

Ondes et signaux – Chapitre 3 : La lumière, nature et propriétés – Les lois de Snell-Descartes

I. Modèles descriptifs de la lumière

1. Modèle ondulatoire de la lumière
2. Modèle corpusculaire de la lumière

II. Propagation de la lumière dans un milieu matériel

1. Caractéristique des milieux matériels étudiés
2. Vitesse de propagation dans un MHTI : phénomène de dispersion et indice optique du milieu
3. Propagation rectiligne de la lumière dans un MHTI
4. Modèle du rayon lumineux
5. Sources de lumière primaires et secondaires

III. Les lois de Snell-Descartes

1. Lois de la réflexion
2. Lois de la réfraction
3. Phénomène de réflexion totale
4. Généralisation aux ondes sismiques de volume

Extrait du programme de seconde

Notions	Capacités exigibles
Propagation rectiligne de la lumière.	Citer la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées.
Vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air.	Caractériser le spectre du rayonnement émis par un corps chaud.
Lumière blanche, lumière colorée. Spectres d'émission : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies. Longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.	Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans le vide ou dans l'air. Exploiter un spectre de raies.
Lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction. Indice optique d'un milieu matériel.	Exploiter les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction.
Dispersion de la lumière blanche par un prisme ou un réseau.	Tester les lois de Snell-Descartes à partir d'une série de mesures et déterminer l'indice de réfraction d'un milieu. Décrire et expliquer qualitativement le phénomène de dispersion de la lumière par un prisme.

Extrait du programme de spécialité de 1^{ère}

Notions	Capacités exigibles
Modèles ondulatoire et particulaire de la lumière :	Utiliser une échelle de fréquences ou de longueurs d'onde pour identifier un domaine spectral.
Domaines des ondes électromagnétiques.	Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes électromagnétiques utilisées dans divers domaines d'application (imagerie médicale, optique visible, signaux wifi, micro-ondes, etc.).
Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence.	Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon. Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations $\lambda = c/\nu$ et $\Delta E = h\nu$.
Le photon. Énergie d'un photon.	Obtenir le spectre d'une source spectrale et l'interpréter à partir du diagramme de niveaux d'énergie des entités qui la constituent.
Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission.	
Quantification des niveaux d'énergie des atomes.	

Extrait du programme de BCPST 1

Notions	Capacités exigibles
<p>Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière</p> <p>Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.</p> <p>Photon : énergie, loi de Planck-Einstein.</p> <p>Effet photoélectrique et photo-ionisation.</p> <p>Réflexion, réfraction</p> <p>Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent.</p> <p>Réflexion, réfraction des ondes lumineuses.</p> <p>Lois de Snell-Descartes.</p> <p>Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.</p>	<p>Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnements infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma).</p> <p>Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.</p> <p>Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photo-ionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.</p> <p>Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites.</p> <p>Établir la condition de réflexion totale.</p> <p>Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.</p>

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre

Savoirs	Savoir-faire
<p>Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.</p> <p>Photon : énergie, loi de Planck-Einstein.</p> <p>Effet photoélectrique et photo-ionisation.</p> <p>Notion de milieu homogène, transparent et isotrope.</p> <p>Phénomène de dispersion et indice de réfraction d'un MHTI.</p> <p>Propagation rectiligne de la lumière dans un MHTI.</p> <p>Notion de rayon lumineux et approximation de l'optique géométrique.</p> <p>Principe du retour inverse de la lumière.</p> <p>Notion de sources primaires, secondaires</p> <p>Dioptre et miroir : lois de la réflexion et de la réfraction.</p> <p>Notion de réfringence et trajet des rayons.</p> <p>Notion de réflexion totale.</p> <p>Notion d'image à travers un miroir</p>	<p>Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnements infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma).</p> <p>Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.</p> <p>Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photo-ionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.</p> <p>Utiliser le théorème de Thalès et les bases de la géométrie.</p> <p>Utiliser le principe du retour inverse de la lumière.</p> <p>Tracer le trajet de la lumière au contact d'un miroir et à la traversée d'un dioptre (notion de réfringence), utiliser les lois de Snell-Descartes.</p> <p>Déterminer les conditions de réflexion totale d'un système.</p> <p>Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.</p>

Ordres de grandeur et valeurs à connaître

Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Rayonnement gamma : $10^{-13} - 10^{-11} \text{ m}$, soit $0,0001 - 0,01 \text{ nm}$

Rayonnement X : $10^{-11} - 10^{-8} \text{ m}$, soit $0,01 - 10 \text{ nm}$

Rayonnement ultra-violet (UV) : $10 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$

Rayonnement visible : $400 - 800 \text{ nm}$

Rayonnement Infra-rouge (IR) : $800 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$

Rayonnement micro-onde : $1 \text{ mm} - 10 \text{ cm}$

Rayonnement radio : $10 \text{ cm} - 100 \text{ km}$

Indice de réfraction de l'air : $n_{\text{air}} = 1,00$

Indice de réfraction de l'eau : $n_{\text{eau}} = 1,33$

Extraits du rapport de jury du concours AGRO-VETO

- Dans l'ensemble, le **vocabulaire de l'optique** n'est pas maîtrisé. Les correcteurs relèvent de très nombreuses confusions entre réfraction, réflexion, dispersion et diffraction. Le cours n'est souvent pas assimilé.
- Le jury rappelle que dans l'énoncé des lois de Descartes pour la réflexion ou la réfraction, il ne faut pas omettre l'appartenance du rayon émergent au **plan d'incidence** (à définir clairement).
- Certains candidats manquent de compétences en **trigonométrie** : définitions ou expressions dans un triangle rectangle des sinus, cosinus et tangente d'un angle.

Un peu d'histoire : depuis l'Antiquité, les phénomènes de réflexion et de réfraction de la lumière sont bien connus. Les lois de l'optique géométrique de Snell-Descartes proposées au début du XVI^e siècle et basées sur la notion de rayon lumineux, permettent une étude quantitative et simple de ces phénomènes. Il a fallu cependant attendre le XIX^e siècle pour que la nature ondulatoire et électromagnétique de la lumière soit proposée puis le début XX^e siècle pour que son aspect particulaire soit admis et avec lui, la quantification de l'énergie à l'échelle atomique et à l'échelle nucléaire. En parallèle, à la révélation des deux visages de la lumière, le spectre électromagnétique s'est enrichi avec les découvertes des rayons UV, IR, X, γ etc.

Liens internet intéressants :

Application en ligne pour comprendre le phénomène de la réfraction : <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/bending-light>

La réfraction permet de voir les contours d'un objet en verre transparent, mais... : https://www.youtube.com/watch?v=IDdfJISvA_4

Mise en évidence de la réflexion totale : <https://www.youtube.com/watch?v=IYnCOAlxOpI>

Explication de la réflexion totale : https://www.youtube.com/watch?v=S_wv23jvlzQ

Une fibre optique faite d'eau ! <https://www.youtube.com/watch?v=3LME-76gQxc> ; https://www.youtube.com/watch?v=hBQ8fh_Fp04

Une expérience de réfraction de la lumière : http://www.dailymotion.com/video/x478hd_refraction-et-tasse_tech

Un mirage expérimental et les explications : <http://matthieu.net/cheminlepluscourt/experience.php> ; <http://matthieu.net/cheminlepluscourt/explications.php>

La loi de la réfraction expliquée par Superman ! <http://matthieu.net/cheminlepluscourt/demonstration.php>

Modélisation de l'arc en ciel en optique géométrique :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/arc_en_ciel/arc_en_ciel.html

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/arcenciel.xml>

**Cahier d'entraînement des prépas :**

- tous les exercices de la fiche 8,

QCM de vérification des connaissances :

I. Modèles descriptifs de la lumière

Définir la lumière n'est pas chose aisée car il existe différents modèles : le modèle corpusculaire et le modèle ondulatoire.

1. Modèle ondulatoire de la lumière

Description :

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} qui oscillent en phase, perpendiculairement l'un par rapport à l'autre et perpendiculairement à la direction de propagation.

Elle peut se propager en l'absence de support matériel (à la différence des ondes mécaniques).

Ondes polychromatiques/monochromatiques

La lumière est en général la superposition d'ondes électromagnétiques sinusoïdales de différentes fréquences : des ondes monochromatiques.

Ainsi la lumière blanche, dite polychromatique, peut être décomposée pour former un spectre lumineux.

Une lumière monochromatique ne peut être décomposée ; c'est une onde sinusoïdale définie par sa fréquence temporelle f ou ν (en Hz).

On rappelle les notions de double périodicité temporelle et spatiale :

Période temporelle :

Période spatiale :

On note souvent la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = c_0/\nu$ avec c_0 la célérité de la lumière dans le vide

$$c_0 = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

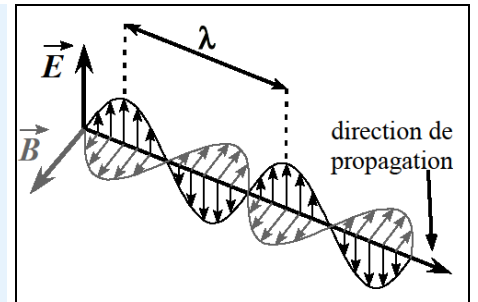


Figure 1 : Onde électromagnétique sinusoïdale polarisée rectilignement (les oscillations restent dans un même plan)

La première mise en évidence du caractère fini de la vitesse de la lumière dans le vide date de 1676 : Olaf Römer l'estime à environ $214\,400 \text{ km.s}^{-1}$ en utilisant l'occultation des satellites de Jupiter. Les expériences de Fizeau (1849), qui utilise une roue dentée, de Foucault (1850) qui utilise un miroir tournant permettent des évaluations plus précises.

La lumière visible n'appartient qu'à une infime partie du spectre électromagnétique qui est représentée figure 2 grâce à une échelle logarithmique.

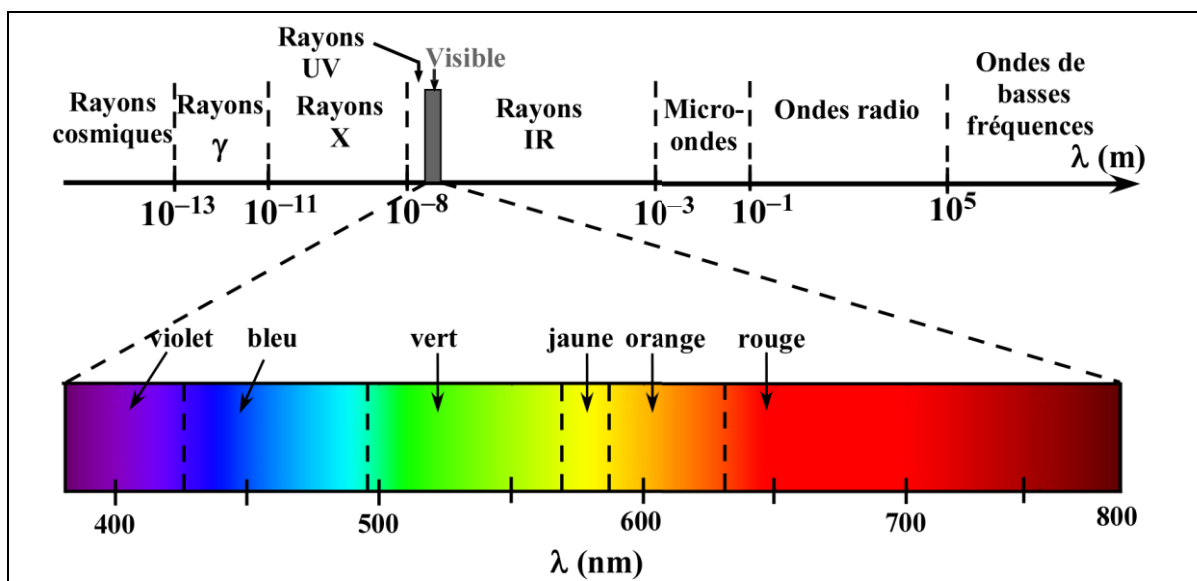


Figure 2 : Spectre électromagnétique

Ordres de grandeur et exemple d'application à retenir :

- **Rayonnement gamma** : $10^{-13} - 10^{-11}$ m, soit 0,0001 – 0,01 nm

Les rayons γ sont mis à profit dans le domaine médical, pour la radiothérapie des tumeurs et l'exploration fonctionnelle des organes comme en tomographie.

- **Rayonnement X** : $10^{-11} - 10^{-8}$ m, soit 0,01 – 10 nm

Les rayons X permettent la réalisation de radiographie et de scanner en imagerie médicale.

- **Rayonnement ultra-violet (UV)** : 10 nm – 400 nm
- **Rayonnement visible** : 400 – 800 nm

Les rayons UV et rayons visibles sont mis à profit pour identifier des espèces chimiques colorées et déterminer leur concentration en solution : on parle de spectroscopie UV-visible

- **Rayonnement Infra-rouge (IR)** : 800 nm – 1 mm

Les utilisations des rayons IR sont diverses :

- Enregistrés par une caméra thermique, les rayons IR émis par un corps, permettent la détermination de sa température et sa localisation.
- Grâce à la spectroscopie IR, il est possible d'analyser les groupes caractéristiques d'un composé organique ainsi que la nature saturée ou insaturée de sa chaîne carbonée

- **Rayonnement micro-onde** : 1 mm – 10 cm

Le rayonnement micro-onde est utilisé pour chauffer les aliments grâce à l'agitation thermique qu'il confère aux molécules d'eau

- **Rayonnement radio** : 10 cm – 100 km

Les ondes radio permettent les radiocommunications (talkie-walkies, téléphone sans fil, téléphonie mobile...), la radiodiffusion et les radars

Remarque :

La délimitation entre les différents types d'onde n'est pas franche, ainsi nous ne donnons que des ordres de grandeur (sauf pour le domaine visible)

2. Modèle corpusculaire de la lumière**a. Présentation (A.Einstein 1905)****Le photon, quantum d'énergie**

Certains phénomènes physiques ne peuvent s'expliquer qu'en modélisant la lumière comme un flux de photons, « grains d'énergie » se déplaçant à la célérité de la lumière.

Dans le cas d'une radiation monochromatique, de fréquence ν , le quantum d'énergie transporté par chaque photon E_{photon} est donné par l'expression :

$$E_{\text{photon}} = h\nu$$

Avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s, la constante de Planck

b. Effet photoélectrique

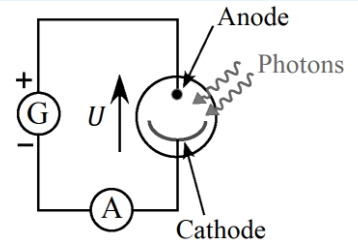
Définition :

Description d'une cellule photoélectrique

Elle est constituée d'une ampoule transparente (verre, quartz) contenant une plaque métallique, la **cathode** et une seconde électrode, l'**anode**. Dans l'ampoule règne un **vide poussé**.

Pour fonctionner, la cellule est montée en série avec un générateur de tension constante qui impose une **tension électrique** $U \geq 0$.

La cathode est soumise à un **rayonnement électromagnétique monochromatique**.



Mise en évidence du phénomène

Un **courant électrique** est **détecté** par l'ampèremètre lorsque la **fréquence** de la radiation est **supérieure ou égale** à une fréquence appelée **fréquence seuil** et notée ν_{seuil} (dépendante de la nature du métal) et cela quelle que soit la puissance du rayonnement.

Interprétation du phénomène

L'**énergie minimale** que le photon doit fournir à l'électron pour permettre son **extraction**, est appelée **travail d'extraction** et est notée $W_{\text{extraction}}$.

Ainsi, la fréquence seuil est telle que le **quantum minimal** d'énergie porté par un photon vaut :

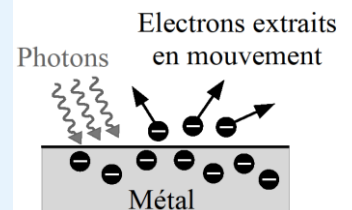
si $\nu < \nu_{\text{seuil}}$:

si $\nu \geq \nu_{\text{seuil}}$:

Si $\nu > \nu_{\text{seuil}}$ alors l'énergie fournie par les photons vérifie :

Dans ce cas, les électrons extraits possèdent, une énergie cinétique E_c telle que :

Ils se déplacent avec une vitesse fixée par cette énergie cinétique telle que :



Exercice d'application 1

Si $U = 0$: les électrons extraits par des photons de fréquence $\nu > \nu_{\text{seuil}}$ se déplacent dans toutes les directions avec une vitesse fixée par l'énergie cinétique $E_c = h\nu - W_{\text{extraction}}$

Si $U > 0$: les électrons sont extraits à la vitesse précédemment définie mais sont ensuite accélérés et se déplacent de la cathode vers l'anode dans un mouvement d'ensemble ordonné (circulation d'un courant électrique).

Remarques : la plupart des photo-détecteurs utilisés sont basés sur l'absorption de photons non pas par les métaux mais par les semi-conducteurs. Lors de l'absorption de photons par un semi-conducteur, les électrons extraits sont libérés à l'intérieur du matériau ce qui permet d'augmenter sa conductivité : on parle d'effet photoélectrique interne ou de photoconductivité. Ce phénomène est mis à profit dans des cellules photovoltaïques équipant les panneaux solaires pour la production d'énergie électrique, ou dans des photodiodes, captant le rayonnement transmis par un échantillon au sein d'un spectrophotomètre.

c. Photo-ionisation

Définition :**Principe du processus :**

Lors du processus, **1 entité** (atome ou molécule) du gaz, absorbe l'énergie d'**1 photon** avec **émission d'1 électron**.

L'**énergie minimale** que doit apporter le photon lors du processus correspond à :

Si le rayonnement électromagnétique fournit l'énergie $h\nu$ au moins égal à l'énergie d'ionisation, les électrons extraits sont attirés vers une anode et les cations formés vers une cathode.

L'**intensité I** du courant ainsi obtenu, permet, la **détermination** de la **teneur** en une **entité** donnée dans le gaz étudié.

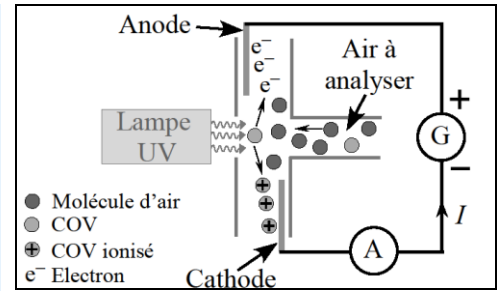


Figure 1 : Schéma d'un détecteur à photo-ionisation de COV (composé organique volatil)

II. Propagation de la lumière dans un milieu matériel

1. Caractéristiques des milieux matériels étudiés

Les milieux de propagation de la lumière étudiés par la suite seront homogènes, transparents et isotrope (MHTI) :

- **homogène** : propriétés physiques identiques en tout point,
- **transparent** : absence d'absorption d'énergie lumineuse par le milieu,
- **isotrope** : propriétés physiques identiques dans toutes les directions de l'espace.

2. Vitesse de propagation dans un MHTI : phénomène de dispersion et indice optique du milieu

Dans un milieu transparent, la lumière interagit tout de même avec la matière, ce qui a pour effet de diminuer la vitesse de propagation d'une radiation monochromatique de fréquence ν dans le milieu considéré : $c_{\nu(\text{milieu})} < c_0$: c'est le **phénomène de dispersion**.

Définition :

L'indice optique ou indice de réfraction d'un MHTI, noté $n_{(\nu)}$, pour une radiation monochromatique de fréquence ν est une grandeur sans dimension, définie par la relation :

Remarque : la plupart des MHTI ont un indice qui vérifie la loi empirique de Cauchy :

$$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$$

A et B étant des constantes positives caractéristiques du milieu.

Conséquence : la longueur d'onde λ d'une radiation traversant un milieu matériel est différente de la longueur d'onde dans le vide λ_0 :

Valeurs à retenir :

Dans l'air et l'eau la variation de l'indice de réfraction en fonction de la fréquence est très faible, ainsi on retiendra les valeurs suivantes quelle que soit la fréquence :

Remarques : le diamant est le minéral naturel possédant le plus haut indice de réfraction avec une valeur moyenne de 2,4. C'est ce qui justifie son éclat si particulier car le phénomène de réflexion totale (cf. III.4) peut facilement se mettre en place.

3. Propagation rectiligne de la lumière dans un MHTI

Hypothèse fondamentale de l'optique dite « géométrique » :

En effet, si nous éclairons une forme opaque et que nous observons la forme projetée sur un écran, l'ombre portée est homothétique de l'objet : le théorème de Thalès peut donc être appliqué.

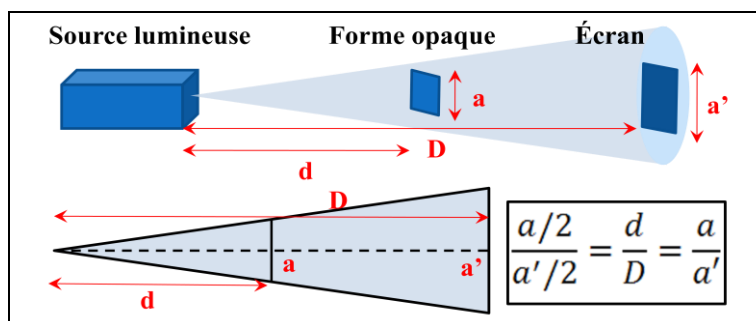


Figure 2 : Propagation rectiligne et théorème de Thalès

Le verre de type « cristal » est un verre particulier dont la valeur de l'indice de réfraction est fortement dépendant de la fréquence de l'onde lumineuse. C'est donc un milieu très dispersif, ce qui justifie ses reflets irisés.



Exercice d'application 2

4. Modèle du rayon lumineux

a. Rayon lumineux

Définition :

Remarque : on oriente toujours un rayon lumineux sur un schéma

b. Propriétés des rayons lumineux

Indépendance des rayons lumineux : dans un MHTI les rayons lumineux se propagent indépendamment les uns des autres.

Principe du moindre temps (principe de Fermat) : la lumière pour aller d'un point à un autre emprunte le chemin qui correspond à un temps de trajet minimal.

Principe du retour inverse de la lumière : tout trajet suivi par la lumière pour aller d'un point A à un point B sera identique au trajet emprunté par la lumière pour un parcours dans le sens B vers A . Autrement dit le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation (c'est une conséquence du principe de Fermat).

c. Faisceau lumineux

Définition :

Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux. Il est composé d'une infinité de rayons lumineux.

Faisceau conique : pour réaliser un faisceau lumineux conique il suffit de placer un diaphragme circulaire devant une source ponctuelle (cf. partie suivante). Le faisceau lumineux est donc un cône qui a pour origine le point source et qui coupe la surface délimitée par le diaphragme.

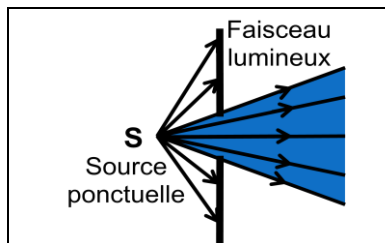


Figure 3 : Faisceau lumineux conique

Faisceau parallèle : on peut observer des faisceaux lumineux parallèles et non de forme conique. C'est par exemple le cas d'un faisceau laser ou si la source ponctuelle de lumière est infiniment loin du diaphragme.

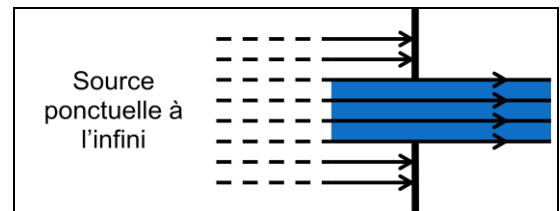


Figure 4 : Faisceau lumineux parallèle

d. Limite du modèle de l'optique géométrique

Il est impossible d'isoler un rayon lumineux en utilisant un diaphragme infiniment fin ; lorsque la taille du diaphragme est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière utilisée, le faisceau lumineux « s'ouvre » : c'est le phénomène de diffraction.

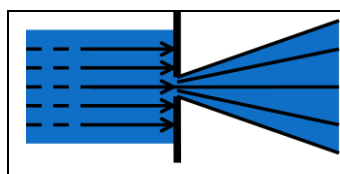


Figure 5 : Phénomène de diffraction à travers une fente étroite

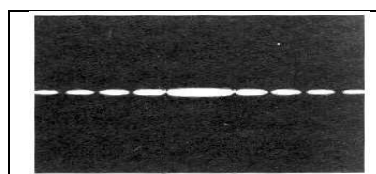


Figure 6 : Figure de diffraction observée sur un écran

5. Sources primaires ou secondaires

L'œil est un récepteur qui peut voir des objets lumineux soit parce qu'ils émettent de la lumière, soit parce qu'ils la diffusent.

a. Sources primaires

Définition :

Les sources primaires de lumière sont des corps qui produisent la lumière qu'ils émettent.

Une source primaire émet dans toutes les directions, quelle que soit la position de l'observateur, celui-ci reçoit un rayon en ligne droite (figure 7).

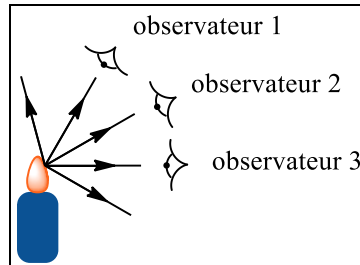


Figure 7

Exemples : le Soleil, une ampoule, la flamme d'une bougie, etc.

b. Sources secondaires

Définition :

Les sources secondaires diffusent la lumière qu'elles reçoivent. On parle aussi de « réflexion diffusive » à ne pas confondre avec la réflexion pure.

Tous les points de l'objet éclairés par la source primaire diffusent la lumière dans toutes les directions. Ainsi quelle que soit la position de l'observateur, ce dernier recevra des rayons diffusés issus de l'objet considéré comme source secondaire (figure 8).

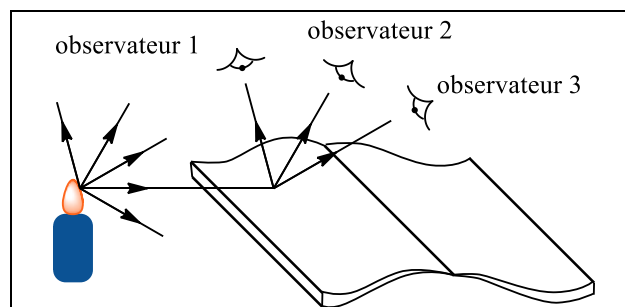


Figure 8 : Lumière émise par une source secondaire



Il ne faut pas confondre ce phénomène avec la réflexion pure pour laquelle seul l'observateur placé dans la direction suivant la loi de la réflexion de Descartes (cf. pages suivantes) reçoit un rayon.

Les instruments d'optique parfaits (c.-à-d. parfaitement propres) : miroirs, lentilles, etc., ne sont pas des sources secondaires ; ils ne diffusent pas la lumière.

III. Les lois de Snell-Descartes

1. Lois de la réflexion – énoncé

Définition :

Un miroir est une surface qui réfléchit totalement la lumière.

Soit un miroir plan et un rayon lumineux incident issu d'une source S parvenant à un point I du miroir.

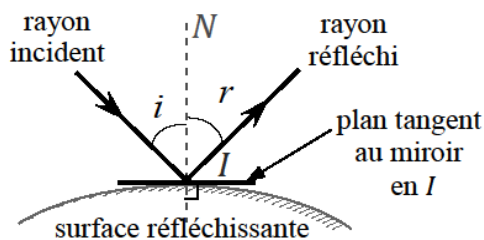
La direction du rayon émergent réfléchi est donnée par les lois suivantes :

Lois de la réflexion :

Remarque : ces lois vérifient le principe du retour inverse de la lumière : le trajet suivi est indépendant du sens de parcours.

Cas particuliers :

- Un rayon émergent provenant d'un rayon incident normal au miroir repartira dans la même direction en sens inverse.
- Pour un miroir non plan il faut considérer un plan tangent à la surface :



2. Lois de la réfraction

a. Énoncé

Définition :

Un dioptre est une interface entre deux milieux d'indices optiques différents.

Propriété :

Au passage d'un dioptre un rayon lumineux donne généralement naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté (transmis). Le rayon réfracté étant dans la plupart des cas beaucoup plus intense que le rayon réfléchi.

Soit un dioptre plan séparant deux milieux 1 et 2 d'indice n_1 et n_2 , soit un rayon lumineux issu d'une source S se propageant dans le milieu d'indice n_1 . Au point I du dioptre, le rayon incident subit une déviation, on obtient un rayon réfracté dans le milieu d'indice n_2 .

La direction du rayon émergent réfracté est donnée par les lois suivantes :

Le phénomène de réfraction de la lumière permet de distinguer visuellement les interfaces entre milieu transparent : vidéo le compte-goutte invisible.

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=IDdfJISvA_4

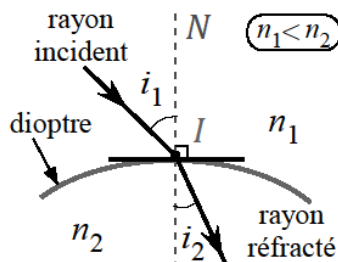


web

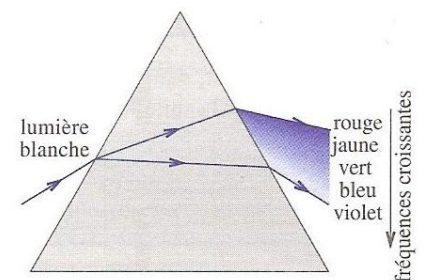
Cette loi peut être démontrée en utilisant le principe de moindre temps (de Fermat) : la déviation du rayon permet à la lumière de parcourir le chemin qui correspond à un temps de trajet minimal entre deux points appartenant à des milieux d'indices différents.

Cas particuliers :

- Un rayon normal au dioptre sera transmis, donc réfracté, sans être dévié.
- Pour un dioptre non plan il faut considérer un plan tangent à la surface :



Le phénomène de réfraction permet d'expliquer la décomposition de la lumière blanche par un prisme (ou par les gouttes d'eau lors de la formation d'un arc-en-ciel). En effet, la lumière subit deux réfractions successives mais les angles de réfractions successifs dépendent de la longueur d'onde des rayonnements monochromatiques composant la lumière blanche car l'indice de réfraction du verre utilisé est fonction de la fréquence de l'onde.



b. Rapprochement ou éloignement de la normale lors de la traversée d'un dioptre

Définition :

Conséquence :

Démonstration : dans le cas du passage vers un milieu plus réfringent



Exercices d'application 3, 4

3. Phénomène de réflexion totale

Description du phénomène :

Mise en évidence du phénomène sur une vidéo YouTube :



On peut déterminer l'angle $i_{1,\text{lim}}$ pour lequel la réfraction est juste rasante :

Ce phénomène est utilisé dans le domaine des télécommunications : la propagation des rayons lumineux à travers les fibres optiques a lieu grâce à une succession de réflexion totale permettant de maintenir la lumière à l'intérieur de la fibre. Ce principe est aussi utilisé en médecine dans le cadre des fibroscopies et endoscopies.



Exercice d'application 5

4. Généralisation aux ondes sismiques de volume

A la différence des ondes de surface, les ondes P et S sont des ondes de volume dont la propagation (célérité, trajectoire) est dépendante des propriétés physico-chimiques des milieux traversés (densité, nature chimique, état physique...). Elles peuvent être comparées à des ondes lumineuses et étudiées comme telles car elles possèdent de nombreuses propriétés communes.

Propriétés communes aux ondes lumineuses et aux ondes sismiques :

- les ondes sismiques se propagent de manière rectiligne dans un milieu homogène : on parlera de raie sismique (l'équivalent du rayon lumineux)
- leur célérité varie selon le milieu, en particulier selon la densité du milieu.
- on peut définir des dioptries pour les ondes sismiques comme étant des surfaces séparant deux milieux d'indice sismique différents.
- les trajectoires des ondes sismiques à la traversée d'un dioptre obéissent aux lois de Snell-Descartes de la réflexion et de la réfraction.

La loi de Descartes de la réfraction est identique mais s'écrit différemment car pour les raies sismiques on ne définit pas d'indice de réfraction. La loi de la réfraction s'écrit donc avec les célérités des ondes sismiques.

Lois de Snell-Descartes appliquées aux raies sismiques

Soit une raie sismique se propageant dans un milieu **1**, à la célérité c_1 , atteignant un dioptre séparant le milieu **1** d'un milieu **2** dans laquelle la célérité de la raie sismique vaut c_2 .

Au contact du dioptre, une partie de la raie sismique est réfléchiée dans le plan d'incidence, telle que :

L'autre partie est transmise, réfractée dans le plan d'incidence, telle que :

Deux cas :

- **milieu 2 « plus lent », les ondes sismiques sont ralenties** : $c_2 < c_1$, la raie sismique se rapproche de la normale (cas de la discontinuité de Gutenberg, présence de la couche externe liquide du noyau)
- **milieu 2 « plus rapide », les ondes sismiques sont accélérées** : $c_2 > c_1$, la raie sismique s'éloigne de la normale et à partir d'une certaine valeur de i_1 , $i_{1, \text{lim}}$, la réflexion est totale (cas qui permet d'expliquer ce qui se produit au contact du MOHO, on passe de la croûte au manteau)

