

## LP 10 : INSTRUMENTS D'OPTIQUES

### Bibliographie

1. Académie de montpellier : [Fiches sur les instruments](#), [Cours : voir plus grand](#), [Cours : voir plus loin](#)
2. Salamito, Physique, tout-en-un, PCSI
3. [tsiphysique.free.fr/pdf/fdc\\_physique/AD\\_OPT\\_2.pdf](http://tsiphysique.free.fr/pdf/fdc_physique/AD_OPT_2.pdf)

### Introduction pédagogique

**Niveau :** Tle STL/SPCL

**Prérequis :**

1. Lentille convergente (plan focaux, images réelles et virtuelles) [1<sup>ère</sup> SPCL]
2. Tracé de rayons lumineux [1<sup>ère</sup> SPCL]
3. Relations de conjugaison et de grandissement [1<sup>ère</sup> SPCL]
4. Diffraction [Tle SPCL]
5. Miroirs [Tle SPCL]

**Objectifs :**

1. Etre capable de tracer l'image d'un système optique
2. Savoir analyser un microscope ou une lunette et ses limite

**Difficultés :**

1. Comprendre comment un instrument optique peut être simplement décrit par des lentilles et une source, sans oublier les limites associées
2. Le tracé des rayons lumineux à travers les systèmes optiques
3. On n'observe non pas des tailles d'objets mais des angles
4. Calculs de trigonométries

**Exemples de TP** Mise en place de dispositifs optique et mesure expérimentales de grandissement

**Exemples de TD** Etude de systèmes optique et tracé de rayons lumineux afin de savoir si le système sert à voir plus loin ou à voir plus grand, Etude de document sur le télescope Hubble

### Table des matières

1	Voir plus grand	2
2	Voir plus loin	6
3	L'oeil et ses défauts ( <i>Salamito</i> , p. 194)	9
4	L'appareil photo ( <i>Salamito</i> , p. 196)	10

## Introduction pédagogique

Ce cours conclut la séquence "Des ondes pour observer" du programme de terminale SPCL. On insistera sur la manière dont un instrument optique permet d'agrandir une image ou de voir plus loin, mais également sur les limites de chaque instrument. Ce cours est profondément lié à la pratique expérimental et le plus bénéfique pour les élèves serait de découvrir les instruments optiques par un montage optique avant de tracer les rayons.

## Introduction

On est tous les jours confrontés à des instruments d'optiques sans forcément s'en rendre compte. Vos lunettes de vue, même vos yeux sont des instruments d'optiques. En effet, vous avez vu l'an dernier comment modéliser l'oeil par une succession d'un diaphragme, d'une lentille et d'un écran.

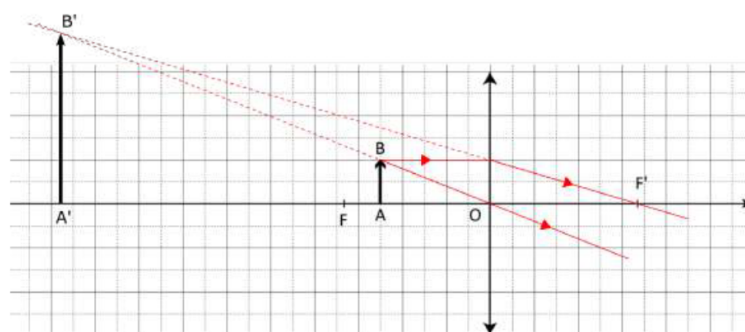
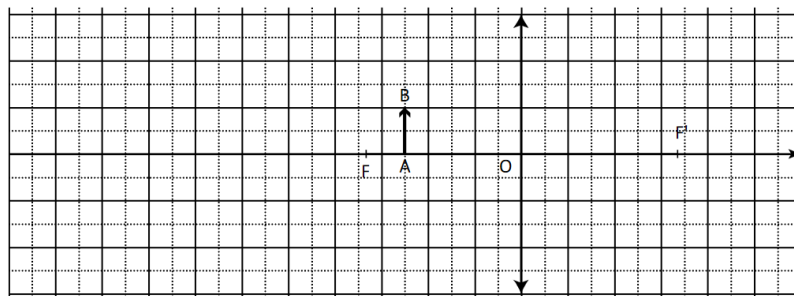
Mais notre oeil a des limites. Il n'arrive pas à voir correctement ce qui est très loin ou très petit. Pour nous permettre d'étudier les objets qui sont très loin ou très petit on va utiliser des instruments d'optiques dont vous avez déjà entendu parler : une loupe, un microscope ou une lunette astronomique.

**OBJECTIF** : Comprendre le fonctionnement des instruments optiques et leurs limites.

## 1 Voir plus grand

### 1.1 Fonctionnement d'une loupe

La loupe est un instrument d'optique permettant d'observer de petits objets à l'aide d'une lentille convergente. La lentille va permettre de créer une image virtuelle au niveau de l'oeil de l'observateur. Pour cela on va tracer les rayons qui passent à travers la loupe.



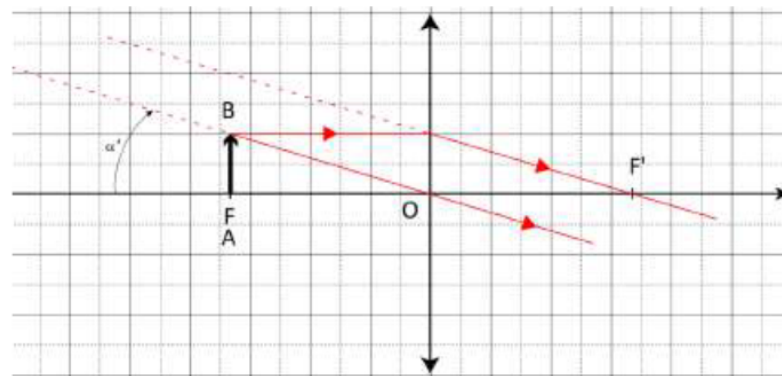
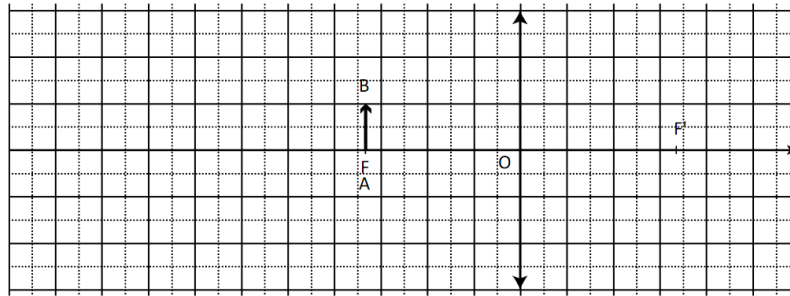
On peut aussi prédire la position de l'image virtuelle grâce à la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} \Leftrightarrow \overline{OA'} = \frac{f' \times \overline{OA}}{f' + \overline{OA}}$$

**Application numérique :**

Avec  $f' = 10$  cm,  $\overline{OA} = -7,5$  cm on trouve une image à la distance  $\overline{OA'} = -30$  cm.

On remarque que si on se place à la distance  $\overline{OA} = f'$  alors on aura l'image qui se formera à l'infini : on peut le vérifier avec le tracé des rayons :



Notre oeil étant bien adapté pour observer les objets à l'infini, cette position est donc la plus agréable pour regarder un objet avec une loupe. On peut donc observer l'image sans avoir besoin d'accomoder.

**Définition :** Le grossissement commercial, noté  $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ , avec  $\alpha'$  l'angle sous lequel on voit l'objet à l'infini à travers la loupe et  $\alpha$  celui sous lequel on voit l'objet à l'oeil nu à une distance  $d_m = 25$  cm de la pupille (*punctum proximum*).

On peut mesurer ce grossissement avec les relations de trigonométrie :

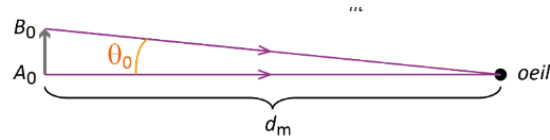
$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \simeq \frac{\tan(\alpha')}{\tan(\alpha)} = \frac{\frac{AB}{f'}}{\frac{AB}{d_m}} = \frac{d_m}{f'}$$

**Application numérique :** avec  $f' = 10$  cm, on a  $G = 2,5$ .

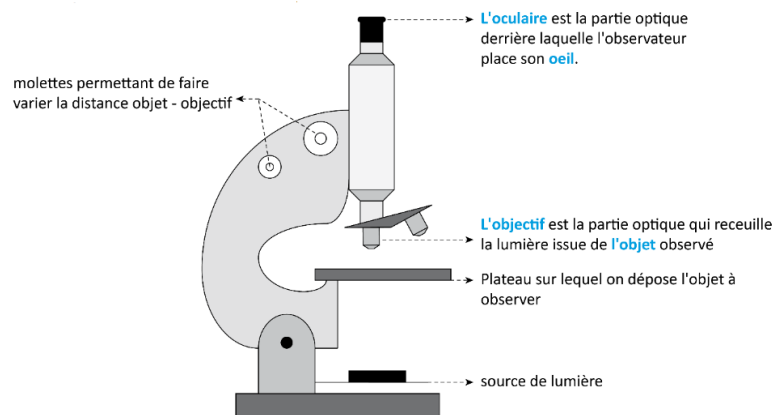
Ce grossissement est bien pour lire un texte trop petit mais n'est pas assez suffisant pour pouvoir observer des objets microscopiques comme des cellules végétales. Pour cela

on utilisera un microscope.

**Remarque :** Pour comprendre l'origine de l'angle  $\alpha$  (noté ici  $\theta_0$ ) on peut proposer le schéma suivant. (***NB :** je ne présenterai pas cette image en leçon c'est juste un pense-bête (avis personnel)*)



## 1.2 Fonctionnement d'un microscope



Le microscope est constitué de deux parties optiques :

- l'objectif, du côté de l'objet ;
- l'oculaire, du côté de l'œil.

Le but du microscope est de former une image à l'infini afin de ne pas fatiguer l'œil de l'observateur. En effet, à travers un instrument d'optique l'objet vu par l'œil est l'image finale qui, ici, est donnée par l'oculaire.

On peut modéliser le microscope par deux lentilles minces :

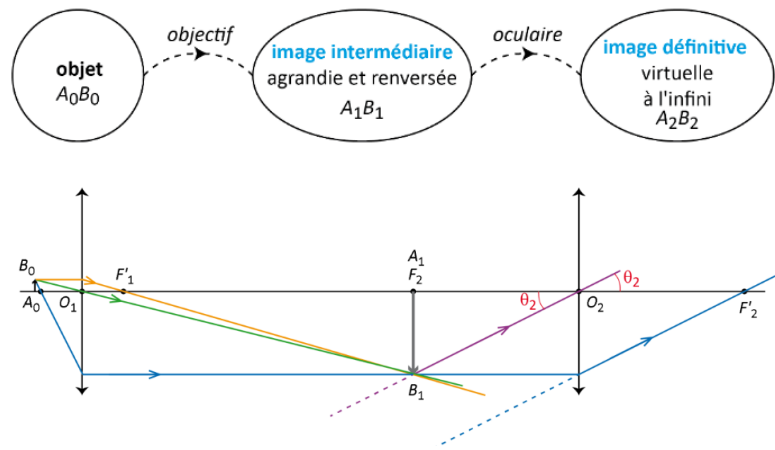
- l'objectif : lentille convergente de focale  $f'_1 = 5 \text{ mm}$
- l'oculaire : lentille convergente de focale  $f'_2 = 2,5 \text{ cm}$

Les deux lentilles doivent être positionnées correctement l'une par rapport à l'autre afin d'avoir bien une image finale à l'infini. Il est nécessaire que l'image formée par l'objectif soit positionnée sur le plan focal objet de l'oculaire pour que l'image en sortie de l'oculaire soit bien à l'infini.

Le schéma de principe du fonctionnement du microscope peut se réduire à :

- On note  $A_0B_0$  l'objet observé
- L'objectif va donner à partir de l'objet  $A_0B_0$  une image réelle, renversée et agrandie  $A_1B_1$
- Cette image intermédiaire  $A_1B_1$  sera l'objet pour l'oculaire
- L'oculaire donne de l'objet  $A_1B_1$  une image à l'infini : l'image définitive

On va donc réaliser le tracé du chemin lumineux afin de se rendre compte du chemin réalisé par les rayons lumineux fin d'envoyer l'image à l'infini :



On peut calculer le grossissement du microscope :

$$\begin{aligned}
 G &= \frac{\theta_2}{\theta_0} = \frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_0)} = \frac{A_1B_1}{f'_2} \times \frac{d_m}{A_0B_0} \\
 &= \frac{A_1B_1}{A_0B_0} \times \frac{d_m}{f'_2} \\
 &= \gamma_{\text{objectif}} \times G_{\text{oculaire}}
 \end{aligned}$$

Pour connaître le rapport  $\frac{A_1B_1}{A_0B_0}$  on peut utiliser le théorème de Thalès dans le triangle  $A_1B_1F'_1$  et celui formé par le triangle rectangle passant par  $O_1F'_1$  (dont le troisième point sur la lentille de l'objectif n'a pas de nom), on trouve :

$$\frac{A_1B_1}{A_0B_0} = \frac{F'_1F_2}{O_1F'_1} = \frac{F'_1F_2}{f'_1}$$

On a donc la formule suivante pour le grossissement :

$$G = \frac{F'_1F_2}{f'_1} \times \frac{d_m}{f'_2}$$

**Application numérique :** la distance  $F'_1F_2$  dépend du microscope utilisé. Ici on prendra :  $F'_1F_2 = 25$  cm, on trouve donc :  $G = 500$  on peut donc considérablement augmenter le grossissement d'un dispositif optique en ajoutant une lentille convergente à une loupe.

### 1.3 Résolution d'un microscope

**Définition :** Le pouvoir de résolution est l'angle minimal entre deux points objets pouvant être nettement distingués. Plus cet angle est faible, meilleure est la résolution de l'instrument d'optique.

La plus forte origine de ce phénomène limitant pour un instrument d'optique provient de la diffraction. Le pouvoir de résolution théorique va donc découler de la formule :

$$\theta_{th} = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

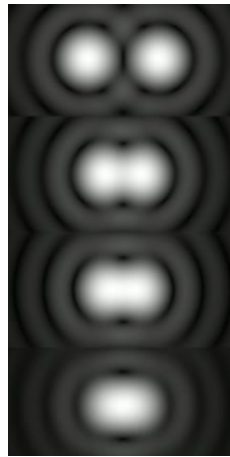


FIGURE 1 – Pouvoir de résolution limite d'un instrument d'optique. On voit sur la première image que les deux objets peuvent être discernés, sur la deuxième les objets sont à la limite de résolution et les deux dernières images présentent des objets qui sont indiscernables car trop proches.

avec  $\lambda$  la longueur d'onde de la lumière incidente et  $D$  la diamètre de l'objectif. Pour un microscope on considère un objectif de diamètre  $D = 5,0$  mm et une longueur d'onde incidente dans le visible de l'ordre de 500 nm.

**Application numérique :** avec les données ci-dessus pour le microscope on obtient un angle théorique de  $\theta_{th} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  rad. Ainsi, si l'objet est situé à  $d = 1$  cm de l'objectif, on peut distinguer deux objets distants de  $x = d \times \tan(\theta_{th}) = 1,2 \mu m$

Nous avons vu comment faire pour observer des objets trop petits pour pouvoir les observer à l'oeil nu mais comment faire pour observer des objets trop petits à cause de la distance qui les sépare de notre oeil. Comment faire pour voir plus loin ?

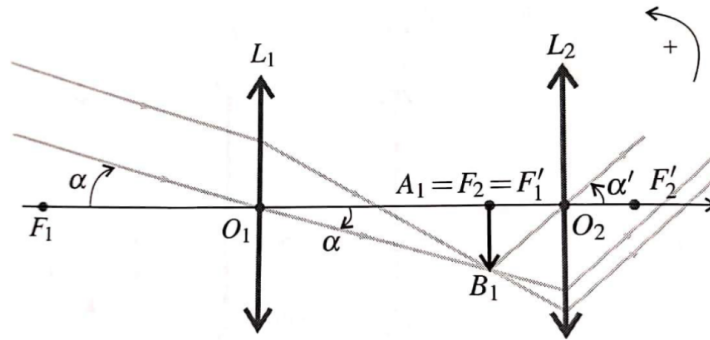
## 2 Voir plus loin

### 2.1 La lunette astronomique

CONTEXTE :

De même que pour le microscope la lunette astronomique peut être modélisé par deux lentilles convergentes. La grande différence entre un microscope et une lunette astronomique est la source lumineuse incidente. En effet, nous avons vu et vous le savez pour un microscope l'objet incident est très proche et il s'agit de l'agrandir. Dans le cas de la lunette l'objet à observer est situé à l'infini. Il faut à nouveau le transmettre à l'infini pour toujours ne pas fatiguer l'oeil qui va observer l'image en sortie de la lunette. L'enjeu ici est donc d'agrandir un objet à l'infini en une image à l'infini aussi.

Pour cela on va utiliser comme pour le microscope deux lentilles convergentes. La première lentille, l'objectif, sera une lentille de grande focale (ici par exemple  $f_1 = 60$  cm) et la seconde lentille, l'oculaire sera une lentille de petite focale (ici  $f_2 = 5$  cm). Afin de transmettre l'image à l'infini il faut régler la distance entre les deux lunettes de telle sorte que le point focal image de la première lentille soit placé exactement au point focal objet de la seconde lentille.



L'objet ET l'image étant placés à l'infini on parle de système afocal. De même que précédemment, on peut calculer le grossissement de ce système. On se place dans les triangles  $O_1A_1B_1$  et  $O_2A_1B_1$  :

$$\begin{aligned} G &= \frac{\alpha'}{\alpha} \simeq \frac{\tan(\alpha')}{\tan(\alpha)} \\ &= -\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{F_2O_2}} / \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1F_1'}} \\ &= -\frac{f_1'}{f_2} \end{aligned}$$

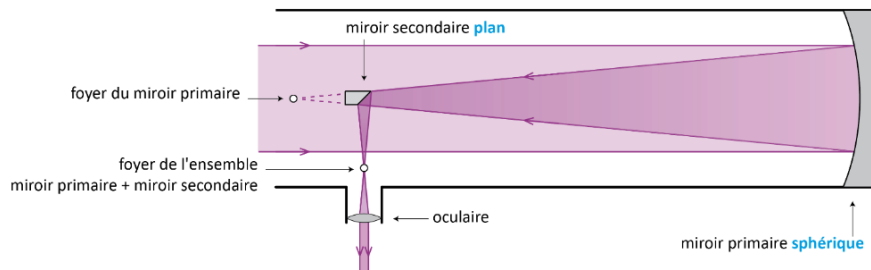
**Application numérique :** avec  $f_1 = 60$  cm et  $f_2 = 5$  cm on obtient un grossissement de  $G = -12$ .

Le grossissement est négatif ce qui sera toujours le cas pour une lunette astronomique. En effet, l'image formée est renversée par rapport à l'objet dont elle provient.

On remarque que afin d'obtenir un meilleur grossissement il faut augmenter la taille de l'objectif. Ainsi on va avoir des télescopes dont la taille sera très importante. Pour contourner ce problème les scientifiques ont développés des instruments optiques plus puissants : les télescopes.

## 2.2 Les télescopes

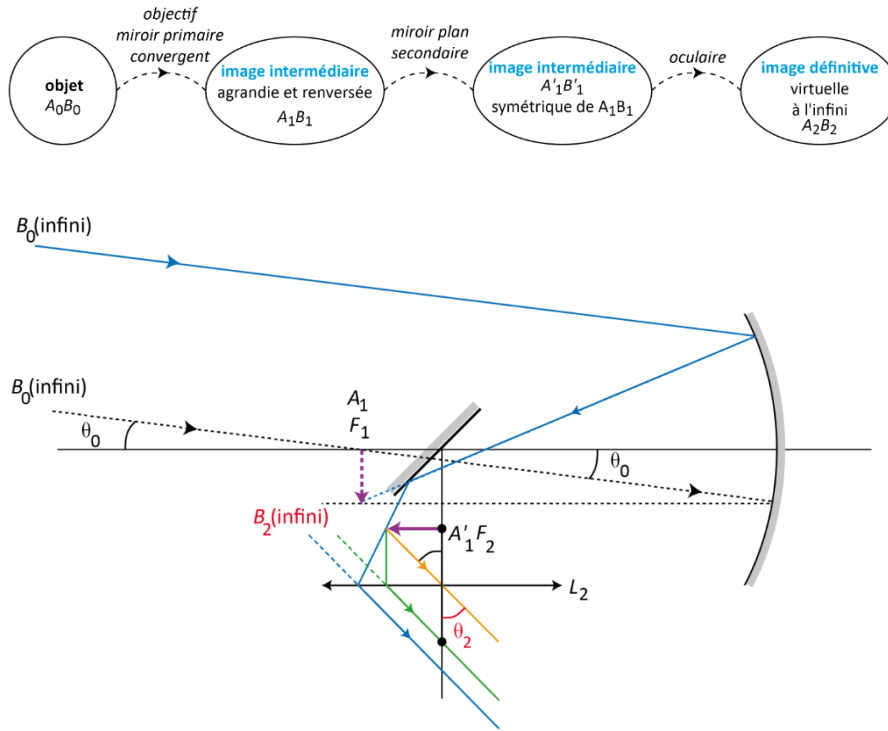
Afin de dépasser les limites de la lunette astronomique on utilise les télescopes. Ils sont constitués de deux miroirs et d'une lentille convergente qui va transmettre à l'infini l'image formée par l'association des deux miroirs.



Le système est donc aussi composé d'un objectif et d'un oculaire :

- l'objectif : miroir sphérique concave, convergent, de foyer  $F_1$  et de distance focale  $f_1'$

- l'oculaire : lentille convergente de foyer  $F_2$  et de distance focale  $f'_2$
- Afin que l'oculaire transmette une image à l'infini l'objet va passer par plusieurs étapes :
- L'objet  $A_0B_0$  est à l'infini ;
  - L'objectif donne une image  $A_1B_1$  réelle et rétrécie au point  $F_1$  : image intermédiaire ;
  - Le miroir secondaire donne une image  $A'_1B'_1$  qui est le symétrique de  $A_1B_1$  ;
  - Cette nouvelle image est l'objet placé dans le plan focal objet de l'oculaire ;
  - L'oculaire donne de  $A'_1B'_1$  une image  $A_2B_2$  à l'infini.



On peut calculer le grossissement de ce système optique :  $G = \frac{\theta_2}{\theta_0}$ , avec :

$$\theta_0 \simeq \tan(\theta_0) = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1}$$

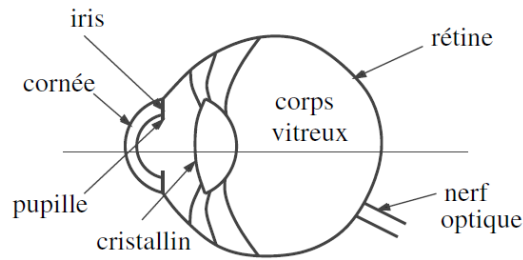
$$\theta_2 \simeq \tan(\theta_2) = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_2}$$

**Application numérique :** Si on considère les focales  $f'_1 = 900$  mm et  $f'_2 = 15$  mm pour le miroir et l'oculaire, on obtient un grossissement  $G = 60$ .

Le grossissement est bien plus grand, en valeurs absolues, que celui d'une lunette astronomique. Il est d'autant plus grand que  $f'_1$  est grande, donc que le diamètre du miroir sphérique est grand. C'est pourquoi les astronomes cherchent à toujours agrandir les miroirs des télescopes. Le plus gros télescope terrestre, en cours de construction et qui sera inauguré en 2025, est l'*Extremely Large Telescope* et possèdera un miroir de diamètre de 39 mètres. Les télescopes et les lunettes astronomiques sont également limités par la diffusion. Le pouvoir de résolution théorique a la même expression que celui pour un microscope.

### 3 L'oeil et ses défauts (*Salamito, p. 194*)

#### 3.1 Modélisation de l'oeil



L'oeil est composé de plusieurs éléments que l'on peut assimiler à des objets d'optiques :

- Iris et pupille : possède un diamètre variable (de 2 à 8 mm) qui sert de diaphragme
- Cristallin : lentille mince de distance focale variable, il donne un objet renversé sur la rétine
- Rétine : écran fixe constitué de cellules sensibles à la lumière

Comme les différents instruments d'optiques, l'oeil possède aussi une limite de résolution. Cette limite est atteinte lorsque deux détails différents de l'objet arrivent sur une même cellule de la rétine.

L'oeil ne peut voir une image nette que si elle se forme sur la rétine. Lorsque l'oeil est au repos (absence de contraction de la part du cristallin) il voit à une distance maximale : il voit à l'infini. Le point situé à cette distance s'appelle le **Punctum Remotum** (P.R.). Lorsque l'objet se rapproche le cristallin doit se contracter afin de diminuer sa distance focale : on dit que l'oeil accomode. Le point le plus proche que l'oeil puisse observer est appelé le **Punctum Proximum** (P.P.). Pour un oeil normal, sans défauts, le PR est situé à l'infini et le PP à une distance d'environ 25 cm.

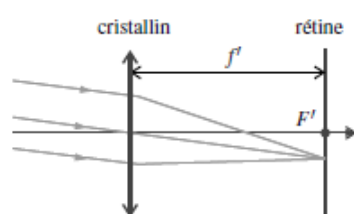


Figure 5.40 – Formation de l'image d'un objet au P.R.

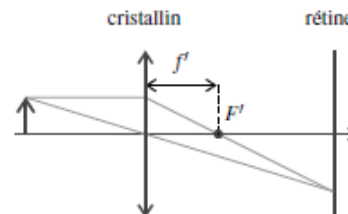


Figure 5.41 – Formation de l'image d'un objet au P.P.

#### 3.2 Les défauts

Toutefois, l'oeil peut avoir des défauts. Vous connaissez sans doute tous une personne qui porte des lunettes. A quoi servent ces lunettes? Vous allez comprendre pourquoi ils doivent en porter et comment modéliser très simplement les lunettes.

Un oeil que l'on appelle myope est un oeil dont le cristallin est trop convergent. Le PP est donc plus proche que pour un oeil normal et le PR n'est plus à l'infini. Ainsi cela correspond à une meilleure vision des objets à une distance inférieure à 25 cm mais en revanche les objets qui sont loin apparaissent flous. Afin de corriger cela il faut rendre l'oeil moins convergent. Pour cela on utilise des lentilles divergentes dans les lunettes.

Un oeil que l'on appelle hypermétrope, au contraire possède un cristallin pas assez convergent. L'oeil est donc obligé d'accomoder (et donc de se fatiguer) pour pouvoir observer des objets à l'infini. En effet, sinon l'image se forme derrière la rétine et alors l'oeil voit flou. Afin de corriger cela il faut utiliser une lentille convergente afin de rendre l'oeil plus convergent.

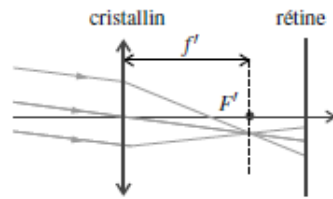


Figure 5.42 – Oeil myope sans accommodation.

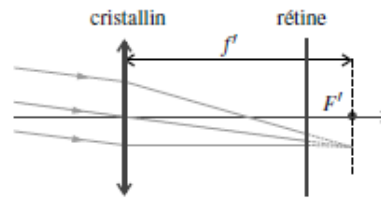
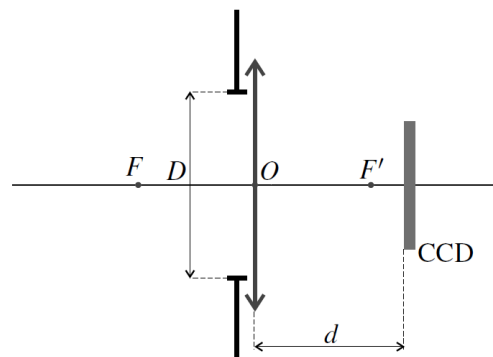


Figure 5.43 – Oeil hypermétrope sans accommodation.

## 4 L'appareil photo (*Salamito, p. 196*)

### 4.1 Modélisation et influence de la durée d'exposition

Il est possible de modéliser un appareil photographique à l'aide de deux objets optiques et d'un capteur. De même que pour l'oeil, il est possible de modéliser l'appareil photo comme l'alignement d'un diaphragme, d'une lentille convergente et d'un écran pouvant capter la lumière (capteur CCD).



On va étudier ici l'influence de la durée d'exposition sur le rendu de la photographie.

**Résolution de l'appareil photo :** pour étudier la résolution de l'appareil photographique on réalise la même expérience que celle pour déterminer le pas du CD mais on utilise un capteur CCD au lieu d'un CD.

L'image est enregistrée à l'aide du capteur CCD qui est situé à la distance  $d$  de la focale. Afin d'obtenir une image correcte il faut que :

- l'image de l'objet se forme sur le capteur (résolution : deux détails doivent être sur deux pixels du capteur)
- la quantité de lumière reçue par les éléments photosensibles soit convenable

Le premier point est vérifié en jouant sur la distance  $d$  qui sépare le capteur de la focale. Cette distance dépend de la distance entre l'objet à photographier et l'objectif. Elle peut être calculée à partir des relations de conjugaison de la lentille.

Ce deuxième point dépend principalement de la durée d'exposition  $\tau$  durant laquelle le capteur va recevoir de la lumière. Pour des paramètres similaires, seule la durée d'exposition est changée, on peut obtenir les trois photographies suivantes :



Figure 5.45 –  
 $\tau = \frac{1}{4}$  s



Figure 5.46 –  
 $\tau = \frac{1}{30}$  s



Figure 5.47 –  
 $\tau = \frac{1}{125}$  s

FIGURE 2 – Influence de la durée d'exposition

La photo 5.46 est considérée comme sous-exposée, tandis que la 5.48 est sur-exposée. D'où cela provient-il? Le signal fourni par les cellules photosensibles est proportionnel à l'énergie qu'elles reçoivent. Cette énergie est directement proportionnelle à la durée d'exposition, en effet, plus la durée sera grande plus les capteurs recevront de la lumière. L'échelle des gris correspond à une valeur d'énergie reçue qui peut varier entre deux valeurs  $E_{min}$  et  $E_{max}$ . Si l'énergie reçue est inférieure alors la photographie sera trop noire (sous-exposée) et à l'inverse si la quantité d'énergie reçue est supérieure alors la photographie sera trop blanche (sur-exposée).

## 4.2 Influence du diaphragme et de la focale

Pour plus d'informations voir le lien des photos ou Salamito Physique-tout-en-un, PCSI p. 199-203

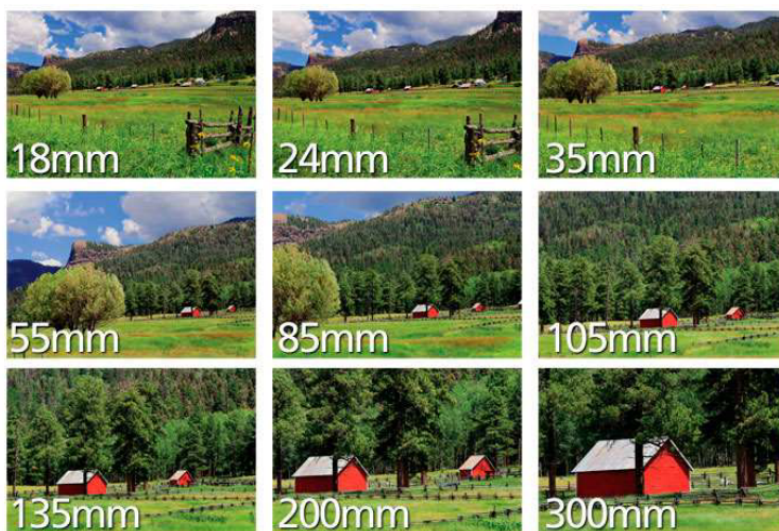


FIGURE 3 – Influence de la focale sur le rendu de l'image (Source : [http://tsiphysique.free.fr/pdf/fdc\\_physique/AD\\_OPT\\_2.pdf](http://tsiphysique.free.fr/pdf/fdc_physique/AD_OPT_2.pdf), Vu le 23/05/2021)

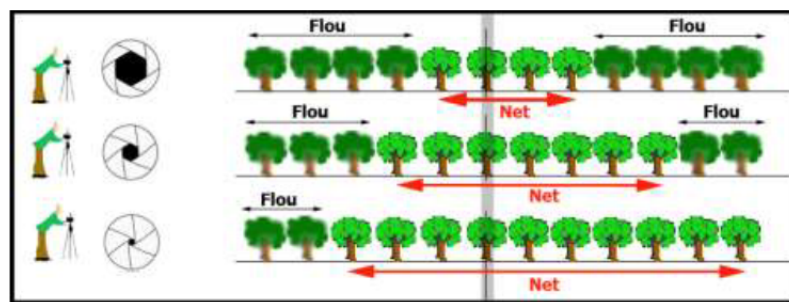


FIGURE 4 – Influence de l'ouverture du diaphragme sur le rendu de l'image (Source : [http://tsiphysique.free.fr/pdf/fdc\\_physique/AD\\_OPT\\_2.pdf](http://tsiphysique.free.fr/pdf/fdc_physique/AD_OPT_2.pdf), Vu le 23/05/2021)