

Table des matières

I	Optique géométrique	5
1	Propagation de la lumière	7
I	L'onde lumineuse	7
A	Nature ondulatoire de la lumière	7
B	Célérité de la lumière	7
I.B.1	Dans le vide	7
I.B.2	Dans un milieu	8
I.B.3	Selon la fréquence	8
C	Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale	8
II	Sources lumineuses primaires	9
A	Spectre d'émission	10
B	Les sources thermiques	10
C	Les sources spectrales	10
D	Le LASER	11
III	Diffraction de la lumière	11
A	Principe	11
B	Loi de la diffraction	12
2	Base de l'optique géométrique	13
I	Propriétés générales	13
A	Approximation de l'optique géométrique	13
B	Notion de rayon lumineux	13
C	Propagation rectiligne	13
D	Retour inverse de la lumière	13
E	Indépendance des rayons lumineux	13
II	Lois de Snell-Descartes	14
A	Changement de milieu	14
B	Lois de Snell-Descartes	15
C	Phénomène de réflexion totale	16
III	Généralités sur les systèmes optiques	16
A	Définition	16
B	Système centré	17
C	Rayons incidents, rayons émergents	17
D	Faisceaux lumineux	17
E	Objets et images réelles ou virtuelles	17
F	Objet étendu, grandissement transversal	19
G	Foyers d'un système optique	19
IV	Approximation de Gauss	20
A	Stigmatisme, aplanétisme	20
B	Rigoureux ou approché ?	20
C	Conditions de Gauss	20
II	Électrocinétique	21

Première partie

Optique géométrique

Propagation de la lumière

Au programme

Savoirs

- ◇ Définir une onde sinusoïdale/monochromatique.
- ◇ Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- ◇ Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
- ◇ Définir le modèle de l'optique géométrique.
- ◇ Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
- ◇ Connaître la valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide.
- ◇ Définir l'indice d'un milieu transparent.

Savoir-faire

- ◇ Déterminer la longueur d'onde d'un rayonnement dans un milieu à partir de sa longueur d'onde dans le vide.

I L'onde lumineuse

A Nature ondulatoire de la lumière

La nature de la lumière a été l'objet de discussions et controverses durant des siècles, opposant principalement au XVII^e NEWTON avec sa théorie corpusculaire et HOOKE puis HUYGENS avec la théorie ondulatoire. Le débat s'est clos avec les expériences d'interférences de YOUNG et FRESNEL (début XIX^e) notamment, prouvant son comportement ondulatoire (nous aurons l'occasion de les réaliser nous-mêmes).

Ce n'est cependant qu'à la fin du XIX^e avec les théories de MAXWELL que cette onde est décrite par la propagation de grandeurs électromagnétiques (champ électrique, champ magnétique, et donc pas dans un milieu matériel).

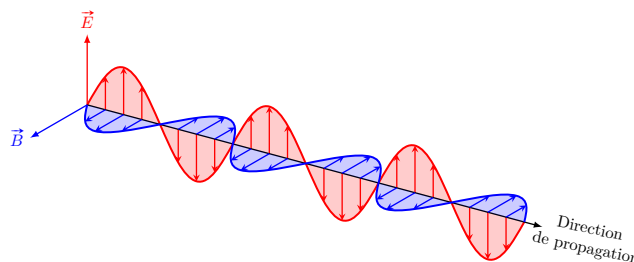


FIGURE 1.1 – Représentation des oscillations du champ électromagnétique lors de la propagation de la lumière

Le XX^e vint bousculer cette vision en attestant de la dualité onde-corpuscule des particules élémentaires de l'Univers avec l'avènement de la physique quantique. Selon les conditions d'études, l'une ou l'autre des visions sera appliquée.

B Célérité de la lumière

I.B.1 Dans le vide

En tant qu'onde électromagnétique, la lumière n'est pas une onde mécanique nécessitant un milieu matériel pour se propager¹.

Définition

Nous appelons *célérité* de la lumière **dans le vide**, et la notons c , la vitesse de l'onde lumineuse.

Valeur

La valeur de c est fixée par définition², telle que

$$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Nous utiliserons et retiendrons cependant la valeur

1. À la différence d'une vague sur l'eau ou d'une corde de guitare qui se propagent sur un milieu matériel.

2. Elle n'est donc théoriquement plus mesurable, puisque les mesures de distances se basent sur la valeur de la célérité de la lumière

I.B.2 Dans un milieu

Elle peut cependant se propager dans certains milieux matériels transparents, comme l'air, l'eau, le verre... Dans le cadre de la physique de cette année, nous étudierons des milieux particuliers :

Définition : milieu transparent linéaire homogène isotrope (TLHI)

Transparent :

Linéaire :

Homogène :

Isotrope :

Lorsque la lumière passe dans un tel milieu, sa vitesse **diminue**. Nous caractérisons cette diminution *via* la définition de l'indice optique :

Définition : indice optique

Nous appelons *indice optique* la grandeur associée à un milieu transparent et caractérisant la **vitesse de la lumière en son sein**, telle que :

Unités

Remarque

Étant donné que la vitesse de la lumière **dans le vide** est absolue et indépassable, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent ne peut qu'être plus petite, et donc

Implication

Par la définition de l'indice optique, nous déduisons l'expression de la vitesse de la lumière dans un milieu par :

Ordre de grandeur

Milieu	n	$v[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
Vide		
Air		
Eau		
Verre		
Diamant		

I.B.3 Selon la fréquence

L'indice optique dépend de la fréquence d'une onde lumineuse, et ainsi la vitesse de la lumière dans un milieu TLHI aussi. Comme la couleur de la lumière correspond à la fréquence de l'onde la représentant, cela cause la **dispersion** de la lumière³. Cet effet est cependant souvent négligé car faible par rapport à d'autres phénomènes.

C Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale

Définition : onde sinusoïdale

Exemples

Une lumière rouge est monochromatique, et est décrite par une onde lumineuse de longueur d'onde $\approx 700 \text{ nm}$. Une lumière **blanche** ne l'est **pas**, c'est une *superposition* d'ondes sinusoïdales sur le domaine du visible.

3. Pensez par exemple au prisme de Pink Floyd.



Propriété

Une onde lumineuse se caractérise par sa fréquence, appelée f ou ν ⁴. En effet, **la fréquence d'une onde est indépendante du milieu traversé**. En revanche, sa **longueur d'onde en dépend**.



Implication

Avec l'analyse dimensionnelle, on trouve directement qu'une longueur d'onde λ doit s'écrire

Or, dans le vide $v_{\text{onde}} = c$, et dans un milieu TLHI d'indice optique n , $v_{\text{onde}} = \frac{c}{n}$; ainsi avec λ_0 dans le vide :



À retenir

Ainsi, quand on parle de la longueur d'onde d'une couleur, on parle en réalité de sa longueur d'onde *dans le vide*.

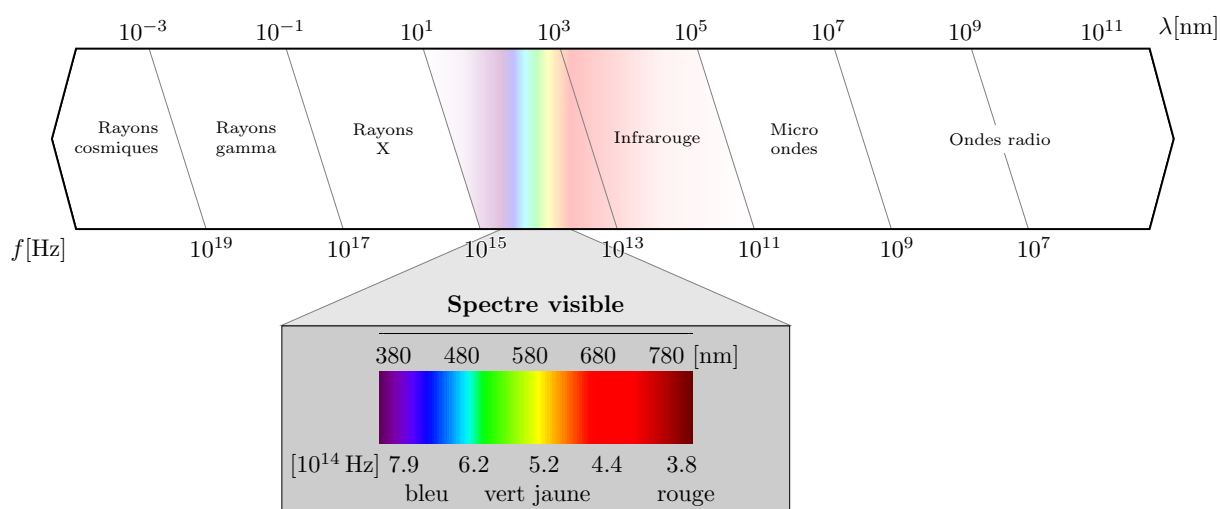


FIGURE 1.2 – Longueurs d'ondes des ondes monochromatiques dans le vide.



Exercice

Un laser rouge émet un rayonnement de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 633$ nm. Déterminer sa longueur d'onde λ dans du verre, d'indice optique $n = 1,5$. Sa couleur change-t-elle ?

II Sources lumineuses primaires

On parle de source primaire quand l'objet en question émet directement de la lumière. Les sources secondaires ne font qu'en renvoyer, par exemple la Lune, la peau, les arbres...

4. Se lit « nu ».

A Spectre d'émission

Pour caractériser un rayonnement électromagnétique, on trace son spectre d'émission, c'est-à-dire la courbe de l'intensité lumineuse en fonction de la fréquence (ou longueur d'onde dans le vide).

Les sources primaires sont classées selon leur contenu spectral qui découle du type de processus d'émission lumineuse :

Sources thermiques :

Sources spectrales :

Sources LASER :

B Les sources thermiques

L'agitation thermique des atomes émet un rayonnement électromagnétique dépendant de sa température : c'est le type de rayonnement du Soleil ou des ampoules à incandescence (chauffage d'un métal qui brille).

Caractéristiques du rayonnement d'un corps chaud

Exemples

- À température ambiante ($T \approx 300\text{ K}$), un corps émet dans l'infrarouge (c'est le principe d'une caméra infrarouge) ;
- Pour une lampe, le filament est à $T \approx 2800\text{ K}$. Son maximum est dans l'infrarouge mais son spectre s'étale sur le domaine visible ;
- La température de surface du Soleil est de $T \approx 5700\text{ K}$. Son maximum d'émission est dans le domaine visible.

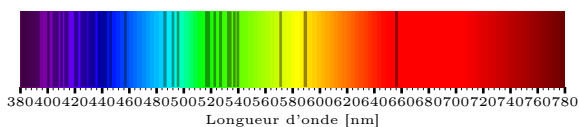


FIGURE 1.3 – Spectre lumineux que l'on reçoit du Soleil.

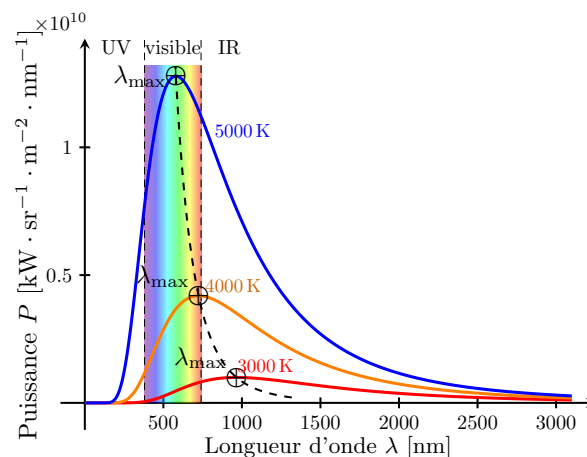


FIGURE 1.4 – Spectre d'émission d'un corps chaud selon quelques températures.

C Les sources spectrales

Une lampe spectrale contient un élément chimique sous forme de gaz, et deux électrodes de part et d'autre du contenant génère des décharges électriques qui excitent les atomes. C'est un état instable. En revenant dans leur état fondamental, ils émettent des photons à une énergie précise correspondant à la différence des niveaux d'énergie quantiques de l'élément ($f = \frac{\Delta E}{h}$; voir chapitre introduction à la physique quantique).

Caractéristiques du rayonnement spectral

Exemples

On trouve des lampes au néon, de couleur rouge; des lampes au mercure, de couleur bleue; des lampes à sodium, dans l'orange... On utilisera principalement ces deux dernières en laboratoire.

Spectre d'émission de Hg :

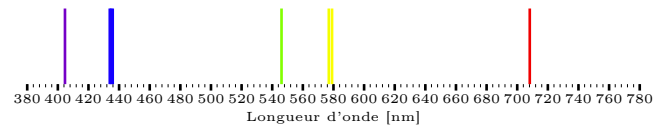


FIGURE 1.5 – Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure.

D Le LASER

LASER est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations*, c'est-à-dire « amplification de la lumière par émission stimulée de radiations ». Il est composé d'une cavité remplie d'un milieu recevant de l'énergie, excité par une source extérieure, et fermée par deux miroirs. Celui de la face de sortie est légèrement transparent.

La lumière passe au travers du milieu qui réémet de la lumière sans atténuer la première, et grâce au miroir le tout est réfléchi pour permettre de nombreux aller-retours, amplifiant l'intensité lumineuse à chaque passage.

Caractéristiques du rayonnement LASER

Exemple

Un laser hélium-néon donne un faisceau rouge de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$.

Spectre d'émission d'un laser He-Ne

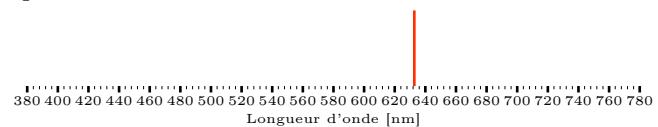


FIGURE 1.6 – Spectre d'émission d'un laser hélium-néon.

Attention

Si la puissance totale du faisceau est communément assez faible ($P \approx 1 \text{ mW}$), sa surface l'est également ($S \approx 1 \text{ mm}^2$). La puissance *surfactive* est donc en réalité très grande, et particulièrement dangereuse pour l'œil. On veillera donc à ne jamais le diriger vers un œil, mais aussi à éviter toute réflexion involontaire (notamment sur tout métal : bijou, tige de support...).

III Diffraction de la lumière

A Principe

La nature ondulatoire de la lumière apparaît clairement lors des expériences de diffraction : dans certains cas, la restriction d'un faisceau lumineux (par exemple un laser) par une fente, donne sur un écran placé loin derrière, un étalement de la lumière **plus large** que la largeur de la fente.

Ce phénomène survient quand l'extension spatiale d'une onde est limitée; cela arrive également avec les vagues dans l'eau. En effet, pour des valeurs de largeur de fente $a \gg \lambda$, il n'y a bien qu'une coupure du faisceau. En revanche, quand $a \approx \lambda$, ce phénomène survient. On observe même que plus a est petit, plus la lumière s'étale sur l'écran.

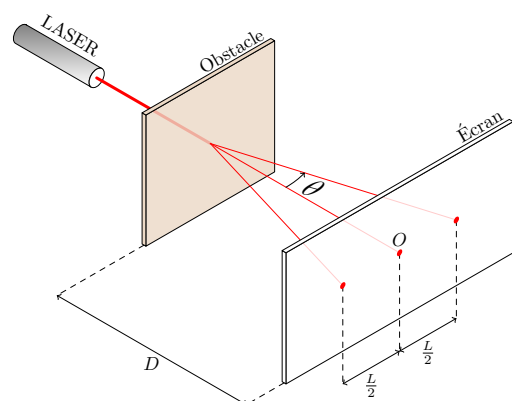


FIGURE 1.7 – Diffraction de FRAUNHOFER d'un faisceau laser par une fente fine.

B Loi de la diffraction



Diffraction par une fente simple

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide, limité spatialement par une fente de largeur $a \approx \lambda$, forme à grande distance sur un écran des tâches lumineuses dont le demi angle d'ouverture θ de la tâche centrale vérifie

Base de l'optique géométrique

I Propriétés générales

A Approximation de l'optique géométrique

approximation de l'optique géométrique

L'approximation de l'optique géométrique consiste à négliger tout phénomène de diffraction (et d'interférence, cf. chapitres plus avancés) pour ignorer le comportement ondulatoire de la lumière. Dans cette approche, la lumière est équivalente à un flux de particules *indépendantes*, sans interaction globale (propriété d'une onde) : c'est le modèle corpusculaire.

B Notion de rayon lumineux

Dans le cadre de l'optique géométrique, on décrit donc la lumière par la trajectoire des photons.

rayon et faisceau lumineux

On appelle « rayon lumineux » le chemin que semble suivre la lumière entre deux points lors d'une expérience de propagation. C'est une **courbe orientée** donnant la direction et le sens de propagation d'une onde lumineuse.

On appelle « faisceau lumineux » passant par un point l'ensemble des rayons lumineux passant par ce point.

Remarque

C'est un outil théorique : il est impossible d'isoler un rayon lumineux en pratique à cause de la diffraction.

C Propagation rectiligne

propagation rectiligne

Dans un milieu TLHI, la lumière se propage en ligne droite.

Contre-exemple

L'indice optique changeant avec la température, dans certaines conditions l'atmosphère n'est pas homogène : cela peut causer des mirages (trajectoire courbée de la lumière).

D Retour inverse de la lumière

retour inverse

Dans un milieu TLI, homogène ou non, le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur un même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation.

échange

Si on connaît le trajet dans un sens, on le connaît l'autre sens. On utilisera ce raisonnement à plusieurs reprises pour l'étude des systèmes optiques.

E Indépendance des rayons lumineux

indépendance des rayons lumineux

Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux. Notamment, un rayon ne peut pas en dévier un autre.

II Lois de Snell-Descartes

A Changement de milieu

dioptre

On appelle « dioptre » la surface de séparation entre deux milieux transparents d'indices optiques différents.

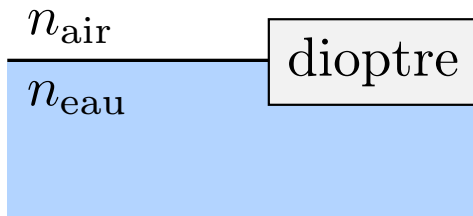


FIGURE 2.1 – Exemple de dioptre.

réflexion, réfraction

Au niveau d'un dioptre, un rayon lumineux incident donne naissance à un rayon réfracté (traversant le dioptre) et à un rayon réfléchi.

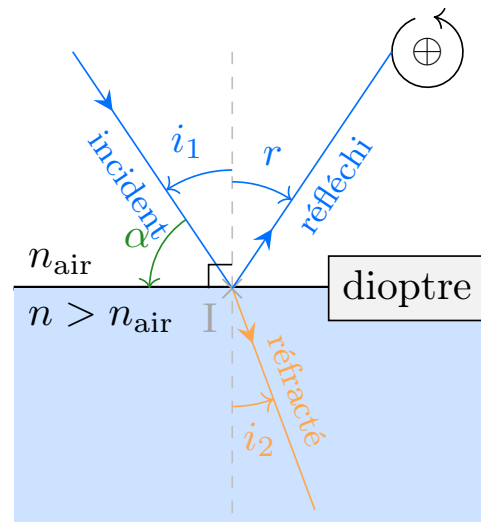


FIGURE 2.2 – Rayons incidents, réfléchis et réfractés sur un dioptre.

vocabulaire général

- On appelle **point d'incidence** I le point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre ;
- On appelle **plan d'incidence** le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre en I ;
- On appelle **angle d'incidence** i_1 l'angle entre la normale et le rayon incident ;
- On appelle **angle de réflexion** r l'angle entre la normale et le rayon réfléchi ;
- On appelle **angle de réfraction** i_2 l'angle entre la normale et le rayon réfracté.

calcul des angles

Les angles se calculent entre le rayon et la **normale** au dioptre. Le sens de comptage doit être indiqué sur la figure.

B Lois de Snell-Descartes



Lois de Snell-Descartes

Les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence, et respectent

$$r = -i_1 \quad \text{et} \quad n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

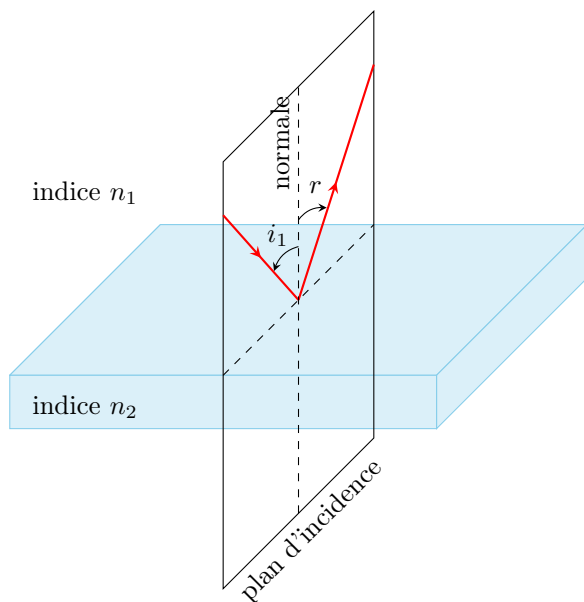


FIGURE 2.3 – Réflexion d'un rayon incident

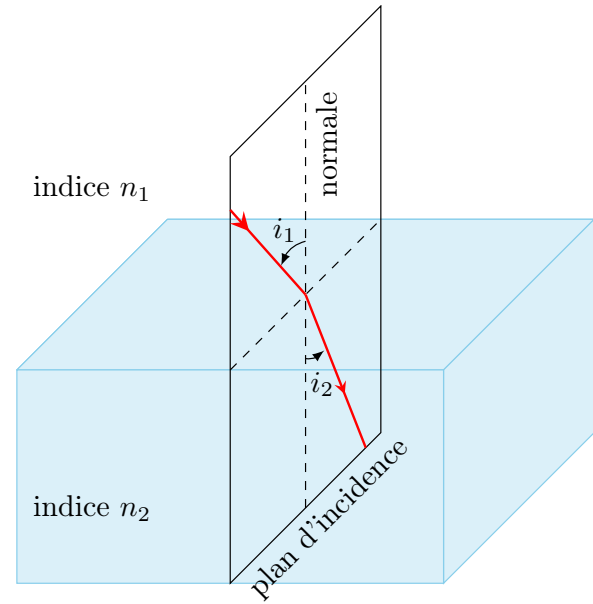


FIGURE 2.4 – Réfraction d'un rayon incident avec $n_2 > n_1$.



réfraction

On distingue 3 cas généraux pour la réfraction :

- 1) Si $i_1 = 0$, alors $i_2 = 0$: en incidence dite « normale », il n'y a pas de déviation du rayon ;
- 2) Si $n_2 > n_1$ ¹, alors $|i_2| < |i_1|$: le rayon réfracté se rapproche de la normale ;
- 3) Si $n_2 < n_1$ ², alors $|i_2| > |i_1|$: le rayon réfracté s'écarte de la normale.

Par le principe du retour inverse de la lumière (1), le troisième point se déduit du deuxième.

1. On dit alors que le milieu 2 est *plus réfringent* que le milieu 1.

2. On dit alors que le milieu 2 est *moins réfringent* que le milieu 1.

C Phénomène de réflexion totale

À partir du moment où $n_2 > n_1$, le rayon réfracté se rapproche toujours de la normale, et existera toujours. En revanche, si $n_2 < n_1$, le rayon réfracté s'écarte de la normale. On considère qu'il existe uniquement s'il reste à l'intérieur du milieu n_2 , soit par définition $|i_2| < \frac{\pi}{2}$ rad.

angle limite de réflexion totale

Lors du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), il existe un angle incident limite i_{lim} au-delà duquel il n'y a pas de rayon réfracté : on parle de **réflexion totale**. On a

$$|i_{\text{lim}}| = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

angle limite de réflexion totale

Soit i_{lim} l'angle d'incidence limite de réfraction, tel que $i_2 = \frac{\pi}{2}$. On a :

$$i_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin(i_2) = 1$$

Or, $n_2 \sin(i_2) = n_1 \sin(i_{\text{lim}})$ d'après la loi de Snell-Descartes pour la réfraction. Ainsi,

$$\begin{aligned} n_2 \underbrace{\sin(i_2)}_{=1} &= n_1 \sin(i_{\text{lim}}) \\ \Leftrightarrow \frac{n_2}{n_1} &= \sin(i_{\text{lim}}) \\ \Rightarrow i_{\text{lim}} &= \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{aligned}$$

réflexion totale

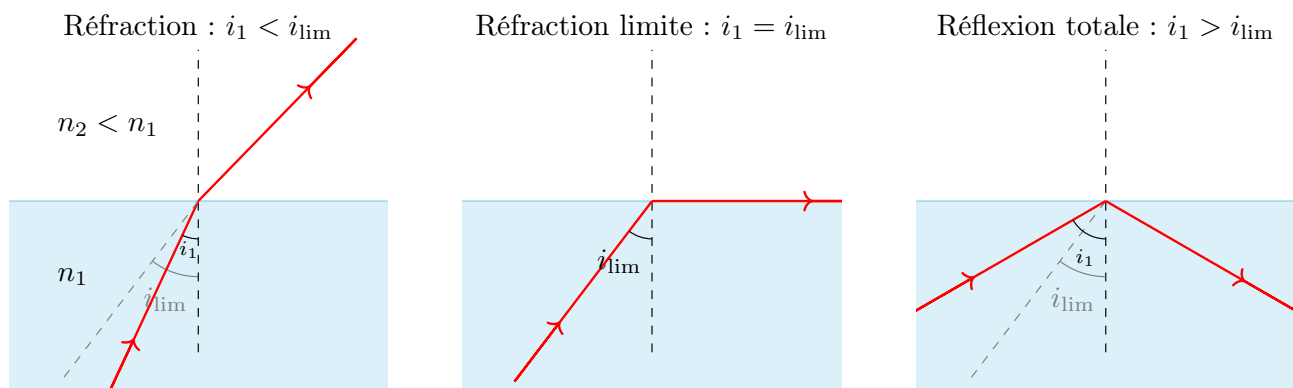


FIGURE 2.5 – Phénomène de réflexion totale

III Généralités sur les systèmes optiques

A Définition

Système optique

On appelle système optique un ensemble de composants optiques (dioptries, miroirs) rencontrés successivement par les rayons lumineux.

Exemple

L'exemple le plus simple est le miroir plan.

B Système centré

Systèmes centrés

On appelle système *centré* un système optique invariant par rotation autour d'un axe ; cet axe est alors appelé *axe optique*. On l'oriente dans le sens de propagation de la lumière incidente, et les distances sont considérées algébriquement (affectées d'un signe). On notera par exemple $\overline{AB} = -2 \text{ cm}$.

Schéma

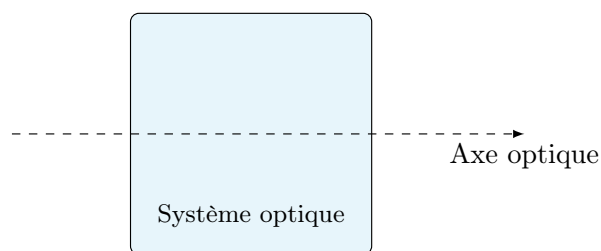


FIGURE 2.6 – Système optique centré.

C Rayons incidents, rayons émergents

Rayons incidents et émergents

On appelle **rayons incidents** les rayons entrant par la face d'entrée d'un système optique. On appelle **rayons émergents** les rayons sortant par la face de sortie d'un système optique.

Schéma

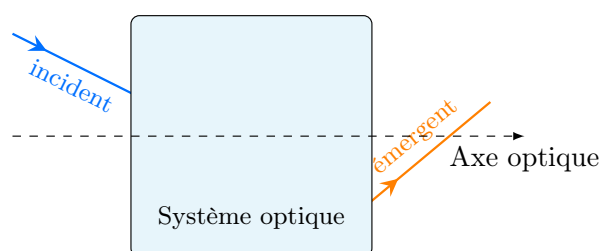


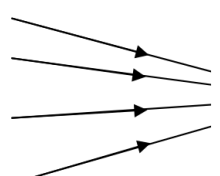
FIGURE 2.7 – Rayons incidents, émergents.

D Faisceaux lumineux

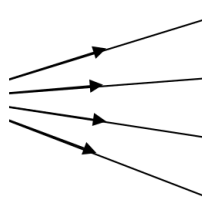
Faisceaux lumineux

On appelle *faisceau lumineux* un ensemble de rayons lumineux. Un faisceau peut être *convergent*, *divergent* ou *parallèle*.

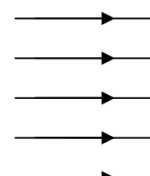
Schéma



faisceau convergent



faisceau divergent



faisceau parallèle
(Intersection à l'infini)

FIGURE 2.8 – Natures de faisceaux

E Objets et images réelles ou virtuelles

Objet et image

On appelle point **objet** d'un système optique le point d'intersection des rayons **incidents**.

On appelle point **image** d'un système optique le point d'intersection des rayons **émergents**.

Réel et virtuel

Un point objet est **réel** si le faisceau **incident** est **divergent**. Il est **virtuel** si le faisceau est **convergent**.

Un point image est **réel** si le faisceau **émergent** est **convergent**. Il est **virtuel** si le faisceau est **divergent**.

On trouve aussi les définitions suivantes, plus communément admises (mais plus verbeuses).



Réel et virtuel, bis

Un point **objet** est **réel** s'il est placé **avant la face d'entrée** du système, et **virtuel** sinon.

Un point **image** est **réel** s'il est placé **après la face de sortie** du système, et **virtuel** sinon.

Objets et images réelles

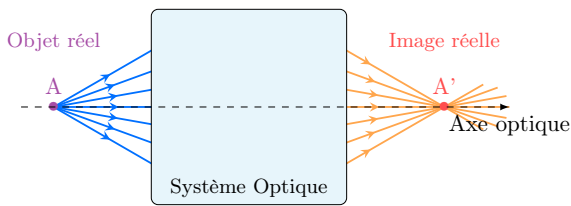


FIGURE 2.9 – Objet et image réelles.

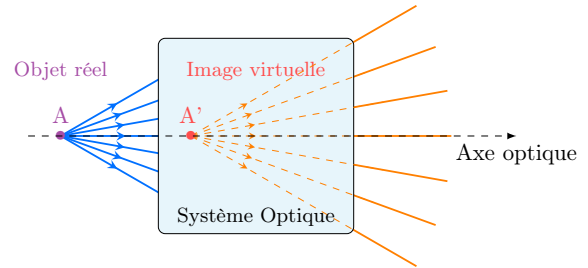


FIGURE 2.10 – Objet réel et image virtuelle.

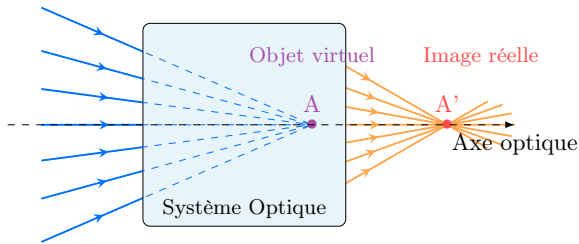


FIGURE 2.11 – Objet virtuel et image réelle.

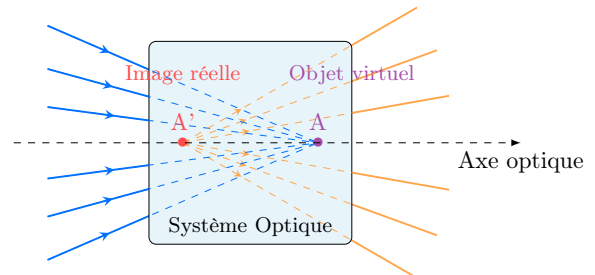


FIGURE 2.12 – Objet et image virtuelles.



Espaces objet et image

De par ces définitions, on peut définir les zones spatiales d'un système optique dans lesquelles un objet ou une image sera soit réel, soit virtuel.

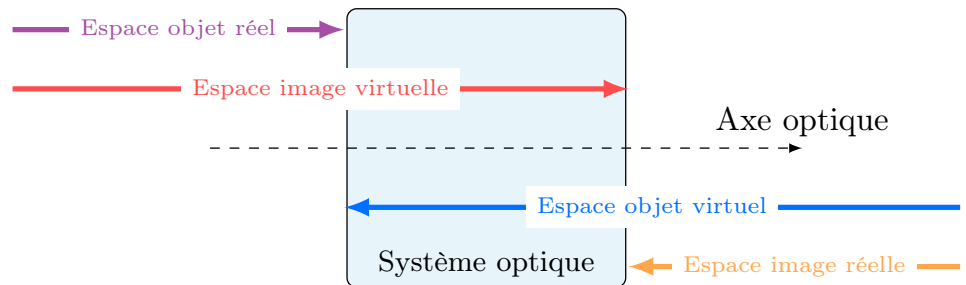


FIGURE 2.13 – Espaces objet et image.



conjugaison de 2 points

Lorsqu'un point objet A passe par un système optique S pour former l'image A' , on dit que A et A' sont *conjugués par le système*. Schématiquement, on note cette relation

$$A \xrightarrow{S} A'$$

Dans cette notation, A est un objet **pour** S , et A' est une image **pour** S . Nous serons amené-es à étudier des combinaisons de systèmes optiques dans lesquels un point sera à la fois image de l'un et objet du suivant.

F Objet étendu, grandissement transversal

objet étendu et angle apparent

On appelle *objet étendu* un ensemble de points objets continu, considéré comme une infinité de points objets.

L'*angle apparent* d'un objet étendu est l'angle perçu (par un détecteur : œil, caméra...) entre les rayons émis par les extrémités de l'objet.

grandissement transversal

Soit \overline{AB} un objet étendu avec A sur l'axe optique, passant par un système S donnant une image elle aussi étendue $\overline{A'B'}$. On appelle *grandissement transversal* et on le note γ le rapport

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

pour $AB \xrightarrow{S} A'B'$

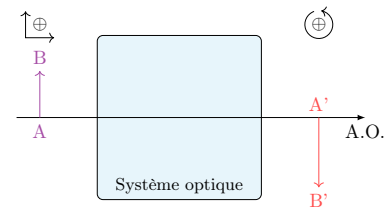


FIGURE 2.14 – Objet et image étendus.

G Foyers d'un système optique

Foyers principaux image et objet

Le foyer principal objet F est le **point objet** d'un système donnant une **image à l'infini** (rayons parallèles entre eux) avec des rayons parallèles à l'axe optique. Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F est appelé *plan focal objet*. On note

$$F \xrightarrow{S} \infty \text{ sur l'axe optique}$$

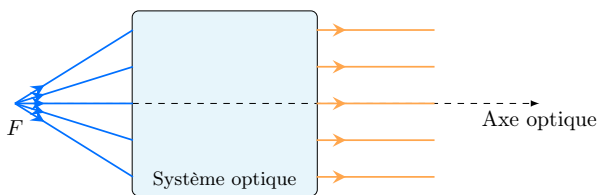


FIGURE 2.15 – Foyer principal objet.

Le foyer principal image F' est le **point image** d'un système d'un **objet situé à l'infini** (rayons parallèles entre eux) avec des rayons parallèles à l'axe optique. Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F' est appelé *plan focal image*. On note

$$-\infty \xrightarrow{S} F' \text{ sur l'axe optique}$$

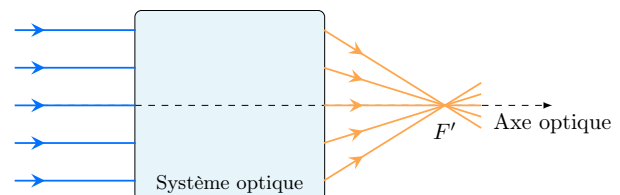


FIGURE 2.16 – Foyer principal image.

retour inverse

Nous pouvons en quelque sorte déduire le fonctionnement du système optique dans le second cas en utilisant le principe du **retour inverse de la lumière**, en « remontant le film ».

foyers principaux

En plus d'être une définition, c'est une propriété : **tous rayons incidents qui se croisent en F émergent parallèles à l'axe optique**, et **tous rayons incidents parallèles à l'axe optique émergent en se croisant en F'** .

foyers secondaires

Tous rayons incidents **parallèles entre eux** émergent en se **croisant dans le plan focal image**³, et tous rayons incidents se **croisant dans le plan focal objet**⁴ émergent **parallèles entre eux**.

3. en un point appelé *foyer secondaire image* Φ'

4. en un point appelé *foyer secondaire objet* Φ

IV Approximation de Gauss

A Stigmatisme, aplanétisme

stigmatisme

Un système optique est dit *stigmatique* si tous les rayons émis par un point objet A convergent en un seul point image A' . Il ne l'est pas si l'image d'un point forme une tâche.

aplanétisme

Un système optique est dit *aplanétique* si un objet étendu \overline{AB} perpendiculaire à l'axe optique donne une image $\overline{A'B'}$ également perpendiculaire à l'axe optique.

B Rigoureux ou approché ?

La plupart des systèmes optiques (lentilles, œil, appareil photo...) ne sont pas rigoureusement stigmatiques et aplanétiques : il arrive souvent qu'un point source forme une tâche sur un capteur (astigmatisme) ou qu'une droite soit vue courbée (non-aplanétisme). On peut cependant trouver des conditions dans lesquelles le stigmatisme et l'aplanétisme sont approchés, par exemple si la tâche formée par le système est plus petite que l'élément récepteur (pixel pour une caméra).

C Conditions de Gauss

Rayons paraxiaux

Un système optique est utilisé dans les conditions de Gauss lorsqu'il est éclairé par des rayons **paraxiaux**, c'est-à-dire

- 1) peu éloignés de l'axe optique ;
- 2) peu inclinés par rapport à l'axe optique.

approximation de Gauss

Dans les conditions de Gauss, un système centré respecte les conditions de stigmatisme et d'aplanétisme *approchés*. On les **considérera** comme rigoureux tant dans les tracés que dans les calculs.

Deuxième partie

Électrocinétique

