

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Optique géométrique</b>	<b>5</b>
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
<b>II</b>	<b>Électrocinétique</b>	<b>21</b>



# 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.
- ◇ 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.



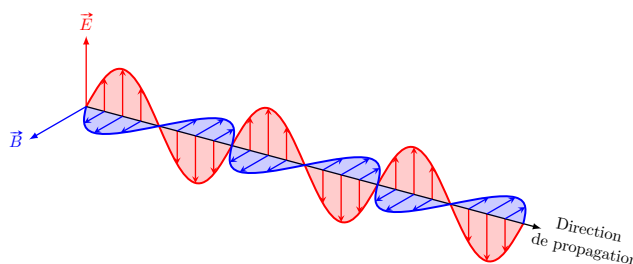
## I L'onde lumineuse

### 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup>) notamment, prouvant son comportement ondulatoire (nous aurons l'occasion de les réaliser nous-mêmes).

Ce n'est cependant qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> 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).

Le XX<sup>e</sup> 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.



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

## 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 propager<sup>1</sup>.

#### 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 définition<sup>2</sup>, telle que

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

Nous utiliserons et retiendrons cependant la valeur

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

### 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** : qui laisse passer la lumière ;

**Linéaire** : dont les sorties sont proportionnelles aux entrées ;

**Homogène** : dont les propriétés physiques sont constantes en tout point du milieu ;

**Isotrope** : dont les propriétés physiques ne dépendent pas de la direction de la lumière dans le milieu.

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 :

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

#### Unités

En tant que rapport de deux grandeurs de même unité, l'indice optique n'a pas d'unité.

#### 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

**l'indice optique est toujours  $> 1$**

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



**Implication**

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

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

**Ordre de grandeur**

Milieu	$n$	$v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
Vide	1	$3,00 \times 10^8$
Air	1,00	$3,00 \times 10^8$
Eau	1,33	$2,30 \times 10^8$
Verre	1,5	$2,00 \times 10^8$
Diamant	2,4	$1,25 \times 10^8$

**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 lumière<sup>3</sup>. 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**

Une onde sinusoïdale est une onde **monochromatique**, ce qui signifie « une seule couleur ». Elle est donc décrite par une unique valeur de longueur d'onde ou de fréquence, et non pas comme une superposition.

**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.

**Propriété**

Une onde lumineuse se caractérise par sa fréquence, appelée  $f$  ou  $\nu$ <sup>4</sup>. 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  $\lambda$  doit s'écrire

$$\lambda = \frac{v_{\text{onde}}}{f_{\text{onde}}}$$

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  $\lambda_0$  dans le vide :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{c}{n \times f} = \frac{\lambda_0}{n}$$

**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*.

3. Pensez par exemple au prisme de Pink Floyd.

4. Se lit « nu ».

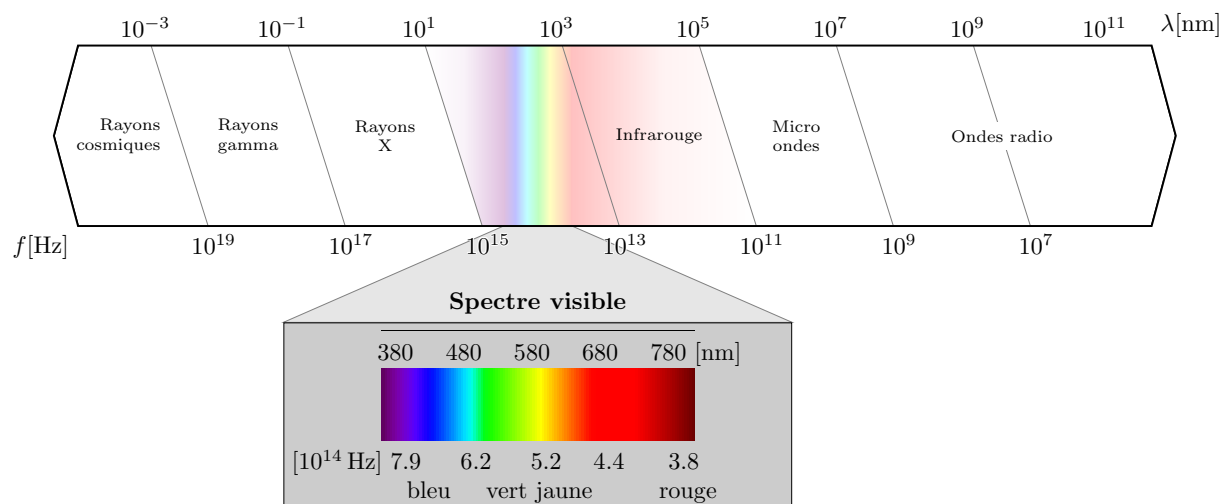


FIGURE 1.2 – Longueurs d'ondes des ondes monochromatiques dans le vide.

**Exercice**

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

D'après ce qui précède, on a

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \lambda_0 = 633 \text{ nm} \\ n = 1,5 \end{cases}$$

$$\text{A.N. : } \lambda = 422 \text{ nm}$$

Cependant, **sa couleur ne change pas** puis qu'une onde est caractérisée par sa fréquence, qui ne change pas.

**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...

**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** : agitation thermique des atomes ;

**Sources spectrales** : excitation électrique des atomes ;

**Sources LASER** : optimisation de l'émission stimulée de photons.

**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

Le spectre d'émission d'une source thermique est une courbe **continue**, étalée autour d'une longueur d'onde d'émission maximale  $\lambda_{\max}$ . Plus la température augmente, plus le spectre se déplace vers une fréquence élevée (ou longueur d'onde faible) : une étoile bleue est bien plus chaude qu'une étoile rouge.

#### Exemples

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

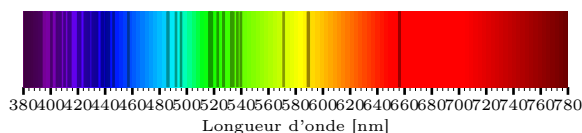


FIGURE 1.3 – Spectre lumineux que l'on reçoit du Soleil.

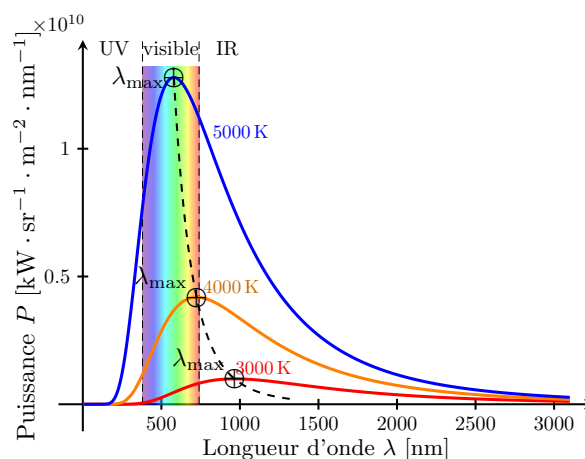


FIGURE 1.4 – Spectre d'émission d'un corps chaud selon quelques températures.

## 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

Le spectre d'émission d'un rayonnement spectral est composé de **pics d'intensités** faiblement élargis. Les longueurs d'onde de ces pics sont **caractéristiques de l'élément** excité ; c'est de cette manière qu'on peut déterminer la composition atmosphérique des exoplanètes ou caractériser les étoiles.

#### 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 :

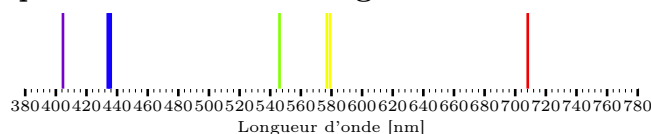


FIGURE 1.5 – Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure.

## 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

Le spectre du laser ne contient qu'une seule raie extrêmement fine, bien plus fine que celle des sources spectrales. C'est l'exemple le plus proche d'une réelle source monochromatique.

### 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

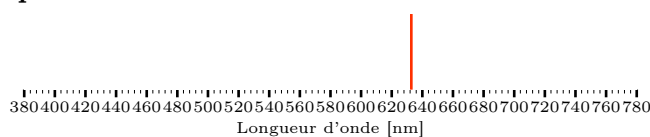


FIGURE 1.6 – Spectre d'émission d'un laser hélium-néon.

### 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...).

# Base de l'optique géométrique

## Au programme



### Savoirs

- ◇ Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
- ◇ Énoncer les lois de SNELL-DESCARTES.
- ◇ Définir une convention d'orientation des angles et travailler avec des angles orientés.
- ◇ Savoir que l'interprétation par le cerveau de la trajectoire des rayons lumineux joue un rôle dans certains phénomènes optiques.
- ◇ Connaître le vocabulaire des systèmes optiques.
- ◇ Énoncer les conditions de l'approximation de GAUSS et ses conséquences.



### Savoir-faire

- ◇ Établir les conditions de réflexion totale.
- ◇ Utiliser les lois de SNELL-DESCARTES.
- ◇ Identifier la nature réelle ou virtuelle d'un objet ou d'une image.
- ◇ Dessiner des rayons lumineux à travers un système optique de manière cohérente avec les indices optiques.
- ◇ Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.



# I Propriétés générales

## A Optique non géométrique : diffraction de la lumière

### I.A.1 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.

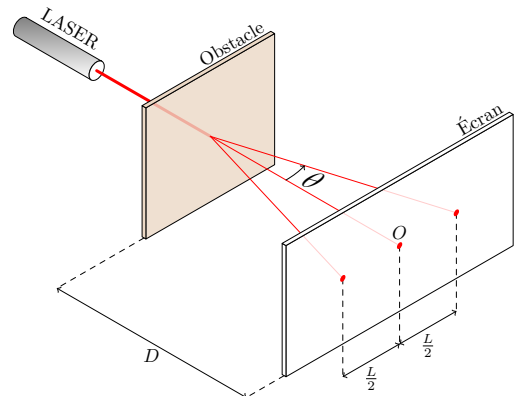


FIGURE 2.1 – Diffraction de FRAUNHOFER d'un faisceau laser par une fente fine.

### I.A.2 Loi de la diffraction

#### Diffraction par une fente simple

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  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  $\theta$  de la tâche centrale vérifie

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

## B Approximation de l'optique géométrique

### I.B.1 Définition

#### 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**.

### I.B.2 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

Un rayon lumineux est une courbe orientée donnant la direction et le sens de propagation d'une onde lumineuse. Un faisceau est un ensemble de rayons.

**Remarque**

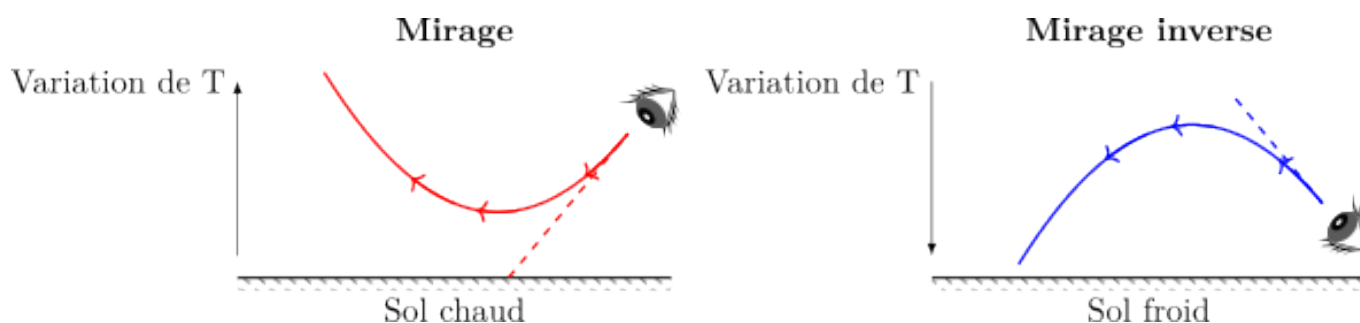
C'est un outil théorique : il est impossible d'isoler un rayon lumineux en pratique à cause de la diffraction.

**I.B.3** Propriétés d'un rayon lumineux**Propriétés d'un rayon lumineux**

- 1) **Propagation rectiligne** : Dans un milieu TLHI, la lumière se propage en ligne droite.
- 2) **Indépendance des rayons** : Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux. Notamment, un rayon ne peut pas en dévier un autre.
- 3) **Retour inverse** : Dans un milieu TLI, homogène ou non, si une source en A éclaire B, alors une source placée en B éclaire A.

**FIGURE 2.2** – Schématisation du principe de retour inverse de la lumière.**I.B.4** Limites du modèle

- ◇ **Diffraction** : voir ?? ;
- ◇ **Phénomènes ondulatoires** : le modèle de rayon n'explique pas les interférences (voir plus tard dans l'année) ;
- ◇ **Polarisation** : en tant qu'oscillations des champs électrique et magnétique  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ , elle est dotée d'une orientation et est à l'origine de nombreux phénomènes optiques (cinéma 3D par exemple) ;
- ◇ **Inhomogénéité** : dans un milieu inhomogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite et donne lieu aux mirages.

**FIGURE 2.3** – Représentation d'un mirage chaud, où la lumière vient du ciel en regardant le sol, et d'un mirage froid, où c'est l'inverse.

## 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.

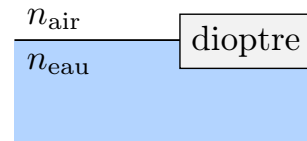


FIGURE 2.4 – Exemple de dioptre.

#### Réflexion, réfraction

Au niveau d'un dioptre, un rayon lumineux **incident** donne naissance à :

- ◇ un rayon réfracté (traversant le dioptre) ;
- ◇ un rayon réfléchi.

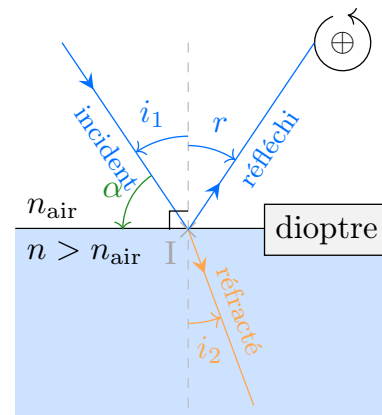


FIGURE 2.5 – Rayons incidents, réfléchis et réfractés sur un dioptre.

#### Vocabulaire général

- ◇ **Point d'incidence I** : intersection du rayon incident avec le dioptre ;
- ◇ **Plan d'incidence** : contient le rayon incident et la normale au dioptre en I ;
- ◇ **Angle d'incidence  $i_1$**  : angle entre la normale et le rayon incident ;
- ◇ **Angle de réflexion  $r$**  : angle entre la normale et le rayon réfléchi ;
- ◇ **Angle de réfraction  $i_2$**  : 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

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

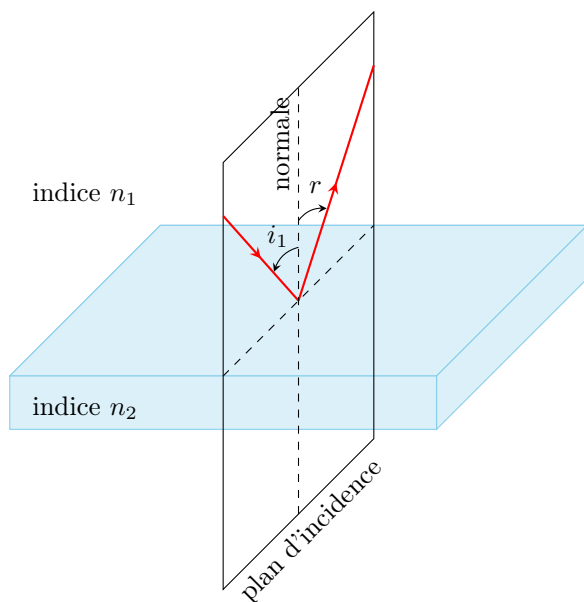


FIGURE 2.6 – Réflexion d'un rayon incident

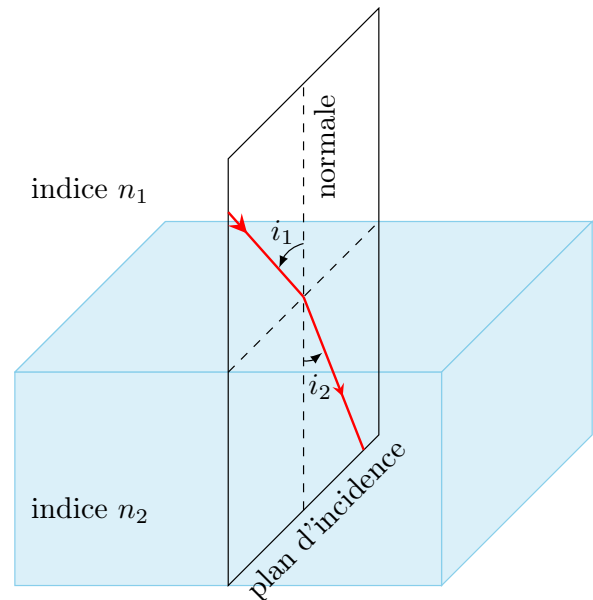


FIGURE 2.7 – Réfraction d'un rayon incident avec  $n_2 > n_1$ .

### Réfraction

On distingue 3 cas généraux pour la réfraction :

- 1) Si  $\mathbf{i}_1 = \mathbf{0}$ , alors  $i_2 = 0$  : en incidence dite « normale », il n'y a **pas de déviation** du rayon ;
- 2) Si  $\mathbf{n}_2 > \mathbf{n}_1$ <sup>1</sup>, alors  $|i_2| < |i_1|$  : le rayon réfracté se **rapproche** de la normale ;
- 3) Si  $\mathbf{n}_2 < \mathbf{n}_1$ <sup>2</sup>, alors  $|i_2| > |i_1|$  : le rayon réfracté **s'écarte** de la normale.

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

## 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  $n_1 > n_2$ , 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  $|i_2| < \frac{\pi}{2} \text{rad}$ .

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.

### Angle limite de réflexion totale

Lors du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ( $n_1 > n_2$ ), il existe un angle incident limite  $i_{\text{lim}}$  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  $i_{\text{lim}}$  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

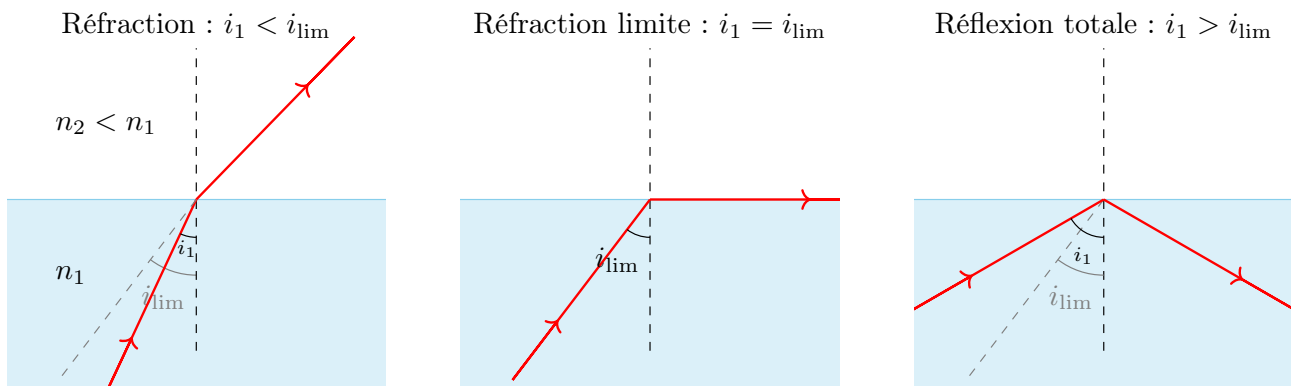


FIGURE 2.8 – Phénomène de réflexion totale

### III Généralités sur les systèmes optiques

#### A Système, rayons, faisceaux.

##### 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.

##### Système centré, axe optique

C'est un système **invariant par rotation** autour d'un axe.

On l'appelle *axe optique*. On l'oriente dans le sens de propagation de la lumière incidente.

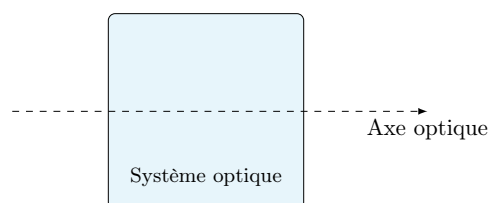


FIGURE 2.9 – Système optique centré.

Les distances sont considérées **algébriquement** (affectées d'un signe) : c'est une distance qui s'exprime en mètres, mais peut être négative selon l'orientation de l'axe optique et de la position relative des points.



FIGURE 2.10 – Distances algébriques.

##### Rayons incidents et émergents

- ◇ **Rayons incidents** : entrent par la face d'entrée.
- ◇ **Rayons émergents** : sortent par la face de sortie.

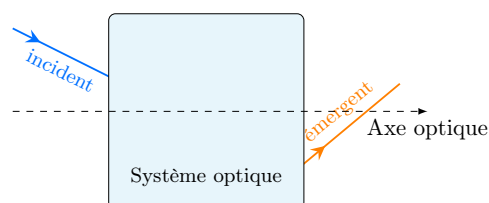


FIGURE 2.11 – Rayons incidents, émergents.

### Nature d'un faisceau

- ◇ **Convergent** : intersection dans le sens direct de propagation.
- ◇ **Divergent** : intersection dans le sens inverse de propagation.
- ◇ **Parallèle** : pas d'intersection.

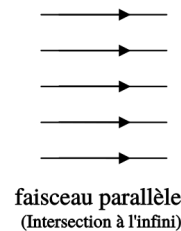
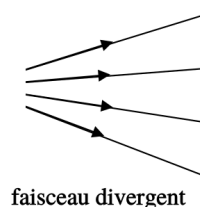
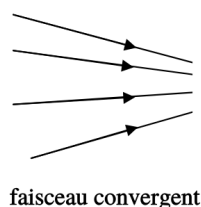


FIGURE 2.12 – Natures de faisceaux

## B Objets et images

### Objet et image

#### Point objet

Point d'intersection des rayons **incidents**.

#### Point image

Point d'intersection des rayons **émergents**.

### Réel et virtuel

#### Point objet

- ◇ **Réel** : faisceau incident **divergent**.
- ◇ **Virtuel** : faisceau incident **convergent**.

#### Point image

- ◇ **Réel** : faisceau émergent **convergent**.
- ◇ **Virtuel** : faisceau émergent **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 ou virtuelles

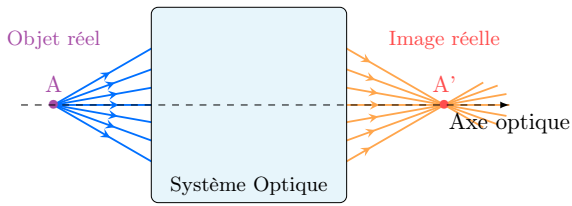


FIGURE 2.13 – Objet et image réelles.

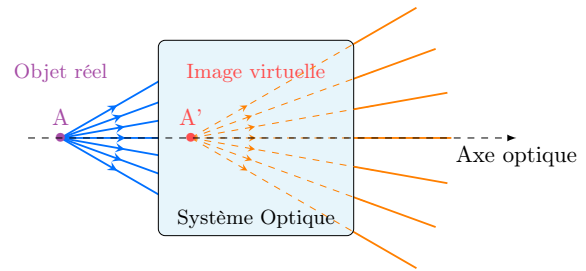


FIGURE 2.14 – Objet réel et image virtuelle.

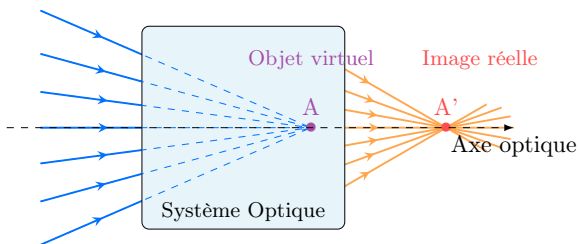


FIGURE 2.15 – Objet virtuel et image réelle.

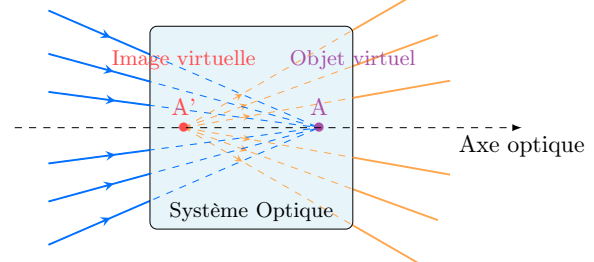


FIGURE 2.16 – Objet et image virtuelles.

## Implication : espaces objet et image

Zones spatiales d'un système optique où un objet ou une image sera réel-le ou virtuel-le.

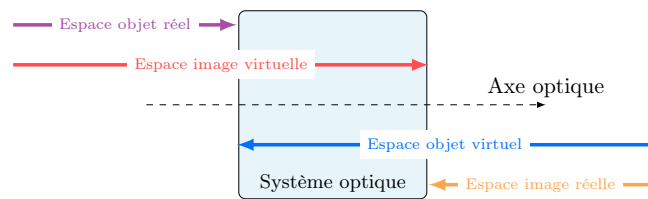


FIGURE 2.17 – Espaces objet et image.

## Notation : conjugaison de 2 points

Un objet A et son image A' par un système S sont dits **conjugués**. On note :

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

avec A un objet **pour** S, et A' est une image **pour** S.

## Objet étendu et angle apparent

- ◇ **Objet étendu** : ensemble de points objets continu, considéré comme une infinité de points objets
- ◇ **Angle apparent** d'un objet étendu : 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  $\gamma$  le rapport

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

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

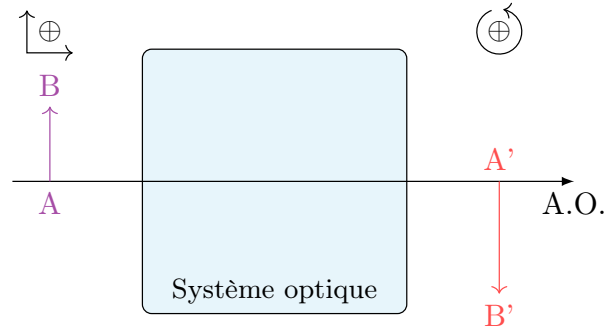


FIGURE 2.18 – Objet et image étendues.

## C Foyers d'un système optique

### Foyers principaux image et objet

#### Foyer principal objet

Noté  $F$ , c'est le **point objet** dont l'**image est à l'infini** avec des rayons parallèles à l'axe optique.

Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par  $F$  est appelé *plan focal objet*,  $\pi$ . On note

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

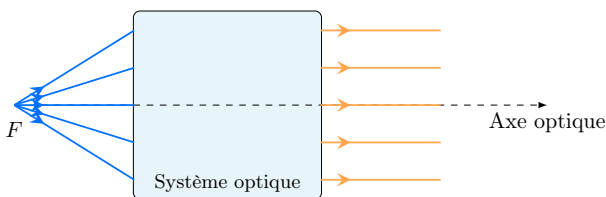


FIGURE 2.19 – Foyer principal objet.

#### Foyer principal image

Noté  $F'$ , c'est le **point image** dont l'**objet est à l'infini** avec des rayons parallèles à l'axe optique.

Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par  $F'$  est appelé *plan focal image*,  $\pi'$ . On note

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

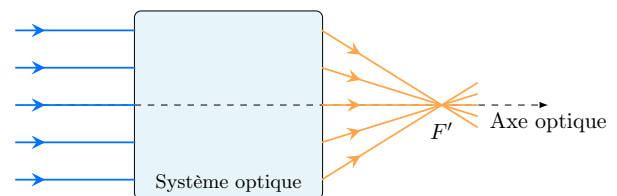


FIGURE 2.20 – Foyer principal image.

### 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

- ◇ Rayons **incidents croisés en F**  $\Rightarrow$  émergent **parallèles** à l'axe optique ;
- ◇ Rayons **incidents parallèles à l'axe**  $\Rightarrow$  émergent **croisés en F'**.

### Foyers secondaires

- ◇ Rayons **incidents // entre eux**  $\Rightarrow$  émergent **croisés en**  $\varphi' \in \pi'$  ;
- ◇ Rayons **incidents croisés en**  $\varphi \in \pi$   $\Rightarrow$  émergent **parallèles entre eux**.

## IV Approximation de GAUSS

### A Stigmatisme, aplanétisme

#### Stigmatisme

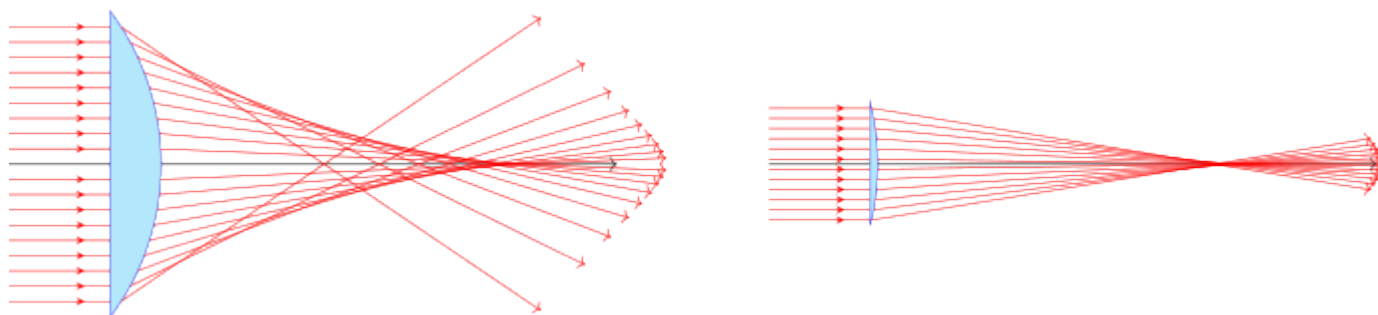
**Stigmatique**  $\Leftrightarrow$  rayons émis par un point objet  $A$  convergent en **un seul point** image  $A'$ . Inverse : l'image d'un point forme une tâche.

#### Aplanétisme

**Aplanétique**  $\Leftrightarrow$  objet étendu  $\overline{AB} \perp$  à l'axe  $\Rightarrow$  une image  $\overline{A'B'}$  également  $\perp$  à l'axe.

### 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).



**FIGURE 2.21** – Exemple d'un système astigmatique à gauche, stigmatique approché à droite.



## 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



