

PHYSIQUE 2

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

Expériences

- ☞ Diffraction par une fente (onde lumineuse, onde de surface, onde sonore)
- ☞ Propagation rectiligne de la lumière
- ☞ Réfraction d'un laser, fontaine lumineuse

Table des matières

1	La lumière	3
1.1	Nature : onde ou particule?	3
1.2	Caractérisation de l'onde lumineuse	4
1.2.1	Vitesse de propagation et indice de réfraction	4
1.2.2	Longueurs d'onde, fréquences et couleurs	5
1.3	Sources lumineuses	6
2	Approximation de l'optique géométrique	7
2.1	Diffraction	7
2.1.1	Observations expérimentales	8
2.1.2	Loi expérimentale de la diffraction	8
2.2	Modèle du rayon lumineux	9
2.2.1	Observation expérimentale	9
2.2.2	Modèle du rayon lumineux	9
3	Lois de Snell-Descartes	11
3.1	Définitions	11
3.2	Lois de Snell-Descartes	12

4	Vocabulaire de l'optique géométrique	14
4.1	Notions d'image et d'objet	14
4.2	Application aux miroirs plans	15
4.3	Objets ou images à l'infini	15
4.3.1	Objets ou images ponctuels à l'infini	15
4.3.2	Objets ou images étendus à l'infini	15
4.4	Stigmatisme et aplanétisme	15
4.5	Conditions de Gauss	16
5	Lentilles minces	17
5.1	Définitions	17
5.2	Caractéristiques et schéma	17
5.3	Constructions	18
5.3.1	Rayons caractéristiques	18
5.3.2	Image d'un point	18
5.3.3	Images des plans focaux	19
5.3.4	Image d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique	19
5.3.5	Image d'un rayon lumineux quelconque	19
5.3.6	Association de deux lentilles	19
5.4	Relations de conjugaison	20
5.4.1	Relation de conjugaison de Descartes	20
6	Application des lentilles aux appareils d'optique	21
6.1	Modèle de la source ponctuelle monochromatique	21
6.2	L'œil humain	22
6.2.1	Pouvoir de résolution	22
6.2.2	Distance de mise au point - accommodation	23
6.2.3	Quelques défauts courants de l'œil	23
6.3	Approche documentaire - L'appareil photographique numérique	24

Dans ce chapitre on va s'intéresser à la propagation d'un type d'ondes particulières, les ondes électromagnétiques, et en particulier à certaines d'entre elles qui composent la lumière visible. On va donc dans un premier temps caractériser les différentes manières de produire de la lumière, puis nous verrons comment elle se propage. Ce deuxième point permettra d'élaborer les lois qui régissent la propagation, ce qui va nous permettre dans un troisième temps de traiter des lentilles, instruments d'optique qui permettent d'expliquer le fonctionnement de l'œil, des appareils photos numériques, des microscopes,...

1 La lumière

1.1 Nature : onde ou particule ?

La nature de la lumière a pendant longtemps été un sujet de débat, entre une vision ondulatoire (développée par Huygens) et une vision corpusculaire (selon Newton) de la lumière. Dans la vision ondulatoire, la lumière est une onde, toutefois, il a pendant été longtemps impossible de voir avec la lumière des phénomènes purement ondulatoires, et on pensait aussi qu'une onde avait forcément besoin d'un milieu matériel pour se propager. Une des preuves du caractère ondulatoire de la lumière a été donnée par l'expérience de Young au 19^{ème} siècle qui a montré des interférences lorsque de la lumière traverse une double fente : pour cette expérience, il est nécessaire de voir la lumière comme une onde. Maxwell a ensuite établi les lois de l'électromagnétique qui ont montré que le signal physique associé à la propagation des ondes lumineuses était le champ électromagnétique.

Toutefois, au début du 20^{ème} siècle, il y avait certaines expériences que l'on ne parvenait pas à expliquer avec une vision ondulatoire de la lumière, en particulier les interactions entre la lumière et la matière (effet photoélectrique, raies d'émission et d'absorption des éléments chimiques en spectroscopie,...). Ces expériences ont pu être expliquées avec les développements de la mécanique quantique qui suppose que la lumière est faite de particules élémentaires, les photons.

En conclusion, la lumière n'est ni une onde, ni faites de particules. Elle est autre chose, que l'on peut, selon l'expérience considérée, approximer soit comme une onde,

soit comme des particules.

On va dans ce chapitre se concentrer uniquement sur le caractère ondulatoire de la lumière, les propriétés dues à son comportement corpusculaire seront vues dans un autre chapitre d'introduction au monde quantique.



1.2 Caractérisation de l'onde lumineuse

1.2.1 Vitesse de propagation et indice de réfraction

L'onde lumineuse est une onde progressive, on peut donc mesurer sa vitesse de propagation. Les premières mesures tentées par Galilée sur une distance de 6 km ne pouvaient aboutir (il fallait mesurer un temps d'environ $20 \mu\text{s}$). Le premier à avoir mesuré la vitesse de la lumière dans le vide suffisamment précisément (*i.e.* avec un résultat compatible avec la valeur actuelle) est Michelson en 1929.

La vitesse de la lumière dans le vide vaut :

$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Dans un milieu transparent, la lumière est "ralentie" par son interaction avec la matière, elle va donc moins vite que dans le vide. On définit donc l'indice optique d'un milieu transparent n comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans le milieu v :

$$n = \frac{c}{v} \geq 1$$

Valeurs typiques

- air : $n = 1,000293 \approx 1,000$. Dépend de la température (mirages) et de la pression.
- eau : $n = 1,33$
- verre : $n \approx 1,5$. Dépend du verre utilisé.
- diamant : $n = 2,4$

1.2.2 Longueurs d'onde, fréquences et couleurs

La lumière est une onde progressive, on peut donc la décomposer comme une somme d'ondes progressives sinusoïdales comme on l'a vu au chapitre précédent. Ces ondes progressives sinusoïdales ont un nom particulier dans le cas de la lumière, on les appelle des **ondes monochromatiques**.

En tant qu'ondes progressives sinusoïdales, les ondes monochromatiques sont caractérisées par leur fréquence f et leur longueur d'onde λ .

Dans le vide, on a la relation :

$$f \times \lambda = c$$

Lorsque l'onde monochromatique pénètre dans un milieu transparent d'indice n , sa fréquence reste la même, par contre, étant donné que la vitesse de propagation change, la longueur d'onde doit changer pour qu'on ait la relation :

$$f \times \lambda' = v$$

On a donc $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$.

Ordres de grandeur

Pour les ondes lumineuses, on a l'habitude de caractériser une onde monochromatique par sa couleur (d'où le nom, *chromos* = couleur en grec), et de repérer ces couleurs par la longueur d'onde dans le vide. On a les valeurs typiques suivantes :

Longueur d'onde dans le vide (nm)	500	550	600	650
Couleur perçue	bleu	vert	jaune orangé	rouge

Le domaine visible couvre les longueurs d'onde $\lambda \in [400 \text{ nm}, 800 \text{ nm}]$. En fréquence, on retiendra le domaine $f \in [0,4 \text{ THz}; 0,75 \text{ THz}]$, mais plus spécialement une valeur typique $f = 0,6 \text{ THz}$.

Les ondes monochromatiques représentent des couleurs pures. Les autres couleurs (par exemple le rose) sont obtenues par composition de lumières monochromatiques.

L'indice optique peut aussi dépendre de la longueur d'onde de l'onde lumineuse considérée. Les différentes couleurs qui composent une lumière polychromatique ne vont plus alors à la même vitesse, on parle alors de dispersion (arc-en-ciel, feux des diamants, décomposition de la lumière par un prisme).

1.3 Sources lumineuses

Dans le cadre des TP vous allez être amenés à utiliser des sources de lumière, qui se classent dans 3 catégories différentes.

1. les sources thermiques : un corps est porté à haute température, typiquement, un filament de tungstène dans une ampoule à filament. Le spectre de la lumière émise est continu (une infinité de longueurs d'onde différentes), avec une forme en cloche, la longueur d'onde la plus émise dépend de la température, plus T est grand plus la longueur d'onde est petite : passage du rouge à jaune orangé, blanc puis bleu.
2. les lampes spectrales : de l'électricité traverse un gaz atomique. Les atomes absorbent de l'énergie par la collision des électrons, ils se déséxcitent en émettant des photons donc de la lumière. La quantité d'énergie que les atomes peuvent absorber dépend de leur structure nucléaire et électronique, donc toutes les

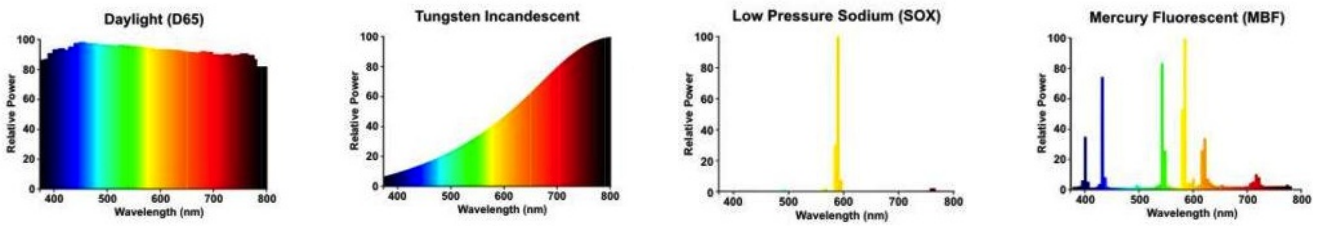


FIGURE 1 – Spectres de différentes sources lumineuses, de gauche à droite, le soleil, une lampe à filament, une lampe à vapeur de sodium et une lampe à vapeur de mercure.

énergies ne peuvent pas être réémises par les photons. On observe un spectre discret présentant seulement quelques longueurs d'onde, chaque spectre étant caractéristique de l'élément chimique présent dans l'ampoule. C'est le principe de fonctionnement de la spectroscopie, et qui nous permet de connaître la composition des couches externes des étoiles.

3. les lasers : de la lumière fait des aller-retours dans une cavité formée par deux miroirs. Il se produit des interférences qui éliminent toutes les longueurs d'onde sauf une qui est très amplifiée. De plus, le faisceau obtenu est très collimaté : la lumière qui en sort va dans une seule direction.

Important

Ces trois types de sources produisent un spectre radicalement différent, vous devez donc être capable de déterminer quel type de source a été utilisée juste à la vision de son spectre : un spectre continu indique une source thermique, un spectre discret à plusieurs raies une lampe à vapeur, un spectre avec une seule raie très piqué un laser.

2 Approximation de l'optique géométrique

2.1 Diffraction

Comme on l'a vu, pour certaines expériences, il est nécessaire de considérer la lumière comme une onde. Parmi ces expériences, on a déjà évoqué les interférences démontrées par Young. Un autre phénomène qui s'explique avec une interprétation ondulatoire de la lumière est la diffraction, c'est-à-dire la déviation d'une onde lorsqu'elle traverse une ouverture de largeur comparable à sa longueur d'onde.

2.1.1 Observations expérimentales



Diffraction de la lumière



⌚ 5 minutes

Le but de l'expérience est de montrer la diffraction de la lumière par une fente, et que l'ouverture du cône augmente lorsque l'on rétrécit la fente.

- on envoie un laser sur une fente réglable.
- fente réglée au maximum : une tache unique, propagation rectiligne
- on réduit : agrandissement de la tache
- on place un écran intermédiaire : taille de la tache qui dépend de la distance, forme conique



Diffraction des ondes de surface



⌚ 5 minutes

Le but de l'expérience est de montrer la diffraction des ondes de surfaces avec une cuve à ondes.

2.1.2 Loi expérimentale de la diffraction

Définition

Lorsqu'une onde traverse une ouverture de taille comparable à sa longueur d'onde, elle est **diffractée**. Dans ce cas, le phénomène de diffraction se manifeste par un étalement angulaire du faisceau dont l'ouverture angulaire, caractérisée son demi-angle d'ouverture θ , dépend de la longueur d'onde λ et de la taille de l'ouverture a selon la loi :

$$\theta \approx \frac{\lambda}{a}$$

Cas des ondes sonores : lorsque l'on parle, la fréquence des ondes acoustiques est d'environ 200 Hz, donc une longueur d'onde de l'ordre de 1,5 m. Ainsi, quand le son d'une voix passe à travers une porte d'environ 80 cm, tous les gens situés à l'intérieur entendent, même ceux situés dans un coin derrière la porte.

2.2 Modèle du rayon lumineux

2.2.1 Observation expérimentale



Propagation rectiligne de la lumière



⌚ 5 minutes

Le but de l'expérience est de montrer que la lumière se propage en ligne droite.

- on envoie la lumière d'une lampe sur un condenseur (lentille fortement convergente) pour condenser la lumière sur un diaphragme de petite ouverture.
- un objet est placé à une distance d après la sortie (exemple papier calque millimétré).
- on place un écran à la distance D du diaphragme et on regarde la taille de l'objet (agrandissement D/d).

On observe donc que la lumière après être passée à travers le diaphragme semble se propager en ligne droite (théorème de Thalès).

2.2.2 Modèle du rayon lumineux

Définition

Les **rayons lumineux** sont les lignes le long desquelles l'onde lumineuse se propage.

L'expérience précédente suggère que les rayons lumineux sont des lignes droites et que la lumière se propage en ligne droite (**loi de propagation rectiligne de la lumière**). Cette loi de propagation rectiligne de la lumière est toutefois uniquement

valable quand le milieu traversé par l'onde lumineuse est homogène (c'est-à-dire partout le même), sinon on peut observer des déviations (réflexion sur un miroir, fibres optiques, mirages, etc). De plus, on vient de voir que les ondes lumineuses peuvent être diffractées : dans ce cas, la loi de propagation rectiligne n'est évidemment plus valide.

Cadre de l'optique géométrique :

- Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans les milieux homogènes.
- Les rayons lumineux n'ont pas d'interactions entre eux.
- Principe du retour inverse de la lumière : si un rayon lumineux va de A en B, la lumière qui va de B en A suivra le même rayon en sens inverse.
- Dans le cadre de l'optique géométrique, on supposera que tous les systèmes optiques utilisés ont une taille D grande devant la longueur d'onde λ de l'onde lumineuse afin de négliger les phénomènes de diffraction. En pratique, on considèrera cette condition validée pour $D > 100\lambda$ (voire $D > 10\lambda$).

3 Lois de Snell-Descartes

Vous avez vu au lycée qu'il est possible de dévier les rayons lumineux avec des miroirs ou des prismes. On va donc voir comment prédire et calculer ces déviations.

3.1 Définitions

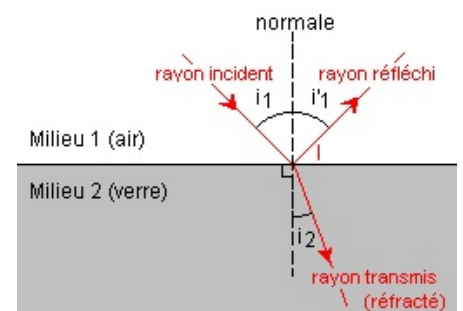
On appelle **dioptre** la surface de séparations entre deux milieux transparents différents.

Le rayon lumineux que l'on va étudier et qui arrive sur le dioptre s'appelle le **rayon incident**. Il frappe le dioptre au **point d'incidence**.

Le rayon qui traverse le dioptre s'appelle le rayon **réfracté**, le rayon restant dans le milieu 1 est le rayon **réfléchi**.

La droite perpendiculaire au dioptre passant par le point d'incidence s'appelle la **normale**. Tous les angles des rayons lumineux seront comptés en partant de la normale (il faut préciser aussi une direction, les angles étant orientés, ils peuvent être positifs ou négatifs). On parle des angles d'incidence (i_1 ou i selon les cas), de réfraction (i_2) et de réflexion (r).

Le **plan d'incidence** est le plan de l'espace comprenant la normale et le rayon incident.



3.2 Lois de Snell-Descartes

Les lois de Snell-Descartes énoncent que :

- le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence ;
- l'angle de réflexion est lié à l'angle d'incidence par la relation : $r = -i_1$;
- l'angle de réfraction est lié à l'angle d'incidence par la relation : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.



Réfraction d'un rayon lumineux



⌚ 5 minutes

A l'aide d'un demi-cylindre de verre et d'un laser, on montre le phénomène de réfraction et de réflexion.

- on envoie la lumière d'un laser au centre d'un demi-cylindre de verre par son côté arrondi ;
- on observe la déviation du rayon réfracté et la réflexion, et en faisant pivoter le demi-cylindre, on montre la non-linéarité de l'angle de réfraction en fonction de l'angle d'incidence ;
- en allant aux grands angles on montre qu'il n'y a plus de rayon réfracté : réflexion totale.

Conséquences

- Si le deuxième milieu est plus réfringent que le premier ($n_2 > n_1$), alors l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence ($i_2 < i_1$) : le rayon réfracté se rapproche de la normale ;
- Si le deuxième milieu est moins réfringent que le premier ($n_2 < n_1$), alors l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence ($i_2 > i_1$) : le rayon réfracté s'éloigne de la normale ;

Il faut bien faire attention à ces conséquences quand on dessine un rayon lumineux traversant un dioptre, en particulier en passant de l'air à du verre ou à de l'eau.

Exercice : Un rayon arrive avec un angle d'incidence de 30° sur un dioptre air-eau. Quel angle de réfraction ? Représentez sur un schéma toutes les grandeurs pertinentes.

Cette déviation est le phénomène à la base des lentilles que l'on va étudier plus tard. Si on ajout le fait que l'indice peut dépendre de la longueur d'onde, on obtient que des rayons de couleurs différentes sont déviés différemment : arcs-en-ciel avec des gouttes d'eau ou décomposition de la lumière par un prisme.

Phénomène de réflexion totale :

Dans le cas où $n_2 < n_1$ et que $\sin i_1 > \frac{n_2}{n_1}$, alors la loi de Snell-Descartes énonce que $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 > 1$ ce qui n'est pas possible.

Il existe donc un angle d'incidence limite $i_{lim} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ à partir duquel il n'y a plus de rayon réfracté, mais réflexion totale.

Application à la fibre optique : une fibre optique est constituée de deux milieux transparents, le cœur et la gaine d'indice de réfraction plus faible que le cœur. Si l'angle d'incidence est tout le temps plus grand que l'angle de réfraction limite, le rayon ne peut sortir du cœur.

Exercice : Quel est l'angle d'incidence limite pour un dioptre air-eau ? Verre-eau ?



Réflexion totale d'un rayon lumineux



⌚ 5 minutes

On va montrer le principe de fonctionnement du guidage d'onde lumineuse dans les fibres optiques avec une fontaine à eau.

- on envoie la lumière d'un laser au centre du robinet d'évacuation d'un récipient transparent ;
- on ouvre le robinet et on s'aperçoit que la lumière suit le jet d'eau.

On vient de voir les conditions de propagation de la lumière dans les milieux transparents, il est maintenant temps d'étudier comment les rayons lumineux se comportent en présence d'instruments d'optique afin de comprendre leur fonctionnement. Nous commencerons par les instruments les plus simples, les miroirs plans, afin de fixer le vocabulaire que nous utiliserons par la suite, puis nous étudierons les lentilles minces, composants essentiels de la plupart des appareils d'optique (lunettes, loupes, microscopes, appareils photos, ...)

4 Vocabulaire de l'optique géométrique

4.1 Notions d'image et d'objet

De manière générale, les rayons lumineux sont déviés lorsqu'ils traversent un système optique (succession de dioptres et de miroirs). Les systèmes optiques que l'on va étudier présentent un axe de symétrie de révolution que l'on appelle **axe optique**.

On appelle **objet** le point qui est à l'origine des rayons lumineux que l'on étudie. On appelle **image** le point d'où semble provenir les rayons considérés en sortie du système. On note :

$$\text{objet} \xrightarrow[\text{système}]{} \text{image}.$$

Exemple : Objet poisson. Système optique dioptre eau-air. Image : poisson "déplacé".

On distingue plusieurs cas :

- **objet réel** : l'objet se situe avant la face d'entrée de la lumière dans le système optique. Cas du poisson ;
- **objet virtuel** : l'objet se situe après la face d'entrée de la lumière dans le système ;
- **image réelle** : l'image se situe après la face de sortie de la lumière du système optique (on peut la toucher) ;
- **image virtuelle** : l'image se situe avant la face de sortie de la lumière du système optique. Cas du poisson.

4.2 Application aux miroirs plans

Sur un miroir plan, les rayons lumineux sont réfléchis selon les lois de Snell-Descartes : le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence et $r = -i$.

Faire un dessin.

Objet virtuel/réel ? Image virtuelle/réelle ?

4.3 Objets ou images à l'infini

On dit qu'un objet est situé à l'infini lorsqu'il est situé très loin (beaucoup plus loin que toutes les tailles caractéristiques mises en jeu, typiquement des planètes ou des étoiles)

4.3.1 Objets ou images ponctuels à l'infini

Lorsqu'un objet de petite taille est situé à l'infini, tous les rayons qui nous parviennent sont parallèles et semble venir de la même direction. C'est la position de l'objet. Exemple : étoile lointaine.

4.3.2 Objets ou images étendus à l'infini

Lorsque l'objet a une taille plus grande, on peut distinguer deux directions différentes entre les points extrémaux de l'objet. Les rayons qui nous parviennent forment un cône d'ouverture angulaire $\alpha \simeq d/D$ où d est la taille de l'objet et D sa distance. Exemple : le soleil et la lune ont même diamètre apparent. Dans ce cas, la position de l'objet est donnée par les directions des points extrémaux de l'objet.

4.4 Stigmatisme et aplanétisme

Définition

Système optique **stigmatique** : tous les rayons issus d'un même point objet A semblent provenir du même point image A' .

L'image d'un point par un système stigmatique est un point, pas une tache. Dans ce cas, on dit que A' est l'image de A par le système optique.

Par principe du retour inverse de la lumière, A est l'image de A' par le système optique : A et A' sont **conjugués**. Le plus souvent, on peut trouver une relation mathématique entre la position de A et celle de A' que l'on appelle **relation de conjugaison**.

Exemples de systèmes optiques stigmatiques : miroirs, dioptrés plans, lentilles (sous certaines conditions). Rayons loin de l'axe optique d'une lentille : stigmatisme.

Définition

Système optique **aplanétique** : l'image d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique est elle aussi perpendiculaire à l'axe optique.

Exemples de systèmes optiques aplanétiques : miroirs, lentilles (sous certaines conditions).

Utilités en photographie :

- Lorsque l'on fait la mise au point, on cherche à faire en sorte que la photo soit nette, c'est-à-dire que l'image de chaque point photographié soit un point sur le capteur et non une tache. Il faut donc un objectif stigmatique.
- Lorsque la mise au point est faite sur un point, on veut que tous les objets qui sont dans le même plan que l'objet soient nets aussi : il faut un objectif aplanétique.

Définition

Pour un système aplanétique, on définit le grandissement transversal comme le rapport de la taille de l'image par la taille de l'objet : $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$

Il y a différents cas possibles :

- si $|\gamma| > 1$, l'image est plus grande que l'objet, si $|\gamma| < 1$ l'image est plus petite ;
- si $\gamma > 0$, l'image et l'objet sont dans le même sens, si $\gamma < 0$, l'image est inversée par rapport à l'objet.

4.5 Conditions de Gauss

Comme on vient de voir, les lentilles peuvent sous certaines conditions, être considérées comme stigmatiques et aplanétiques. Une part de ces conditions sont les **conditions de Gauss**.

Conditions de Gauss

Pour pouvoir considérer une lentille comme stigmatique et aplanétique, les rayons lumineux qui la traversent doivent être :

- proches de l'axe optique ;
- pas trop inclinés par rapport à l'axe optique.

Comment caractériser "proches" et "pas trop inclinés" ?

Il suffit que les taches dues à l'astigmatisme du système soient petites devant la taille du capteur utilisé (cônes et bâtonnets de l'œil, taille du capteur CCD d'un appareil photo, etc)

5 Lentilles minces

5.1 Définitions

Les lentilles sont la réunion de deux dioptries sphériques, majoritairement une pièce de verre dont chaque face est taillée en sphère. Elles sont très couramment utilisées, qu'ils s'agissent de verres de lunettes, d'objectifs de microscope, d'oculaire de télescope ou bien encore d'objectif d'appareil photo ou de caméra. Il existe deux types de lentilles :

- les lentilles **convergentes**, ou à bords minces ;
- les lentilles **divergentes**, ou à bords épais.

On définit aussi les lentilles **minces** : leurs bords sont petits devant les rayon de courbure des dioptries.

Les lentilles minces sous les conditions de Gauss peuvent être considérées comme stigmatiques et aplanétiques. C'est le cadre qui définit notre étude dans ce chapitre.

5.2 Caractéristiques et schéma

Pour une lentille, on définit :

- son **centre optique** O qui est son centre de symétrie. L'axe de symétrie est l'axe optique ;
- son **point focal image** ou **foyer image** F' : c'est le point par lequel passent, après traversée de la lentille, tous les rayons qui arrivaient parallèlement à l'axe optique ;
- sa **distance focale** $f' = \overline{OF'}$. La vergence V se trouve par $V = \frac{1}{f'}$ (V s'exprime en m^{-1}) ;
- son **point focal objet** ou **foyer objet** F : c'est le symétrique de F' par rapport à O . Tout rayon qui avant déviation par la lentille passe par F ressort parallèle à l'axe optique. On dit que l'image de F par la lentille est à l'infini.

Pour les lentilles convergente $f' > 0$, pour les lentilles divergentes $f' < 0$.

Schémas (convergente +divergente)

5.3 Constructions

On va maintenant étudier comment construire l'image d'un objet vue à travers une lentille.

5.3.1 Rayons caractéristiques

Il existe 3 rayons très faciles à tracer :

- tout rayon passant par O n'est pas dévié par la lentille ;
- tout rayon passant par F ressort parallèle à l'axe optique ;
- tout rayon arrivant parallèle à l'axe optique ressort en passant par F' .

Schémas (convergente +divergente)

5.3.2 Image d'un point

On utilise le stigmatisme des lentilles minces sous les conditions de Gauss : si on trace deux rayons caractéristiques issus de A , ils se croisent nécessairement en A' , et tout rayon passant par A avant la lentille passera par A' en sortie.

Schémas (convergente +divergente)

5.3.3 Images des plans focaux

Le **plan focal objet** est le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par F . L'image de tout point du plan focal objet est situé à l'infini (tous les rayons ressortent parallèles).

$$\text{plan focal objet} \xrightarrow{\text{lentille}} \infty$$

Le **plan focal image** est le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par F' . Tout objet ponctuel situé à l'infini (les rayons arrivent parallèles entre eux) a son image dans le plan focal image.

$$\infty \xrightarrow{\text{lentille}} \text{plan focal image}$$

Schémas (convergente +divergente)

5.3.4 Image d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique

A sur l'axe optique, B en dehors, AB perpendiculaire à l'axe optique On fait l'image de B, l'image de A est sur l'axe optique perpendiculairement à B' grace à l'aplanétisme de la lentille mince en conditions de Gauss.

Schémas (convergente +divergente).Objet/image virtuel/réel ?

5.3.5 Image d'un rayon lumineux quelconque

On imagine qu'il provient d'un objet ponctuel situé à l'infini en traçant un rayon qui lui est parallèle et passe par O (sans être dévié du coup). Les deux rayons se coupent dans le plan focal image.

5.3.6 Association de deux lentilles

Pour construire l'image d'un objet à travers d'un système optique constitué de deux lentilles, on considère l'image de l'objet par la première lentille comme objet

pour la seconde lentille.

$$\text{objet} \xrightarrow{\text{lentille 1}} \text{image 1} = \text{objet 2} \xrightarrow{\text{lentille 2}} \text{image}$$

5.4 Relations de conjugaison

Il existe des relations qui permettent de connaître la position et la taille de l'image d'un objet AB par une lentille. Il en existe en comptant les distances à partir des foyers F et F' , mais on se contentera ici des **relations de conjugaison de Descartes**, qui comptent les distances à partir du centre O .

5.4.1 Relation de conjugaison de Descartes

La formule qui permet d'obtenir la position A' de l'image d'un objet AB à travers une lentille de longueur focale f' est :

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

La formule qui donne le grandissement transversal est quand à elle :

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

Exercice : représentez sur un schéma l'image d'un objet de taille 20 cm, situé à une distance 60 cm d'une lentille convergent de focale 40 cm. On prendra comme échelle 1 carreau = 10 cm. Quelle st la taille de l'image obtenue? Quelle est sa position? Est-ce compatible avec les formules de conjugaison de Descartes?

Nous venons de voir le principe de fonctionnement des lentilles, nous allons maintenant appliquer ces connaissances nouvelles à deux types applications différentes : l'œil humain, et les appareils photographiques numériques.

6 Application des lentilles aux appareils d'optique

6.1 Modèle de la source ponctuelle monochromatique

Définition

Une source ponctuelle est une source de dimension infiniment petites assimilable à un point.

Conséquences : si on a dispose d'une source ponctuelle en S alors

- tous les rayons lumineux sont des droites issues de S ;
- tous les points situés sur une même sphère de centre S reçoivent le même signal

Définition

Une source ponctuelle monochromatique est une source ponctuelle émettant une onde sinusoïdale.

Le long d'un rayon lumineux et donc d'un axe Sx, l'onde peut s'écrire $s(x, t) = A(x) \cos(\omega t - kx + \phi_0)$. Le long du rayon lumineux, l'amplitude décroît pour prendre en compte le fait que l'onde se dilue sur des sphères de surface de plus en plus grandes. On admettra que $A(x) \propto 1/x$.

Le signal d'une source ponctuelle monochromatique S de pulsation ω est donné en tout point situé à une distance x de S par :

$$s(x, t) = \frac{\alpha}{x} \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

Exemples :

- Avec une lampe spectrale et un filtre interférentiel (plus précis qu'un verre coloré), on peut réaliser une source monochromatique. On utilise alors une lentille convergente et un diaphragme pour réaliser une source ponctuelle.
- Un laser focalisé par un objectif de microscope (lentille convergente) réalise une source ponctuelle monochromatique depuis le point de convergence.

6.2 L'œil humain

L'œil humain est un organe complexe, dont nous allons simplifier l'étude en considérant qu'il est composé :

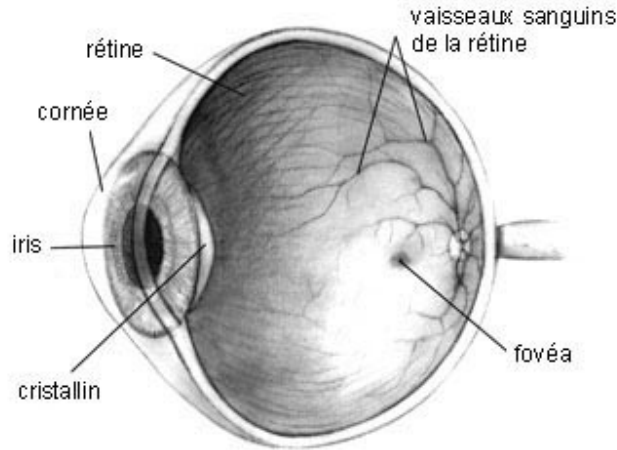


FIGURE 2 – Coupe de l'œil humain

- de la **cornée** : c'est une couche de protection transparente ;
- de l'**iris** : c'est la partie colorée de l'œil. C'est un muscle qui sert à ouvrir ou fermer la **pupille**, le point noir au centre de l'œil à travers lequel passe la lumière, afin de contrôler la quantité de lumière perçue ;
- le **cristallin** : c'est un petit disque transparent situé derrière la pupille et qui a pour but de focaliser les rayons sur la rétine. Il est pourvu de muscles qui lui permettent de changer de forme ;
- la **rétine** : c'est le fond de l'œil, tapissé de capteurs appelés bâtonnets (luminosité) et cônes (couleur).

En première approximation, on peut considérer que l'œil est équivalent à une lentille convergente de focale variable (le cristallin) qui forme une image sur un écran fixe (la rétine).

6.2.1 Pouvoir de résolution

Pour pouvoir distinguer deux objets, il faut que leurs images respectives se forment sur deux cellules différentes de la rétine. Dans des conditions optimales

d'éclairement et de contraste, l'œil peut distinguer des détails d'environ 1 minute d'arc (1/60ème de degré). On appelle cette grandeur le **pouvoir séparateur** ou la **limite de résolution** de l'œil.

Dans des conditions optimales d'éclairement et de contraste, le pouvoir séparateur de l'œil est d'environ 1 minute d'arc soit 3.10^{-4} rad.

6.2.2 Distance de mise au point - accommodation

Lorsque le cristallin n'est pas contracté, l'œil voit net le plus loin possible, on appelle ce point le **punctum remotum**. Lorsque le cristallin se contracte, il se bombe et la focale diminue : ce sont des objets plus proches qui ont leur image qui est nette sur la rétine, on dit alors que l'œil **accomode**. Lorsque le cristallin est contracté à son maximum, l'œil voit net le plus près possible, il s'agit du **punctum proximum**.

La zone située entre le *punctum proximum* et le *punctum remotum* est le **champ en profondeur de l'œil**.

Pour un œil normal, le *punctum proximum* est situé à 25 cm et le *punctum remotum* est à l'infini.

Dessins de l'œil regardant à l'infini sans accommoder, puis accommodant pour voir au PP.

6.2.3 Quelques défauts courants de l'œil

Myopie : le cristallin est trop bombé donc trop convergent. Le PR n'est plus à l'infini. Corrigé avec une lentille divergente.

Hypermétropie : le cristallin n'est pas assez convergent, l'œil doit accommoder pour voir à l'infini. Corrigé avec une lentille convergente.

Astigmatisme : le cristallin n'est pas à symétrie axiale. Verre asphériques pour corriger.

Presbytie : le cristallin n'est plus assez souple pour se déformer assez. Correction avec des verres progressifs (focale différente selon l'endroit du verre).

6.3 Approche documentaire - L'appareil photographique numérique

ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

ETUDE DES DIFFÉRENTS RÉGLAGES D'UN APPAREIL PHOTO NUMÉRIQUE.

On va s'intéresser aujourd'hui à la manière dont fonctionne un appareil photographique numérique (APN). On verra dans un premier temps comment modéliser l'APN de manière assez simple pour effectuer l'étude tout en restant assez précis afin d'étudier les différents réglages nécessaires à l'obtention d'une prise de vue correcte.

Objectifs : Comprendre l'influence des différents réglages d'une prise de vue avec un APN.

1 Principe de fonctionnement d'un APN de type reflex

Un APN de type reflex est constitué de plusieurs parties afin de réaliser la visée (on observe la scène qui va être photographiée à travers un viseur) et la prise de vue (on envoie l'image sur un capteur qui fixe l'image).

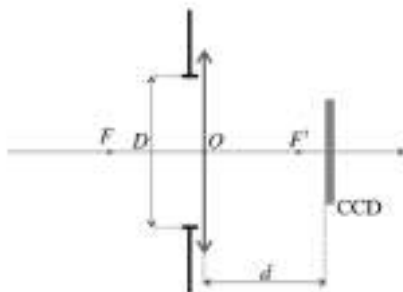
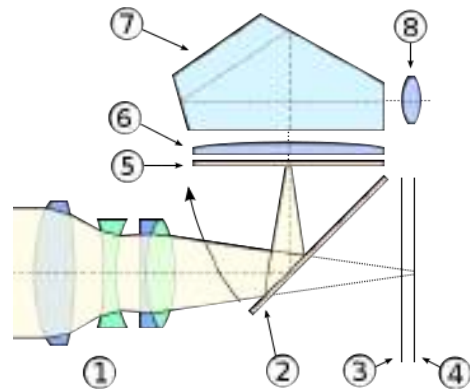
Une caractéristique des appareils reflex est la possibilité de changer d'objectif. L'objectif (1) est un ensemble de lentilles qui servent à faire l'image de la scène sur le capteur.

Après la traversée de l'objectif les rayons lumineux sont dirigés soit vers le viseur (quand le miroir (2) est abaissé) soit vers le capteur lors du déclenchement de la photographie (le miroir se relève alors). Le miroir est la raison pour laquelle ce type d'appareil s'appelle reflex.

Lors de la visée, les rayons lumineux traversent alors un nouveau système optique en plusieurs parties (5,6,7) puis une lentille (8) appelée oculaire qui sert à faire en sorte que l'objet visé ait son image envoyée à l'infini, ce qui permet au photographe de viser sans accommoder le cristallin.

Lors de la prise de vue, les rayons lumineux sont envoyées sur le capteur (4) lorsque le rideau obturateur (3) se relève. Les premiers capteurs étaient des pellicules recouvertes de sels d'argent noircissant quand ils sont exposés à la lumière, dans les APN les capteurs sont des capteurs photoélectroniques de type CCD.

Lors de la photographie, il est possible de jouer sur plusieurs paramètres pour obtenir des effets différents. Parmi ces paramètres, nous étudierons le *temps d'exposition* qui correspond à la durée pendant laquelle le rideau obturateur laisse passer les rayons lumineux vers le capteur. Un autre est la *focale* de l'objectif, et un dernier est l'*ouverture* qui correspond au diamètre du diaphragme qui contrôle la quantité de rayons lumineux qui entrent par l'objectif.



Par la suite, nous modéliserons la prise de vue par un système optique centré constitué d'un diaphragme circulaire, d'une lentille convergente de focale f' collée au diaphragme et d'un capteur qu'on assimilera à un écran situé à une distance d .

Question (1.1)

Où doit se former l'image de l'objet visé par le photographe ?

Question (1.2)

Quel paramètre le photographe peut-il changer lorsqu'il fait la mise au point (le choix de l'objet visé) ?

2 Influence du temps d'exposition

Il est possible de changer le temps d'exposition lors d'une prise de vue. Vous trouverez dans la figure 1 trois photographies effectuées avec la même focale et des temps d'exposition différents.

Question (2.1)

Les temps d'exposition des photographies sont de 30 s, de 1/20ème de s et de 1/250ème de s. Attribuez à chaque photographie son temps d'exposition en justifiant et en utilisant les termes *sous-exposition*, *sur-exposition* et *exposition correcte*.

Question (2.2)

A part l'exposition de la photo, que l'on peut aussi régler par l'ouverture du diaphragme, quel est l'intérêt d'avoir un temps d'exposition très faible? Très long?

3 Influence de la focale

En mode automatique, l'appareil contrôle lui-même l'exposition afin que les photos soient correctement exposées. On procède avec un objectif à focale variable à la prise de vue de la même scène depuis le même endroit en changeant la focale. Vous trouverez les photographies correspondantes à la figure 2.

Question (3.1)

Quelle est l'influence du choix de la focale sur la photographie obtenue?

Question (3.2)

Interprétez cette influence à l'aide de schémas représentant deux photographies avec des focales différentes et un capteur de taille identique (il n'est pas possible de changer la taille du capteur dans un APN).

4 Influence de l'ouverture (du diaphragme)

Il existe aussi un mode appelé *priorité ouverture* où le photographe contrôle la taille du diaphragme placé avant la lentille. L'appareil photographique numérique choisit alors le temps d'exposition convenable pour avoir une photographie correctement exposée. L'ouverture se mesure généralement en *nombre d'ouverture* qui est le rapport entre la focale f' et le diamètre du diaphragme D : $N = \frac{f'}{D}$. Vous trouverez à la figure 3 deux photographies de la même scène, prises du même endroit avec deux nombres d'ouverture différents.

Photométrie : La photométrie est l'étude de l'énergie transmise par les rayons lumineux. Il y a quelques grandeurs pertinentes en photométrie qui vont nous être utiles pour notre étude.

- L'énergie rayonnée par une source dépend linéairement du temps (si on attend deux fois plus longtemps, la source rayonnera deux fois plus d'énergie). On définit donc le flux lumineux Φ qui est la puissance rayonnée par une source, et qui se mesure donc en W.
- la puissance reçue par un capteur dépend linéairement de sa surface. On définit donc l'éclairement \mathcal{E} qui est le flux lumineux reçu par un capteur divisé par sa surface, et s'exprime donc en W.m^{-2}

Question (4.1)

Les deux photographies de la figure 3 ont été prises avec des temps d'exposition de 1/60ème de seconde et de 0,5 s. Attribuez à chaque photographie son temps d'exposition.

Question (4.2)

Le flux lumineux étant émis par la source, il ne dépend pas de l'APN. Quelle doit être la relation mathématique entre l'ouverture du diaphragme et le temps d'exposition pour que chaque pixel du capteur reçoive la même énergie rayonnée et donc que les deux photographies soient bien exposées?

Question (4.3)

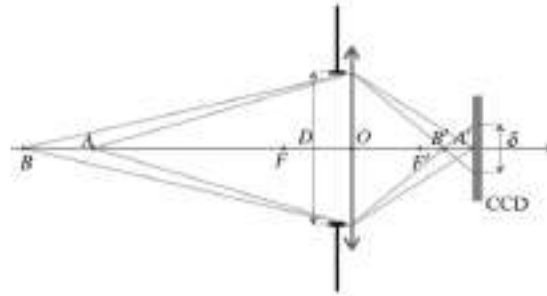
Est-ce que cette relation est vérifiée ici?

Question (4.4)

En étudiant les deux photographies, comment doit-on choisir le nombre d'ouverture afin que la profondeur de champ soit la plus grande possible?

Question (4.5)

Si on souhaite la profondeur de champ la plus grande possible, doit-on ouvrir le diaphragme ou le fermer ?



Question (4.6)

En vous servant du schéma ci-dessus, déterminez la taille δ de la tache que fait un point situé en B lorsque la mise au point est faite en A , en fonction de D , de OB' et de $B'A'$.

Question (4.7)

Sachant que si la tache est plus grande qu'un pixel, l'objet B sera flou, est-ce que cette formule est cohérente avec votre observation des photographies ?



FIGURE 1 – 3 photographies différentes de la même scène prises avec un objectif de focale 28 mm, et des temps d'exposition différents.



FIGURE 2 – 3 photographies différentes de la même scène prises en mode automatique avec un objectif de focale variable. La focale prend les valeurs 18 mm, 34 mm et 55 mm en allant de gauche à droite.

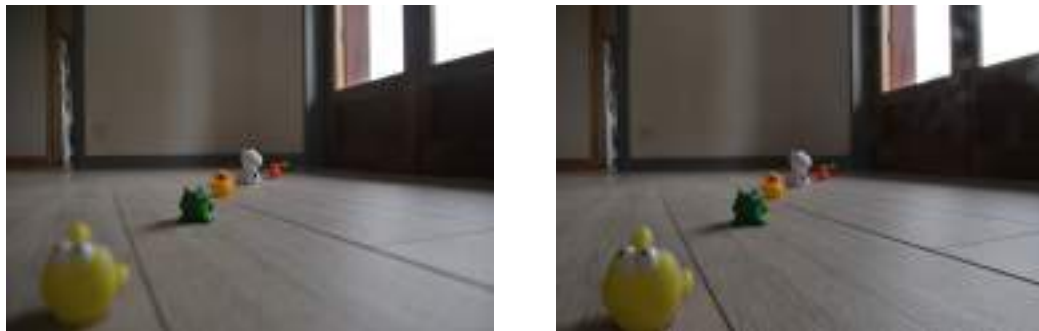


FIGURE 3 – 2 photographies différentes de la même scène prises en mode priorité ouverture avec un objectif de focale 18 mm. Les nombres d'ouverture sont $N = 3,5$ à gauche et $N = 22$ à droite. Dans les deux cas, la mise au point est faite sur la vache.