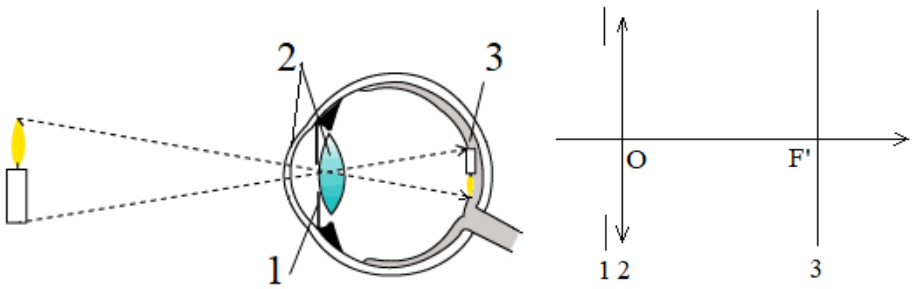


FIGURE 7 – Gauche : modèle biologique simplifié ; droite : modèle physique

L'image sur la rétine est rétrécie et renversée, le cerveau la remet mentalement à l'endroit lorsqu'il traite l'information pour permettre la vision, tout en recréant une perception des tailles et des distances réaliste.

2.1.3 Mécanisme de l'accommodation

Pour voir net, l'image d'un objet doit se former sur la rétine.

Dans l'œil, la distance entre le cristallin et la rétine est fixe, elle est égale à la distance focale la lentille mince convergente qui modélise l'association de la cornée et du cristallin. Ainsi, un œil au repos permet d'observer, sans se fatiguer, des objets situés à une distance infinie (en pratique, à plusieurs mètres).

Lorsque la distance entre l'œil et l'objet varie, le cristallin se déforme pour que l'image reste sur la rétine. Cette déformation du cristallin permet en effet de modifier la distance focale. Ce mécanisme est appelé **accommodation**.

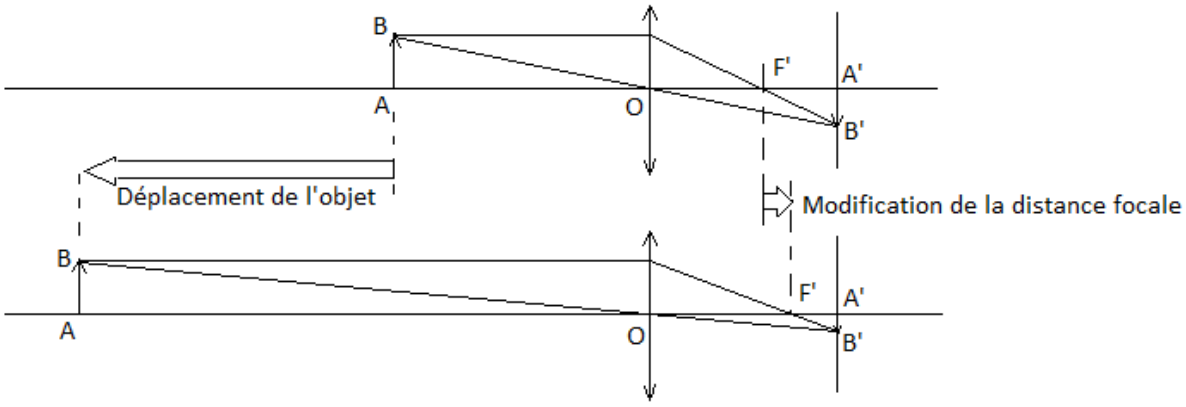


FIGURE 8 – Illustration du mécanisme d'accommodation

Ce schéma permet aussi de comprendre pourquoi on voit plus petits les objets qui se trouvent plus loin : c'est parce que la taille de l'image sur la rétine est plus petite.

2.1.4 Zone de vision nette et limite de résolution angulaire

Le **punctum remotum** (P.R.) désigne le point le plus éloigné pouvant donner une image nette sur la rétine. Cette situation correspond à un œil au repos.

Un œil **emmétrope** (sans défaut de vision) a une distance focale f' qui correspond exactement à la profondeur de l'œil. Le punctum remotum se trouve donc à l'infini.

Lorsque l'objet se trouve plus près que le punctum remotum, l'œil accommode : le cristallin se courbe afin de former à chaque instant une image sur la rétine grâce à une modification de la distance focale. Toutefois, la courbure du cristallin ne peut excéder une certaine limite. Le point le plus proche qu'on peut observer en accommodant porte le nom de **punctum proximum** (P.P.).

Dans les applications numériques, on prend une distance entre l'œil et le P.P. :

$$d_{\text{P.P.}} = 25 \text{ cm}.$$

Deux points A et B d'un objet peuvent être vus distinctement si leur **diamètre angulaire** α est supérieur à la **limite de résolution angulaire** de l'œil :

$$\alpha > \alpha_{\text{min}} \sim (1/60)^\circ = 1' = 3 \times 10^{-4} \text{rad}.$$

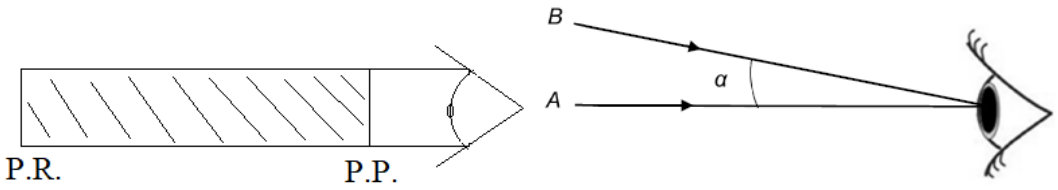


FIGURE 9 – Gauche : zone de vision nette ; droite : définition du diamètre angulaire α

2.2 L'appareil photographique

Le boîtier d'un appareil photographique comporte principalement :

▷ un **diaphragme** (D) de diamètre réglable, qui permet de contrôler la quantité de lumière qui pénètre dans l'appareil ;

▷ un **objectif**, modélisé par une lentille mince convergente (L) de focale f' ;

▷ un **capteur** (C), situé derrière la lentille, à une distance d réglable (par mise au point) entre d_{min} et d_{max}, en fonction de la distance entre l'objectif et l'objet à photographier, la valeur $d_{min} = f'$ étant utilisée quand l'objet est à l'infini.

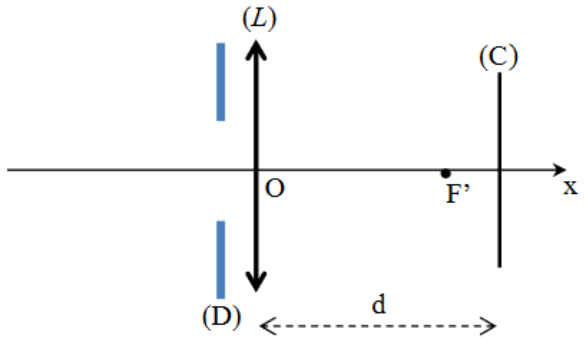


FIGURE 10 – Schéma du modèle d'un appareil photographique

L'image d'un point par l'objectif d'un appareil photographique est nette si sa taille ne dépasse pas celle d'un pixel du capteur. Si on effectue la mise au point sur un plan à une distance D de l'appareil, les plans situés plus loin ou plus près peuvent aussi donner des images nettes.

La **profondeur de champ** est la distance entre le plan le plus proche et le plan le plus lointain donnant des images nettes. Elle augmente quand la distance de mise au point D augmente, quand le diaphragme est moins ouvert, et quand la focale f' diminue.



FIGURE 11 – Grande (gauche) et faible (droite) profondeur de champ

2.3 La lunette astronomique

Une **lunette astronomique** est un instrument d'optique contenant au moins deux lentilles, qui sert à observer des astres (par exemple la Lune).

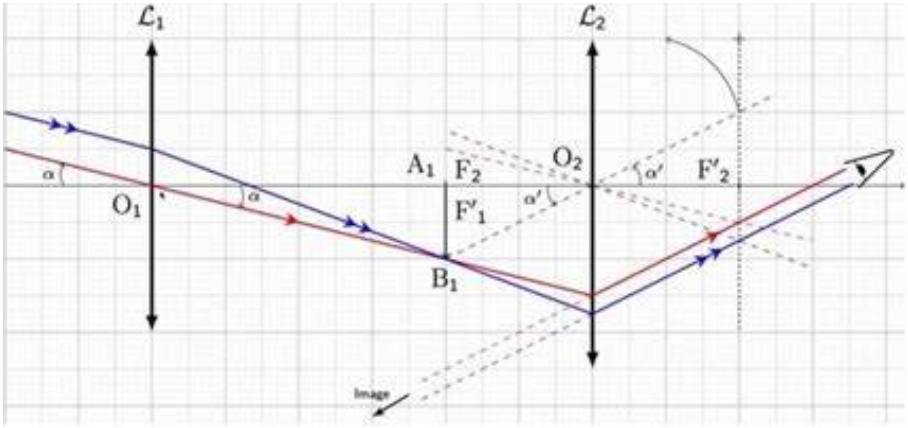
Un modèle simple de lunette est constitué de deux lentilles convergentes : l'**objectif** (L_1) du côté de l'objet et l'**oculaire** (L_2) du côté de l'œil. L'objectif forme une image qui devient un objet pour l'oculaire.

On peut considérer que l'objet à observer se situe à une distance infinie, de sorte que son image à travers l'objectif se forme dans le plan focal image de ce dernier. Or, pour que les rayons ressortent de l'oculaire parallèles entre eux comme s'ils provenaient de l'infini (ce qui permet une vision nette pour un œil au repos) il faut que cette image, qui est l'objet pour l'oculaire, se situe dans le plan focal objet de ce dernier.

Ainsi, le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire : $\mathrm{F}'_1 = \mathrm{F}_2$.

La lunette est qualifiée d'**instrument afocal** car elle forme un faisceau parallèle à partir d'un faisceau parallèle : elle ne possède pas de foyer.

En appliquant les règles de construction des rayons, on aboutit au schéma ci-dessous :



Le but de la lunette astronomique est de former d'un objet une image qu'on observe sous un angle plus grand que l'objet n'est observé à l'œil nu, de sorte qu'il apparaît grossi.

Par analogie avec le grandissement, on définit une grandeur sans unité appelée **grossissement** (angulaire), notée G, qui est le quotient des angles orientés α' et α sous lesquels on voit l'image à travers l'instrument et l'objet à l'œil nu :

$$\mathrm{G} = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

La définition du grossissement combinée aux conditions de Gauss (qui permettent d'utiliser l'approximation des petits angles) permet de montrer que

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

Pour obtenir un grossissement élevé, on combine un objectif de grande focale et un oculaire de petite focale.