

Sciences Appliquées
SCIAP1
BTS Cinéma et Audiovisuel

Raymond Kneip¹

Lycée Technique des Arts et Métiers
Département de Physique
19, rue Guillaume Schneider
L - 2522 Luxembourg

28 janvier 2015

1. <http://www.ltam.lu/physique>

Table des matières

I	Optique géométrique	1
1	La lumière - notions de base	3
1.1	Propagation rectiligne de la lumière.	4
1.2	La vitesse de la lumière.	5
1.2.1	Exercices	5
1.3	Ombre et pénombre	6
1.3.1	Exemples	7
1.3.2	Exercices	9
1.4	Le spectre électromagnétique	11
1.4.1	Exercices	12
2	Réflexion	13
2.1	Réflexion sur un miroir plan	13
2.1.1	Exemples	15
2.2	Réflexion diffuse	16
2.2.1	La réflectance	17
2.2.2	Exercices	20
3	Réfraction	21
3.1	La loi de la réfraction	22
3.1.1	Propagation vers un milieu plus réfringent : réfraction limite	24
3.1.2	Propagation vers un milieu moins réfringent : réflexion totale	24
3.1.3	Exercices	26
3.2	La dispersion	27
4	Les lentilles minces	31
4.1	Les lentilles convergentes	32
4.1.1	Exercices	37
4.2	Les lentilles divergentes	39
5	Les aberrations optiques	41
5.1	Aberrations géométriques	42
5.1.1	Aberration sphérique	42
5.1.2	Aberration de coma	44
5.1.3	Astigmatisme	45
5.1.4	Distorsion	46
5.2	Aberration chromatique	47
5.2.1	L'achromat	49
5.2.2	L'apochromat	50

6 Les systèmes optiques	51
6.1 L'appareil photographique - la caméra	51
6.1.1 Le nombre d'ouverture	52
6.1.2 Le champ de vue	54
6.2 La lunette	57
6.2.1 Le grossissement	58
6.2.2 La résolution	58
6.2.3 Le nombre d'ouverture	59
6.3 Le télescope	60
6.4 Le microscope	61
6.5 Le projecteur	62
Rappels de trigonométrie	65
Solution des exercices	67

Première partie

Optique géométrique

Chapitre 1

La lumière - notions de base

L'optique géométrique est une branche de l'optique qui s'appuie notamment sur le modèle du *rayon lumineux*. Cette approche simple permet notamment des constructions géométriques d'images. L'optique géométrique constitue un outil très flexible pour traiter les systèmes optiques et permet d'expliquer la formation des images produites par ces systèmes. Ce modèle décrit entre autre les phénomènes de réflexion, de réfraction, de dispersion et la photométrie.

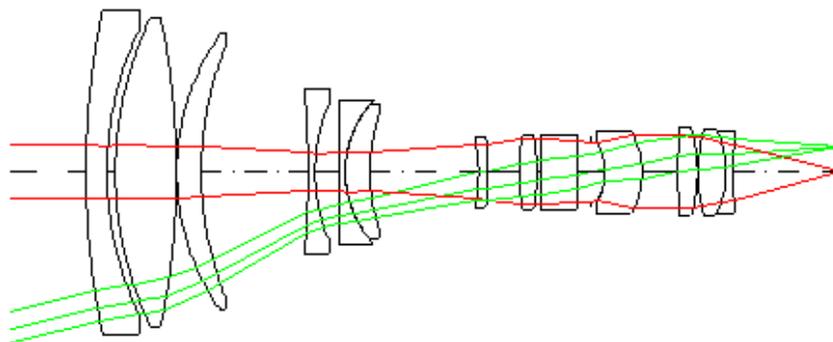


FIGURE 1.1 – Trajet de rayons lumineux à travers un système de lentilles.

Domaine de validité de l'optique géométrique : La dimension du système doit être grande devant la longueur d'onde qui se propage. Lorsque les dimensions du système physique sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, les observations ne correspondent en partie plus aux prédictions du modèle de l'optique géométrique. Un autre modèle est nécessaire pour faire la description des phénomènes observés.

L'optique ondulatoire étudie la lumière en la considérant comme étant une *onde électromagnétique*. L'optique ondulatoire s'attache plus particulièrement aux phénomènes affectant les ondes, comme les interférences, la diffraction et la polarisation.

2. Plus de détails sur la page <http://www.ephotozine.com/article/easy-cross-polarisation-14716>

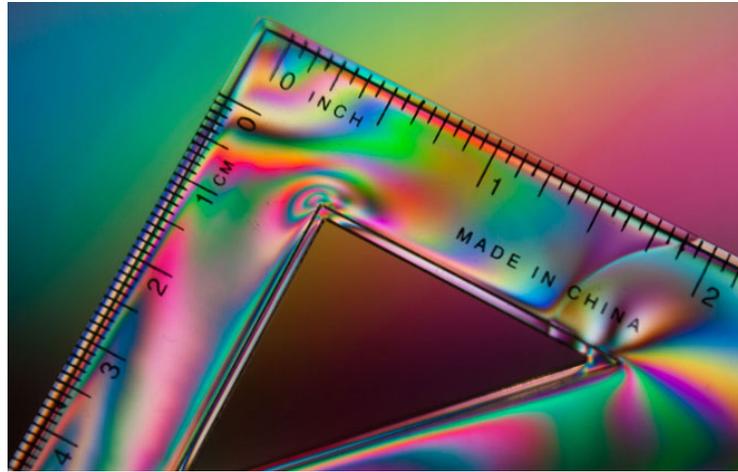


FIGURE 1.2 – Effet de polarisation (*cross polarising effect*) en utilisant deux filtres de polarisation ; le premier devant la caméra, le deuxième devant la source lumineuse. Ainsi on peut visualiser le stress dans le plastique qui se manifeste par des zones multicolores.².

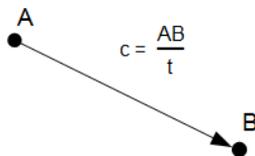
1.1 Propagation rectiligne de la lumière.

Pour décrire la propagation rectiligne, on a l'habitude de représenter les *rayons lumineux* sous forme de lignes droites issues de la source. Une flèche indique le sens de déplacement. Si cette formalisation n'a pas de support physique, elle est très pratique pour la compréhension des phénomènes. De nombreux rayons très serrés issus de la même source forment un *pinceau*. Enfin, en raison du principe de propagation rectiligne de la lumière, sa trajectoire ne dépend pas de son sens de propagation (figure 1.4).



FIGURE 1.3 – Rayons de soleil passant à travers les nuages.

Lorsque la lumière se déplace dans un milieu homogène, elle se propage à vitesse constante. En connaissant par exemple la distance AB parcourue par la lumière pendant le

FIGURE 1.4 – Propagation rectiligne de la lumière entre deux points A et B .

temps t , on peut déterminer la célérité c^3 par :

$$\boxed{c = \frac{AB}{t}} \quad (1.1)$$

1.2 La vitesse de la lumière.

Dans le vide, la lumière se propage rectilignement à une vitesse de propagation (aussi appelée célérité) de $299\,792.458 \frac{km}{s}$, donc d'à peu près $300\,000 \frac{km}{s}$. C'est la plus grande vitesse qui puisse exister dans l'univers.

$$\boxed{c = 299\,792.458 \frac{km}{s}} \quad (1.2)$$

Lorsque la lumière passe dans un autre milieu, sa vitesse est toujours inférieure à la vitesse qu'elle a dans le vide.

1.2.1 Exercices

1. La Terre est à une distance d'environ $150\,10^6 \text{ km}$. Déterminez le temps nécessaire à la lumière pour parcourir le trajet Soleil-Terre. Exprimez le résultat en minutes.
2. Déterminez le temps nécessaire à la lumière pour parcourir une salle d'une longueur de 30 m .
3. La célérité du son est d'environ $330 \frac{m}{s}$. Trois secondes, après avoir vu un éclair, on entend la tonnerre. Déterminez la distance entre l'observateur et le lieu d'impact de l'éclair. Quel est le temps nécessaire à la lumière pour parcourir cette distance? Comparez les deux résultats.

3. Ce terme est utilisé pour désigner la vitesse de propagation d'un phénomène ondulatoire tel que la lumière.

1.3 Ombre et pénombre

Une conséquence qui découle de la propagation rectiligne de la lumière est la formation des ombres. Si un objet opaque est éclairé par une source lumineuse ponctuelle, sa partie non-éclairée est appelée *ombre propre*. La région qui se trouve derrière l'objet et qui ne reçoit pas de lumière venant de la source est appelée *cône d'ombre*. Sur un écran placé dans le cône d'ombre se forme une silhouette du corps appelée *ombre portée*⁴.

Une seule source ponctuelle fournit une ombre portée avec des contours nets. Deux sources ponctuelles donnent des ombres portées qui peuvent se recouvrir partiellement.

Dans ce cas, on appelle *cône d'ombre pure* la région dans laquelle ne pénètre aucune lumière. Ce cône est entouré d'une zone de *pénombre* qui n'est éclairée que par une des deux sources lumineuses.

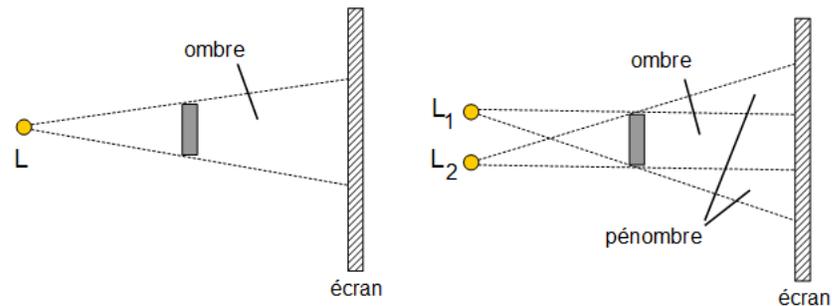


FIGURE 1.5 – Ombre produite par une resp. deux sources lumineuses ponctuelles



FIGURE 1.6 – Shadow art⁵.

4. Dans le langage commun, le terme ombre désigne aussi bien le cône d'ombre que l'ombre portée.

5. Plus d'exemples surprenants, voir <http://artrebels.com/blog/shadow-art>

Pour une source étendue, le passage de la région sombre à la région éclairée se fait d'une façon continue. Cette région de transition, qui n'est éclairée que par une partie de la source, est aussi appelée pénombre.

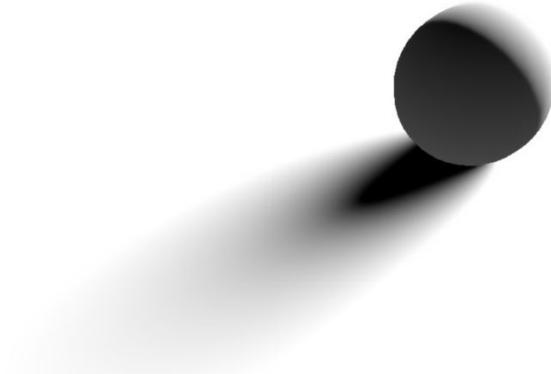


FIGURE 1.7 – Ombre d'une sphère illuminé par une source lumineuse étendue.

1.3.1 Exemples



FIGURE 1.8 – L'ombre portée d'une sphère n'est pas toujours circulaire. Expliquez.



FIGURE 1.9 – Expliquez la forme des ombres portées de ces deux personnages.



FIGURE 1.10 – Ombre très connue; rien n'y est à ajouter.



FIGURE 1.11 – Comparez l'ombre portée de la personne et de la main. Quelles sont les observations qu'on peut faire et expliquez-les.



FIGURE 1.12 – L'homme, était-il vraiment sur la lune; ou est-ce que ces photos ont été réalisées dans un studio en utilisant deux sources lumineuses ?



FIGURE 1.13 – A-t-on besoin de deux sources lumineuses pour expliquer les directions de ces ombres ?

1.3.2 Exercices

1. Tracez les rayons nécessaires pour déterminer les ombres portées sur les murs dans le cas des deux exemples suivants (voir page suivante).
2. Quel est l'angle que forme le soleil avec l'horizontale en hiver resp. en été (pour l'Europe centrale) ?
Quelle est alors la longueur de l'ombre portée pour une personne d'une hauteur de $h = 1.70 \text{ m}$ (sur une surface plane et horizontale) ?
De quelle manière change l'ombre portée lorsqu'on se trouve sur une surface plane, mais légèrement inclinée ?
3. Une source lumineuse ponctuelle est posée sur le sol à 2 mètres d'un mur vertical. Où doit on poser une souris (hauteur de la souris : 8 cm) pour qu'elle projette une ombre portée d'une hauteur de 80 cm sur ce mur ?

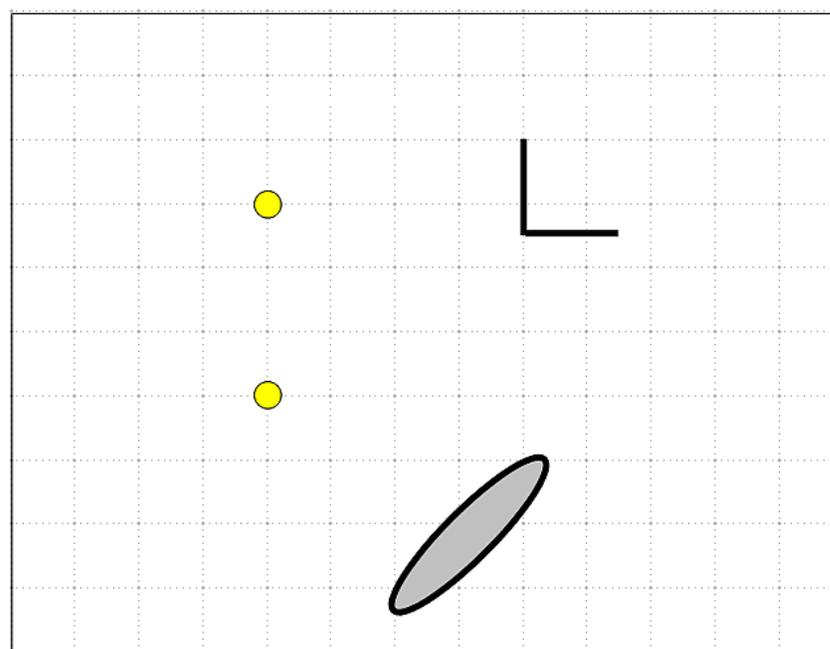
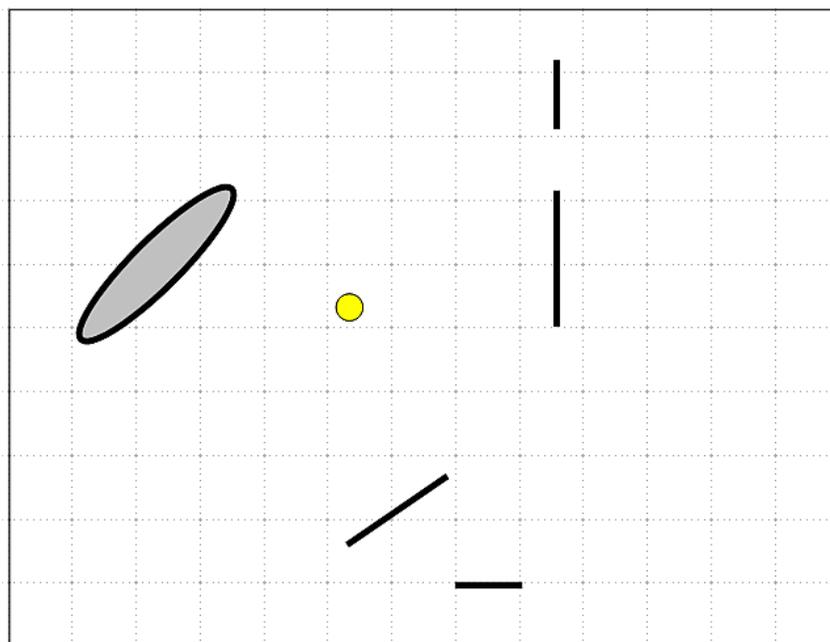


FIGURE 1.14 – Tracez les ombres portées sur les murs dans le cas d'une et de deux sources lumineuses ponctuelles.

1.4 Le spectre électromagnétique

Dans le modèle ondulatoire, la lumière est décrite comme une *onde électromagnétique*. Les ondes électromagnétiques sont des phénomènes périodiques qui se propagent aussi bien dans un milieu matériel que dans le vide. Les ondes électromagnétiques sont constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique (perpendiculaire au premier) qui varient périodiquement dans le temps. La plupart des effets lumineux étant directement liés à l'existence du champ électrique, l'optique s'intéresse essentiellement à l'évolution du champ électrique.

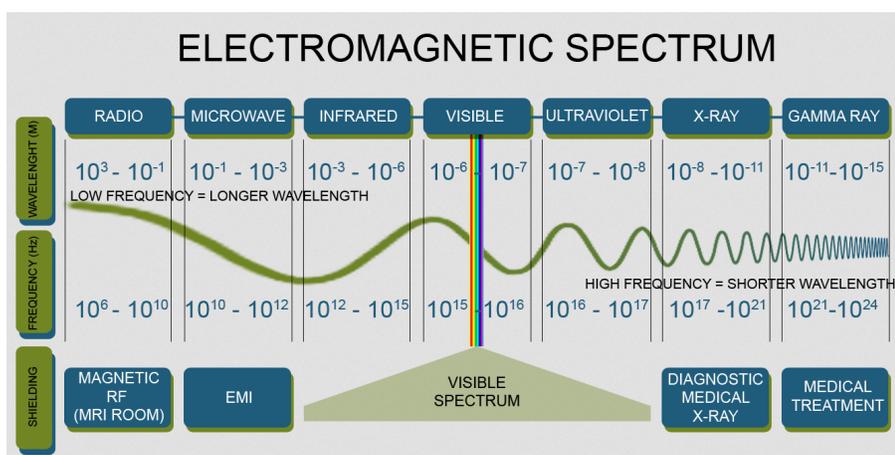


FIGURE 1.15 – Le spectre électromagnétique

Ces ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière c . Les grandeurs, nécessaires pour caractériser ces ondes sont la *fréquence* et la *longueur d'onde*.

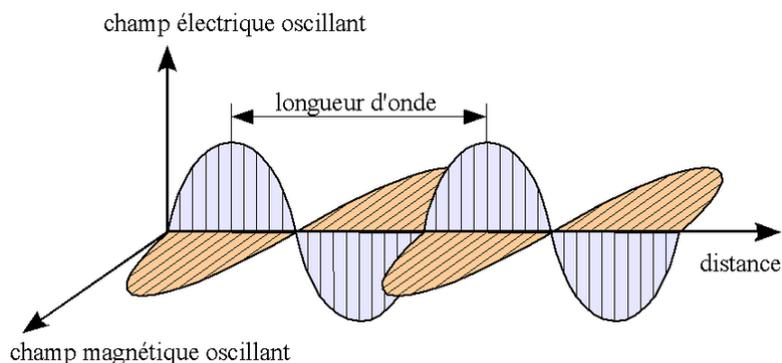


FIGURE 1.16 – Une onde électromagnétique est formée par un champ électrique et un champ magnétique oscillant. Il s'agit d'une *onde transversale*.

Définitions

La fréquence f est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de mesure du temps.

L'unité de fréquence est le *Hertz*, Hz .

$$[f] = \frac{1}{s} = Hz$$

La longueur d'onde λ est la plus courte distance séparant deux points de l'onde strictement identiques à un instant donné.

L'unité de la longueur d'onde est le *mètre*, m .

$$[\lambda] = m$$

La fréquence f et la longueur d'onde λ sont liées par la relation suivante :

$$\boxed{c = f\lambda} \quad (1.3)$$

La lumière que nous voyons n'est qu'une petite partie du spectre électromagnétique. Les longueurs d'onde des radiations visibles (dans le vide) sont comprises entre environ $\lambda = 400 \text{ nm}$ et $\lambda = 750 \text{ nm}$. En fait, les limites du spectre visible varient selon l'acuité de l'oeil de l'observateur et selon l'intensité perçue. Les longueurs d'onde ultraviolettes et infrarouges forment deux régions adjacentes du spectre visible.

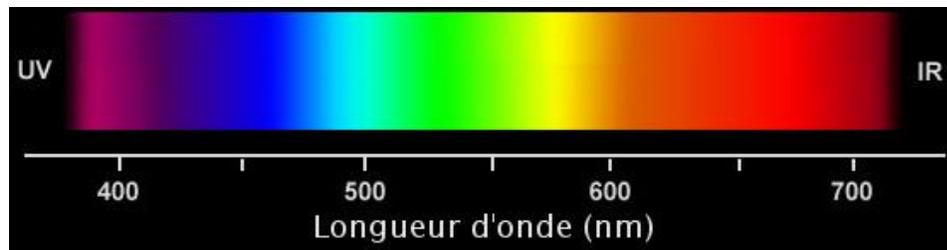


FIGURE 1.17 – La partie visible du spectre électromagnétique.

1.4.1 Exercices

1. Déterminez la longueur d'onde des couleurs bleu, rouge et verte (d'après la figure précédente.). Calculez les fréquences associées.
2. Les ondes sonores perceptibles par l'oreille humaine ont des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz . Déterminez les longueurs d'ondes correspondantes aux fréquences données.

Attention : Les ondes sonores (*ondes longitudinales*) ne sont pas à confondre avec les ondes électromagnétiques. Les ondes sonores ont une célérité d'environ 340 m/s dans l'air ambiant.

Chapitre 2

Réflexion

Une méthode pour étudier le trajet d'un rayon lumineux réfracté ou réfléchi par une surface de séparation a été suggérée par *Pierre de Fermat* en 1658. Elle s'intéresse au temps de propagation plutôt qu'au trajet géométrique suivi par la lumière et définit ainsi *un principe de moindre temps* ou *principe de Fermat*.

Pour aller d'un point à un autre, la lumière suit, parmit toutes les trajectoires possibles, celle dont le temps de parcours est extrémal.

Par ce principe, on peut démontrer aussi bien la loi de la réflexion que la loi de la réfraction.

2.1 Réflexion sur un miroir plan

Lorsque la lumière tombe sur un *miroir plan* ou une autre surface lisse, elle revient dans le milieu où elle a été émise suivant une direction déterminée : c'est le phénomène de la réflexion de la lumière.



FIGURE 2.1 – Reflets sur une surface plane.

Un rayon incident perpendiculaire (normal) au miroir est réfléchi en lui-même. Si l'incidence est oblique, le rayon est réfléchi dans une autre direction. Les directions des rayons incident et réfléchi sont repérées par les angles d'incidence et de réflexion.

L'angle d'incidence i est l'angle formé par le rayon incident et *la normale au miroir*

(droite perpendiculaire au miroir passant par le point d'incidence). L'angle entre la normale et le rayon réfléchi est appelé *angle de réflexion* r .

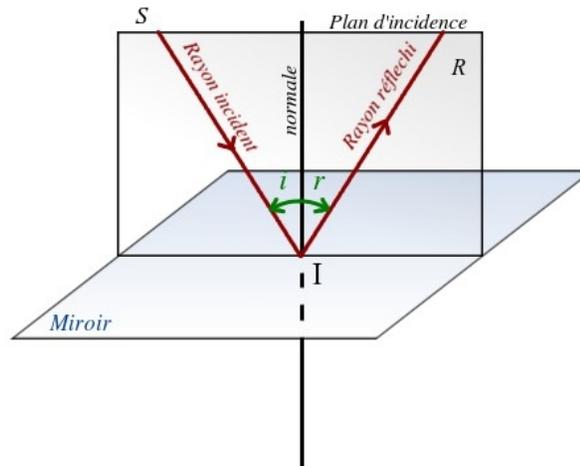


FIGURE 2.2 – Réflexion sur un miroir plan.

Loi de la réflexion¹ :

1. Les rayons incident et réfléchi sont situés dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.
2. Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :

$$\boxed{i = r} \quad (2.1)$$



FIGURE 2.3 – Complétez la figure. Tracez la normale; mesurez l'angle d'incidence et tracez correctement le rayon réfléchi.

1. Loi, aussi appelée *première loi de Snell-Descartes*

2.1.1 Exemples

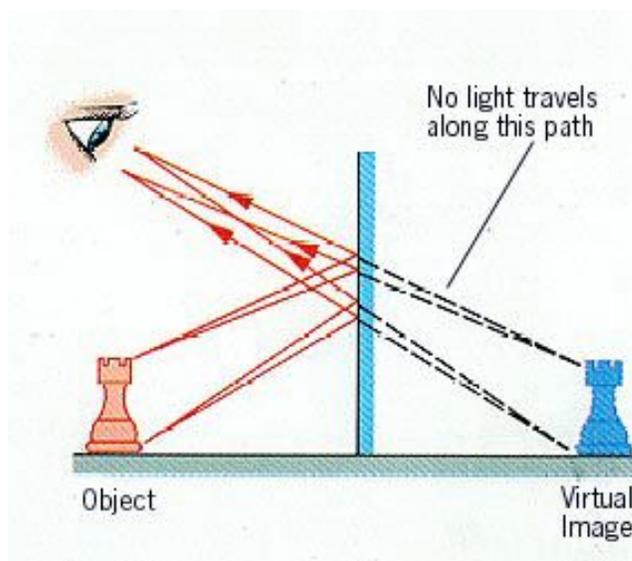


FIGURE 2.4 – Lorsqu'on regarde dans un miroir plan, on voit l'image virtuelle d'un objet. Par la méthode décrite dans la figure, on peut déterminer le trajet des rayons lumineux, sans appliquer la loi de la réflexion.

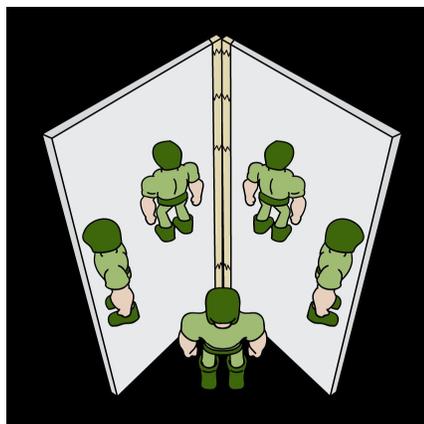


FIGURE 2.5 – En utilisant plusieurs miroirs, on peut observer des situations particulières (p.ex. : deux miroirs à angle droit, où deux miroirs parallèles).³

3. voir sous : <http://www.education.com/science-fair/article/how-many-images-make-mirrors/>.

2.2 Réflexion diffuse

La réflexion est dite *diffuse* lorsque la lumière est réfléchiée dans un grand nombre de directions. C'est le phénomène qui permet la vision d'un objet éclairé. Cette diffusion permet de créer, de la manière la plus simple, *une source lumineuse orthotrope*⁴. C'est le cas d'un simple écran de cinéma, dont la surface est perlée, mais aussi des décors mats ou des visages poudrés.

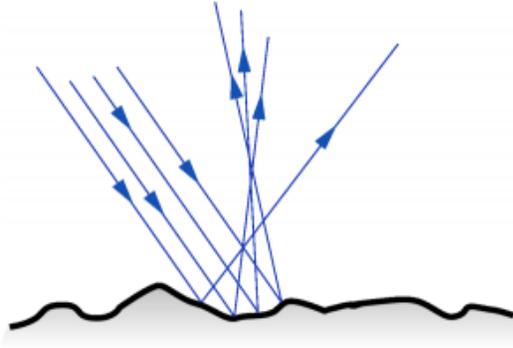


FIGURE 2.6 – La réflexion diffuse.

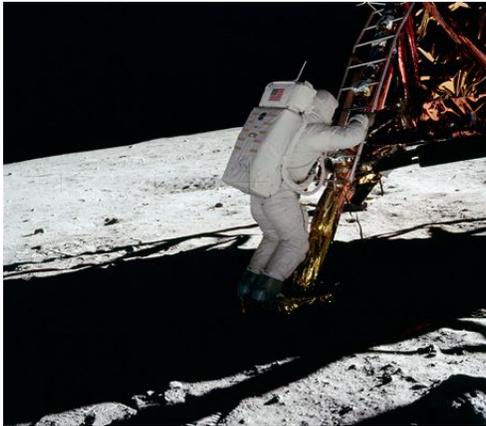


FIGURE 2.7 – Buzz Aldrin en train de descendre sur la surface lunaire (*Apollo 11*). On voit très bien l'astronaute, bien qu'il est dans l'ombre du module lunaire. Est-ce que cette scène à été tournée dans un studio?



FIGURE 2.8 – La situation : une boîte, illuminé par une source unique, est posée sur un sol rugueux. Et on voit bien quelque chose!

4. Une source lumineuse orthotrope est une source de lumière uniforme angulairement, c'est-à-dire dont la luminance est la même dans toutes les directions

2.2.1 La réflectance

Lorsque la lumière frappe une surface, une partie de la lumière est réfléchi. La quantité réfléchi dépend de plusieurs facteurs : de la nature de la surface réfléchissante, de la structure de cette surface, de l'angle d'incidence de la lumière, de la longueur d'onde de la lumière incidente,

Influence de la longueur d'onde sur la réflectance

La *réflectance* désigne le rapport entre le *flux lumineux* (voir chapitre sur la photométrie) réfléchi et le flux lumineux incident ; elle est également nommée *facteur de réflexion*. La réflectance peut être exprimée en %.

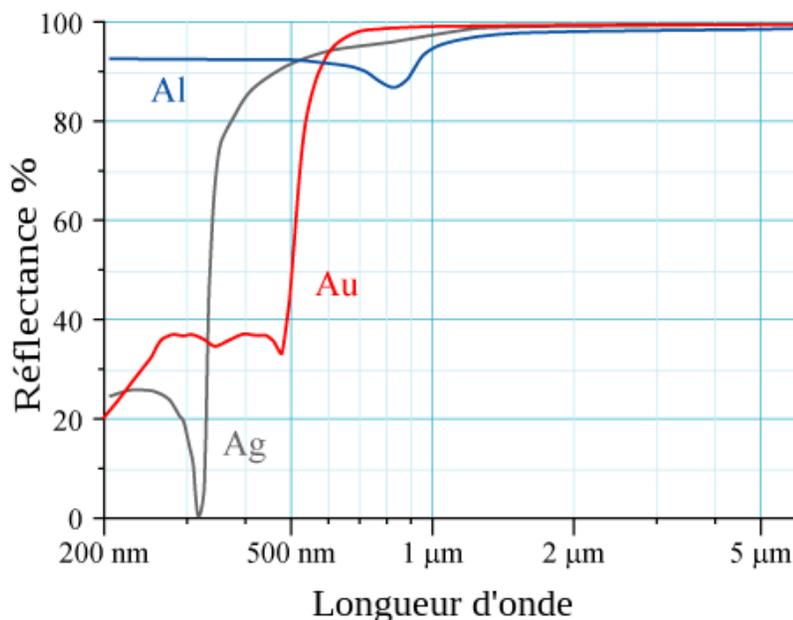


FIGURE 2.9 – Réflectance de trois métaux différents.

L'aluminium a une réflectance plus ou moins constante dans le domaine du visible ; une source lumineuse blanche réfléchi paraît toujours blanche après réflexion.

L'or a une réflectance très élevée pour des longueurs d'ondes supérieures à environ 600 nm. La lumière de couleur orange et rouge est prépondérante dans le spectre de la lumière réfléchi. Par conséquent, plus le flux de lumière réfléchi (orange et rouge) est grand, plus le flux de lumière transmise à travers le matériel considéré est faible.

Les réflecteurs sont utilisés pour contrôler le flux et la couleur de la lumière. Le réflecteur or donne un ton chaud. Le réflecteur argenté est utilisé pour donner une lumière brillante. Le réflecteur blanc procurera un éclairage doux et neutre. Finalement, un réflecteur translucide diffuse et adoucit l'éclairage.



FIGURE 2.10 – Quelques exemples de réflecteurs.



FIGURE 2.11 – Modèle illuminé par un réflecteur blanc (à gauche) et doré (à droite) ⁵.

5. voir sous : <http://www.vivrelaphoto.com/video-reflecteurs-photo-comment-sen-servent-les-photographes-pro/>.

Influence de l'angle d'incidence sur la réflectance

Lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur une surface réfléchissante - comme p. ex. une fenêtre, une lentille, un plan d'eau - on observe en général une réflexion partielle. Plus l'angle d'incidence est grand, plus la réflectance est élevée.



FIGURE 2.12 – Reflections sur les fenêtres d'un immeuble.

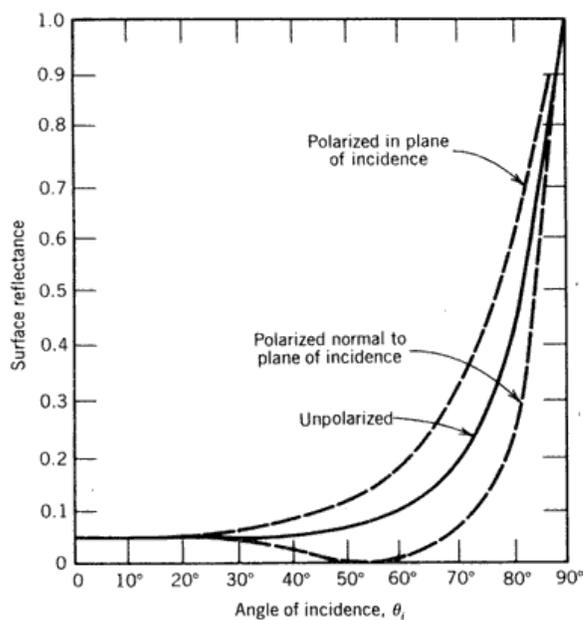


FIGURE 2.13 – Réflectance d'un verre ordinaire (BK7). La réflectance d'un rayon lumineux non-polarisé ainsi que de rayons polarisés sont montrés dans le diagramme.

Pour une incidence normale à la surface d'un verre ordinaire, à peu près 4% de la lumière incidente est réfléchi. À part de l'augmentation de la réflectance en fonction de l'angle d'incidence, on peut observer une *polarisation* (partielle) de la lumière après la réflexion. En utilisant des *filtres polarisants*, on peut éliminer partiellement ces reflêts.

2.2.2 Exercices

1. Déterminez la réflectance (en %) du verre pour un angle d'incidence de 0° , 60° et 75° degrés (rayon lumineux non-polarisé).
2. Les visières des pompiers et astronautes sont revêtues d'une couche dorée. Expliquez en utilisant les informations de la figure 2.9.
3. Le diagramme suivant donne (pour différentes épaisseurs) la transmittance du verre BK7 en fonction de la longueur d'onde du rayonnement qui le traverse. La *transmittance* d'un matériau ou d'un filtre est la fraction du flux lumineux le traversant. Elle est également nommée *facteur de transmission* mais aussi *transparence* dans le domaine de la photographie.

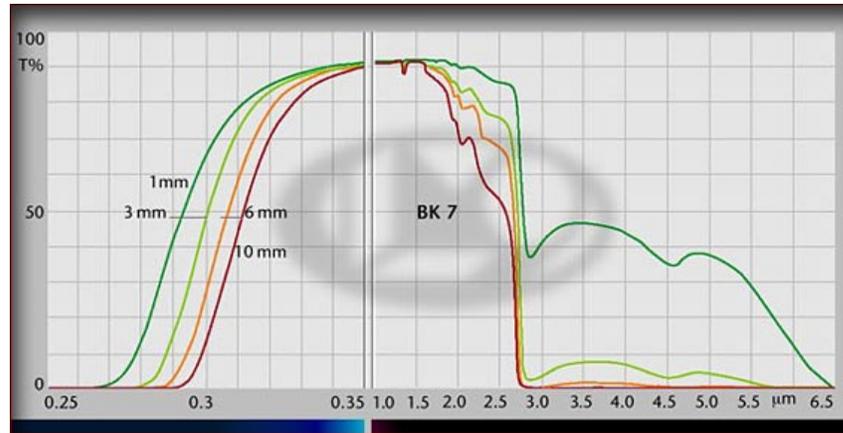


FIGURE 2.14 – Transmittance d'un verre (BK7) en fonction de la longueur d'onde⁶

Que peut-on dire de la transparence du verre (d'une vitre) dans le domaine de l'ultraviolet, du visible et dans le domaine de l'infrarouge ?

4. Une photo a été prise à travers une fenêtre; une fois avec une caméra ordinaire; une fois avec une caméra infrarouge. Que peut-on voir ? Expliquez en utilisant les informations données par la figure 2.14.



FIGURE 2.15 – Vue à travers la fenêtre de notre bureau de physique prise, une fois avec une caméra ordinaire, une fois avec une caméra infrarouge.

6. voir *Transmission Curves* sous : <http://www.laseroptik.de/index.php?Catalogs:Substrates>.

Chapitre 3

Réfraction

Lorsqu'un rayon lumineux tombe obliquement sur la surface de séparation entre par exemple l'air et le verre ou l'air et l'eau, il subit un brusque changement de direction. Ce phénomène est appelé *réfraction*. On dit que la lumière est *réfractée*.



FIGURE 3.1 – Deux exemples sur les effets de la réfraction lors du passage de la lumière entre l'eau et l'air. Dans le deuxième exemple, les verres d'eau se comportent comme des lentilles.

3.1 La loi de la réfraction

Expérience

Deux milieux transparents sont délimités par une surface de séparation plane. Nous appelons *angle d'incidence* i l'angle formé par le rayon lumineux incident et la normale à la surface de séparation. L'*angle de réfraction* r est l'angle entre le rayon réfracté et la normale.

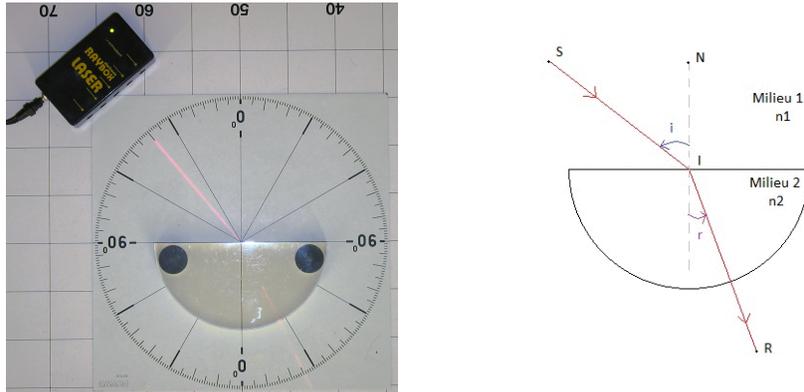


FIGURE 3.2 – *Gauche* : Expérience pour mesurer l'angle d'incidence en fonction de l'angle de réfraction. *Droite* : schéma du dispositif expérimental.

Sur un disque muni d'une graduation d'angle on dispose, en son centre, un demi-disque en plexiglas (voir fig. 3.2). On dirige un faisceau laser vers le centre de celui-ci. On mesure aussi bien l'angle d'incidence que l'angle de réfraction. Les mesures prises sont représentées dans un diagramme (voir fig. 3.3).

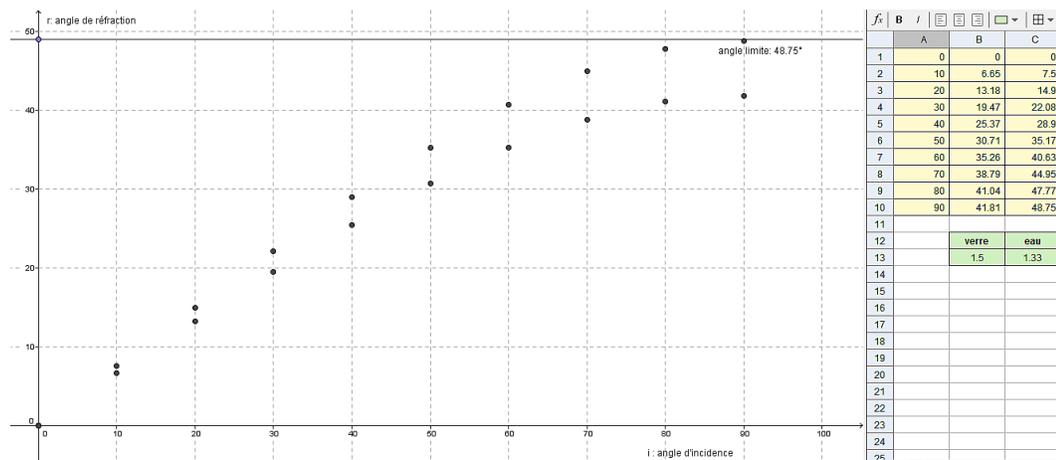


FIGURE 3.3 – Tableau et diagramme comprenant les angles d'incidence et de réfraction pour les matériaux air-plexiglas et air-eau.

Observations

1. Pour une incidence normale, le rayon lumineux pénètre dans le verre sans être dévié.
2. Lorsque la lumière passe de l'air dans le plexiglas, l'angle de réfraction est toujours inférieur à l'angle d'incidence. Le rayon réfracté se rapproche de la normale.
3. Lorsque la lumière passe du plexiglas dans l'air, l'angle de réfraction est toujours supérieur à l'angle d'incidence. Le rayon réfracté s'écarte de la normale.
4. La déviation du rayon réfracté est d'autant plus grande que l'angle d'incidence est plus grand.
5. La loi du retour inverse de la lumière s'applique aussi pour la réfraction.
6. Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale au dioptre sont toujours situés dans un même plan, appelé le *plan d'incidence*.

Le milieu qui contient le plus petit des angles est le *milieu plus réfringent*. Le milieu qui contient le plus grand des angles est le *milieu moins réfringent*. Ainsi le plexiglas et l'eau sont des milieux plus réfringents que l'air. La réfraction de la lumière peut être décrite par l'*indice absolu* d'un matériel.

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu d'indice absolu n_1 à un milieu d'indice absolu n_2 , on peut établir la loi de la réfraction¹ :

$$\boxed{n_1 \sin i = n_2 \sin r} \quad (3.1)$$

Les angles i et r sont les angles d'incidence et de réfraction. Vérifiez cette relation avec les mesures de la figure 3.3 ($n_{air} = 1$; $n_{Plexiglas} = 1.5$).

La fréquence f ne dépend pas du milieu dans lequel se propage la lumière; par contre, la longueur d'onde λ est modifiée car la lumière se propage à une vitesse v différente de la célérité c (dans le vide). L'indice absolu n d'un milieu est défini par² :

$$\boxed{n = \frac{c}{v}} \quad (3.2)$$

materiel	n	materiel		n
vide	1	verre <i>crown</i>	FK3	1.46444
air (aux <i>CNTP</i>)	1.000277		BK1	1.51002
glace (0°C)	1.3091		BK7	1.51625
eau	1.33299	verre <i>flint</i>	F3	1.61279
ambre	1.54		SF4	1.75496
glycérine	1.455		SFS1	1.92250

TABLE 3.1 – Indice absolu de réfraction de quelques matériaux (20°C; $\lambda = 589.3 \text{ nm}$).

1. Aussi appelé 2^e loi de Snell-Descartes

2. A part du milieu, l'indice absolu dépend aussi de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse.

3.1.1 Propagation vers un milieu plus réfringent : réfraction limite

Soit $n_2 > n_1$, le deuxième milieu est plus réfringent que le premier. Lorsque l'angle d'incidence i varie de 0° à 90° , l'angle de réfraction existe toujours. Il atteint une valeur limite appelée *angle de réfraction limite*, donnée par $i = 90^\circ$. Pour le plexiglas, l'angle limite vaut 41.8° ; pour l'eau 48.8° . Aucun rayon lumineux n'existe dans le deuxième milieu au-delà de cet angle. Ceci crée une zone d'ombre ($41.8^\circ < r < 90^\circ$) dans laquelle il n'existe aucun rayon réfracté provenant du premier milieu.

3.1.2 Propagation vers un milieu moins réfringent : réflexion totale

Soit un rayon lumineux rencontrant un milieu moins réfringent avec un angle d'incidence i . Après réfraction, il est dévié et fait par rapport à la normale un angle r tel que $r > i$. Le rayon réfracté s'écarte donc de la normale. Lorsque l'angle d'incidence varie de 0° à 90° , l'angle de réfraction n'existe plus dans le deuxième milieu au-delà d'une certaine *incidence limite* i_{lim} , donné par $r = 90^\circ$. Le rayon est donc complètement réfléchi (d'après la loi de la réflexion).

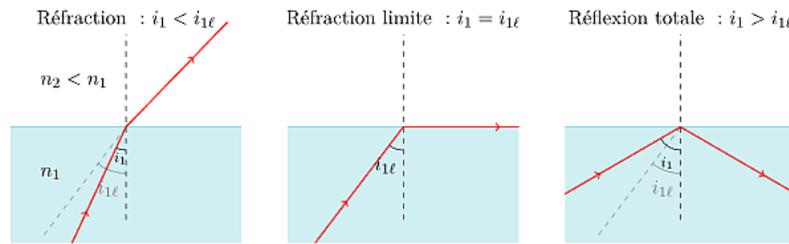


FIGURE 3.4 – Réfraction - cas limite - réflexion totale. Lorsque l'angle d'incidence dépasse un angle limite $i > i_{lim}$, on observe une réflexion totale du rayon lumineux.

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un milieu moins réfringent, le rayon réfracté n'existe plus pour une incidence supérieure à une valeur limite i_{lim} , tel que ($r = 90^\circ$) :

$$\sin i_{lim} = \frac{1}{n_2} \quad (3.3)$$

On est alors en condition de *réflexion totale*.



FIGURE 3.5 – *Gauche* : Expérience montrant la réfraction et la réflexion totale. *Droite* : Banpo-Bridge en Corée du Sud. La lumière peut aussi être guidée (partiellement) à l'intérieur d'un jet d'eau par réflexion totale.

Le prisme à réflexion totale

Il s'agit d'un prisme droit dont la base est un triangle isocèle rectangle. À part d'un angle droit, il possède deux angles à 45° . Dans les deux cas montrés dans la figure 3.6 l'angle incident dans le prisme est de 45° . Comme cet angle est supérieur à l'angle limite (de 41.8° pour la combinaison plexiglas-air), on se trouve dans la situation d'une réflexion totale. Le prisme peut être utilisé ou bien comme un miroir plan ou bien comme un réflecteur.

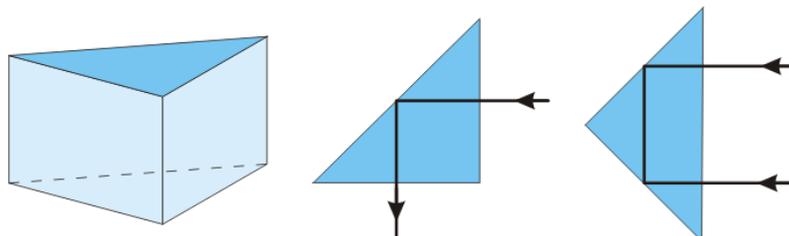


FIGURE 3.6 – Un prisme peut être utilisé comme un miroir plan ou comme un réflecteur. Dans ce cas, les faisceaux lumineux entrant et sortant sont parallèles.⁴

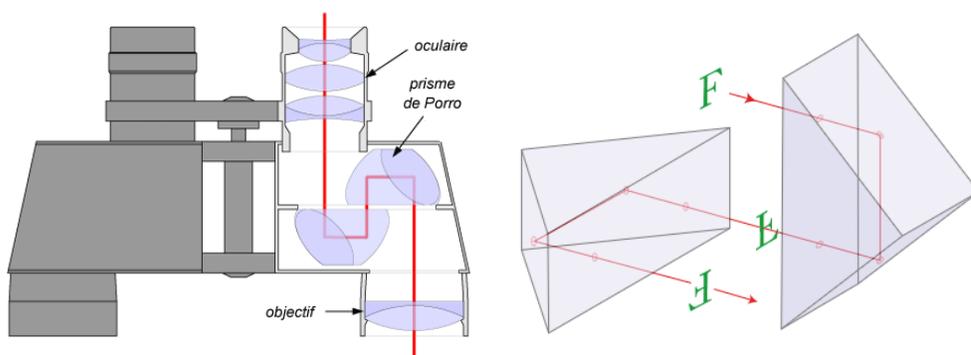


FIGURE 3.7 – Schéma des jumelles . Pour permettre l'observation d'images terrestres redressées (droites), un système de prismes est interposé dans le chemin lumineux. Ces prismes sont appelés *prismes de Porro*. Ils permettent le redressement de l'image indispensable dans les jumelles et permettent également de diminuer la longueur des appareils. À part du système à prismes de Porro existe aussi le système à *prismes en toit*.

4. voir sous <http://serge.bertorello.free.fr/optique/images/images.html>

La fibre optique

Une fibre optique est un guide de lumière. Elle est constituée d'un coeur cylindrique et d'une gaine. Ces deux milieux sont transparents. Le but de la fibre optique est de transmettre le rayon à l'intérieur du coeur avec le minimum d'absorption sans que celui-ci puisse sortir de la gaine. Il faut donc que la réflexion soit totale. Pour arriver à cet but, l'indice de réfraction du coeur de la fibre doit être légèrement plus élevé que celui de la gaine.

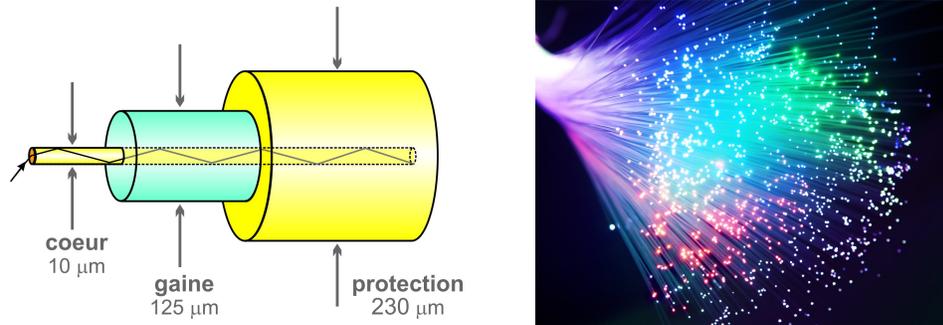


FIGURE 3.8 – Principe de la fibre optique.

3.1.3 Exercices

- Déterminez d'après la figure 3.3 l'angle de réfraction correspondant à un angle d'incidence de 50° . Vérifiez la loi de la réfraction à l'aide de ces valeurs numériques.
- Un rayon lumineux passe d'un premier milieu d'indice n_1 dans un deuxième milieu d'indice n_2 . L'angle d'incidence est de 60° ; l'indice de réfraction est de 45° . Quel est le milieu le plus réfringent ?
- Calculez la vitesse de la lumière dans un verre ordinaire d'indice de réfraction 1.50.
- Un rayon lumineux passe de l'air dans l'eau avec un angle d'incidence de 30° resp. de 75° . Calculez l'angle de réfraction pour les deux cas. Tracez la figure pour un de ces deux cas.
- Un rayon lumineux passe de l'eau dans l'air avec un angle d'incidence de 30° resp. de 75° . Calculez l'angle de réfraction pour les deux cas. Que peut-on remarquer ? Expliquez.
- Calculez l'angle limite pour un prisme ($n = 1.70$) se trouvant dans l'air. Pour quelles angles peut-on observer le phénomène de la réflexion totale.
- L'angle limite d'un matériel (se trouvant dans l'air) est de 52.8° . Déterminez l'indice de réfraction de ce matériel.
- Une fibre optique est formée d'un coeur et d'une gaine. Les deux matériaux ont un indice de réfraction de 1.45 resp. de 1.50. Déterminez dans ce cas l'angle limite.

3.2 La dispersion

Un faisceau de lumière blanche qui traverse un prisme subit deux réfractions successives. Il en résulte une déviation du faisceau.

D'autre par, le faisceau s'élargit. A la sortie du prisme, les bords du faisceau sont colorés. Sur un écran apparaît une bande colorée qu'on appelle *spectre*; les couleurs de cette bande sont appelées *couleurs du spectre*. Cette décomposition de la lumière blanche est appelée *dispersion optique*.

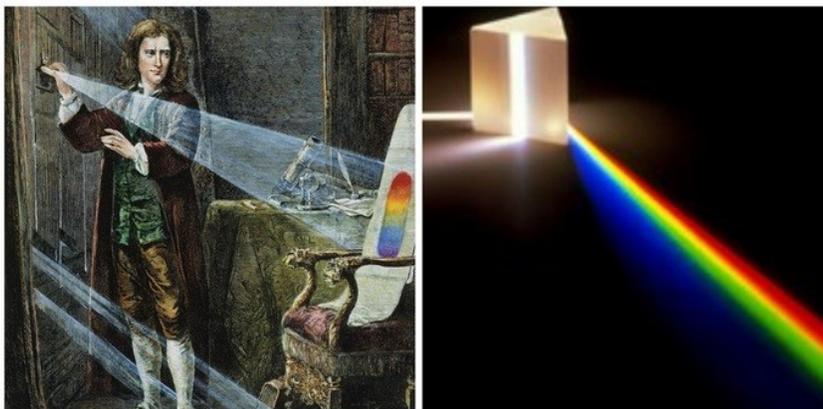


FIGURE 3.9 – Un prisme décompose la lumière blanche dans les couleurs spectrales.

Observations

1. Ce n'est pas le prisme qui donne la couleur à la lumière, mais la lumière blanche est un mélange de lumières colorées.
2. Le prisme sépare les différentes couleurs en le réfractant différemment. À la traversée du prisme, la lumière violette subit la plus grande déviation, la lumière rouge la plus petite déviation.

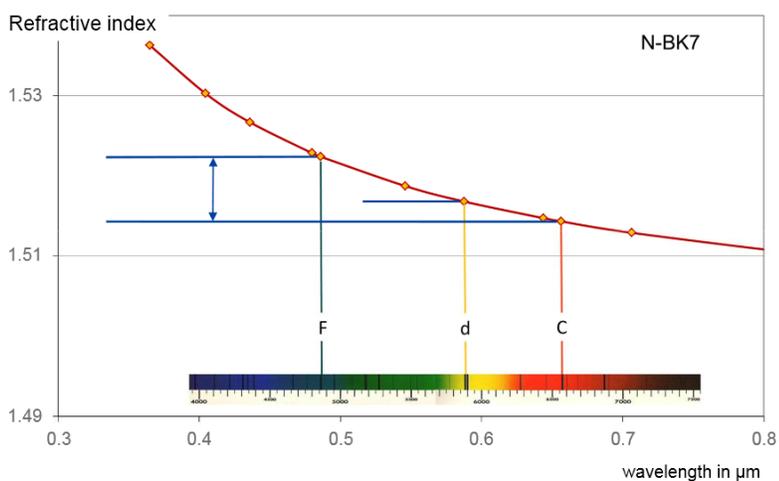


FIGURE 3.10 – Indice de réfraction n d'un verre (BK7) en fonction de la longueur d'onde λ .

L'indice de réfraction n n'est pas constant, mais dépend de la longueur d'onde de la lumière qui traverse le milieu. D'une manière générale, on observe que lorsque la longueur d'onde diminue, l'indice augmente. Ainsi, le verre a l'indice de réfraction le plus élevé pour le rayonnement violet ; il subit la plus forte déviation lors de la réfraction.

λ (nm)	486 nm raie F	589 nm raie D	656 nm raie C
eau	1.3371	1.3330	1.3311
verre	1.5157	1.5100	1.5076

TABLE 3.2 – Indice de réfraction de l'eau et d'un verre pour différentes longueur d'ondes. Les longueurs d'ondes indiquées sont celles de l'hydrogène (raies C et F) et du sodium (raie D).

En optique le *nombre d'Abbe*, *constringence* ou *coefficient de dispersion* d'un verre optique sert à en déterminer la dispersion, c'est-à-dire la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde. Il quantifie l'*aberration chromatique* d'une optique.

Définition du *nombre d'Abbe* V :

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (3.4)$$

Exemple

Détermination du nombre d'Abbe de l'eau :

$$V = \frac{1.3330 - 1}{1.3371 - 1.3311} = \frac{0.3330}{0.0060} = 55.5$$

Plus la constringence est élevée moins le verre présente de dispersion chromatique. Un *diagramme d'Abbe* est un diagramme représentant le nombre d'Abbe V en fonction de l'indice de réfraction n . Il sert à comparer différents types de verre. Ces verres peuvent être classés et positionnés sur le diagramme par catégorie en fonction de leur composition. La variation de la teneur de certains constituants influe sur le nombre d'Abbe.

dispersion	nombre d'Abbe V
forte	< 39
modérée	39 - 45
faible	> 45

TABLE 3.3 – Dispersion chromatique et nombre d'Abbe.

6. Document sur la dispersion de différents verres spéciaux :
http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/schott-fluoro-phosphate-glasses-may-2014.pdf

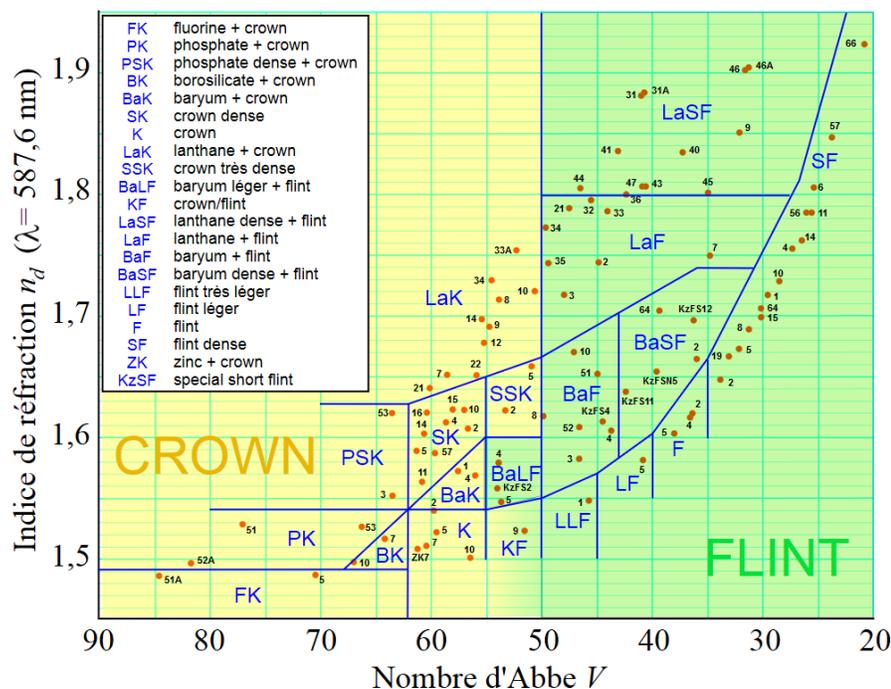


FIGURE 3.11 – Indice de réfraction de différents verres en fonction du nombre d'Abbe. Le nombre d'Abbe est influencé par la teneur de certains constituants. Les verres *crown* se caractérisent par un nombre d'Abbe élevé; l'effet de la dispersion chromatique est faible.

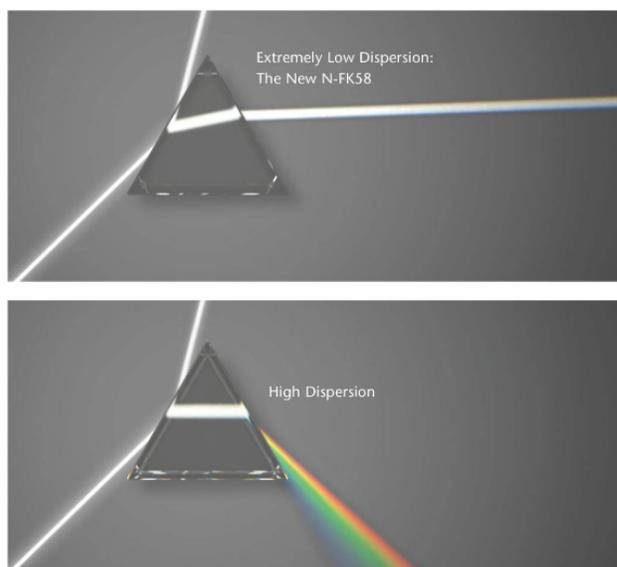


FIGURE 3.12 – Exemple d'un verre à dispersion faible et à dispersion élevée. *En haut* : verre à indice de réfraction $n = 1.456$ et à dispersion très faible (nombre d'Abbe $V = 90.8$)⁶. *En bas* : Le rayon lumineux est fortement dévié; l'indice de réfraction est élevé; de même le dispersion chromatique est bien visible.

Exercice

Un faisceau de lumière blanche traverse un prisme et est décomposée dans ses couleurs spectrales. Calculez à l'aide du tableau 3.2 l'angle de réfraction du rayon bleu et du rayon rouge.

On a : $i = 30^\circ$; $n_B = 1.5157$; $n_R = 1.5077$

Pour le **bleu** :

$$\begin{aligned}\sin r_B &= n_B \sin i \\ &= 1.5157 \sin 30^\circ \\ &= 0.75785 \\ r_B &= 49.28^\circ\end{aligned}\tag{3.5}$$

Pour le **rouge** :

$$\begin{aligned}\sin r_R &= n_B \sin i \\ &= 1.5076 \sin 30^\circ \\ &= 0.75380 \\ r_R &= 48.92^\circ\end{aligned}\tag{3.6}$$

Le spectre couvre un intervalle de $49.28^\circ - 48.92^\circ = 0.36^\circ$.

D'autre part, le nombre d'Abbe du verre utilisé est : $V = 63$.

Il s'agit d'un verre à *dispersion faible*.

Calculons un deuxième exemple en supposant que le verre a des indices de réfraction de 1.782, 1.760 et 1.752 pour les trois longueurs d'ondes indiquées dans le tableau 3.2.

Pour le **bleu** :

$$\begin{aligned}\sin r_B &= n_B \sin i \\ &= 1.782 \sin 30^\circ \\ &= 0.891 \\ r_B &= 63.00^\circ\end{aligned}\tag{3.7}$$

Pour le **rouge** :

$$\begin{aligned}\sin r_R &= n_B \sin i \\ &= 1.752 \sin 30^\circ \\ &= 0.876 \\ r_R &= 61.16^\circ\end{aligned}\tag{3.8}$$

Le spectre couvre un intervalle de $63.64^\circ - 60.58^\circ = 1.84^\circ$.

D'autre part, le nombre d'Abbe du verre utilisé est : $V = 25$.

Il s'agit d'un verre à *dispersion forte*.

Chapitre 4

Les lentilles minces

On appelle une *lentille* un corps transparent homogène, d'indice absolu n , limité par deux dioptries dont l'un au moins est une sphère, l'une des deux faces pouvant être plane. Tout type de dioptré¹ étant caractérisé par son centre de courbure C et par son rayon de courbure R , une lentille est donc délimitée par des portions de surfaces sphériques et/ou planes. Les deux dioptries ainsi assemblés, la droite passant par leurs centres de courbure est l'*axe optique*.

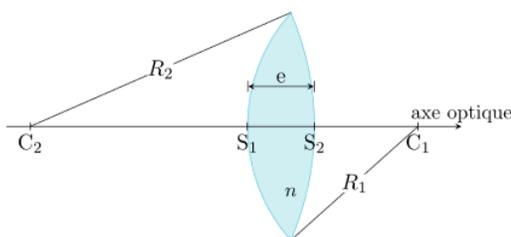


FIGURE 4.1 – Lentille convergente.

Un rayon incident ne subit que des réfractions à travers les deux dioptries. Si l'on dessine un rayon incident parallèle à l'axe optique, en appliquant les lois de *Snell-Descartes* à chaque interface rencontrée, on établit son trajet. Il n'existe que deux types de lentilles, les *lentilles convergentes* et les *lentilles divergentes*.

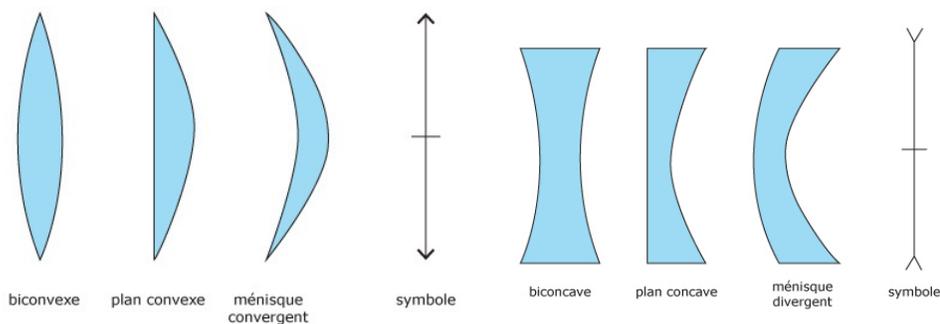


FIGURE 4.2 – Différentes lentilles convergentes et divergentes et représentations schématiques.

1. En optique, un dioptré est une surface séparant deux milieux transparents homogènes et isotropes, d'indices de réfraction différents.

Une lentille peut être considérée comme une *lentille mince* si son épaisseur est faible devant la différence des valeurs des rayons de courbure.

4.1 Les lentilles convergentes

Supposons qu'un faisceau parallèle frappe une lentille mince. Les rayons limites sont réfractés au passage des deux dioptries en direction de l'axe optique et convergent en un point. La lentille convergente, aussi appelée *lentille convexe*, transforme donc tout faisceau parallèle en faisceau convergent.

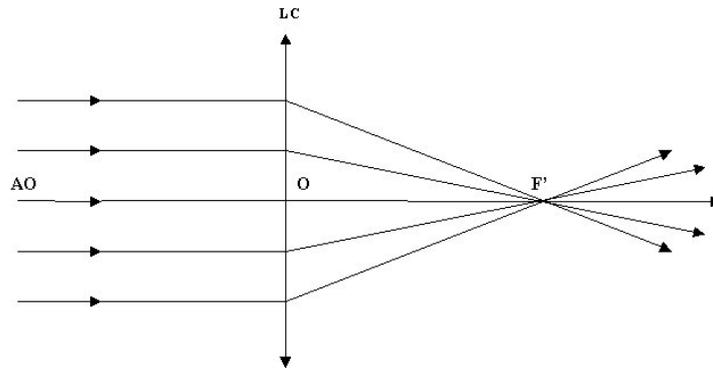


FIGURE 4.3 – Un faisceau parallèle traversant une lentille convergente se transforme en faisceau convergent.

Les faisceaux parallèles qui atteignent la lentille sous des angles différents convergent en différents points derrière la lentille. Tous ces points sont situés dans un même plan, perpendiculaire à l'axe optique, appelé *plan focal*. La distance entre le plan focal et le centre de la lentille est la *distance focale* f .

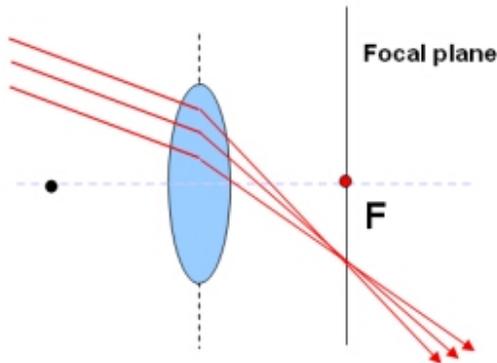


FIGURE 4.4 – Tout faisceau de rayons parallèles passant à travers une lentille convergente converge dans le plan focal, perpendiculaire à l'axe optique.

Le point d'intersection du plan focal et de l'axe optique s'appelle *foyer* F . Tous les rayons qui entrent parallèlement à l'axe optique dans la lentille convergent en F après leur sortie. La description du passage d'un rayon lumineux à travers une lentille peut être décrite par la loi de la réfraction. Or, il existe une méthode beaucoup plus simple pour traiter ce problème en utilisant trois rayons caractéristiques.

Rayons caractéristiques

1. Un rayon, parallèle à l'axe optique traversant une lentille convergente passe par le foyer F_1 .
2. La réfraction étant indépendante du sens de propagation de la lumière, un faisceau parallèle à l'axe optique et venant de la droite converge au deuxième foyer F_2 , symétrique de F_1 par rapport au milieu de la lentille.
3. Un rayon lumineux traversant le centre de la lentille en sort sans changer de direction. La déviation du rayon au passage du premier dioptré est opposée à celle du rayon émergent de la lentille. Tous les rayons lumineux passant par le centre de la lentille subissent un faible décalage latéral qui est d'autant plus négligeable que la lentille est mince. Nous allons uniquement considérer le cas de lentilles minces, c-à-d les rayons traversant le centre d'une lentille sont représentées par des droites.

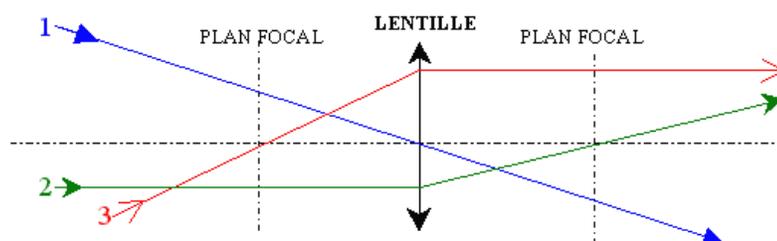


FIGURE 4.5 – Rayons caractéristiques traversant une lentille convergente mince.

Pour construire l'image d'un objet AB formée à travers une lentille mince, on utilise les propriétés des rayons caractéristiques. Les rayons, issus du point B et ayant traversé la lentille se coupent en un point B' , image de B . On déduit de cette construction la position et la nature de l'image $A'B'$ de AB .

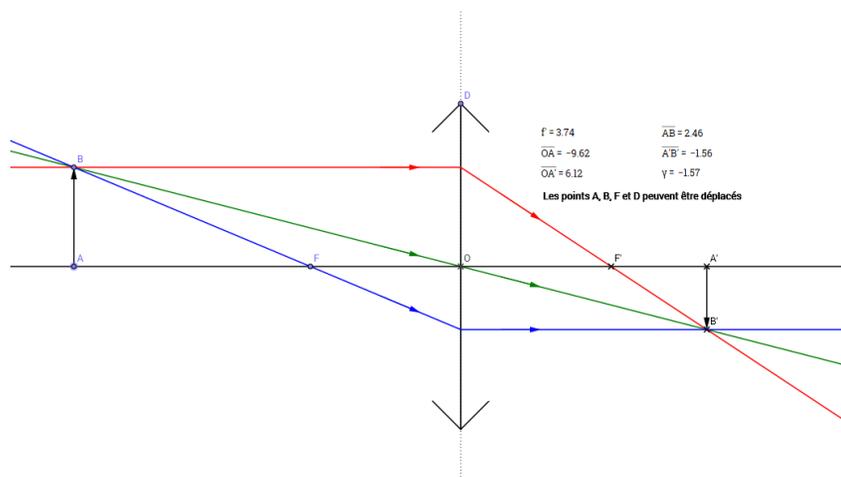


FIGURE 4.6 – Construction d'une image d'un objet par les rayons caractéristiques².

2. Voir l'application sous : <https://www.geogebraTube.org/student/m26974>

La distance entre un point-objet et le plan de la lentille s'appelle *distance-objet* p .

$$p = |OA|$$

La distance qui sépare un point-image du plan de la lentille a pour nom *distance-image* q .

$$q = |OA'|$$

Tous les points-images correspondant à un objet situé à la distance-objet p sont situés dans un même plan appelé *plan-image*. Derrière le plan-image, la lumière continue à se propager sous forme de faisceaux divergents.

Attention : *En général, on doit tenir compte du sens des distances p et q et de l'orientation de l'objets AB et de l'images $A'B'$. Pour se limiter à l'essentiel dans ce cours, toutes ces grandeurs sont traitées comme des grandeurs positives. Uniquement des exercices pour lesquels cette simplification est applicable sont traités.*

Dans ce contexte, on peut établir (sans démonstration) *la relation de conjugaison* d'une lentille mince :

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}} \quad (4.1)$$

Généralement, l'image $A'B'$ est de taille différente de celle de l'objet AB . Le *grandissement transversal* γ se calcule par :

$$\boxed{\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p}} \quad (4.2)$$

Exemple

Reprenons les valeurs indiqués dans la figure 4.6 et calculons la distance focale f ainsi que le grandissement transversal γ en utilisant les relations précédentes.

$$p = |OA| = |-9.62 \text{ cm}| = 9.62 \text{ cm} \quad q = |OA'| = |6.12 \text{ cm}| = 6.12 \text{ cm}$$

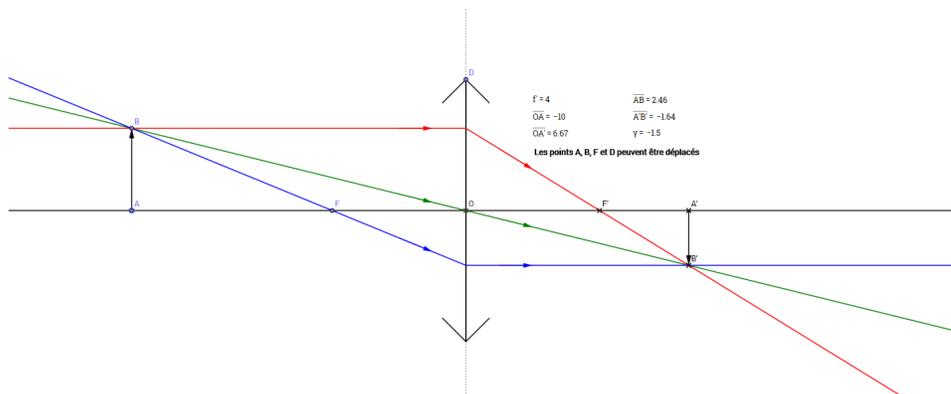
Distance focale f :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ &= \frac{1}{9.62 \text{ cm}} + \frac{1}{6.12 \text{ cm}} \\ &= 0.104 \text{ cm}^{-1} + 0.163 \text{ cm}^{-1} \\ &= 0.267 \text{ cm}^{-1} \\ f &= 3.74 \text{ cm} \end{aligned}$$

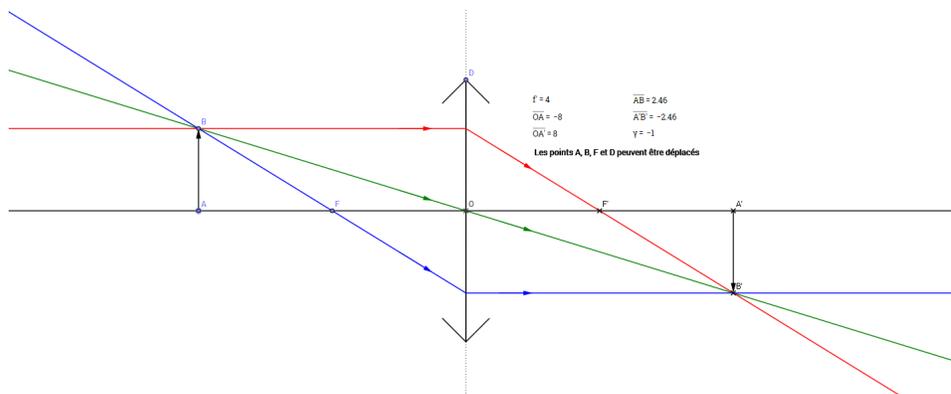
Grandissement transversal γ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{q}{p} \\ &= \frac{6.12 \text{ cm}}{9.62 \text{ cm}} \\ &= 0.636 \end{aligned}$$

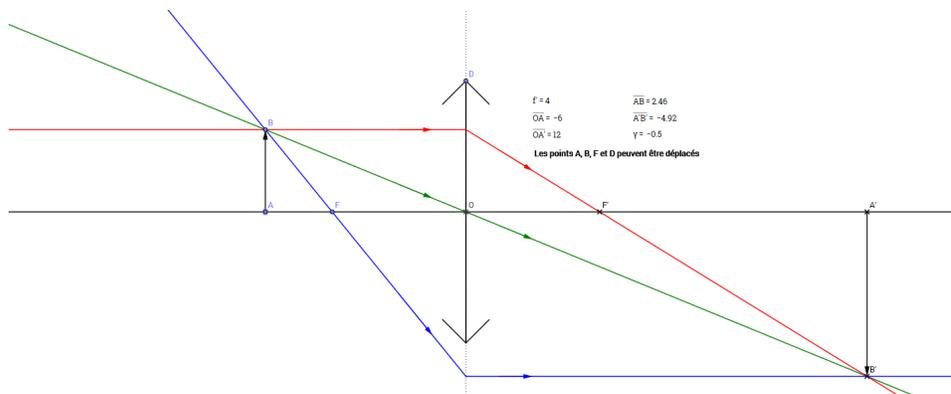
Cas 1 : $p > 2f$



Cas 2 : $p = 2f$

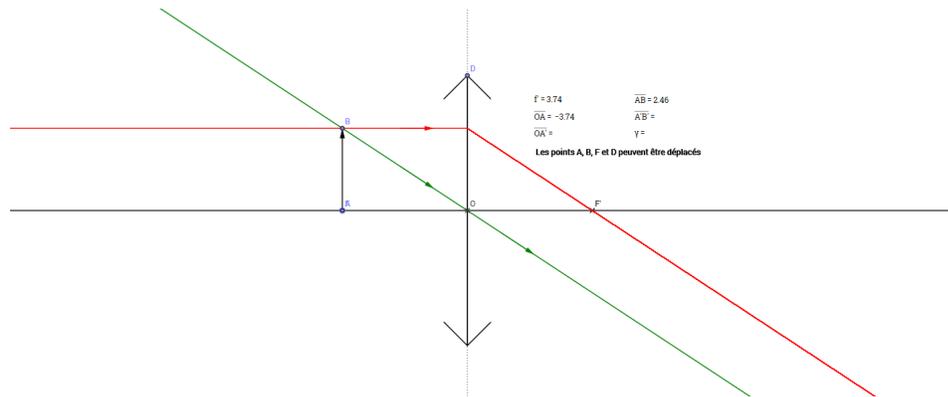


Cas 3 : $2f > p > f$



Exercice

Retracez les figures précédentes en utilisant les valeurs numériques indiquées (f , OA et AB). Vérifiez les résultats en utilisant la relation de conjugaison ainsi que la relation du grandissement transversal. *Attention* : La valeur numérique de γ indiquée dans les figures est l'inverse du grandissement transversal!

Cas 4 : $p = f$ 

Lorsque la distance-objet est strictement plus grande que la distance focale ($p > f$), on obtient pour chaque cas une image. Or, lorsque l'objet est situé dans le foyer de la lentille ($p = f$), tous les rayons émergent de l'objet forment un faisceau parallèle après avoir traversé la lentille. Il n'existe plus d'image.

distance-objet	nature de l'image	grandissement	application
$p > 2f$	image renversée, réelle	$A'B' < AB$	oeil, appareil photo
$p = 2f$	image renversée, réelle	$A'B' = AB$	
$2f > p > f$	image renversée, réelle	$A'B' > AB$	projecteur
$p = f$	aucune image		

TABLE 4.1 – Nature de l'image en fonction de la distance-objet p et quelques applications.

A part de la distance focale d'une lentille, on retrouve le terme de vergence. La *vergence* C d'une lentille est l'inverse de la distance focale f . Elles s'exprime en dioptries (symbole δ) si f s'exprime en mètres.

$$C = \frac{1}{f} \quad (4.3)$$

Unité de la vergence D :

$$[C] = \frac{1}{[f]} = \frac{1}{m} = \delta$$

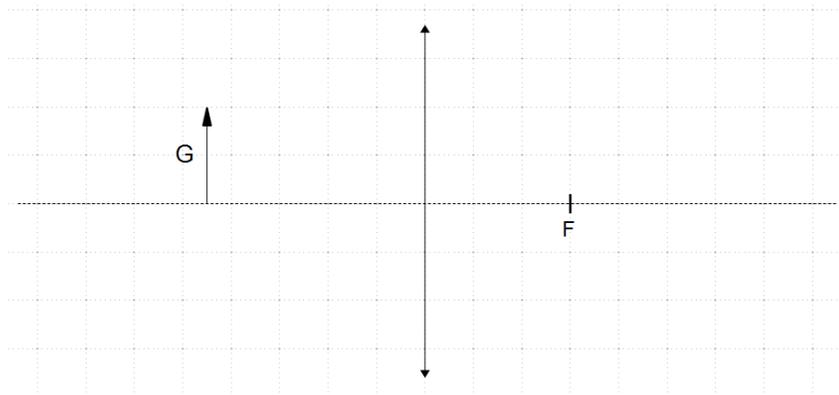
Exemple

Calculez la vergence d'une lentille de distance focale $f = 50 \text{ mm}$

$$C = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.05 \text{ m}} = 20 \delta$$

4.1.1 Exercices

- Déterminez par les trois rayons caractéristiques la position et la grandeur de l'image.



- Déterminez par les rayons caractéristiques la position et la longueur focale de la lentille convergente.



- Un chasseur photographique désire photographier un lion de 1 m de hauteur situé à une distance de 300 m . Il veut en obtenir sur son film une image d'une hauteur de 1 cm .
En considérant l'objectif de son appareil photographique comme une lentille mince, déterminez le grandissement transversal, la distance lentille-film (distance-image) et la longueur focale de l'objectif.
- La Lune a un diamètre d'environ $3\,500\text{ km}$ et se situe à une distance d'environ $380\,000\text{ km}$ de la Terre. On dispose d'un objectif d'une longueur focale de 50 mm pour photographier la Lune.
 - Déterminez la distance lentille-film pour cet objectif. Quelle est la dimension de l'image de la Lune sur le film ?
 - Quel est la dimension de la Lune sur le film, lorsqu'on utilise un objectif de 500 mm ?
- Un objet d'une hauteur de $AB = 3\text{ cm}$ se trouve à une distance de $p = 6\text{ cm}$ devant une lentille mince convergente. La distance focale de cette lentille est de $f = 2.5\text{ cm}$. Déterminez par la méthode graphique la grandeur de l'image $A'B'$, la distance de la lentille à l'image q ainsi que le grandissement transversal γ . Quelles sont les caractéristiques de l'image? Les résultats peuvent être vérifiés par le calcul.

Cas 5 : $p < f$

Si l'objet se trouve entre le plan focal et la lentille, le faisceau émergent diverge. Il ne se forme pas d'image réelle. Or, en prenant le prolongement des rayons réels du côté de l'objet, on constate que ces prolongements convergent en un point. Un observateur regardant à travers la lentille voit une image, dans ce cas *virtuelle*, droite et plus grande que l'objet.

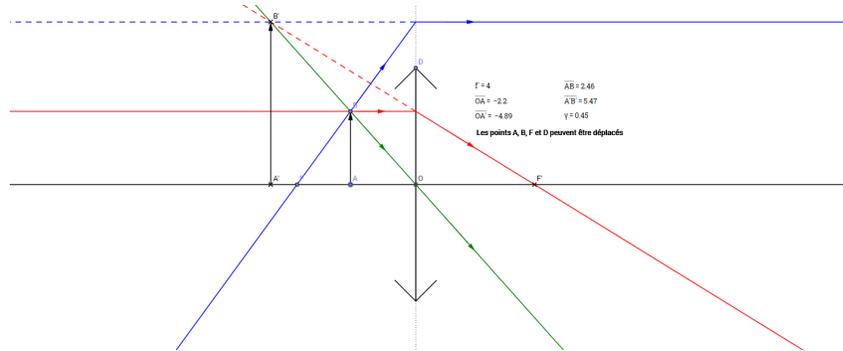


FIGURE 4.7 – L'objet se situe entre la lentille mince et le foyer.

Dans ce cas l'image ne peut pas être visualisée sur un écran; on ne peut la voir qu'en regardant à travers la lentille.

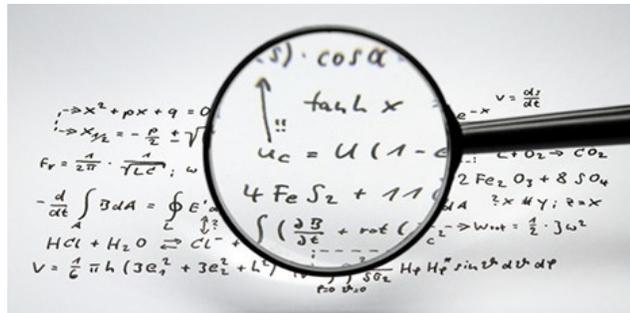


FIGURE 4.8 – Image virtuelle, agrandie et droite, vue à travers une loupe.

distance-objet	nature de l'image	grandissement	application
$p < f$	image non-renversée, virtuelle	$A'B' > AB$	loupe

TABLE 4.2 – Nature de l'image en fonction de la distance-objet p et application.

4.2 Les lentilles divergentes

Considérons un faisceau incident parallèle à l'axe optique d'une lentille divergente, appelée aussi *lentille concave*. Chaque rayon de ce faisceau est réfracté deux fois, sur la face d'entrée et sur la face de sortie de la lentille. Après le passage à travers la lentille, les rayons s'écartent les uns des autres : le faisceau devient divergent. Les prolongements des rayons réfractés se coupent en un point de l'axe optique : le foyer F . Les rayons ne passent pas vraiment par ce point, mais à la sortie de la lentille, ils semblent tous issus d'un même point F appelé *foyer virtuel*.

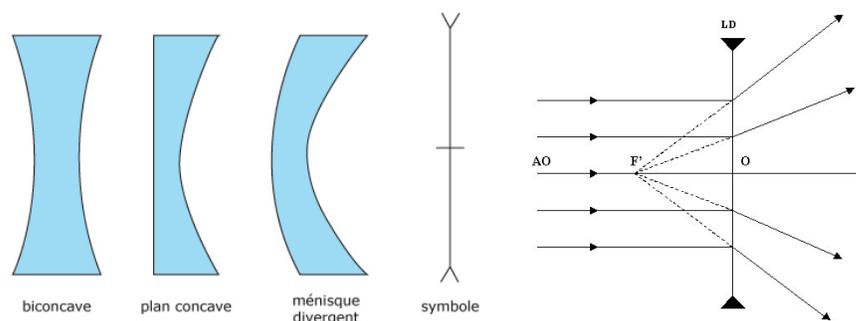


FIGURE 4.9 – *Gauche* : Lentilles divergentes et représentation schématique d'une lentille divergente mince. *Droite* : Foyer virtuel d'une lentille divergente.

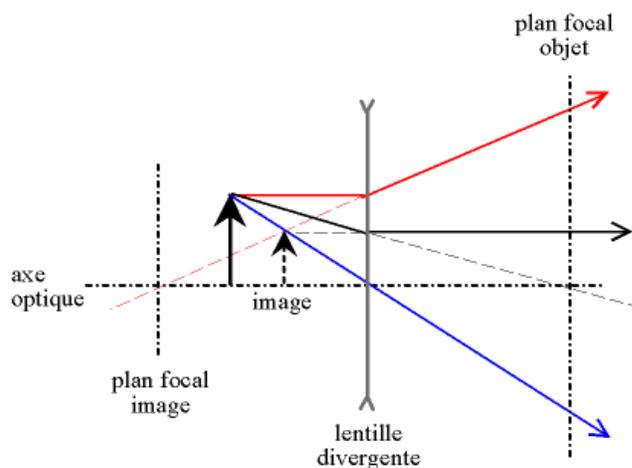


FIGURE 4.10 – Rayons caractéristiques passant à travers une lentille divergente.

L'image formée par une lentille divergente a toujours la même orientation que l'objet, est toujours virtuelle et plus petite que l'objet.

distance-objet	nature de l'image	grandissement
pour toute distance p	image non-renversée, virtuelle	$A'B' < AB$

TABLE 4.3 – Nature de l'image produite par une lentille divergente.

Comparaison entre une lentille convergente et une lentille divergente.

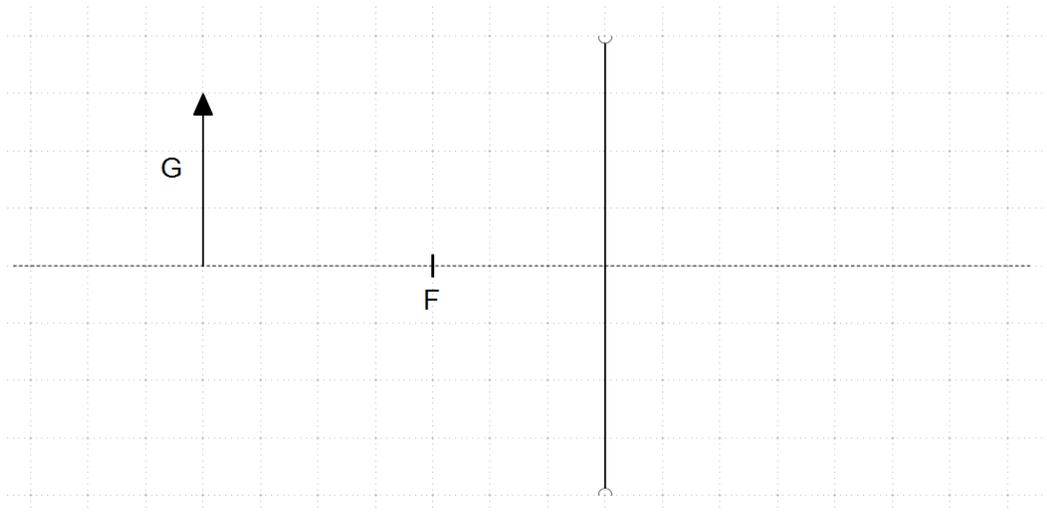


lentille	convergente	divergente
distance focale	positive, p.ex : $f = +50 \text{ mm}$	négative, p.ex : $f = -50 \text{ mm}$

TABLE 4.4 – Convention de signe pour les lentilles convergentes et divergentes.

Exercice

Complétez la figure suivante par les trois rayons caractéristiques. Déterminez par la méthode graphique les caractéristiques de l'image produite par cette lentille divergente.



Chapitre 5

Les aberrations optiques

Une aberration est un défaut d'un système optique qui conduit à la déformation des images. Les aberrations expriment le fait que certains rayons passant par une ou plusieurs lentilles ne convergent pas vers l'image prédite par l'optique géométrique.

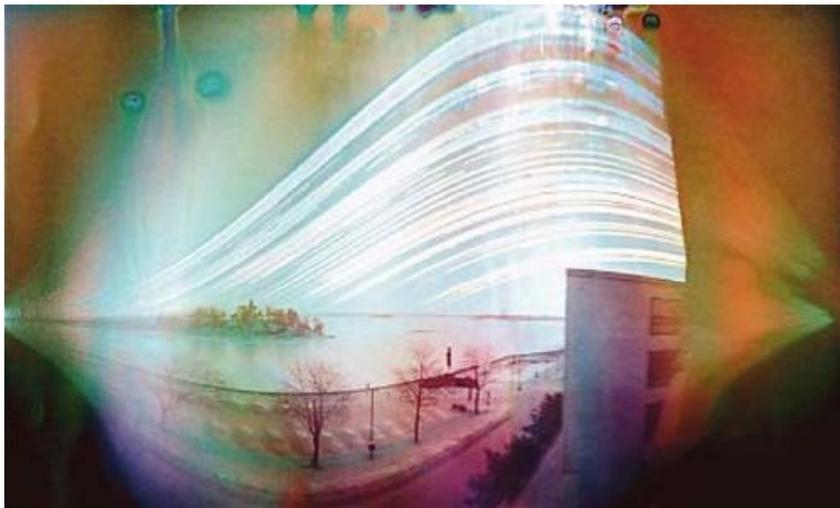


FIGURE 5.1 – Une *camera obscura* est une caméra sans système optique. Cette image nous montre une *solargraphy* ; image exposée dans une *camera obscura* pendant 180 jours. A part du paysage, le trajet du soleil lors des journées sans nuages est visible. Même ce type de caméra présente plusieurs types d'aberrations optiques².

Il est possible de classer les aberrations en deux groupes. D'une part, les *aberrations chromatiques*, dépendantes de la longueur d'onde, qui sont responsables d'erreurs d'ordre colorimétrique dans les images. D'autre part, les *aberrations géométriques*, dépendantes de paramètres géométriques (position de la pupille, ouverture numérique et angle de champ notamment) ont un impact sur le pouvoir de résolution du système.

La conception optique permet de concevoir des systèmes peu aberrants en combinant des optiques dont les aberrations se compensent.

2. Pour la *solargraphy*, voir entre autre sous : <http://www.alternativephotography.com/wp/processes/pinholes/solargraphy-catching-the-suns-path-pinhole-camera> ;
Quelques détails sur la *caméra obscura* : <http://www.wesjones.com/pinhole.htm>

5.1 Aberrations géométriques

5.1.1 Aberration sphérique

L'*aberration sphérique* désigne une aberration dont l'une des conséquences est la disparition du foyer. Les rayons provenant du bord et du centre de l'optique ne se focalisent plus au même point. On observe alors une caustique de focalisation, dans laquelle le point image attendu sera remplacé par une surface plus ou moins floue. Les rayons parallèles ne se concentrent pas en un point unique.

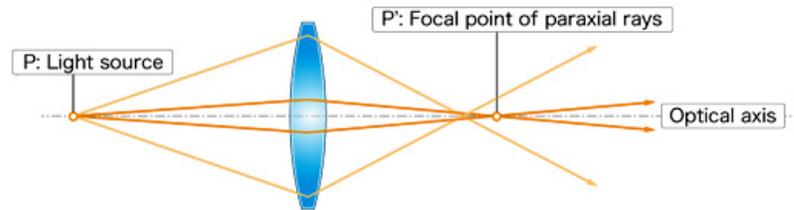


FIGURE 5.2 – Rayons lumineux passant par une lentille sans et avec aberration sphérique. Les rayons provenant du bords ne passent plus par le foyer⁴.

Pour une lentille sphérique, les rayons se trouvant au bord de la lentille focalisent à une place légèrement différente des rayons se trouvant au centre : l'image d'un point est donc une tache floue.

Ceci est dû au fait qu'une surface sphérique n'est pas la forme idéale pour réaliser une lentille. Il s'agit cependant de la forme la plus simple à polir, et elle reste très souvent utilisée.

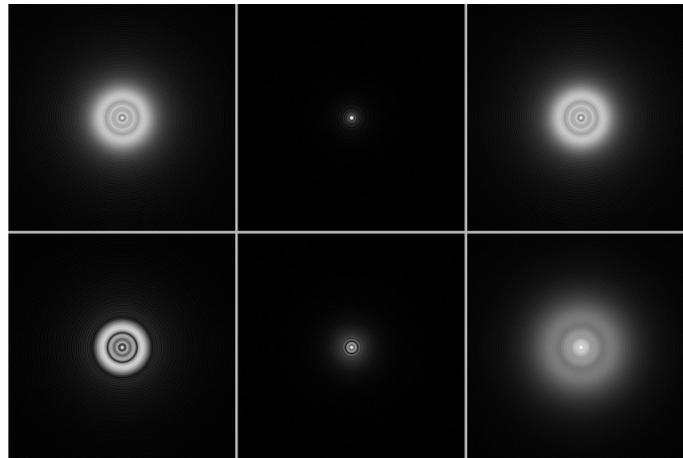


FIGURE 5.3 – Source lumineuse ponctuelle imagée par une optique sans (*rangée supérieure*) et avec aberration sphérique (*rangée inférieure*). *Colonne du milieu* : image nette; *colonne gauche et droite* : image intra- et extrafocale.

L'aberration sphérique peut être minimisée en choisissant soigneusement une courbure particulière de la surface de la lentille : on utilise des lentilles non-sphériques que l'on nomme *lentilles asphériques*.

⁴. Certaines images de ce chapitre ont été reprises de la page suivante : http://www.nikon.com/products/sportoptics/how_to/guide/binoculars/technologies/technologies_08.htm

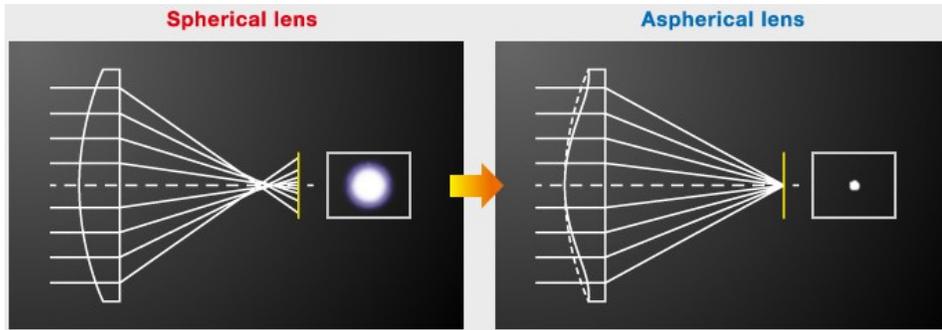


FIGURE 5.4 – Une lentille asphérique corrige l’aberration sphérique. L’optique utilisée devient ainsi plus compacte et légère par rapport à une optique comprenant plusieurs lentilles sphériques.

En photographie, l’aberration sphérique se manifeste par une perte de définition dans les zones à fort contraste. En utilisant une ouverture plus faible, on peut réduire les effets de l’aberration sphérique.

5.1.2 Aberration de coma

L'*aberration de coma* désigne une aberration qui dépend du champ d'une part et de l'ouverture d'autre part. Cette aberration est dite *de champ* car elle n'existe pas sur l'axe optique. L'effet de cette aberration est de produire une tache en forme de comète dans un plan d'observation.

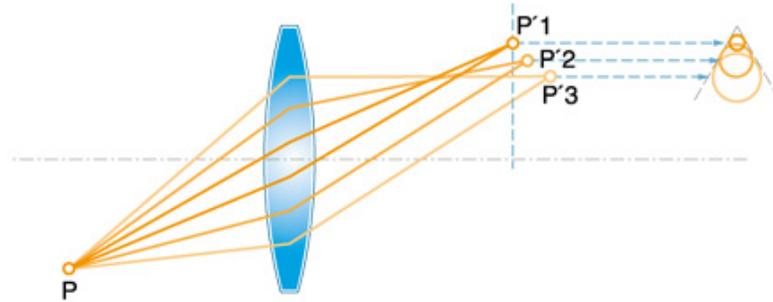


FIGURE 5.5 – Les rayons qui ne sont pas dans l'axe optique de la lentille ne convergent pas tous en un même point sur le plan focal.

Les rayons parallèles qui ne sont pas dans l'axe optique de la lentille ne convergent pas tous en un même point sur le plan focal. Les rayons qui passent sur les bords de la lentille peuvent être focalisés plus loin ou plus près de l'axe optique que ceux passant au centre de la lentille.



FIGURE 5.6 – Image d'une source lumineuse ponctuelle au milieu du champ visuel (à gauche). Plus on s'éloigne de l'axe optique, plus l'aberration de coma devient importante.

Comme pour l'aberration de sphéricité, il est possible de réduire la coma en choisissant une courbure particulière de la lentille ou d'utiliser une ouverture plus faible.

5.1.3 Astigmatisme

Une lentille optique présente a priori une symétrie axiale. Dans la pratique, cette symétrie n'est pas parfaite.

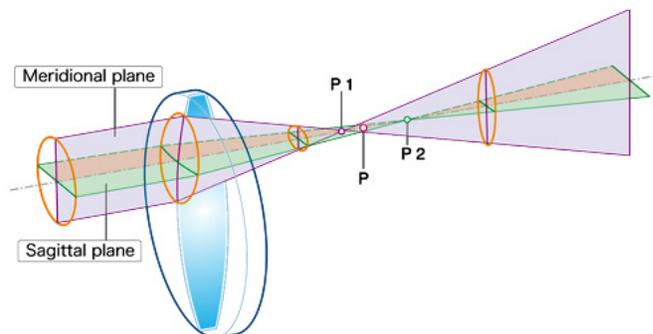


FIGURE 5.7 – L'astigmatisme est une aberration optique géométrique lié à une dissymétrie axiale du système optique. Elle fait apparaître deux foyers distincts, le *foyer sagittal* et le *foyer tangentiel*.

On constate alors que la distance focale de l'objectif n'est pas constante autour de l'axe optique. En effet, la distance focale dépend de l'indice de réfraction de la lentille et de son rayon de courbure. Dès lors que celui-ci n'est pas parfaitement homogène, la distance focale ne l'est pas non plus. Le décentrement d'une lentille ainsi qu'une inclinaison de celle-ci sont également à même d'induire un astigmatisme.

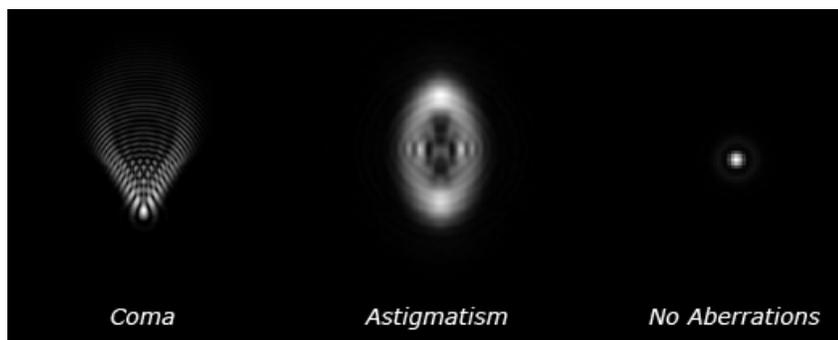


FIGURE 5.8 – Comparaison entre les effets de l'aberration de coma et de l'astigmatisme.

Une lentille est dite corrigée des défauts d'astigmatisme dès lors que son rayon de courbure a été homogénéisé le plus possible, mais des défauts résiduels sont pratiquement inévitables. Les objectifs corrigés de l'astigmatisme sont dits *anastigmat*.

Les objectifs modernes, calculés et fabriqués selon des procédés de haute précision sont quasiment exempts d'astigmatisme.

5.1.4 Distorsion

En optique la *distorsion* est une aberration géométrique apparaissant quand l'angle d'incidence des rayons lumineux devient important. La distorsion se manifeste le plus visiblement sur les lignes droites : une grille imagée par un système à forte distorsion aura une forme dite en *barillet*, la grille est bombée vers l'extérieur, ou en *coussinet*, la grille image ayant l'air déformée vers l'intérieur. La distorsion est une aberration géométrique de champ.

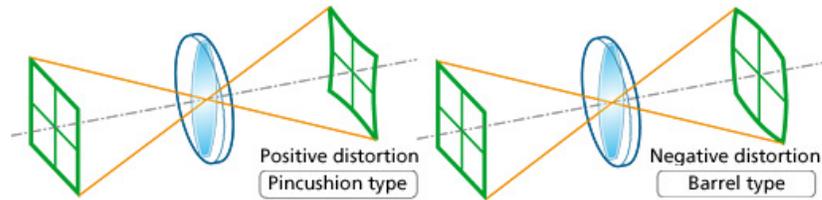


FIGURE 5.9 – dfgh

Un système sans distorsion est dit *orthoscopique* ou *rectilinéaire*.



FIGURE 5.10 – Photo prise avec un objectif de 10.5 mm^5 .

5. Vois sous :

<https://www.flickr.com/photos/10025089@N05/4984637048/in/photostream/>

5.2 Aberration chromatique

On a vu dans le chapitre 3.2 le phénomène de la dispersion, c.à.d. que l'indice de réfraction du matériau composant les lentilles varie en fonction de la longueur d'onde (couleur) de la lumière qui les traverse. Ce phénomène est à l'origine du problème d'aberration, appelé *aberration chromatique*. Il en résulte que la distance focale dépend de la longueur d'onde, de sorte que la mise au point ne peut être effectuée simultanément pour toutes les couleurs du spectre. Si, par exemple, la mise au point est effectuée pour le rouge, le bleu est flou : l'image d'un objet blanc présente alors sur ses bords une irisation bleutée.

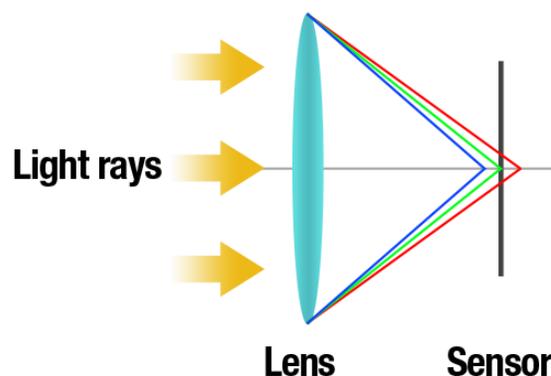


FIGURE 5.11 – Dû à la dispersion du verre, la distance focale dépend de la couleur de la lumière qui traverse la lentille.

Analysons la situation d'abord sur l'axe optique d'un objet blanc se situant à l'infini. Cet objet donne une multitude d'images formées au niveau de chaque foyer image entre le foyer du bleu qui se trouve proche de la lentille et le foyer du rouge qui en est plus éloigné.

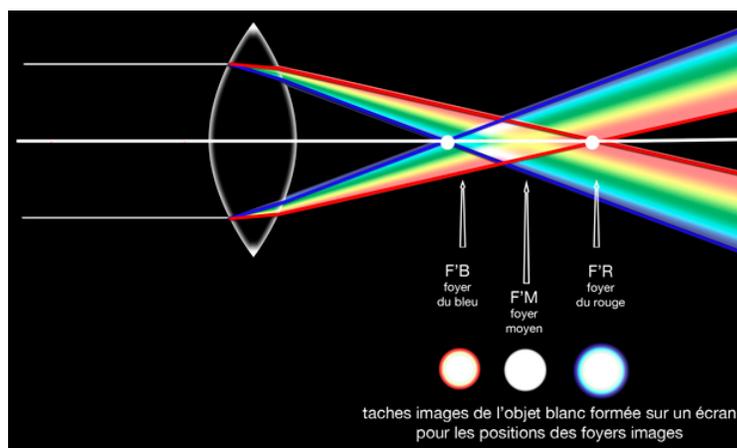


FIGURE 5.12 – Taches images d'un objet blanc, lorsque la mise au point a été faite pour le bleu, le vert/jaune resp. le rouge⁷. La distance mesurée entre les foyers du bleu et du rouge correspond à l'*aberration chromatique longitudinale* (le long de l'axe optique).

⁷. Voir sous :

<http://www.focus-numerique.com/test-1220/glossaire-les-aberrations-chromatiques-presentation-caracteristiques-1.html>

Si on fait la mise au point pour la radiation rouge, on verra une irisation bleue autour de l'image. Inversement en faisant la mise au point pour les radiations bleues, on visualisera une irisation rouge. La distance mesurée entre les foyers du bleu et du rouge correspond à l'*aberration chromatique longitudinale*.

Si on photographie des éléments qui ne sont pas proches de l'axe, on voit apparaître une irisation autour de la tache image du sujet photographié, car les foyers seront alors étalés dans le plan du film (et non dans la profondeur comme c'est le cas de l'aberration chromatique longitudinale). Ce phénomène s'appelle *aberration chromatique transversale* (ou *latérale*) et l'irisation sera d'une couleur différente selon la position.

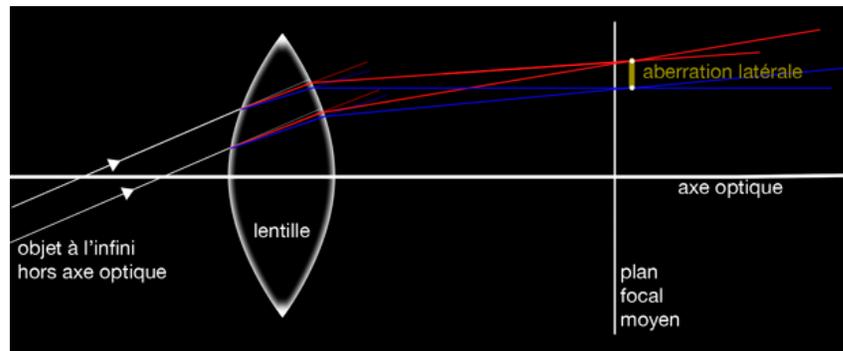


FIGURE 5.13 – Lorsque les rayons lumineux ne passent pas parallèlement par rapport à l'axe optique à travers une lentille, les foyers pour les différentes couleurs sont étalés dans le plan du film. Il s'agit de l'aberration chromatique transversale.



FIGURE 5.14 – Exemple du phénomène de l'*aberration chromatique latérale*. Si on photographie des éléments qui ne sont pas proches de l'axe, on voit apparaître une irisation autour de la tache image du sujet photographié, car les foyers pour les différentes couleurs sont étalés dans le plan du film.

Lors de la prise de vue, la diminution de l'ouverture permet de limiter l'aberration chromatique longitudinale. En revanche, elle est sans effet sur l'aberration chromatique transversale qui doit, si nécessaire, être corrigée par d'autres moyens.

5.2.1 L'achromat

Un *doublet achromatique* ou *achromat* est un doublet de lentilles conçu pour limiter les effets des aberrations chromatique et sphérique. L'achromat corrige les distances focales de faisceaux lumineux de différentes longueurs d'onde pour mieux les faire converger vers le même plan.

Le principe de la correction consiste à associer deux éléments présentant des défauts de sens opposés. Le type d'achromat le plus couramment utilisé est un doublet constitué d'une lentille convexe en *verre crown* - à dispersion faible - et d'une lentille concave en *verre flint* - à dispersion élevée (voir graphique 3.11).

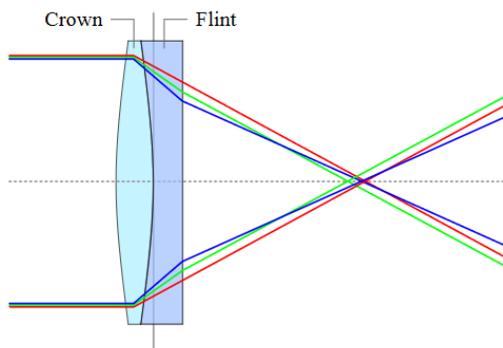


FIGURE 5.15 – Achromat formé d'une lentille convergente en verre crown et d'une lentille divergente en verre flint.

Comme la distance focale d'une lentille simple dépend de la couleur de la lumière qui la traverse, on ne peut qu'indiquer un foyer moyen pour cette lentille. En utilisant un achromat, l'aberration chromatique est annulée pour une paire de longueurs d'onde et peut être réduite pour le reste du spectre. L'utilisation d'une deuxième lentille permet également de réduire d'autres aberrations optiques.

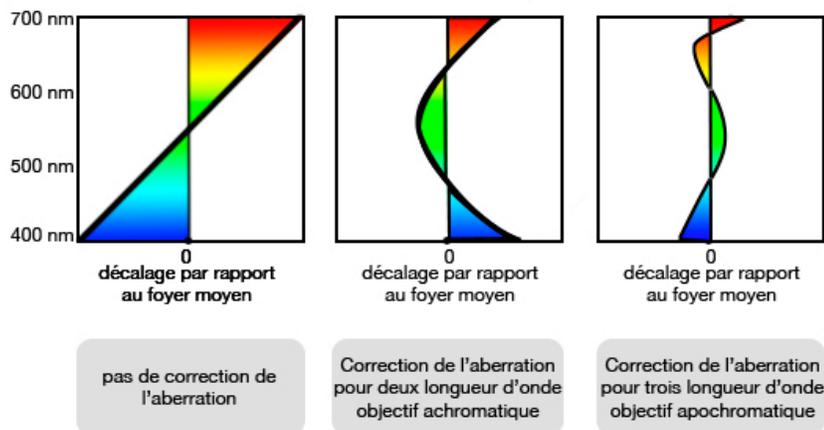


FIGURE 5.16 – Décalage du foyer réel par rapport au foyer moyen pour une lentille simple (de la gauche vers la droite), un achromat et un apochromat.

5.2.2 L'apochromat

Un *objectif apochromatique* ou *apochromat* est une version améliorée du doublet achromatique pour assurer la correction des aberrations chromatique et sphérique.

L'achromat se limite à la correction des distances focales de deux faisceaux de longueurs d'onde différentes (généralement rouge et bleu). L'apochromat permet de corriger les distances focales de trois longueurs d'onde différentes (voir graphique 5.16). La dispersion résiduelle des couleurs est moindre que celle produite par un achromat, à ouverture et distance focale équivalentes. L'apochromat permet aussi une meilleure correction des aberrations sphériques par rapport à l'achromat.

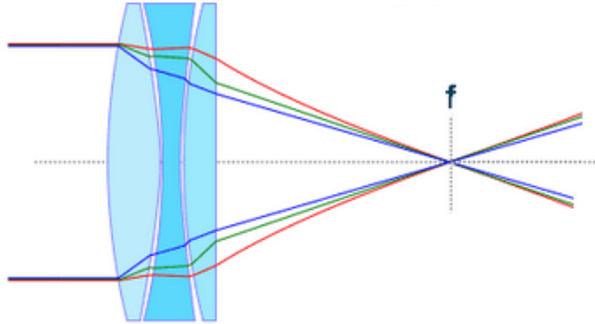


FIGURE 5.17 – L'apochromat est un assemblage de trois lentilles permettant de corriger les trajectoires de trois faisceaux de longueurs d'onde différentes.

Les effets de l'aberration chromatique peuvent aussi être réduites en utilisant des verres spéciaux à dispersion réduite (p.ex. : *ED glass - extra low dispersion glass*) .

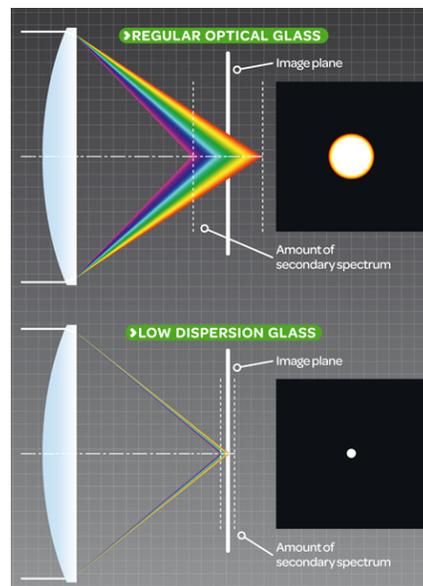


FIGURE 5.18 – Les verres spéciaux à dispersion faible permettent de réduire considérablement l'aberration chromatique et améliorent ainsi le contraste de l'image.

Chapitre 6

Les systèmes optiques

6.1 L'appareil photographique - la caméra

L'objectif d'un appareil photo peut être en principe une simple lentille convergente. Or, vu tous les aberrations optiques qu'entraîne une simple lentille, les objectifs modernes montrent une grande complexité. La *mise au point* est parfaite quand l'image de l'objet à photographier se situe exactement dans le plan de la pellicule. La photo est nette lorsque la distance objectif-pellicule correspond exactement à la distance-image. Lorsque l'objet se situe à une très grande distance, la distance-image q est presque égale à la distance focale f de l'objectif ($q = f$). Plus l'objet est proche, plus la distance-image q est grande.

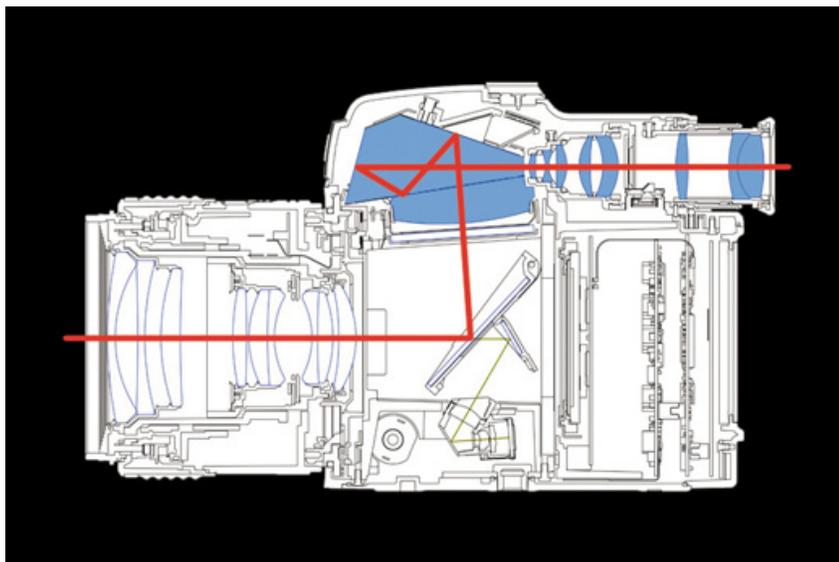


FIGURE 6.1 – Coupe d'un appareil photo à format moyen.

6.1.1 Le nombre d'ouverture

La quantité de lumière qui traverse l'appareil photo peut être réglée par le *diaphragme* : c'est un écran métallique percé d'un trou circulaire de taille réglable placé entre l'objectif et la pellicule. À chaque *nombre d'ouverture* z correspond un diamètre du diaphragme. Plus l'ouverture du diaphragme est grande, plus le nombre d'ouverture est petit.

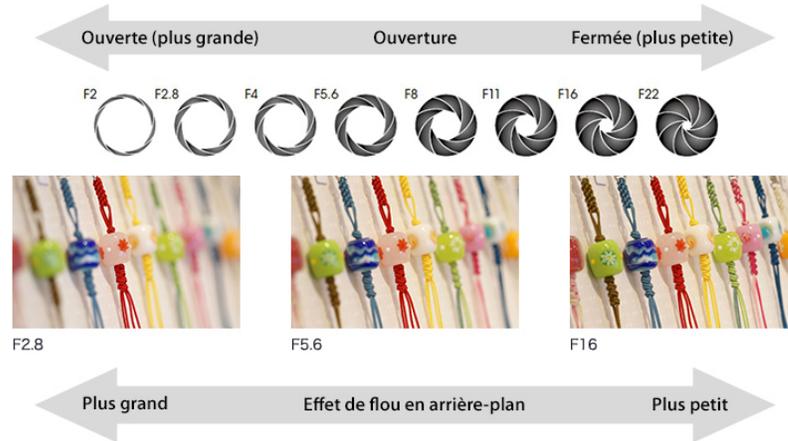


FIGURE 6.2 – *En haut* : Aspect du diaphragme pour différents nombres d'ouverture. *En bas* : Influence du nombre d'ouverture sur la profondeur de champ.

Le nombre d'ouverture z est égal au quotient de la distance focale f de l'objectif et du diamètre d de celui-ci.

$$z = \frac{f}{d} \quad (6.1)$$

Dans le tableau 6.1 on retrouve une série de nombres d'ouverture bien connue dans le domaine de la photographie ou du film. Mais quelle est la raison d'utiliser les nombres 1.4, 2, 2.8, ... pour caractériser le nombre d'ouverture z ?

Le tableau 6.1 nous montre le nombre d'ouverture en fonction du diamètre du diaphragme et de la surface¹ S illuminée.

z	d (mm)	S (mm ²)
1.4	36	1000
2	25	500
2.8	18	250
4	12.5	125
5.6	8.9	63
8	6.3	31
11	4.5	16
16	3.1	8
22	2.3	4

TABLE 6.1 – Nombre d'ouverture z en fonction du diamètre d et de la surface S du diaphragme d'un objectif de $f = 50$ mm.

1. Surface d'un disque circulaire : $S = \pi r^2$ resp. $S = \frac{1}{4} \pi d^2$, avec r : rayon, $d = 2r$: diamètre du disque.

En comparant les surfaces, on constate que celles-ci doublent en passant étape par étape des nombres d'ouverture les plus grands aux plus petits. Ainsi, pour $z = 1.4$, la surface du diaphragme est le double que celle pour $z = 2$. Comme la quantité de lumière passant par l'objectif dépend de la surface du diaphragme, le flux lumineux utilisable est doublé en passant p. ex. de $z = 2$ à $z = 1.4$.

Lorsque la mise au point a été faite, une photo ne sera nette qu'à une distance très précise de l'appareil photo. Cependant, lorsque l'on regarde une photo, celle-ci nous apparaît nette sur une certaine distance, parfois très courte, parfois très grande.

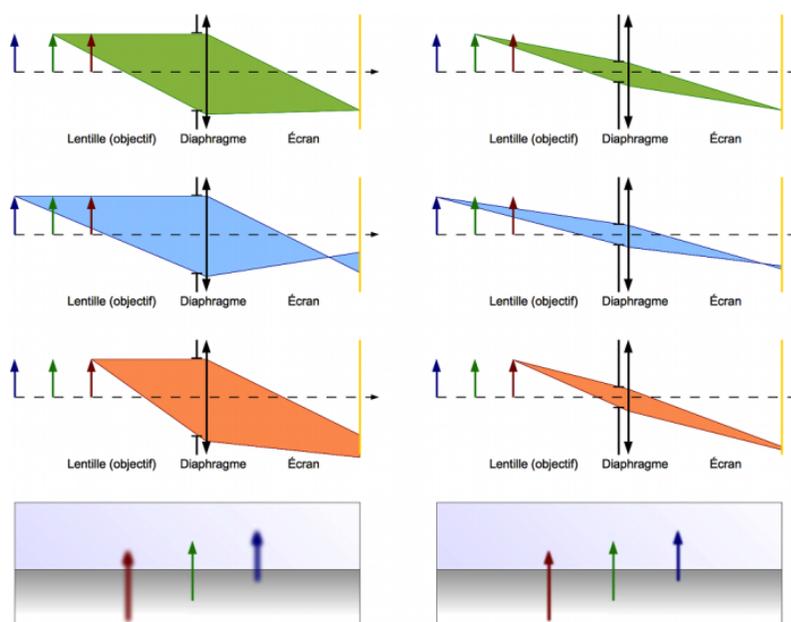


FIGURE 6.3 – Trajet des rayons lumineux passant par un diaphragme d'ouverture importante et réduite³.

Cette zone nette s'appelle la *profondeur de champ*. Plus celle-ci est grande, plus la photo sera nette sur une grande distance. à l'inverse, plus la profondeur de champ est petite, plus courte sera la distance sur laquelle la photo sera nette.

Si l'ouverture est importante, les rayons issus d'un point empruntent beaucoup de chemins différents. Si l'image de cet objet n'est pas sur le capteur, mais en avant ou en arrière, alors tous ces rayons tombent sur le capteur en une large zone, une grosse tache. L'image est floue. Mais si on réduit l'ouverture, on diminue le nombre de rayons entrant dans l'appareil, et on réduit ainsi la taille de la tache où ils convergent. L'image paraît plus nette.

Exercices

1. Un objectif de distance focale $f = 100 \text{ mm}$ est utilisé avec le nombre d'ouverture $z = 4$. Calculez le diamètre d et la surface S du diaphragme.
2. Vérifiez par le calcul les valeurs indiquées dans la première ligne du tableau 6.1.

³. Voir sous : http://media4.obsppm.fr/public/AMC/pages_instruments-photo/instru-ap-profondeur-de-champ.html

6.1.2 Le champ de vue

Le *champ* est la fraction d'espace visible à travers l'instrument ; c'est donc la portion d'espace objet dont l'instrument forme l'image. On dit par exemple qu'une diapositive couvre un champ de 36° avec un système d'entrée de 50 mm de distance focale. De même, dans le cas d'une paire de jumelles, apparaît une mention du type : champ de 8° ou champ de 100 m à 1000 m : cela correspond à une *ouverture angulaire* (*champ angulaire*) égal à $100/1000 = 1/10\text{ rad}$ ⁴ soit environ 6° .

Exemple - L'ouverture angulaire

Avec des lunettes, vous pouvez voir un champ de $c = 100\text{ m}$ à une distance de $d = 1000\text{ m}$. Calculez l'ouverture angulaire α .

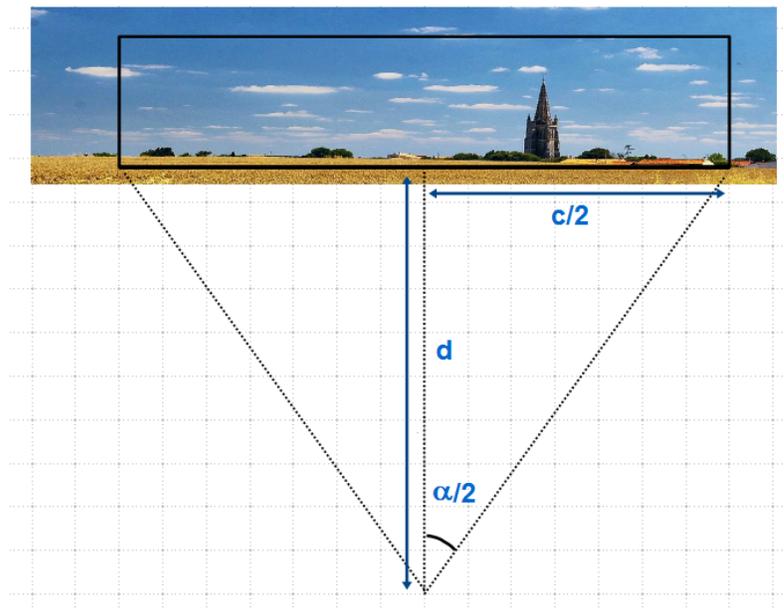


FIGURE 6.4 – Champ de largeur c observable à une distance d .

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{c/2}{d} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \tan \frac{\alpha}{2} &= \frac{100\text{ m}/2}{1000\text{ m}} \\ \frac{\alpha}{2} &= 2.86^\circ \\ \alpha &= 5.72^\circ \end{aligned}$$

Le champ observable est limité par l'encombrement des montures des lentilles ou des éléments optiques du système. La qualité de l'image se dégrade souvent sur les bords en raison des aberrations importantes. C'est pour cela que des *diaphragmes* sont placés à l'intérieur des instruments empêchant justement de voir les régions périphériques. Un diaphragme limitant ainsi l'espace observable s'appelle un *diaphragme de champ*.

4. Le radian (rad) est l'unité dérivée du système international qui mesure les angles ; $2\pi\text{ rad} = 360^\circ$

L'ouverture angulaire peut être déterminée en connaissant le champ observable à une distance déterminée. Or, cette ouverture peut aussi être déterminée, en connaissant le système d'acquisition, c.-à.-d. les données physiques du de la caméra utilisée. D'une part, la distance focale f détermine le champ observable, d'autre part, aussi les dimensions d du capteur de la caméra. Plus celui-ci est grand, plus le champ observable augmente à distance focale constante.

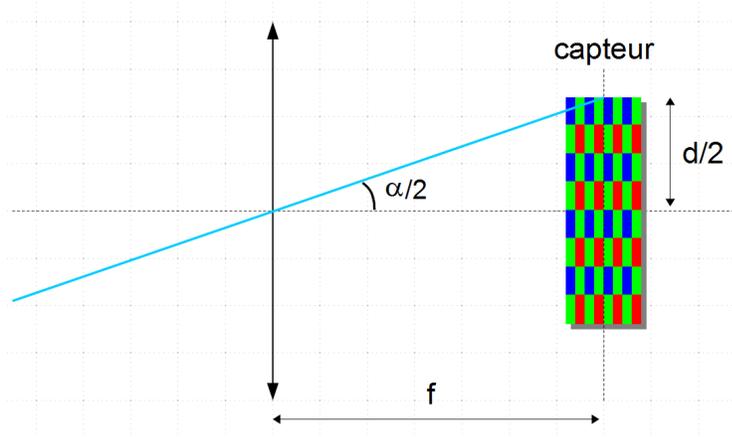


FIGURE 6.5 – Champ observable pour un capteur de dimension d se situant à la distance focale f de l'objectif.

Lorsqu'un objet photographié ou filmé se situe à une grande distance de l'objectif, le capteur doit se trouver plus ou moins au plan focal pour donner une image nette. Dans ce cas, le champ observable α peut être déterminé en connaissant la distance focale f de l'objectif et la (les) dimension(s) du capteur :

$$\boxed{\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{d/2}{f}} \quad (6.3)$$

Exemple

On utilise un objectif de $f = 50 \text{ mm}$ sur un appareil photo de format d'image $24 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$. Ces dimensions correspondent aux dimensions du film, resp. du capteur utilisé. Champ angulaire α_H dans l'horizontale :

$$\begin{aligned} \tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{d/2}{f} \\ &= \frac{36 \text{ mm}/2}{50/\text{mm}} = 0.36 \\ \frac{\alpha_H}{2} &= 19.8^\circ \\ \alpha_H &= 39.6^\circ \end{aligned}$$

De la même façon, on peut calculer le champ angulaire dans la verticale α_V , resp. dans la diagonale α_D de l'image pour cette configuration :

$$\begin{aligned} \alpha_V &= 27.0^\circ \\ \alpha_D &= 46.8^\circ \end{aligned}$$

La figure 6.6 montre un schéma comparatif des principaux format de capteurs disponible sur le marché. Il n'est pas à l'échelle, mais les proportions sont respectées. D'autre part, l'unité de mesure choisie est souvent le pouce⁵.

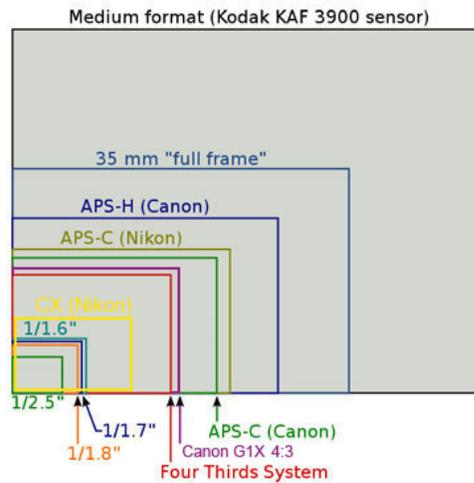
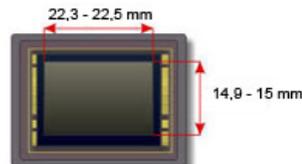


FIGURE 6.6 – Schéma comparatif des principaux format de capteurs⁶.

Exercices

1. Calculez le champ angulaire α (horizontal, vertical et diagonal) pour un capteur APS-C (Canon), lorsqu'on utilise un objectif de 50 mm .



- De quel rapport, le champ angulaire est-il plus grand ou plus petit par rapport au champ calculée dans l'exemple précédent (c.à.d. format *full frame*) ?
2. On utilise un capteur *full frame* avec un objectif de 100 mm . Déterminez le champ angulaire. Quelle est la largeur c du champ observable se situant à une distance de 1000 m ?
 3. En utilisant une caméra avec un capteur *full frame* (largeur de 36 mm), on veut couvrir un champ de 50 m à une distance de 100 m . Quelle distance focale f doit être choisie pour l'objectif ?

5. $1 \text{ pouce} = 1'' = 2,54 \text{ cm}$

6. Voir sous :

<http://www.cnetfrance.fr/produits/s-y-retrouver-dans-la-taille-des-capteurs-en-photo-numerique-39713467.htm>

6.2 La lunette

Une *lunette astronomique* est formée de deux systèmes optiques :

1. *l'objectif*, généralement une grande distance focale f_1 , allant de plusieurs centaines de *mm* à un ou deux mètres. L'objectif peut être un achromat ou un apochromat ;
2. *l'oculaire*, de courte distance focale f_2 , allant de quelques *mm* à quelques dizaines de *mm*. Il existe un grand nombre de types d'oculaires, comme p.ex. : oculaire Kellner, Plössl, Erfle, Nagler, ...

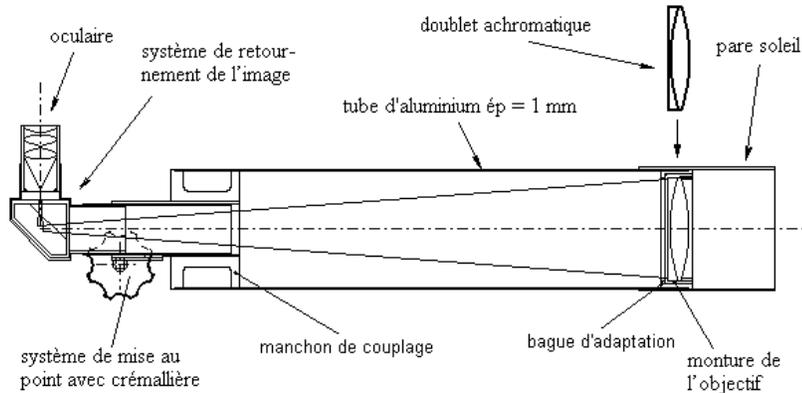


FIGURE 6.7 – Une lunette est formée d'un objectif et d'un oculaire. Pour redresser les images (observations terrestres), on utilise un système de retournement d'image.

L'objectif donne d'un objet très éloigné une image, appelée *image intermédiaire* dans son plan focal. L'oculaire se comporte comme une loupe. Il donne de l'image intermédiaire (qui se comporte comme un objet pour l'oculaire) une image définitive qui est ensuite observée par l'oeil. Pour éviter une accommodation de l'oeil, l'image finale doit se situer à l'infini. Cette situation décrit le fait que les rayons lumineux sortent parallèlement de l'oculaire et la lunette est appelée *afocale*.

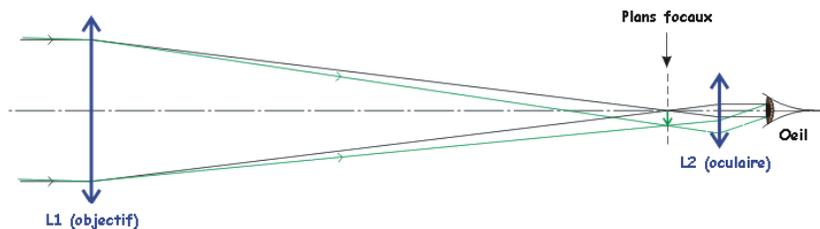


FIGURE 6.8 – Trajet des rayons lumineux pour un objet placé à une très grande distance. Pour que l'oeil n'a pas besoin de s'accomoder, les rayons sortant de l'oculaire doivent être parallèles.

6.2.1 Le grossissement

Une des caractéristiques d'une lunette est son *grossissement* G . Ce grossissement est une grandeur liée aux angles sous lesquels on observe un objet à l'oeil nu et son image à travers l'instrument. En connaissant les distances focales f_1 et f_2 de l'objectif, resp de l'oculaire, on peut déduire que :

$$G = \frac{f_1}{f_2} \quad (6.4)$$

Exemple

La distance focale de l'objectif d'une lunette est de 1200 mm. On dispose de deux oculaires de 24 mm et de 7 mm. Calculez les grossissements.

$$G_1 = \frac{1200 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} = 50$$

$$G_2 = \frac{1200 \text{ mm}}{7 \text{ mm}} = 171$$

6.2.2 La résolution

La **résolution** θ de l'instrument est une caractéristique de la qualité des images. Elle dépend de la longueur d'onde ainsi que du diamètre de l'objectif : plus le diamètre est grand, plus la qualité sera bonne. Elle est chiffrée par le plus petit angle que l'instrument peut séparer. La résolution θ , exprimée en degré⁷, est donnée par (d'après les critères de *Rayleigh* ; voir figure 6.9) :

$$\theta = 68.75 \frac{\lambda}{D} \quad (6.5)$$

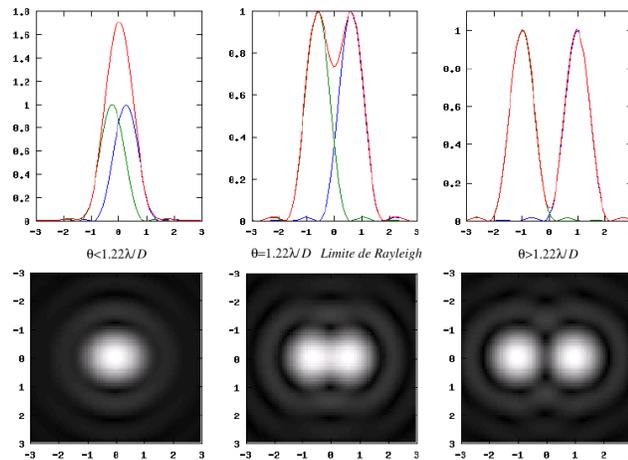


FIGURE 6.9 – Critère de Rayleigh : deux taches sont distinctes si le sommet de la première tache (de diffraction) correspond au premier minimum de la deuxième tache. Le facteur 1.22 vient du fait que dans ce cas, l'unité utilisée est le *radian*.

7. L'unité de un *degré* est subdivisée en 60 *arcminutes* - $1^\circ = 60'$; l'*arcminute* est subdivisée en 60 *arcsecondes* - $1' = 60''$

Exemple

Comparez la résolution de l'oeil (pupille de 4 mm) avec celle d'une lunette de 10 cm de diamètre. La longueur d'onde utilisée est de $\lambda = 500 \cdot 10^{-9} m$.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 68.75 \frac{500 \cdot 10^{-9} m}{4 \cdot 10^{-3} m} = 0.00859^\circ = 0.52' \\ \theta_2 &= 68.75 \frac{500 \cdot 10^{-9} m}{0.1 m} = 0.000344^\circ = 0.02' = 1.24''\end{aligned}$$

La valeur calculée θ_1 est un peu optimiste. L'oeil, dans de bonnes conditions, voit des détails de $1' = 60''$. Cette résolution correspond à une séparation⁸ de deux objets de 2.6 mm se situant à une distance de 10 m.

6.2.3 Le nombre d'ouverture

Le nombre d'ouverture z défini dans le chapitre précédent peut aussi être utilisé pour caractériser une lunette. En connaissant la distance focale f et le diamètre de l'objectif d d'une lunette on peut déterminer z par :

$$z = \frac{f}{d} \quad (6.6)$$



FIGURE 6.10 – Jupiter, Venus et la Lune photographiées avec une lunette à distance focale effective de $f = 3080 mm$ et nombre d'ouverture $z = 28$ (*R. Kneip*).

Exemple

On dispose de deux lunettes ayant un diamètre de $d = 100 mm$. La première a une distance focale de $f_1 = 1000 mm$, la deuxième de $f_2 = 420 mm$.

$$\begin{aligned}z_1 &= \frac{1000}{100} = 10 \\ z_2 &= \frac{420}{100} = 4.2\end{aligned}$$

La première lunette a un nombre d'ouverture élevé ; on peut l'utiliser surtout pour l'observation d'objets plutôt brillants à résolution élevée (comme p.ex. la Lune, les planètes - voir figure 6.10). La deuxième lunette est plus favorable à l'observation d'objets à grande surface et moins brillants.

8. $d = 10 m \cdot \tan(1/60^\circ) = 0.0026 m$

6.3 Le télescope

Le *télescope* a été inventé par *I. Newton*. La lumière est focalisée à l'aide d'un miroir, appelé *miroir primaire*, parabolique. Comme le foyer se situe à l'intérieur du tube du télescope, un *miroir secondaire* plan doit refléter les rayons lumineux convergents à l'extérieur du tube.

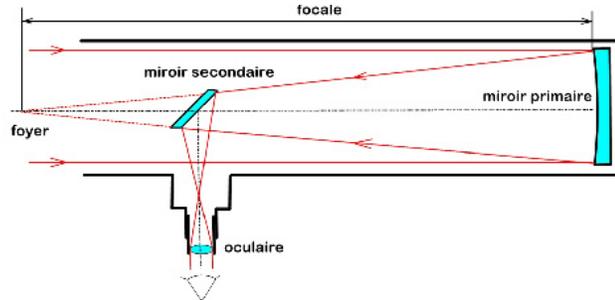


FIGURE 6.11 – Le télescope Newton.

Dans le télescope de Cassegrain, le faisceau sort par l'arrière du tube, resp. du miroir primaire qui est percé. Le miroir secondaire est hyperbolique afin de faire converger le faisceau à l'extérieur.

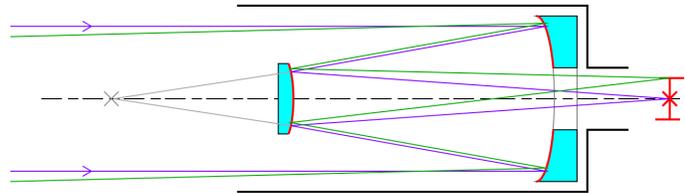


FIGURE 6.12 – Le télescope Cassegrain.

Il existe une grande multitude de types de télescopes et de combinaisons de systèmes à miroirs et à lentilles. L'image suivante montre l'exemple d'un télescope, resp. d'un téléobjectif *Maksutov-Cassegrain*. C'est une variante du Cassegrain corrigé par un ménisque (une lentille concave plus épaisse sur les bords).



FIGURE 6.13 – Téléobjectif *Maksutov-Cassegrain* sur un appareil photo.

6.4 Le microscope

Le microscope peut être décrit comme un système optique à deux lentilles de distances focales f_1 et f_2 . L'objectif a en principe une distance focale très courte, de l'ordre de quelques millimètres; l'oculaire est également à courte distance focale, de quelques centimètres.

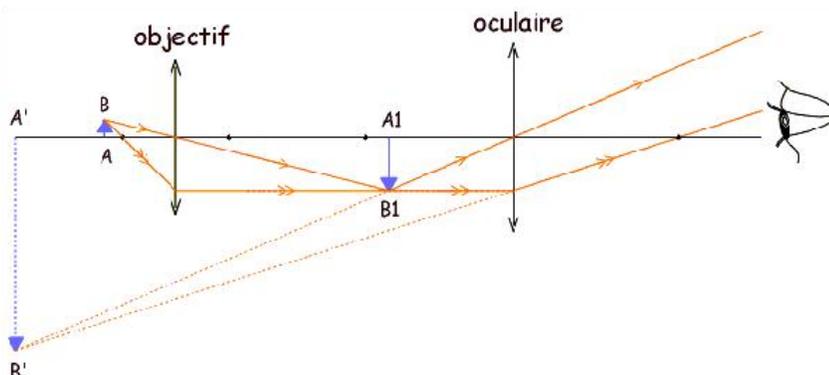


FIGURE 6.14 – Schéma des rayons lumineux passant à travers un microscope.

De l'objet à étudier, se trouvant proche de l'objectif, se forme une image réelle intermédiaire. Pour que l'œil n'a pas besoin de s'accommoder, cette image doit se situer au foyer de l'oculaire. L'image finale se situe à l'infini.

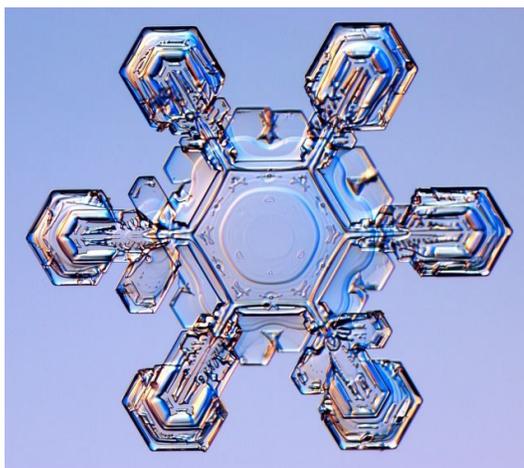


FIGURE 6.15 – Photographie d'un cristal de neige à l'aide d'un microscope spécial⁹.

9. Pour plus de détails sur les cristaux de glace voir la page de *Ken Libbrecht* sous : <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>

6.5 Le projecteur

Un projecteur est un appareil qui combine une source lumineuse avec un dispositif optique destiné à projeter un puissant faisceau de lumière dans une direction particulière et d'un réflecteur. Il existe une grande multitude de projecteurs. Intéressant du point de vue de l'optique, seulement deux projecteurs traditionnels, le *projecteur PC* et le *projecteur Fresnel* ne sont traités dans ce chapitre.

1. Projecteur à lentille plan convexe (*PC*) : Ces projecteurs permettent de projeter un faisceau dont l'ouverture est réglable. Cette ouverture dépend de la position de la source lumineuse à la lentille. Le *spot* présente une lumière uniformément répartie aux bords nets (*PC clair*).
2. Projecteur *Fresnel* : Ils présentent les mêmes caractéristiques de fonctionnement, mais ont un faisceau tout à fait différent. Ce faisceau est très lumineux au centre et l'intensité baisse plus on s'éloigne de celui-ci.



FIGURE 6.16 – *Gauche* : Projecteur *PC* présentant un spot à lumière uniformément répartie et *droite* : projecteur *Fresnel* dont le centre du spot a une intensité élevée¹¹.

¹¹. Voir sous :
[http://www.movinglights.net/2314 projecteurs et faisceaux.htm](http://www.movinglights.net/2314_projecteurs_et_faisceaux.htm)

La *lentille de Fresnel*, ou *lentille à échelons*, est un type de lentille inventé par *Augustin Fresnel* en 1822. C'est une lentille plan-convexe découpée de sections annulaires concentriques optimisées pour alléger la lentille. Cette conception permet d'obtenir une courte distance focale pour un large diamètre, sans le poids et le volume nécessaire à une lentille standard.

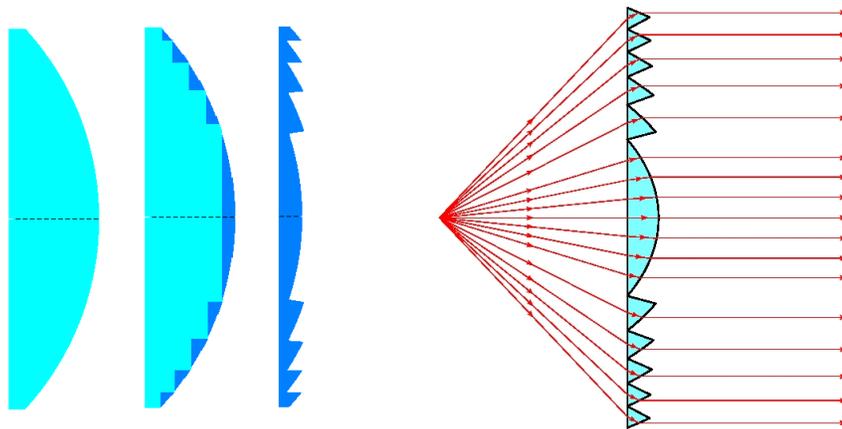


FIGURE 6.17 – Schéma d'une lentille de *Fresnel*.

À part des phares de signalisation marine, on peut utiliser la lentille de *Fresnel* pour différents usages comme pour les rétroprojecteurs, les vidéoprojecteurs, le chauffage solaire et aussi les éclairages architecturaux.

Rappels de trigonométrie

Soit ABC un triangle rectangle en B

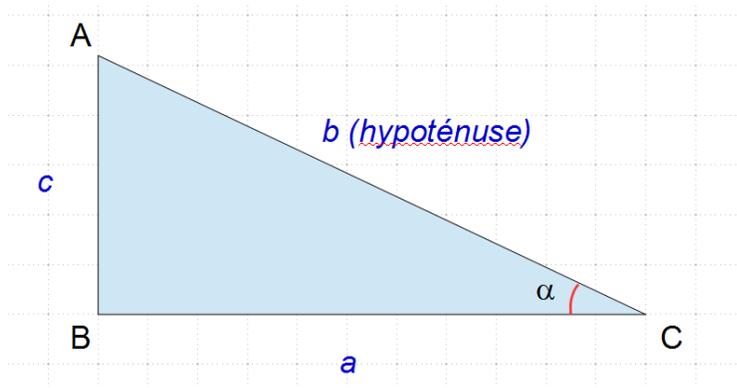


FIGURE 18 – Triangle rectangle en B.

$$\sin \alpha = \frac{\text{coté opposé}}{\text{hypoténuse}} = \frac{c}{b} \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \frac{\text{coté adjacent}}{\text{hypoténuse}} = \frac{a}{b} \quad (8)$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{coté opposé}}{\text{coté adjacent}} = \frac{c}{a} \quad (9)$$

Exemples

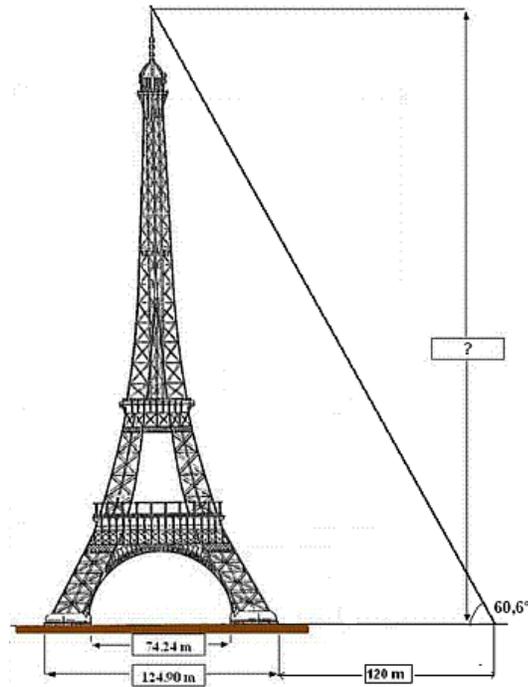
$$\begin{aligned} \sin 0^\circ &= \\ \sin 90^\circ &= \\ \sin 30^\circ &= \\ \sin \alpha &= 0.30 & \alpha &= \\ \sin \alpha &= 0.95 & \alpha &= \\ \sin \alpha &= 1.50 & \alpha &= \\ \cos 45^\circ &= \\ \tan 55^\circ &= \\ \cos \alpha &= 0.12 & \alpha &= \\ \tan \alpha &= 2.05 & \alpha &= \end{aligned}$$

Solutions

0, 1, 0.5, 17.46°, 71.81°, *ERROR* car les fonctions $\sin \alpha$ et $\cos \alpha$ sont toujours comprises entre -1 et 1 , 0.707, 1.428, 83.11°, 64.0°.

Exercice

Déterminez, à partir de la figure suivante, la hauteur de la Tour Eiffel.

**Solution**

Pour obtenir un triangle rectangle, nous devons d'abord déterminer la distance de l'observateur au centre de la base de la tour.

$$a = 120 \text{ m} + \frac{124.90}{2} \text{ m} = 182.45 \text{ m}$$

Hauteur de la tour :

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{c}{a} \\ c &= a \cdot \tan \alpha = 182.45 \text{ m} \cdot \tan 60.6^\circ \\ c &= 323.8 \text{ m} \end{aligned}$$

Solution des exercices

Chapitre 1 : La lumière

La vitesse de la lumière

1. Distance Terre-Soleil : $d = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$
vitesse de la lumière : $c = 300\,000 \text{ km/s}$

$$\begin{aligned}t &= \frac{d}{c} \\&= \frac{150 \cdot 10^6 \text{ km}}{300\,000 \text{ km/s}} \\&= 500 \text{ s} \\&= 8.33 \text{ min} = 8 \text{ min } 20 \text{ s}\end{aligned}$$

La lumière a besoin de 8 min et 20 s pour parcourir la distance Soleil-Terre.

2. Distance : $d = 30 \text{ m}$
vitesse de la lumière : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}t &= \frac{d}{c} \\&= \frac{30 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \\&= 10^{-7} \text{ s} = 0.1 \mu\text{s}\end{aligned}$$

La lumière a besoin de 0.1 μs pour parcourir une salle d'une longueur de 30 m.

3. Temps : $t = 3 \text{ s}$
célérité du son : $c_S = 330 \text{ m/s}$
célérité de la lumière : $c_L = 300\,000 \text{ km/s}$
Trois secondes séparent les événements de voir et d'entendre l'éclair resp. la tonnerre.
Pendant ce temps, le son parcourt la distance d :

$$\begin{aligned}d &= c \cdot t \\&= 330 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} \\&= 990 \text{ m}\end{aligned}$$

Or, la lumière a aussi besoin d'un certain temps t_L pour parcourir la distance calculée de 990 m.

$$\begin{aligned}t_L &= \frac{d}{c} \\&= \frac{990 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \\&= 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 3.3 \mu\text{s}\end{aligned}$$

Donc, l'événement réel a eu lieu $3.3 \mu s$ avant de le voir. Cet intervalle de temps très bref peut souvent être négligé.



FIGURE 19 – Eclair filmé le 24.06.2007 (R. Kneip)

Ombre et pénombre

1. Complétez les deux graphiques.
2. Altitude du soleil en hiver : $\alpha_H = 17^\circ$
 Altitude du soleil en été : $\alpha_E = 63^\circ$
 Hauteur de la personne : $h = 1.70 \text{ m}$
 Longueur l de l'ombre portée sur une surface plane, horizontale :

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{h}{l} \\ l &= \frac{h}{\tan \alpha} \\ l_{\text{hiver}} &= \frac{1.70 \text{ m}}{\tan 17^\circ} \\ l_{\text{hiver}} &= 5.56 \text{ m} \\ l_{\text{ete}} &= 0.87 \text{ m} \end{aligned}$$

L'ombre portée a une longueur de 5.56 m resp. de 0.87 m . L'inclinaison de la surface entraîne une augmentation ou diminution de la longueur de l'ombre portée.

3. Hauteurs : $h_1 = 8 \text{ cm}$; $h_2 = 80 \text{ cm}$
 distance : $d_2 = 2 \text{ m}$
 Position d_1 de l'objet par rapport à la source lumineuse (Théorème de Thalès) :

$$\begin{aligned} \frac{h_1}{d_1} &= \frac{h_2}{d_2} \\ d_1 &= h_1 \cdot \frac{d_2}{h_2} \\ d_1 &= 8 \text{ cm} \cdot \frac{200 \text{ cm}}{80 \text{ cm}} = 20 \text{ cm} \end{aligned}$$

L'objet doit donc se situer à 20 cm de la source lumineuse. On peut aussi trouver la solution en utilisant la fonction trigonométrique de la tan.

Le spectre électromagnétique

1. célérité de la lumière : $c = 3 \cdot 10^8 m/s$
longueurs d'onde : $\lambda_R = 680 nm$; $\lambda_V = 540 nm$; $\lambda_B = 450 nm$
Fréquences f :

$$\begin{aligned}c &= \lambda f \\f &= \frac{c}{\lambda} \\f_R &= \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{680 \cdot 10^{-9} m} = 4.41 \cdot 10^{14} Hz \\f_V &= 5.56 \cdot 10^{14} Hz \\f_B &= 6.67 \cdot 10^{14} Hz\end{aligned}$$

2. Célérité des ondes sonores : $c = 340 m/s$
fréquences : $f_1 = 20 Hz$; $f_2 = 20\,000 Hz$
Longueur d'ondes λ :

$$\begin{aligned}c &= \lambda f \\ \lambda &= \frac{c}{f} \\ \lambda_1 &= \frac{340 m/s}{20 Hz} = 17 m \\ \lambda_2 &= 0.017 m = 1.7 cm\end{aligned}$$

Chapitre 2 : Réflexion

1. En utilisant la figure 2.13, on peut déterminer la réflectance pour du verre ordinaire (BK7) :

$$\begin{aligned}i_1 &= 0^\circ \Rightarrow R_1 = 0.05 = 5\% \\i_2 &= 60^\circ \Rightarrow R_2 = 0.10 = 10\% \\i_3 &= 75^\circ \Rightarrow R_3 = 0.28 = 28\%\end{aligned}$$

On peut faire l'observation que la réflectance augmente fortement pour des angles d'incidence élevés.

2. D'après la figure 2.9, l'or a une réflectance d'environ 38 % entre 400 nm et 500 nm. En négligeant l'absorption dans une couche mince d'or, plus de 60 % de la lumière (dans ce domaine spectral) passent à travers la visière. Au-delà de 600 nm, presque la totalité de la lumière est réfléchi; donc ne passe pas par la visière. Comme une source très chaude a un rayonnement intense dans l'infrarouge (dans le domaine du μm), ce rayonnement ne peut pas passer par la visière. Les yeux sont donc protégés du rayonnement infrarouge.
3. Lorsqu'un rayonnement tombe sur un matériel, il est ou bien réfléchi, ou bien transmis ou bien absorbé par ce matériel. On peut donc dire que la somme de la transmittance T , de la réflectance R et de l'absorption A est égale à 1 (resp. à 100 %) :

$$\boxed{T + R + A = 1}$$

Lorsque l'absorption est négligeable ($A = 0$), on a :

$$\boxed{T + R = 1}$$

En connaissant dans ce cas la transmittance, on peut en déduire immédiatement la réflectance; p.ex. : si la transmittance est $T = 60 \%$, la réflectance est :
 $R = 1 - T = 1 - 0.60 = 0.40 = 0.4 \%$.

L'ultraviolet : La transmittance du verre ordinaire est nulle en dessous de 270 nm . Dans l'ultraviolet proche (entre 300 nm et 400 nm), une partie du rayonnement peut passer par le verre (en dépendance de l'épaisseur du verre).

Le visible : Dans le domaine du visible, la transmittance du verre est à peu près constante et s'élève à plus de 90% .

L'infrarouge : La lumière infrarouge peut passer en grande partie à travers le verre, mais uniquement pour des longueurs d'ondes inférieures à $2\,500 \text{ nm} = 2.5 \mu\text{m}$. Au-delà de $3\,000 \text{ nm} = 3 \mu\text{m}$, le verre n'est plus transparent pour cette partie du rayonnement électromagnétique.

4. Comme on l'a vu dans l'exercice précédent, une fenêtre est (presque) transparente pour le rayonnement visible; or ne laisse passer presque aucun rayonnement infrarouge. Comme la transmittance est presque nulle pour le rayonnement infrarouge ($T \simeq 0$), la réflectance R est très élevée ($R = 1 - T \simeq 1$). Une fenêtre se comporte donc comme un miroir (plan) pour le rayonnement infrarouge.

Chapitre 3 : Réfraction La loi de la réfraction

1. Angle d'incidence : $i = 50^\circ$
 D'après la figure : $r \simeq 31^\circ$ pour les matériaux air-plexiglas.
 Détermination de l'angle de réfraction par le calcul (air : $n_1 = 1$; plexiglas : $n_2 = 1.5$) :

$$\begin{aligned} n_1 \sin i &= n_2 \sin r \\ \sin r &= \frac{n_1}{n_2} \sin i \\ \sin r &= \frac{1}{1.5} \sin 50^\circ = 0.511 \\ r &= 30.71^\circ \end{aligned} \tag{10}$$

2. Avec : $i = 60^\circ$; $r = 45^\circ$
 Comme :

$$\begin{aligned} \sin i &> \sin r \\ \frac{\sin i}{\sin r} &> 1 \end{aligned}$$

D'après la loi de la réfraction :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{n_2}{n_1} &> 1 \\ n_2 &> n_1 \end{aligned}$$

n_2 est le milieu le plus réfringent.

3. Vitesse v de la lumière dans le verre ($n = 1.5$) :

$$\begin{aligned} n &= \frac{c}{v} \\ v &= \frac{c}{n} \\ v &= \frac{300\,000}{1.5} \text{ km/s} \\ v &= 200\,000 \text{ km/s} \end{aligned}$$

4. On a : $n_1 = 1$, $n_2 = 1.33$, $i = 30^\circ$

Loi de la réfraction :

$$\begin{aligned} n_1 \sin i &= n_2 \sin r \\ \sin r &= \frac{n_1}{n_2} \sin i \\ \sin r &= \frac{1}{1.33} \sin 30^\circ = 0.376 \\ r &= 22.08^\circ \end{aligned}$$

Pour le 2^{ieme} cas : $r = 46.57^\circ$

Ajoutez la figure.

5. Dans cet exercice, le rayon lumineux passe de l'eau dans l'air. On a donc : $n_1 = 1.33$, $n_2 = 1$, $i = 30^\circ$

Loi de la réfraction :

$$\begin{aligned} n_1 \sin i &= n_2 \sin r \\ \sin r &= \frac{n_1}{n_2} \sin i \\ \sin r &= \frac{1.33}{1} \sin 30^\circ = 0.665 \\ r &= 41.68^\circ \end{aligned}$$

Pour le 2^{ieme} cas :

$$\begin{aligned} n_1 \sin i &= n_2 \sin r \\ \sin r &= \frac{n_1}{n_2} \sin i \\ \sin r &= \frac{1.33}{1} \sin 75^\circ = 1.285 \\ r &= \text{ERROR} \end{aligned}$$

Dans ce cas il n'existe pas de solution pour calculez l'angle de réfraction. On est dans la situation de la réflexion totale, comme (a) on passe d'un milieu plus vers un milieu moins réfringent et (b) l'angle d'incidence est supérieur à l'angle limite i_{lim} .

6. On a : $n_1 = 1$, $n_2 = 1.70$

$$\begin{aligned} \sin i_{lim} &= \frac{1}{n_2} \\ \sin i_{lim} &= \frac{1}{1.70} = 0.588 \\ i_{lim} &= 36.03^\circ \end{aligned}$$

Lorsque l'angle d'incidence dépasse l'angle limite, le rayon lumineux est réfléchi (réflexion totale).

7. On a : $n_1 = 1$, $n_2 = ?$, $i_{lim} = 52.8^\circ$

$$\begin{aligned}\sin i_{lim} &= \frac{1}{n_2} \\ n_2 &= \frac{1}{\sin i_{lim}} \\ n_2 &= 1.26\end{aligned}$$

8. On a : $n_1 = 1.45$, $n_2 = 1.50$

$$\begin{aligned}\sin i_{lim} &= \frac{n_1}{n_2} \\ \sin i_{lim} &= \frac{1.45}{1.50} = 0.967 \\ i_{lim} &= 75.16^\circ\end{aligned}$$

Les lentilles minces

1. Figure à faire

Vérification par le calcul :

On a : $p = 4.5 \text{ cm}$, $AB = 2 \text{ cm}$, $f = 3 \text{ cm}$

Relation de conjugaison :

$$\begin{aligned}\frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{3 \text{ cm}} - \frac{1}{4.5 \text{ cm}} = \frac{3}{9 \text{ cm}} - \frac{2}{9 \text{ cm}} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{9 \text{ cm}} \\ q &= 9 \text{ cm}\end{aligned}$$

Grandissement transversal γ :

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p} \\ A'B' &= AB \cdot \frac{q}{p} \\ A'B' &= 2 \text{ cm} \cdot \frac{9 \text{ cm}}{4.5 \text{ cm}} \\ A'B' &= 4 \text{ cm}\end{aligned}$$

L'image est dans ce cas une image réelle, inversée et agrandie. L'image se situe à $q = 9 \text{ cm}$ de la lentille et a une hauteur de $A'B' = 4 \text{ cm}$.

2. Figure à faire (sans vérification par le calcul)
3. On a : $p = 300 \text{ m}$, $AB = 1 \text{ m}$, $A'B' = 1 \text{ cm}$

Grandissement transversal γ :

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{A'B'}{AB} = \frac{1 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} \\ \gamma &= \frac{1}{100}\end{aligned}$$

D'autre part on peut aussi écrire :

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p} = \frac{1}{100}$$

Distance image q :

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{100} \cdot p = \frac{300 \text{ m}}{100} \\ q &= 3 \text{ m} \end{aligned}$$

Détermination de la distance focale par la relation de conjugaison :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{100}{p} = \frac{101}{p} \\ f &= \frac{p}{101} = \frac{300 \text{ m}}{101} \\ f &= 2.970 \text{ m} = 2970 \text{ mm} \end{aligned}$$

4. On a : $p = 380\,000 \text{ km}$, $AB = 3\,500 \text{ km}$, $f = 50 \text{ mm}$

a) Détermination de la distance-image q par la relation de conjugaison :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{50 \text{ mm}} - \frac{1}{380\,000 \text{ km}} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{50 \text{ mm}} - \frac{1}{3.8 \cdot 10^{11} \text{ mm}} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{50 \text{ mm}} \\ q &= 50 \text{ mm} = f \end{aligned}$$

On constate que lorsque l'objet est très éloigné, la distance-image q est presque identique à la distance focale f de l'objectif (le facteur $\frac{1}{3.8 \cdot 10^{11}} = 2.63 \cdot 10^{-12}$ est négligeable).

Détermination de la hauteur de l'image $A'B'$ par la relation du grandissement transversal :

$$\begin{aligned} \frac{A'B'}{AB} &= \frac{q}{p} \\ A'B' &= AB \cdot \frac{q}{p} = 3\,500 \text{ km} \cdot \frac{50 \text{ mm}}{3.8 \cdot 10^{11} \text{ mm}} \\ A'B' &= 4.605 \cdot 10^{-7} \text{ km} \\ A'B' &= 0.46 \text{ mm} \end{aligned}$$

En utilisant un objectif de 50 mm , l'image de la Lune a une hauteur de moins d'un demi millimètre! Supposons que les pixels de la caméra ont une dimension de $5 \mu\text{m}$, l'image de la Lune ne couvre qu'environ 92 pixels.

b) On utilise un objectif de $f = 500 \text{ mm}$. En utilisant le résultat de l'étape précédente, on peut dire que :

$$q = f = 500 \text{ mm}$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} A'B' &= AB \cdot \frac{f}{p} \\ A'B' &= AB \cdot \frac{500 \text{ mm}}{3.8 \cdot 10^{11} \text{ mm}} \\ A'B' &= 4.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

En utilisant un objectif de $f = 500 \text{ mm}$, l'image est 10 fois plus grande que dans le cas précédent.



FIGURE 20 – La Lune, photographié avec un objectif de 770 mm et une Canon 500d. (R. Kneip)

5. Figure à faire.

On a : $p = 6 \text{ cm}$, $AB = 3 \text{ cm}$, $f = 2.5 \text{ cm}$

Relation de conjugaison :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \\ \frac{1}{q} &= \frac{1}{2.5 \text{ cm}} - \frac{1}{6 \text{ cm}} = \frac{12}{30 \text{ cm}} - \frac{5}{30 \text{ cm}} \\ \frac{1}{q} &= \frac{7}{30 \text{ cm}} \\ q &= \frac{30}{7} \text{ cm} = 4.29 \text{ cm} \end{aligned}$$

Grandissement transversal γ :

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p} \\ A'B' &= AB \cdot \frac{q}{p} \\ A'B' &= 3 \text{ cm} \cdot \frac{30 \text{ cm}}{7 \cdot 6 \text{ cm}} \\ A'B' &= \frac{15}{7} \text{ cm} = 2.14 \text{ cm}\end{aligned}$$

L'image est dans ce cas une image réelle, inversée et plus petite que l'objet. L'image se situe à $q = 4.29 \text{ cm}$ de la lentille et a une hauteur de $A'B' = 2.14 \text{ cm}$.

Chapitre 6 : Les systèmes optiques

Le nombre d'ouverture

1. On a : $f = 100 \text{ mm}$, $z = 4$
Diamètre d du diaphragme :

$$\begin{aligned}z &= \frac{f}{d} \\ d &= \frac{f}{z} = \frac{100 \text{ mm}}{4} \\ d &= 25 \text{ mm}\end{aligned}$$

Surface S du diaphragme :

$$\begin{aligned}S &= \frac{1}{4}\pi d^2 \\ S &= \frac{1}{4}\pi(25 \text{ mm})^2 \\ S &= 490.9 \text{ mm}^2 \simeq 500 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

2. On a : $f = 50 \text{ mm}$, $z = 1.4$
Diamètre d du diaphragme :

$$\begin{aligned}z &= \frac{f}{d} \\ d &= \frac{f}{z} = \frac{50 \text{ mm}}{1.4} \\ d &= 35.71 \text{ mm}\end{aligned}$$

Surface S du diaphragme :

$$\begin{aligned}S &= \frac{1}{4}\pi d^2 \\ S &= \frac{1}{4}\pi(35.71 \text{ mm})^2 \\ S &= 1001.78 \text{ mm}^2 \simeq 1000 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Le champ de vue

1. On a : $f = 50 \text{ mm}$, $d_H = 22.3 \text{ mm}$, $d_V = 14.9 \text{ mm}$
Calcul de la diagonale d_D :

$$\begin{aligned}d_D &= \sqrt{d_H^2 + d_V^2} \\d_D &= \sqrt{(22.3 \text{ mm})^2 + (14.9 \text{ mm})^2} \\d_D &= 26.8 \text{ mm}\end{aligned}$$

Champ angulaire α_H , α_V et α_D :

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{d/2}{f} \\ \tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{22.3 \text{ mm}/2}{50 \text{ mm}} = 0.223 \\ \frac{\alpha_H}{2} &= 12.57^\circ \\ \alpha_H &= 25.14^\circ \\ \alpha_V &= 16.95^\circ \\ \alpha_D &= 30.03^\circ\end{aligned}$$

Le format *full frame* correspond aux dimensions $24 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$. Prenons pour notre calcul l'horizontale de $d_{Hff} = 36 \text{ mm}$.

Champ angulaire α_{Hff} :

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_{Hff}}{2} &= \frac{d/2}{f} \\ \tan \frac{\alpha_{Hff}}{2} &= \frac{22.3 \text{ mm}/2}{50 \text{ mm}} = 0.36 \\ \frac{\alpha_{Hff}}{2} &= 19.80^\circ \\ \alpha_{Hff} &= 39.60^\circ\end{aligned}$$

En utilisant le même objectif, on constate que le champ angulaire est plus petit en utilisant un capteur plus petit. Pour le capteur APS-C, le champ angulaire (horizontal) est de 25.14° , alors que pour le format *full frame* il est de 39.60° .

Rapport du champ angulaire avec le capteur APS-C et du champ angulaire *full frame* :

$$\begin{aligned}\frac{\alpha_{Hff}}{\alpha_H} &= \frac{39.60^\circ}{25.14^\circ} \\ \frac{\alpha_{Hff}}{\alpha_H} &= 1.58 \simeq 1.6\end{aligned}$$

2. On a : $f = 100 \text{ mm}$, $d_H = 36 \text{ mm}$
Champ angulaire α_H :

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{d/2}{f} \\ \tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{36 \text{ mm}/2}{100 \text{ mm}} = 0.180 \\ \frac{\alpha_H}{2} &= 10.20^\circ \\ \alpha_H &= 20.41^\circ\end{aligned}$$



FIGURE 21 – Champ photographié par (a) un capteur *full frame* et (b) un capteur APS-C.

Le champ angulaire (horizontal) est de 20.41° pour un objectif de 100 mm .
 Largeur du champ observable à une distance de $d = 1000\text{ m}$:

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{c/2}{d} \\ \frac{c}{2} &= d \cdot \tan \frac{\alpha_H}{2} \\ c &= 2 \cdot d \cdot \tan \frac{\alpha_H}{2} = 2 \cdot 1000\text{ m} \cdot \tan \frac{20.41^\circ}{2} \\ c &= 360\text{ m}\end{aligned}$$

3. On a : $d_H = 36\text{ mm}$, $c = 50\text{ m}$, $d = 100\text{ m}$, $f = 100\text{ mm}$
 Champ angulaire α_H :

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{c/2}{d} \\ \tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{50\text{ m}/2}{100\text{ m}} = 0.25 \\ \frac{\alpha_H}{2} &= 14.04^\circ \\ \alpha_H &= 28.07^\circ\end{aligned}$$

Distance focale f à choisir :

$$\begin{aligned}\tan \frac{\alpha_H}{2} &= \frac{d/2}{f} \\ f &= \frac{d/2}{\tan \frac{\alpha_H}{2}} \\ f &= \frac{36\text{ mm}/2}{\tan 14.04^\circ} \\ f &= 72\text{ mm}\end{aligned}$$

Index

- aberration chromatique, 28, 47, 50
- aberration chromatique latérale, 48
- aberration chromatique longitudinale, 48
- aberration chromatique transversale, 48
- aberration de coma, 44
- aberration optique, 41
- aberration sphérique, 42
- aberrations chromatiques, 41
- aberrations géométriques, 41
- accomodation, 57
- achromat, 49
- anastigmat, 45
- angle d'incidence, 14, 22
- angle de réfraction, 22
- angle de réflexion, 14
- apochromat, 50
- appareil photographique, 51
- astigmatisme, 45
- axe optique, 31

- barillet, 46

- célérité, 5, 23
- cône d'ombre, 6
- cône d'ombre pure, 6
- caméra, 51
- caméra infrarouge, 20
- camera obscura, 41
- capteur, 55
- Cassegrain, 60
- champ angulaire, 54
- champ de vue, 54
- coefficient de dispersion, 28
- couleurs spectrales, 27
- coussinet, 46
- critères de Rayleigh, 58

- diagramme d'Abbe, 28
- diaphragme, 52
- diaphragme de champ, 54
- dioptre, 31
- dioptrie, 36
- dispersion, 27, 28, 47
- distance focale, 32, 52, 55

- distance-image q , 34
- distance-objet p , 34
- distorsion, 46
- doublet, 49
- doublet achromatique, 49

- ED glass, 50

- facteur de réflexion, 17
- facteur de transmission, 20
- fibre optique, 26
- filtre polarisant, 19
- format de capteur, 56
- foyer, 32
- foyer sagittal, 45
- foyer tangentiel, 45
- foyer virtuel, 39
- fréquence, 12

- grandissement transversal, 34
- grossissement, 58

- Hertz, 12

- image intermédiaire, 57
- image virtuelle, 38
- incidence limite, 24
- indice absolu, 23
- indice de réfraction, 28
- infrarouge, 12

- jumelles, 25

- lentille, 31
- lentille à échelons, 63
- lentille asphérique, 42
- lentille concave, 39
- lentille convergente, 31, 32
- lentille convexe, 32
- lentille de Fresnel, 63
- lentille divergente, 31, 39
- lentille mince, 31
- loi de la réflexion, 14
- loi de la réfraction, 23

- longueur d'onde, 12, 23
- lunette, 57
- lunette afocale, 57
- Maksutov-Cassegrain, 60
- microscope, 61
- miroir plan, 13
- miroir primaire, 60
- miroir secondaire, 60
- mise au point, 51
- Newton, 60
- nombre d'Abbe, 28
- nombre d'ouverture, 52, 59
- normale, 14, 22
- objectif, 51, 57
- oculaire, 57
- ombre, 6
- ombre portée, 6
- ombre propre, 6
- onde électromagnétique, 11
- onde transversale, 11
- optique géométrique, 3
- optique ondulatoire, 3
- orthotrope, 16
- ouverture angulaire, 54, 55
- pénombre, 6, 7
- plan focal, 32
- plan-image, 34
- polarisation, 4, 19
- principe de Fermat, 13
- prisme droit, 25
- prismes de Porro, 25
- prismes en toit, 25
- profondeur de champ, 53
- projecteur, 62
- projecteur Fresnel, 62
- projecteur PC, 62
- propagation rectiligne, 4
- réflectance, 17, 19
- réflecteur, 18
- réflexion, 13
- réflexion diffuse, 16
- réflexion totale, 24–26
- réfraction, 21
- réfraction limite, 24
- résolution, 58
- rayon lumineux, 3, 4
- rayons caractéristiques, 32, 33
- relation de conjugaison, 34
- source ponctuelle, 6
- spectre, 27
- spectre électromagnétique, 11, 12
- système orthoscopique, 46
- système rectilinéaire, 46
- télescope, 60
- transmittance, 20
- ultraviolet, 12
- vergence, 36
- verre crown, 29, 49
- verre flint, 29, 49
- vitesse de la lumière, 5

Bibliographie

- [1] Jean-Paul Parisot, Patricia Segonds, Sylvie Le Boiteux
Cours de physique, Optique, Cours et exercices corrigés
ISBN 2-10-006846-6
Dunod/Paris, 2e édition, 2003
- [2] Jacques Gaudin
Colorimétrie appliquée à la vidéo
ISBN 978-2-10-058271-6
Dunod/Paris, 2e édition, 2006, 2012
- [3] Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann
Farben, Natur Technik Kunst
ISBN 978-3-8274-2846-2
Spektrum, 3. Auflage, 2012
- [4] Jens Mueller
Handbuch der Lichttechnik - Das Kompendium für den Praktiker
ISBN 978-3-937841-25-0;
PPV Medien, 4. Auflage, 2008