3 – Description et propagation de la lumière

L'optique géométrique est l'étude de la trajectoire des rayons lumineux. C'est une science qui peut se baser quasiment exclusivement sur des outils géométriques simples, même s'il est commode d'utiliser un formalisme mathématique plus poussé (basé sur l'algèbre linéaire) pour les dispositifs complexes. C'est la raison pour laquelle les lois de l'optique géométrique ont été établies dès le 17e siècle, avec les travaux de Snell puis Descartes sur les lois de la réflexion et de la réfraction, complétés par les expériences de Newton sur la couleur. Une première théorie sur la formation des arcs-en-ciel a même été proposée par Descartes. Dès cette époque, plusieurs principes équivalents ont été énoncés par Fermat et Malus, à partir desquels il est possible de retrouver toutes les lois de l'optique géométrique.

La limite de ces modèles lorsque la lumière rencontre des objets (fils, fentes, etc) de taille proche de sa longueur d'onde a rapidement été observée. Les phénomènes de diffraction et d'interférences qui apparaissent alors ont été modélisés au 19e siècle par Frenel et Cauchy, en relation avec le développement de la théorie des ondes, et de l'électromagnétisme.

Au tout début de 20e siècle, l'optique a connu un nouveau développement avec la théorie corpusculaire d'Albert Einstein, qui permet d'étudier facilement les interactions entre la lumière et la matière, mais n'est pas utile pour l'étude des systèmes optiques simples.



Willibrord Snell (1580 - 1626)
physicien néerlandais



portrait de A. Tardieu

Augustin Fresnel (1837 - 1923)
physicien français

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

Plan du chapitre

1 Description ondulatoire de la lumière **3**
1.1 Caractéristique d'une onde lumineuse . . . 3
1.2 Lumière monochromatique et polychromatique ; couleurs . . . 4
1.3 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel . . . 5
1.4 Rayon lumineux . . . 6

2 Aspect corpusculaire de la lumière **7**
2.1 La lumière est un flux de photons . . . 7
2.2 Effet photoélectrique . . . 8
2.3 Photoionisation . . . 9

3 Propagation de la lumière ; lois de Snell-Descartes **9**
3.1 Sources primaires et sources secondaires . . . 9
3.2 Propagation dans un milieu homogène . . . 9
3.3 Réflexion de la lumière . . . 10
3.4 Réfraction de la lumière . . . 14
3.5 Réflexion et réfraction sur un dioptre . . . 19

4 Réflexion et réfraction des ondes sismiques **19**

Programme officiel – Premier semestre – **Thème S – ondes et signaux**

Notions	Capacités exigibles
S.1 Propagation d'un signal physique	
Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière.	
Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.	Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnement infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma). Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.
Photon : énergie, loi de Planck-Einstein. Effet photoélectrique et photoionisation.	Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photoionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
Réflexion, réfraction	
Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites.
Réflexion, réfraction des ondes lumineuses. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.	Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.

L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :

creative commons

BY Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggèrerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).

NC Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.

SA Vous avez le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter, sous les mêmes conditions de partage et d'utilisation que le présent document.

Consulter la licence creative commons complète en français :
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

1 Description ondulatoire de la lumière

1.1 Caractéristique d'une onde lumineuse

La lumière est une onde électromagnétique. Sa propagation est associée à la vibration sinusoïdale d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$ (direction de propagation repérée par le vecteur $\vec{v}$), perpendiculairement à la direction de propagation ; c'est donc une onde transversale.

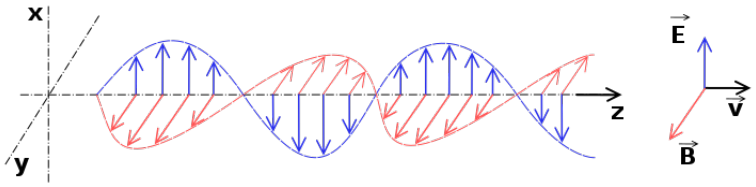


FIGURE 1 – Schématisation d'une onde électromagnétique.
Par SuperManu CC BY-CA https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2107870



Christiaan HUYGENS
par B. VAILLANT

En tant que phénomène ondulatoire, la lumière est caractérisée par sa longueur d'onde [1] λ, sa fréquence ν et sa période T, reliées par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière c :

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

L'aspect ondulatoire de la lumière a été supposé pour la première fois au 17e siècle par HUYGENS [2]. Théorisé au 19e siècle, il permet d'étudier les phénomènes optiques, que ce soit d'optique géométrique (réflexion, réfraction) ou d'optique physique (diffraction et interférences) [3].

Il est commode de définir et nommer différemment les manifestations des ondes électromagnétiques dans les différents domaines spectraux. En effet, les appareillages nécessaires pour étudier ou détecter une onde électromagnétique sont très différents selon l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. De même, les manifestations, les effets ou les utilisations des ondes électromagnétiques sont très différentes selon la longueur d'onde.

domaine	rayons γ	rayons X	ultraviolet	visible
λ	$< 10\,\text{pm}$	$10\,\text{pm} - 10\,\text{nm}$	$10\,\text{nm} - 380\,\text{nm}$	$380\,\text{nm} - 780\,\text{nm}$

domaine	infrarouge	micro-ondes	ondes radio	
λ	$780\,\text{nm} - 100\,\mu\text{m}$	$1\,\text{mm} - 30\,\text{cm}$	$> 1\,\text{m}$	

TABLE 1 – Domaines spectraux d'une onde électromagnétique.

Des applications usuelles des ondes électromagnétiques relèvent de la culture scientifique de base.

- Ondes radio : détection d'objets macroscopiques (radar), transmission d'information recueillies par une antenne.
- Micro-onde : transmission d'information (téléphonie mobile, GPS, WiFi), chauffage (four), détection (radar de recul).
- Infrarouge : analyse des liaisons d'une molécule (spectrométrie infrarouge), détecteur de présence, vision nocture.

1. On définit aussi le nombre d'onde σ, égal à l'inverse de la longueur d'onde : $\sigma = 1/\lambda$. C'est par exemple en fonction du nombre d'onde que sont classiquement présentés les spectres IR qu'on étudiera au deuxième semestre.

2. Christiaan HUYGENS (1629 - 1695), astronome et physicien néerlandais, est le premier à attribuer à la lumière un caractère ondulatoire. La renommée de NEWTON, qui était un tenant d'une théorie corpusculaire, a totalement éclipsé cette théorie.

3. Ces phénomènes seront brièvement évoqués en seconde année.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

- Visible et ultraviolet : analyse des électrons d'une molécule (spectrophotométrie), désinfection de surface, déclenchement de réactions chimiques.
- Rayons X : radiographie médicale, analyse des cristaux (diffraction des rayons X).
- Rayons γ : radiographie médicale, radiothérapie.

On admet que l'énergie transportée par la lumière est proportionnelle à sa fréquence, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Ainsi, les rayons ultraviolets sont suffisamment énergétiques pour abimer l'épiderme (coup de soleil), alors que les rayons infrarouges sont inoffensifs. Sur la figure suivante, les différents domaines spectraux sont rangés sur un axe d'énergie et de fréquence, gradué en échelle logarithmique. On constate que le domaine visible est une infime partie du spectre complet.

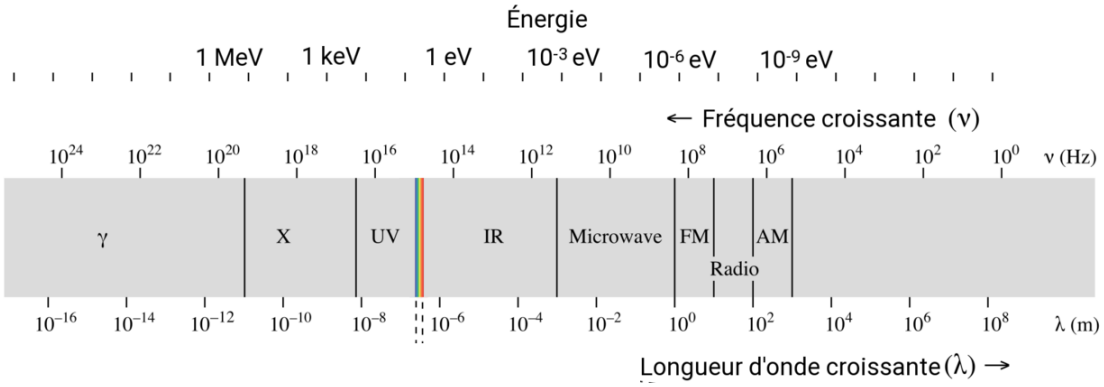


FIGURE 2 – Énergie des ondes électromagnétiques.
Par Philip Ronan, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=67848114

1.2 Lumière monochromatique et polychromatique ; couleurs

Une lumière est dite **monochromatique** si elle correspond à la propagation d'une unique longueur d'onde λ. Elle est perçue colorée par l'œil humain : à chaque longueur d'onde dans le domaine visible correspond une couleur [4].

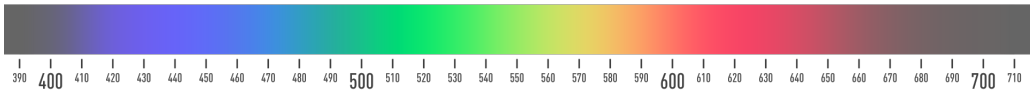


FIGURE 3 – Couleurs du spectre visible.
Par Bhutajata, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59589865

couleur	violet	bleu	vert	jaune	rouge
λ	400 nm	450 nm	520 nm	570 nm	680 nm

TABLE 2 – Longueurs d'onde des principales couleurs.

Une **lumière polychromatique** est la superposition de plusieurs ondes de longueurs d'onde différentes ; il lui est associé des photons de différentes énergies. La lumière naturelle, émise par le Soleil est polychromatique, et comporte en particulier toutes les longueurs d'onde entre 0,4 et 0,8 µm environ, qui constitue le domaine visible [5] La **lumière blanche** est une lumière polychromatique comportant toutes les longueurs d'onde du

4. Il s'agit de couleur au sens physique. La perception des couleurs dépend énormément de l'observateur, de ses éventuels défauts physiologiques (daltonisme), mais également de sa culture.

5. Ce cas n'est pas particulier d'un point de vue physique, mais uniquement en ce sens que nos yeux sont sensibles à cette gamme de longueurs d'onde, présente en quantité importante dans le spectre solaire.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

domaine visible en proportions égales. La **lumière naturelle**, est la lumière émise par le Soleil ; elle contient toutes les longueurs d'onde visible, mais en proportions inégales, avec un maximum autour du jaune.

Une lumière blanche dont on a retiré une unique longueur d'onde λ_0 est de la couleur complémentaire de celle à laquelle correspond λ_0. Les couleurs complémentaires sont diamétralement opposées sur le cercle chromatique (figure 4). Ainsi, de la lumière blanche passant à travers une solution contenant de la chlorophylle, molécule qui absorbe une longueur d'onde dans le rouge, ressort verte.

Une lumière polychromatique comportant quelques longueurs d'onde parait colorée, mais la couleur perçue est difficile à prévoir [6]. De la même façon, une lumière blanche dont on a ôté deux longueurs longueurs d'onde est perçue d'une couleur impossible à prévoir *a priori*.



FIGURE 4 – Cercle chromatique.

1.3 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel

La vitesse de la lumière dans le vide est une **constante universelle** : $c \approx 3 \cdot 10^8 \,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Dans un milieu matériel, la lumière se propage moins rapidement. Sa vitesse v dépend de la nature du milieu :

$$\boxed{v = \frac{c}{n}} \tag{1}$$

où n est l'**indice optique** du milieu [7]. Comme $v < c$, l'indice optique d'un milieu matériel est toujours supérieur à 1. Il dépend de la température, et est caractéristique du milieu (nature, état physique, concentration en soluté s'il s'agit d'une solution). Quelques valeurs caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous. La valeur de l'indice optique de l'eau est à connaitre.

milieu	air	eau	jus sucrés	verre
n	$1,00027 \approx 1$	$1,33$	$1,35$ à $1,37$	$1,5$ à $1,9$

TABLE 3 – Indice de réfraction de quelques milieux.



Augustin CAUCHY
source : Library of Congress

L'indice d'un milieu dépend de la longueur d'onde de la lumière, ce qui signifie que toutes les longueurs d'onde ne propagent pas à la même vitesse dans un milieu matériel ; c'est la **dispersion de la lumière**. La dépendance de n avec λ suit approximativement la relation empirique de Cauchy [8] :

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

où A et B sont des constantes positives (particulières à chaque milieu). La dispersion de la lumière s'observe à la traversée d'un prisme, comme l'a montré Isaac NEWTON dans une expérience historique (figure 5a). Elle est responsable de certains phénomènes lumineux coloré comme les arcs-en-ciel [9].

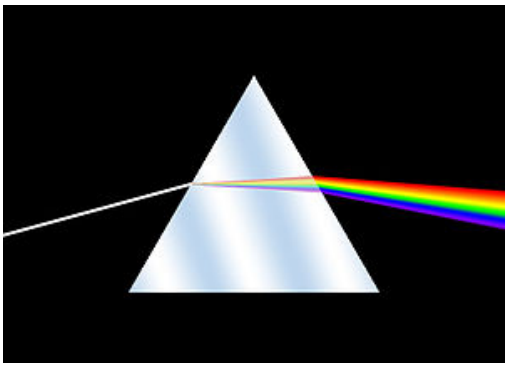
6. Elle dépend des longueurs d'onde présentes et de leurs intensités respectives

7. Cette relation n'est valable que dans le domaine visible.

8. Augustin CAUCHY (1789 - 1857), physcien et mathématicien français est surtout connu pour ses travaux mathématiques. C'est néanmoins lui qui a établi l'équation de propagation de la lumière, mis en évidence le phénomène de diffraction, et interprété mathématiquement la réfraction de la lumière. Il a été l'un des premiers à appliquer à la physique les méthodes mathématiques modernes

9. La photo de la figure 5b est due à Fabien1309, et disponible à : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arc-en-ciel_secondaire.jpg. Au-dessus de l'arc-en-ciel le plus lumineux, on voit nettement l'arc-en-ciel secondaire, moins lumineux, dans lequel l'ordre des couleurs est inversé. Entre les deux, le ciel est nettement plus sombre. Il est possible d'expliquer tous ces phénomènes de façon plus ou moins complète.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.



(a) dispersion par un prisme



(b) arc-en-ciel

FIGURE 5 – Exemples de dispersion de la lumière.

1.4 Rayon lumineux

Considérons une source, qui envoie un faisceau lumineux. On désire isoler la plus petite partie du faisceau, pour le rendre infiniment mince, par exemple pour isoler la trajectoire d'un photon particulier du faisceau. On peut pour cela utiliser un **diaphragme**[10], c'est-à-dire faire passer le faisceau dans un trou de dimension très petite. À la sortie du diaphragme, on place un écran, sur lequel le faisceau forme une tache (figure 6).

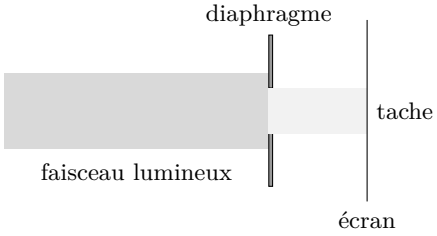
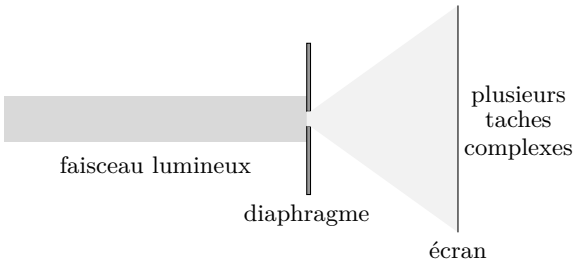
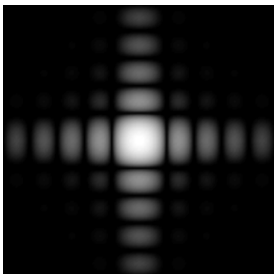


FIGURE 6 – principe du diaphragme

Si on ferme progressivement le diaphragme, on constate qu'en-deçà d'une certaine ouverture, le faisceau s'élargit et une figure complexe apparait sur l'écran ; c'est le phénomène de diffraction dont un exemple est donné sur la figure 7b[11]. Il a lieu dès que le diamètre du diaphragme est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière, ou inférieur. Il est donc impossible d'isoler un rayon lumineux ; on ne peut avoir qu'une brassée de rayons, un pinceau lumineux[12].



(a) phénomène de diffraction



(b) figure de diffraction par un trou carré

FIGURE 7 – Diffraction par un trou.

En BCPST, on s'intéresse presqu'exclusivement à des systèmes où on n'observe pas de diffraction. Les ouvertures par où passent la lumière doivent donc toujours être de taille supérieure à la longueur d'onde de la lumière, soit environ 1 µm. Les phénomènes de diffraction et d'interférences peuvent être étudiés à partir

10. L'œil est muni d'un diaphragme dont l'ouverture varie en fonction de la luminosité.

11. Source : Christophe FINOT disponible sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Diffraction.

12. Ceci ne doit pas faire croire qu'il soit impossible d'obtenir un photon unique. En effet, il existe des dispositifs permettant d'émettre *un seul* photon. En revanche, il est impossible d'isoler la trajectoire d'un unique photon à partir d'un faisceau lumineux.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

du principe de Huygens-Fresnel [13]. Précisons que les phénomènes d'interférence permettent de réaliser, avec des dispositifs optiques, des mesures d'une très grande précision : épaisseur de fil très fins, indices optiques, vitesse [14], etc. Elles sont également à la base de certains téléscopes actuels [15].

2 Aspect corpusculaire de la lumière

2.1 La lumière est un flux de photons

Au 18e siècle, Isaac Newton a envisagé la lumière comme un flux de particule. Ce modèle s'est avéré inopérant pour l'étude des phénomènes optique, et a été abandonné durant tout le 19e siècle au profit du modèle ondulatoire. Il a été réinroduit en particulier par Albert Einstein au début du 20e siècle, pour l'étude des interactions entre la lumière et la matière. Les aspects corpusculaire et ondulatoire sont deux descriptions (deux modèlisations) d'un même phénomène physique (la lumière). Chacun des deux aspects permet d'expliquer certains phénomènes : les deux aspects sont complémentaires.

La lumière peut être modélisée comme un flux de particules appelées **photons**. Un photon a pour caractéristiques :

- sa charge est nulle,
- sa masse est nulle,
- il se déplace à la vitesse de la lumière dans le milieu considéré,
- il transporte une énergie.

Un photon est parfois décrit comme un *quantum* d'énergie, autrement du un « grain » d'énergie.

L'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire de la lumière sont reliés par l'énergie du photon. Un photon associé à une lumière de fréquence ν et de longueur d'onde λ transporte une énergie :

$$\boxed{E = h \times \nu = \frac{hc}{\lambda}} \tag{3}$$

où h est une constante universelle, appelée la constante de Planck, dont la valeur est : $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$.

La lumière visible a une longueur d'onde typique de l'ordre de 500 nm ; l'énergie d'un photon visible est donc de l'ordre de :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^{8}}{500 \cdot 10^{-6}} \approx 4 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

Cette valeur étant très petite, une unité plus adaptée a été définie pour les énergie à l'échelle des particules élémentaires, des atomes ou des molécules : l'**électronvolt** noté eV, avec la conversion : $1\,\mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$. Un photon visible a donc une énergie de l'ordre de 2 eV.

La puissance totale transportée par un faisceau lumineux, appelée l'**intensité lumineuse** (en watt), dépend de l'énergie transportée par chaque photon et du flux de ceux-ci. Si N est le flux de photons (nombre de photons par unité de temps), la puissance d'un faisceau de fréquence ν est :

$$\mathcal{P} = N \times h\nu \tag{4}$$

13. Augustin Fresnel (1788 - 1827), physicien français, a repris l'idée de Huygens d'une théorie ondulatoire de la lumière. Par des expériences d'interférences, il a mis en évidence que la lumière est une onde transversale, et a été le premier à produire de la lumière polarisée. Il est par ailleurs le concepteur de systèmes de miroirs qui permettent de concentrer la lumière pour obtenir les faisceaux très lumineux utilisés dans les phares.

14. C'est grâce à l'interféromètre qui porte son nom que le physicien américain Albert Michelson (1852 - 1931) a montré l'invariance de la vitesse de la lumière. Il en a été récompensé par le prix Nobel de physique en 1907.

15. L'observation dans le domaine visible d'objets célestes très lointains nécessite des téléscopes de très grand diamètre. Or, construire des lentilles en verre de très grand diamètre avec une surface parfaite est impossible : le verre se déformerait sous son propre poids, sans compter qu'il risquerait de briser son support. D'autre part, l'observation dans des domaines de longueurs d'onde plus grandes que les longueurs d'onde visibles nécessite également des capteurs de grande dimension. Les appareils les plus récents sont constitués de plusieurs antennes ou paraboles, dont la réponse collective est une figure d'interférence à partir de laquelle on sait reconstituer l'image de l'objet observé.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

À un faisceau est polychromatique est associé un flux de photons d'énergies différentes. La puissance s'obtient en sommant les puissances associées à chaque type de photons.

2.2 Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique s'observe lorsqu'on illumine une surface métallique par de la lumière. En pratique, le métal est placé dans une enceinte où règne le vide, et munie d'une cathode permettant de collecter des électrons. Un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ et de fréquence $\nu = c/\lambda$ est envoyé sur la surface métallique. On constate qu'il existe une fréquence seuil ν_s (et une longueur d'onde seuil λ_s), telle que :

- si $\nu < \nu_s$ (soit $\lambda > \lambda_s$), il ne se passe rien quelle que soit l'intensité de la lumière,
- si $\nu > \nu_s$ (soit $\lambda < \lambda_s$), des électrons sont arrachés du métal, comme schématisé [16] sur la figure 8.

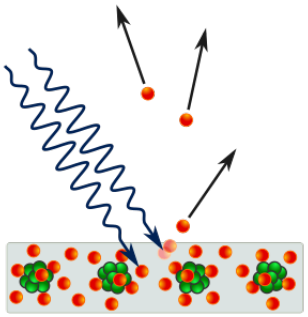


FIGURE 8 – L'effet photoélectrique.

Pour $\nu < \nu_s$, aucun électron n'est arraché même si on augmente l'intensité lumineuse. Autrement dit, ce n'est pas simplement la puissance totale de la lumière qui compte. Inversement, lorsque $\nu > \nu_s$, soit lorsque chaque photon individuel transporte une énergie supérieure à $h\nu_s$, des électrons sont arrachés. Cela suggère que le phénomène résulte d'un choc individuel entre un électron du métal et un photon à l'issue duquel le photon est absorbé [17], et qu'il a cèdé la totalité de son énergie à l'électron.

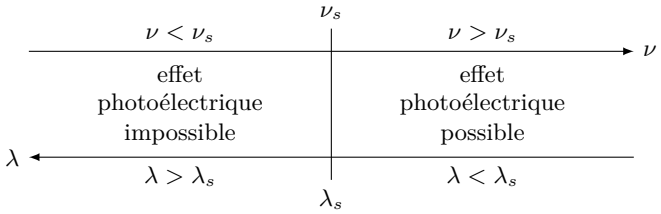


FIGURE 9 – Condition d'observation de l'effet photoélectrique.

Arracher un électron du métal est un processus qui nécessite de l'énergie. En effet, l'électron est lié au réseau par des interactions complexes mais globalement attractive. À la **fréquence seuil**, l'énergie du photon $E_s = h\nu_s$ est égale à l'énergie exactement nécessaire pour arracher un électron du réseau métallique. Cette énergie s'appelle le **travail d'extraction** du métal $W_s = h\nu_s$. C'est une mesure de l'énergie d'interaction de l'électron avec le réseau métallique.

Si on fait une analyse des électrons émis, on constate que ceux-ci ont des vitesses distribuées entre quasiment 0 et une valeur maximum, autrement dit que les électrons ont des énergies cinétiques entre 0 et une valeur maximale $E_{c\,\max}$. L'énergie cinétrique maximale augmente de façon affine avec la fréquence de la lumière excitatrice, soit avec l'énergie des photons envoyés.

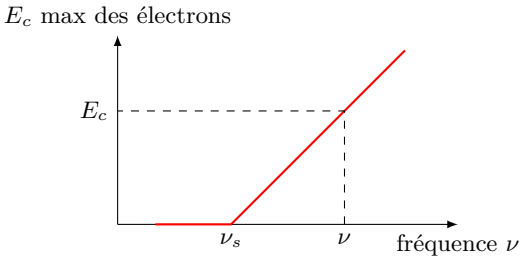


FIGURE 10 – Énergie cinétique maximale des électrons.

Ceci peut s'interpréter en écrivant la conservation de l'énergie. Toutes l'énergie du photon est cédée à l'électron lors de son absorption, et peut se décomposer en trois termes :

16. Figure de Ponor, CC BY-SA 4.0, disponible à : https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=92684859
17. C'est un choc inélastique, ce qui signifie que les particules après le choc ne sont plus les mêmes qu'avant le choc.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

- une partie de cette énergie sert à arracher l'électron du métal, c'est le travail d'extraction,
- une fois arraché du réseau, l'électron perd de l'énergie au cours de chocs avec les atomes du réseau,
- une fois sorti du réseau, le reste de l'énergie est de l'énergie cinétique.

La conservation de l'énergie s'écrit donc :

$$h\nu = W_s + E_{\text{perdue}} + E_c \Rightarrow E_c = h\nu - W_s - E_{\text{perdue}}$$

Le travail d'extraction est un terme fixe indispensable, sans quoi l'électron n'est pas arraché. En revanche, l'énergie perdu est variable selon la position initiale de l'électron arraché, et le hasard de sa trajectoire. L'énergie cinétique maximale possible pour les électrons correspond au cas où l'énergie perdu est nulle, ce qui ne concerne que quelques électrons de la surface du métal. En introduisant la fréquence seuil, l'énergie cinétique maximale est finalement :

$$E_{c\,\max} = h\nu - W_s = h\nu - h\nu_s$$

Graphiquement, $E_{c\,\max}$ en fonction de ν est une droite de pente h, d'ordonnée à l'origine $-h\nu_s$ et qui coupe l'axe des abscisses en $\nu = \nu_s$, ce qui correspond parfaitement au schéma de la figure 10.

Par exemple, on éclaire du sodium par une lumière de longueur d'onde variable. On constate un effet photoélectrique pour une lumière de fréquence supérieure à $\nu_s = 8{,}1 \cdot 10^{14}$ Hz. On cherche le travail d'extraction du sodium, et l'énergie cinétique maximale des électrons pour une longueur d'onde $\lambda = 0{,}25\,\mu$m.

Le travail d'extraction est $W_s = h\nu_s = 5{,}36 \cdot 10^{-19}$ J $= 3{,}35$ eV. Les électrons d'énergie cinétiques maximale sont ceux qui emportent sous forme d'énergie cinétique la totalité de l'énergie restante, soit : $E_{c\,\max} = E_{\text{photon}} - W_s = hc/\lambda - W_s = 2{,}64 \cdot 10^{-19}$ J $= 1{,}65$ eV.

2.3 Photoionisation

On appelle **photoionisation** ou **effet photoionisant** la libération d'un électron par un atome ou une molécule isolé suite à l'absorption d'un photon :

$$\mathrm{A} + h\nu \longrightarrow \mathrm{A}^+ + \mathrm{e}^-$$

Le phénomène est analogue à l'effet photoélectrique mais sur des entités (molécules ou atomes) en phase liquide et surtout gazeuse. La photoionisation est intensivement utilisée en spectrométrie de masse : on arrache un électron à une molécule préalablement vaporisée pour la convertir en un ion, qui est ensuite envoyé dans une zone où règne un champ électrique ou un champ magnétique ; le parcours de l'ion est fonction de sa masse, ce qui permet de mesurer celle-ci. En astronomie. Les nuages de gaz (nébuleuses) entourant certaines étoiles sont photoionisés par le rayonnement de l'étoile ; l'analyse du spectre lumineux de l'étoile vu à travers la nébuleuse permet de déterminer la composition du gaz.

3 Propagation de la lumière ; lois de Snell-Descartes

3.1 Sources primaires et sources secondaires

L'origine de la lumière est un corps qui emet des photons, usuellement suite à des desexcitation atomique. Un tel corps est qualifié de **source primaire** : il s'agit d'une étoile, d'un filament d'ampoule, d'une diode électroluminescente, d'un ver luisant, etc. Une source primaire émet des photons qui ne préexistent pas.

Une **source secondaire** reçoit de la lumière et la renvoie dans toutes les directions par un processus appelé diffusion. Tout objet invisible dans le noir mais visible dans la lumière est une source secondaire.

3.2 Propagation dans un milieu homogène

Dans le cadre du cours de BCPST, l'étude de la propagation de la lumière se limite au domaine visible ou proche du visible, et dans un milieu homogène (l'indice optique est le même en tout point), non dispersif (l'indice optique est identique pour toutes les longueurs d'onde) sauf avis contraire, et sans dispositif diffractant.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

Dans un milieu homogène, la lumière se **propage en ligne droite**. Ceci est une conséquence du principe de Fermat [18], dont un énoncé simplifié est que la lumière suit le chemin le long duquel son temps de propagation est le plus court [19].


Pierre de Fermat

À titre culturel, le principe de Fermat permet d'expliquer le phénomène du mirage optique : dans un milieu non homogène, le chemin le plus court en temps peut être incurvé s'il passe par des zones d'indice optique plus faible donc où la vitesse de propagation est plus grande. La plus longue distance parcourue est compensée par la vitesse de parcours plus courte. Ceci est un cas particulier de problèmes plus généraux de minimisation de temps de parcours, qui permettent de justifier les lois de Snell-Descartes qui seront énoncées plus loin.

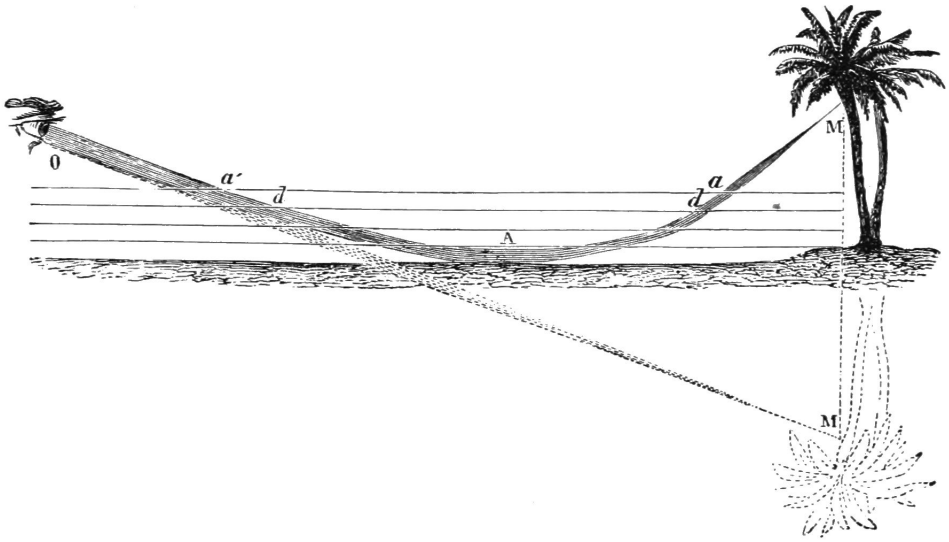


Figure 11 – Phénomène de mirage optique.

Le principe de Fermat est équivalent au **principe du retour inverse de la lumière** dont l'emploi est parfois fructueux.

> Le chemin parcouru par la lumière entre une source et un récepteur est le même, mais parcouru en sens inverse, si on échange les positions de la source et du récepteur.

D'après ce principe, si un observateur voit les yeux d'une personne à travers un dispositif optique quelconque, alors cette personne voit les yeux de l'observateur.

3.3 Réflexion de la lumière

3.3.1 Loi de Snell-Descartes de la réflexion

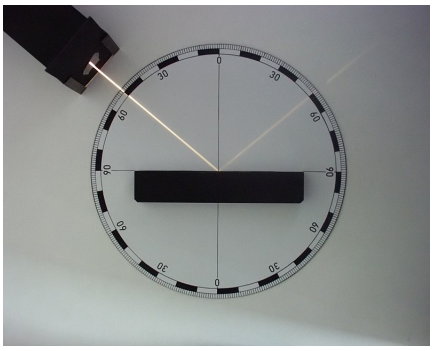
Si on envoie un rayon lumineux sur une surface réfléchissant la lumière, on observe sur la figure 12a l'existence d'un rayon réfléchi [20], c'est-à-dire qui repart de la surface dans le même milieu que celui dans lequel s'est propagé le rayon incident.

18. Un principe est un postulat de base d'une théorie, et n'est donc pas démontré. Toute l'optique géométrique peut être intégralement démontrée à partir du principe de Fermat, qui n'est pas au programme. Pierre de Fermat (? - 1665), est un magistrat toulousain plutôt doué. Mathématicien, il est à l'origine de résultats en théorie des nombres, et a laissé son nom a un théorème fameux qui n'a été résolu qu'au début de ce siècle. Il s'est intéressé à l'optique surtout par son aspect mathématiques.

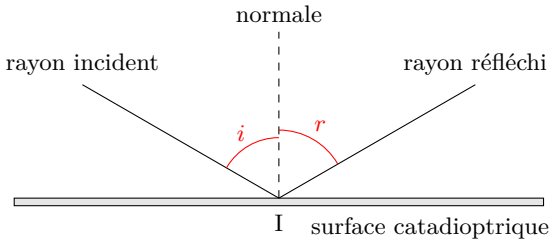
19. Le principe de Fermat affirme en fait que la lumière suit le chemin dont le temps de parcours est extremum (minimum ou maximum).

20. Photographie de Zátonyi Sándor (ifj.), travail personnel, CC BY-SA 3.0, disponible à https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10035697

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.



(a) mise en évidence expérimentale



(b) schématisation

FIGURE 12 – Loi de Snell-Descartes pour la réflexion.



René DESCARTES
par Franz HALS

Considérons une **surface catadioptrique**, c'est-à-dire une surface réfléchissant la lumière. Un **rayon incident** parvient à la surface en I, et est réfléchi sous forme d'un **rayon réfléchi**. Sur la figure 12b, on définit :

- la **normale** au catadioptre au point I, qui est la direction orthogonale au catadioptre en I,
- l'**angle d'incidence** i entre la direction du rayon incident et la normale au catadioptre,
- l'**angle de réflexion** r entre la direction du rayon réfléchi et la normale au catadioptre.

Dans la première moitié du 17e siècle, et indépendamment l'un de l'autre, Snell [21] et Descartes [22] ont étudié la réflexion de la lumière et ont établi les propriétés géométriques du rayon réfléchi par rapport au rayon incident. Ils en ont tiré les **lois de Snell-Descartes pour la réflexion** :

- Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence, défini par le rayon incident et la normale.
- Les rayons incident et réfléchi sont de part et d'autre de la normale.
- Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :

$$\boxed{r = i} \qquad \text{avec } r, i \in [0, \pi/2] \tag{5}$$

Considérons un lampadaire d'une hauteur $H = 6\,\text{m}$, assimilé à une source ponctuelle (de la taille d'un point) qui éclaire une route plane sur laquelle se trouve une flaque d'eau à $D = 20\,\text{m}$ en avant du lampadaire. Un automobiliste, dont les yeux sont à une hauteur $h = 1{,}5\,\text{m}$ au-dessus de la chaussée, roule vers le lampadaire (figure 13). On se demande à quelle distance du lampadaire il sera ébloui par le reflet de la lampe sur la flaque.

Les angles incidents et réfléchi ont la même valeur i. D'après la propriété des angles alterne-interne, i est aussi la valeur de l'angle entre le rayon incident et le lampadaire, ainsi qu'entre le rayon réfléchi et la verticale au niveau des yeux de l'automobiliste. Écrivons $\tan i$ dans les deux triangles rectangles :

$$\tan i = \frac{H}{D} = \frac{h}{d} \Rightarrow d = \frac{h \times D}{H} = 5\,\text{m}$$

21. Willebrord SNELL (1580 - 1626) est un mathématicien et astronome néerlandais, qui s'est intéressé aux problèmes de triangulation. Il semble qu'il ait établi les lois de la réfraction vers 1612, mais il subsiste un doute sur ce point, car il ne les a pas publiées. C'est son compatriote HUYGENS qui a œuvré pour que la parternité lui en soit attribuée plutôt qu'à DESCARTES. On voit là l'importance, dès cette époque, de la publication des résultats scientifiques pour attester de la priorité des découvertes.

22. René DESCARTES (1596 - 1650) est surtout connu pour son œuvre philosophique et mathématique. Sa contribution à la physique se limite à l'optique et à la mécanique. Il redécouvre les lois établies par SNELL, quoiqu'il soit possible qu'il en ait eu connaissance.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

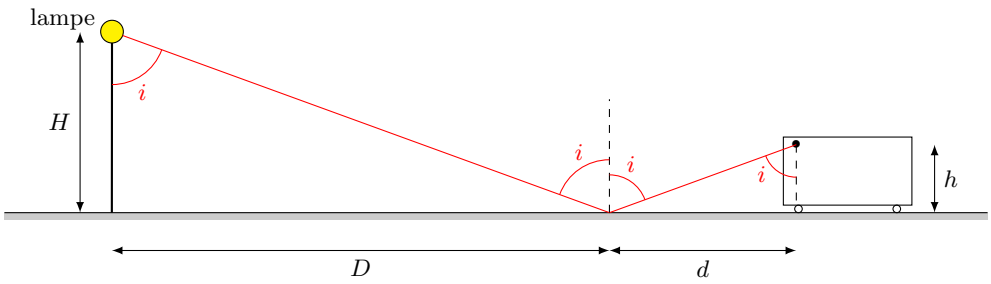


FIGURE 13 – Exemple de réflexion.

Cette loi peut être formulée algébriquement, à condition d'orienter les angles. On commence donc par choisir un sens positif des angles, par exemple le sens trigonométrique. On définit les directions de la normale et des rayons incident et réfléchi par trois vecteurs unitaires $\vec{N}$, $\vec{u}_1$ et $\vec{u}'_1$. Les angles des rayons incident et réfléchi i et r sont alors définis algébriquement à partir de la normale, comme sur la (figure 14). La loi de Snell-Descartes pour la réflexion énonce que le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence : $\vec{i}'_1 \in (\vec{N}, \vec{u}_1)$, et que les angles vérifient :

$$(\vec{N}, -\vec{u}_1) = -(\vec{N}, \vec{u}'_1) \qquad \text{soit :} \qquad \boxed{r = -i}$$

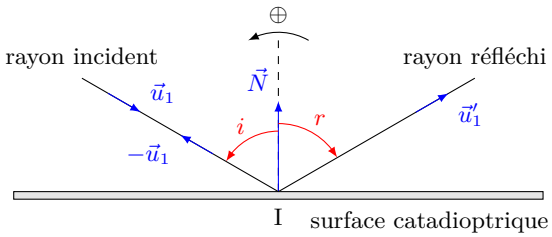


FIGURE 14 – Réflexion de la lumière avec algébrisation des angles.

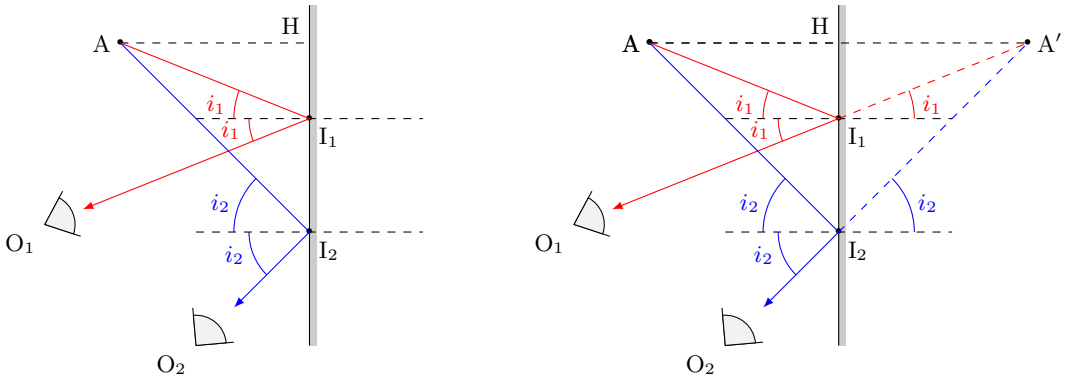
Travailler avec des angles orientés ne présente, dans la plupart des cas, aucun intérêt et complique inutilement les choses. Néanmoins, si on souhaite calculer la déviation finale d'un rayon lumineux qui subit plusieurs réflexions, l'algébrisation est impérative pour savoir si deux réflexions successives entrainent des déviations qui s'ajoutent (angles de déviation de même signe) ou qui se compensent (angles de déviation de signes contraires).

3.3.2 Image par un miroir plan

La réflexion de Snell-Descartes peut être modélisée par le concept d'image par un miroir plan. Considérons un observateur qui regarde un objet ponctuel A par réflexion sur un miroir plan. Un objet est dit ponctuel lorsque sa taille est celle d'un point. En premier lieu, l'observateur place son œil au point O_1 ; il le place ensuite au point O_2. Dans le premier cas, le point où le rayon issu de A se reflète sur le miroir est l'unique point I_1 tel que l'angle entre AI_1 et la normale est égal à l'angle entre la normale et I_1O_1. Il en est de même pour le point I_2 (figure 15a).

Lorsque l'observateur a son œil en O_1, le rayon issu de A lui semble venir de la direction définie par I_1O_1 ; il a donc l'impression que A est quelque part dans cette direction. De même, lorsque l'observateur a son œil en O_2, il lui semble que A est quelque part dans la direction définie par I_2O_2. En prolongeant ces deux directions sur le schéma de la figure 15b, on constate que ces deux directions convergent en un point A'. Du fait de la conservation des angles et des distances par la symétrie par un plan, il est facile de se convaincre que la point A' est le symétrique de A par le plan du miroir.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.



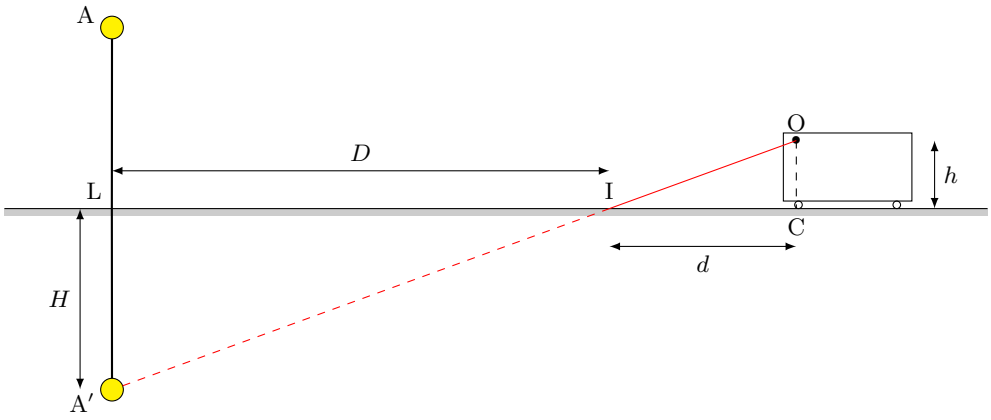
(a) observation par réflexion dans un miroir

(b) construction de l'image par un miroir

FIGURE 15 – Modélisation de la réflexion par construction de l'image par un miroir.

En définitive, pour l'observateur, **tout se passe comme si la lumière venait du point symétrique de A par le miroir**. Ce point A′ est l'**image de A par le miroir**.

Reprenons l'exemple du lampadaire dont la lumière est réfléchie par une flaque d'eau. Le lampadaire de hauteur $H = 6\,\text{m}$, assimilé à une source ponctuelle éclaire une route plane sur laquelle se trouve une flaque d'eau à $D = 20\,\text{m}$ en avant du lampadaire. Un automobiliste, dont les yeux sont à une hauteur $h = 1{,}5\,\text{m}$ au-dessus de la chaussée, roule vers le lampadaire. Lorsque l'automobiliste est ébloui par le lampadaire, il lui semble que la lumière qui se réfléchit sur la flaque vienne du symétrique de A par rapport au plan du miroir (autrement dit au plan de la route). Il suffit de construire le symétrique A′ de A et de raisonner et de considérer que tout se passe comme si la lumière venait de A′.



En appliquant le théorème de Thalès dans les triangles (A′LI) et (ACI) qui sont semblables, on a :

$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} \Rightarrow d = \frac{h \times D}{H} = 5\,\text{m}$$

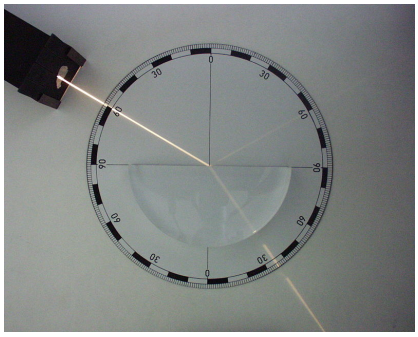
Le miroir plan possède deux propriétés importantes. D'une part, le miroir est un dispositif optique **rigoureusement stigmatique**, ce qui signifie que l'image d'un objet ponctuel est une image elle-même ponctuelle (et non pas une tache étendue). En d'autre terme, l'image par un miroir plan est nette. Par ailleurs, l'image de A est **virtuelle** : elle se trouve derrière le miroir, à une position où la lumière n'est en réalité jamais passée. Cette image ne peut donc pas être visualisée sur un écran placé en A′.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

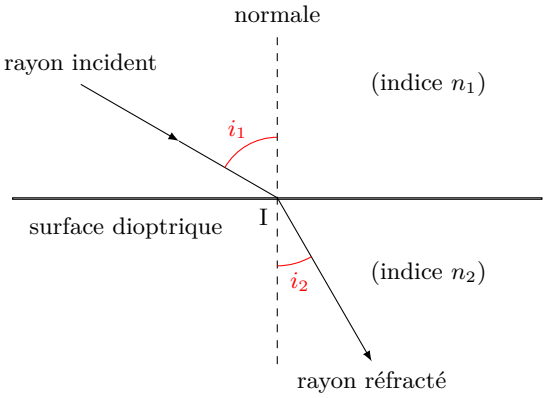
3.4 Réfraction de la lumière

3.4.1 Loi de Snell-Descartes de la réfraction

Si on envoie un rayon lumineux sur une interface séparant deux milieux transparents, on observe sur la figure 16a l'existence d'un rayon réfracté [23], c'est-à-dire qui traverse l'interface et se propage dans le milieu de l'autre côté de celle-ci.



(a) mise en évidence expérimentale



(b) schématisation

FIGURE 16 – Loi de Snell-Descartes pour la réfraction.

Considérons une **surface dioptrique** ou **dioptre**, c'est-à-dire une interface entre deux milieux transparent. Un **rayon incident** parvient à la surface en I, et est réfracté sous forme d'un **rayon réfracté**. Sur la figure 16b, on définit :

- la **normale** au dioptre au point I, qui est la direction orthogonale au dioptre en I,
- l'**angle d'incidence** i entre la direction du rayon incident et la normale au dioptre,
- l'**angle de réfraction** r entre la direction du rayon réfracté et la normale au dioptre.

C'est encore Snell et Descartes qui ont étudié les propriétés du rayon réfracté et établi les **lois de Snell-Descartes pour la réfraction** :

- Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence, défini par le rayon incident et la normale.
- Les rayons incident et réfracté sont de part et d'autre de la normale.
- Les angles d'incidence et de réfraction vérifient la relation :

$$\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2} \qquad \text{avec } r, i \in [0, \pi/2] \tag{6}$$

On considère la banquise, dans laquelle se trouve un petit trou. Un poisson, supposé ponctuel, se trouve à une profondeur de $h_1 = 2\,\text{m}$ et décalé de $d_1 = 2\,\text{m}$ par rapport à la verticale du trou. Un ours, dont les yeux sont à $h_2 = 1\,\text{m}$ du sol observe le poisson (figure 17). On veut déterminer à quelle distance du trou il doit se placer.

L'ours observe le poisson si un rayon issu du poisson se réfracte à l'interface entre l'eau et l'air puis arrive dans l'œil de l'ours. Comme les rayons incident et réfractés sont de part et d'autre de la normale, l'ours doit se placer de l'autre côté du trou par rapport au poisson. Les positions du poisson et du trou étant fixes, l'angle d'incidence est fixé : il vérifie :

$$\tan i_1 = \frac{d_1}{h_1} = 0{,}785\,\text{rad} = 45°$$

23. Photographie de Zátonyi Sándor (ifj.) Fizped (talk), travail personnel, CC BY-SA 3.0, disponible à https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2845439

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

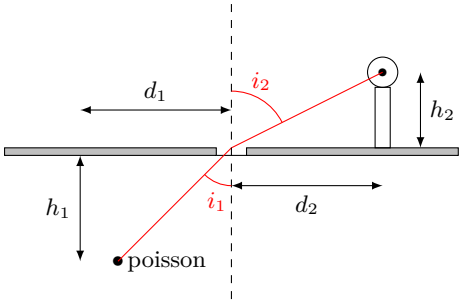


FIGURE 17 – L'ours et le poisson.

Au niveau du trou, le rayon est réfracté, et l'angle de réfraction vérifie :

$$n_{\text{air}} \sin i_2 = n_{\text{eau}} \sin i_1 \Rightarrow \sin i_2 = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{air}}} \times \sin i_1 = 0,940$$

En prenant l'arcsinus, on obtient la valeur de l'angle réfracté : $i_2 = 1{,}224\,\text{rad} = 70{,}1°$. Il reste à déterminer la position de l'ours. Si le poisson est vu, c'est que le rayon réfracté passe par l'œil de l'ours, soit :

$$\tan i_2 = \frac{d_2}{h_2} \Rightarrow d_2 = h_2 \times \tan i_2 = 2{,}7\,\text{m}$$

Le mirage optique peut être modélisé comme un très grand nombre de diffractions sur des couches d'air d'épaisseur infinitésimale et d'indice optique qui varie progressivement, comme montré[24] sur la figure 18.

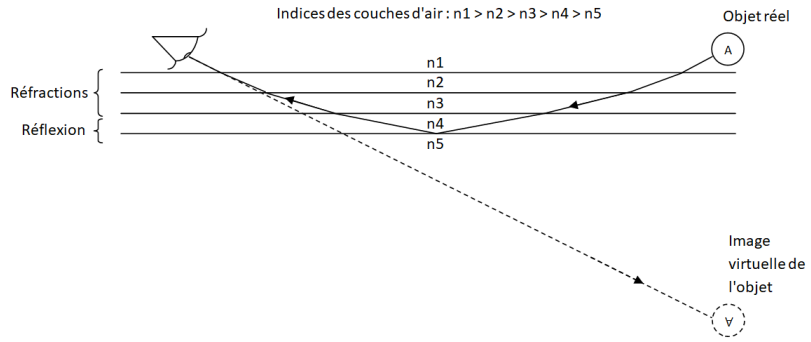


FIGURE 18 – Modélisation du mirage par une multicouche d'air.

Il peut être utile d'utiliser des angles orientés, si on cherche la déviation d'un rayon lumineux suite à plusieurs réflexions ou réfraction. On définit les directions de la normale et des rayons incident et réfracté par trois vecteurs unitaires $\vec{N}$, $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$. Le plan d'incidence est défini par la base $(\text{I}, \vec{N}, \vec{u}_1)$. Les angles des rayons incident et réfracté i_1 et i_2 sont alors définis algébriquement à partir de la normale, comme sur la (figure 19). La loi de Snell-Descartes pour la réfraction énonce que le rayon réfracté appartient au plan d'incidence : $\vec{i}_2 \in (\vec{N}, \vec{u}_1)$, et que les angles vérifient :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

24. Schéma de Bezzerides 57 — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, disponible à : https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=67749159

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

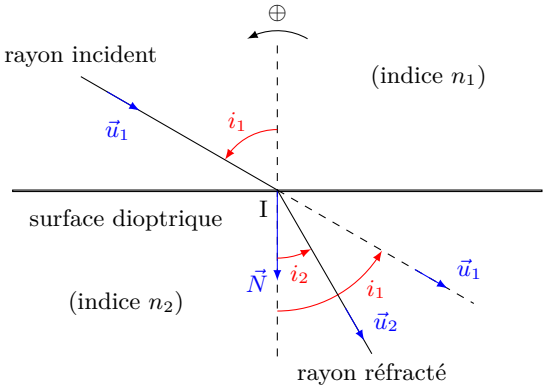


FIGURE 19 – Réfraction de la lumière avec algébrisation des angles.

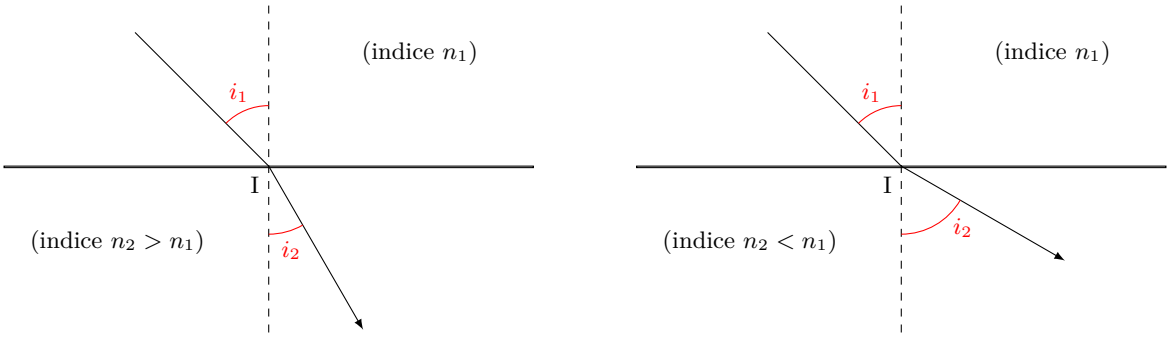
3.4.2 Comparaison de l'angle incident et de l'angle réfracté

Considérons un rayon lumineux se propageant dans un milieu d'indice n_1 et arrivant sur un dioptre le séparant d'un milieu d'indice n_2. Deux cas sont à considérer, en fonction de la valeur de n_2 par rapport à n_1.

Si la réfraction a lieu d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent, soit $n_1 < n_2$, alors :

$$\sin i_2 = \underbrace{\frac{n_1}{n_2}}_{<1} \times \sin i_1 \Rightarrow \sin i_2 < \sin i_1 \Rightarrow i_2 < i_1$$

autrement dit, l'angle réfracté est plus petit que l'angle incident, et le rayon se rapproche de la normale lors du passage du dioptre.



(a) vers un milieu plus réfringent

(b) vers un milieu moins réfringent

FIGURE 20 – Comparaison des angles incident et réfracté selon les indices optiques.

Si au contraire la réfraction a lieu d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent, soit $n_1 > n_2$, alors :

$$\sin i_2 = \underbrace{\frac{n_1}{n_2}}_{>1} \times \sin i_1 \Rightarrow \sin i_2 > \sin i_1 \Rightarrow i_2 > i_1$$

autrement dit, l'angle réfracté est plus grand que l'angle incident, et le rayon s'écarte de la normale lors du passage du dioptre.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

Une application classique de cette propriété est que le fond d'un bassin ou d'un ruisseau parait situé moins profondément qu'il ne l'est réellement. C'est également cette propriété qui explique qu'un bâton plongé dans l'eau semble coudé au niveau de la surface.

Un bâton d'une longueur $L = 1\,\text{m}$, incliné de 45° par rapport à la verticale, est plongé à moitié dans l'eau. On cherche à déterminer à quelle profondeur sous l'eau l'observateur a l'impression de voir son extrémité.

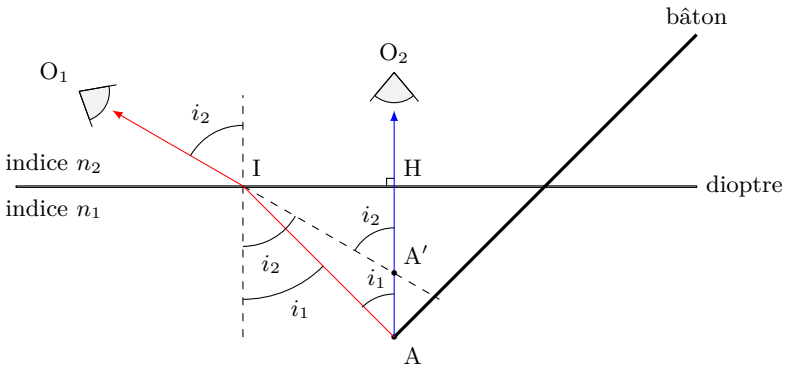


FIGURE 21 – Un bâton plongé dans l'eau semble coudé.

Si l'observateur se place à la verticale de l'extrémité du bâton (position O_2), le rayon issu de A se propage en ligne droite vers son œil ; en effet, le rayon arrive en H sous un angle d'incidence nul, et l'angle réfracté est donc nul. En conséquence, l'observateur voit cette extrémité dans la direction (O_2A).

Si maintenant l'observateur se place en O_1, alors le rayon issu de A se réfracte en I et s'écarte de la normale. L'observateur voit donc l'extrémité du bâton dans la direction (O_1A). En définitive, l'observateur, lorsqu'il se déplace, il a l'impression que l'extrémité du bâton se trouve A', intersection des deux directions (O_2A) et (O_1A).

Pour déterminer la position de A', raisonnons dans les deux triangles rectangles (AHI) d'angle en A égal à i_1, et $(A'HI)$ d'angle en A' égal à i_2. On a :

$$\tan i_1 = \frac{\text{HI}}{\text{HA}} \qquad \text{et} \qquad \tan i_2 = \frac{\text{HI}}{\text{HA}'}$$

En faisant le rapport membre à membre, on obtient :

$$\frac{\text{HA}'}{\text{HA}} = \frac{\tan i_1}{\tan i_2}$$

Cette équation a deux inconnues, i_1 et i_2, et il faut une seconde équation, qui est la relation de Snell-Descartes de la réfaction :

$$n_{\text{eau}} \sin i_1 = n_{\text{air}} \sin i_2 \Rightarrow \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}}$$

Avec ces deux équations, on ne peut pas trouver de solution explicite, et il faut faire une résolution numérique. Cependant, si i_1 et i_2 ne sont pas trop grand, alors on peut faire l'approximation que $\sin i_1 \approx \tan i_1$ et $\sin i_2 \approx \tan i_2$. Dans ces conditions, on a donc :

$$\frac{\text{HA}'}{\text{HA}} \approx \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}} \Rightarrow \text{HA}' \approx \text{HA} \times \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}}$$

Comme $\text{HA} = L/2 \times \sin 45 = L/2\sqrt{2} = 0{,}35\,\text{m}$, et en prenant $n_{\text{air}} = 1$ et $n_{\text{eau}} = 1{,}33$, on obtient $\text{HA}' = 0{,}26\,\text{m}$. L'extrémité du bâton semble donc 10 cm plus haute qu'elle ne l'est réellement.

L'approximation faite est classique et est connue sous le nom d'approximation des conditions de Gauss. Elle est très bonne pour des angles inférieurs à environ $30° = \frac{\pi}{6}$ rad. En effet, si $\theta = \frac{\pi}{6} \approx 0{,}5\,\text{rad}$, alors $\sin\theta = 1/2$.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

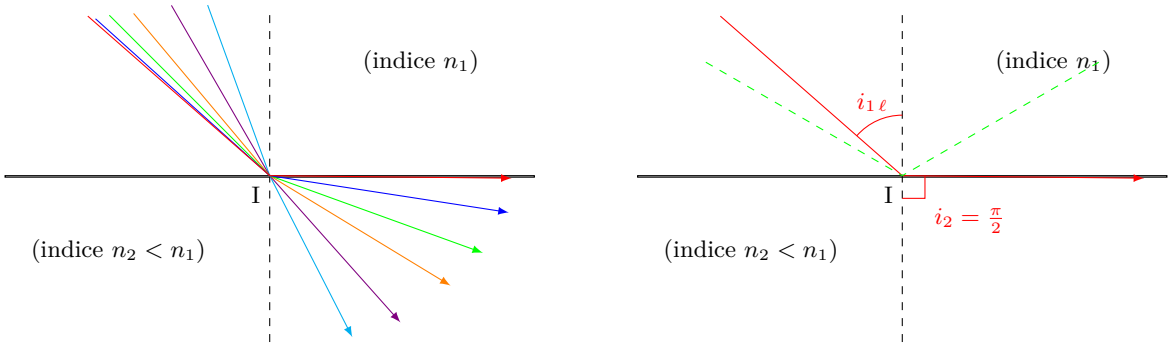
On dit qu'on se trouve dans les **conditions de Gauss**, lorsqu'on limite l'étude aux rayons peu inclinés par rapport à la normale : i_1 et i_2 petits.

Dans les conditions de Gauss, et pour un angle i exprimé **en radians**, on peut faire l'approximation :

$$\tan i \approx \sin i \approx i \tag{7}$$

3.4.3 Angle limite de réfraction

Lorsque la lumière est réfractée vers un milieu plus réfringent, il n'existe pas de limitation. En revanche, la réfraction vers un milieu moins réfringent fait apparaitre deux possibilités. Considérons un rayon incident dans un milieu d'indice n_1 qui est réfracté en un point I dans un milieu d'indice $n_2 < n_1$. Comme on l'a vu, le rayon s'éloigne de la normale, soit $i_2 > i_1$. Une augmentation progressive de l'angle incident i_1 entraine une augmentation de l'angle réfracté i_2 plus rapide, comme montré sur la figure 22a.



(a) mise en évidence de la limite de réfraction

(b) angle limite de réfraction

FIGURE 22 – Réfraction vers un milieu moins réfringent.

En conséquence, l'angle i_2 atteint sa plus grande valeur possible $\pi/2$, alors que i_1 est encore strictement inférieur à $\pi/2$. Il en résulte qu'il existe une valeur limite de l'angle d'incidence $i_{1\ell}$, qui correspond à l'angle d'incidence tel que l'angle de réfraction soit maximal soit $i_2 = \pi/2$ (figure 22b). L'application de la loi de Snell-Descartes pour la réfraction pour ce rayon limite donne :

$$n_1 \sin i_{1\ell} = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \Rightarrow n_1 \sin i_{1\ell} = n_2 \Rightarrow i_{1\ell} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Pour les angles incidents supérieurs à $i_{1\ell}$, le rayon réfracté n'existe plus. Mathématiquement, cela correspond à : $\sin i_2 = (n_1/n_2) \sin i_1 > 1$, ce qui est une absurdité mathématique. La lumière ne peut donc pas être refractée, et ne peut que se réfléchir. On peut remarquer que la formule donnant l'angle limite de réfraction met en évidence que cet angle n'existe pas pour le passage vers un milieu plus réfringent ; en effet, si $n_2 > n_1$, alors $\arcsin(n_2/n_1)$ n'est pas défini. Au-delà de $i_{1\ell}$, le rayon incident ne peut se réfracté ; il ne peut donc que se réfléchir.

Pour un rayon se propageant dans un milieu d'indice n_1 arrivant sous une incidence i_1 sur un dioptre le séparant un milieu moins réfringent d'indice $n_2 < n_1$:
- si $i_1 < i_{1\ell}$, la réfraction est possible,
- si $i_1 = i_{1\ell}$, le rayon est réfracté tangentiellement à l'interface soit $i_2 = \pi/2$,
- si $i_1 > i_{1\ell}$, la réfraction est impossible et il y a **réflexion totale**.

L'angle limite de réfraction est :

$$i_{1\ell} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \tag{8}$$

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

Un source ponctuelle située dans l'air émet un rayon lumineux vers la surface d'un plan d'eau. L'indice optique de l'eau étant plus grand que celui de l'air, la réfraction a lieu vers un milieu plus réfringent, et l'angle réfracté est inférieur à l'angle incident ; en conséquence, la réfraction est toujours possible.

À l'inverse, pour une source ponctuelle située dans l'eau, la réfraction vers l'air correspond à un passage vers un milieu moins réfringent. Le rayon n'émerge qu'au niveau des points de la surface tels que l'angle incident soit inférieur à $\arcsin\left(n_{\text{air}}/n_{\text{eau}} = \arcsin 1/1,33 = 0{,}85\,\text{rad} = 48{,}75°\right.$.

3.5 Réflexion et réfraction sur un dioptre

On vient de voir que, sur une surface dioptrique, il peut arriver que la lumière soit intégralement réfléchie si on est au-delà de l'angle limite de réfraction. Cela signifie-t-il que, dans les autres cas, l'intégralité de la lumière est réfractée ?

Prenons le cas d'un rayon se propageant dans l'air et arrivant sur de l'eau ; cette dernière étant un milieu plus réfringent, la réfraction est possible quel que soit l'angle d'incidence. Cependant, on peut facilement faire l'expérience que de la lumière est réfléchie (reflet d'un arbre ou des nuages sur de l'eau). Autrement dit, sur une surface dioptrique, il y a toujours une partie de la lumière qui est réfléchie (figure 23). Les proportions de lumière réfléchie et réfractée dépendent des indices optiques n_1 et n_2. En terme d'énergie lumineuse, l'existence du phénomène de réflexion implique qu'il est difficile de transmettre la totalité de l'énergie lumineuse d'un milieu à un autre par réfraction [25].

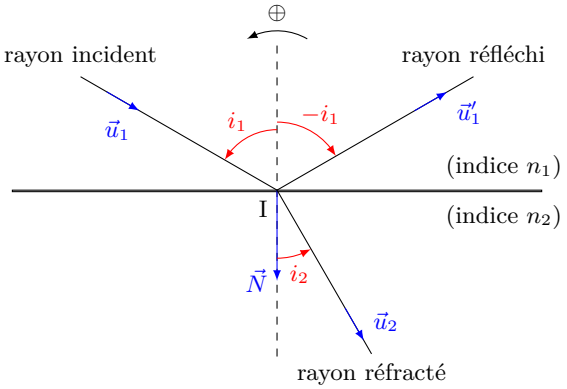


FIGURE 23 – Réfraction par un dioptre partiellement réfléchissant.

En revanche, sur une surface catadioptrique, le rayon réfracté peut être quasiment inexistant ; on observe alors uniquement un phénomène de réflexion. Il est possible de réfléchir quasiment 100% de l'énergie lumineuse arrivant sur une surface catadioptrique [26].

4 Réflexion et réfraction des ondes sismiques

Les lois précédentes se généralisent, avec des adaptations, aux autres phénomènes ondulatoires : ondes sonores, ondes mécaniques (vagues, corde vibrante, ressort...), ondes sismiques.

Pour ce qui concerne les ondes sismiques, on observe des phénomènes de réflexion et de réfraction au niveau des interfaces entre les couches constituant la Terre. L'étude de ces réflexions et réfractions est d'ailleurs l'unique moyen de vérification expérimentale des modèles de l'intérieur du Globe. Le problème est assez complexe, car il existe de deux sortes d'ondes sismiques de volume, les ondes P et les ondes S, qui ne se propagent pas à la même vitesse, autrement dit il y a un phénomène de dispersion.

25. Le calcul des proportions d'énergie transmise et réfléchie n'est pas au programme de BCPST.

26. En réalité, il y a généralement une très petite portion de la lumière qui entre dans la surface réfléchissante et s'y propage juste au-dessous de la surface. Il s'agit d'une onde évanescente, qui est à l'origine de certaines méthodes de détection très originales.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

La vitesse de propagation des ondes sismiques varie suivant la nature du milieu dans lequel elles se propagent. Les discontinuités de la vitesse de propagation sont donc caractéristiques du passage d'une couche du globe terrestre à une autre couche. C'est ainsi qu'on peut affirmer que la Terre est constituée de quatre parties principales : la graine, le noyau externe, le manteau inférieur et le manteau supérieur (ce dernier étant surmonté de la croûte, d'épaisseur négligeable). Les ondes sismiques S et P ne se comportent pas de la même façon lors de leur réfration ou de leur réflexion, ce qui donne des indications sur la nature physico-chimique des milieux traversés [27].

On appelle **rai sismique** la trajectoire décrite par une onde sismique entre un site d'émission et un site de réception ; c'est l'équivalent du rayon lumineux. Lorsqu'un rai sismique parvient à une interface entre deux milieux avec un angle d'incidence i, une partie de l'onde (éventuellement toute) se réfléchit avec un angle de réflexion $r = i$ (loi de la réflexion).

Par ailleurs, lorsqu'un rai sismique, se propageant dans un milieu où sa célérité est c_1, parvient à une interface avec un milieu dans lesquel il peut se propager [28] avec une célérité c_2, alors une partie de l'onde se réfracte avec un angle de réfraction tel que :

$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2}$$

qui est bien l'équivalent de la loi de Snell-Descartes, puisque l'indice optique est bien inversement proportionnel à la célérité de la lumière : $v = c/n$.

Dans un milieu donné (croûte, manteaux, noyau), la célérité n'est pas uniforme, et les rais sismiques ne sont pas rectiligne, comme dans le cas du mirage.

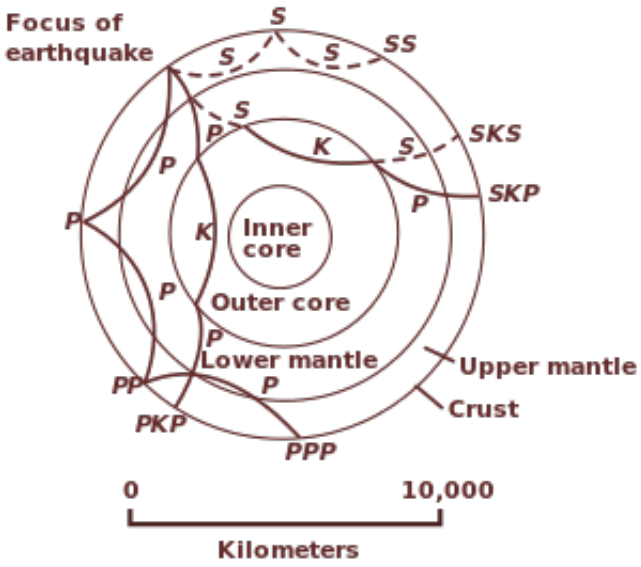


FIGURE 24 – Rais sismiques dans la Terre.

La réflexion des ondes sismiques peut être mise à profit pour effecteur des sondages sismiques, dont un exemple est le suivant. Un marteau est actionné à la surface du sol, et envoie une onde mécanique de célérité $c = 6{,}2\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Cette onde se réfléchit sur la première discontinuité et est enregistré par un détecteur situé à une distance $d = 100\,\mathrm{m}$ du marteau. Le retard avec lequel l'onde est enregistré est $\Delta t = 580\,\mathrm{ms}$. On suppose que les ondes mécaniques se propagent sur une distance suffisamment courte pour qu'on puisse considérer le milieu homogène ; leur propagation se fait donc en ligne droite.

27. Les compositions minéralogiques des différentes couches sont postulées à partir de modèles théoriques et d'expériences de laboratoire. On connait la nature de chacune des couches, mais seulement dans les grandes lignes ; de nombreuses incertitudes demeurent sur les détails.

28. On rappelle que les ondes S ne peuvent pas se propoager dans un milieu liquide, et qu'il n'y a donc pas réfraction des ondes S à l'interface entre le manteau et le noyau.

Strictement réservé aux élèves de BCPST du lycée Fénelon (Paris).
Toute utilisation commerciale est interdite.

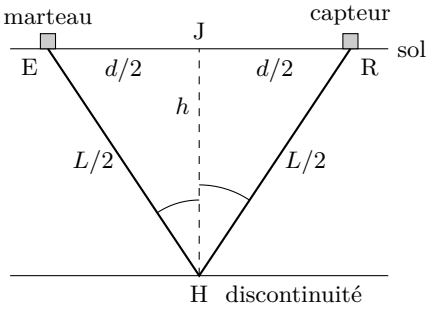


FIGURE 25 – Sondage sismique.

Le trajet des ondes entre le marteau et le récepteur a une longueur $L = c \times \Delta t$, par définition de la célérité.

Lors de la réflexion, l'angle réfléchi est égal à l'angle incident. Le point où la réflexion a lieu se trouve donc sur la hauteur du segment reliant le marteau E au capteur R. Les triangles (EHJ) et (RHJ) sont égaux. En conséquence, le trajet est divisé en deux parties de longueur égale $L/2 = \text{EJ} = \text{JR}$. Le théorème de Pythagore s'écrit :

$$\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2 \Rightarrow h^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow h = \sqrt{\left(\frac{c\,\Delta t}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

L'application numérique donne $h \approx 1800\,\text{m} = 1{,}8\,\text{km}$.