

Modéliser la lumière

Plan du chapitre

I. La lumière, toute une histoire !	2
II. Propagation de la lumière	3
A. Célérité et indice optique	3
B. Longueur d'onde et fréquence	4
C. Sources de lumière, notion de spectre	8
III. Théorie de l'optique géométrique	10
A. Modèle de l'optique géométrique	10
B. Lois de Snell-Descartes	10
C. Réfraction limite et réflexion totale	14
D. Limites du modèle de l'optique géométrique	15

Ce qu'il faut connaître

- La valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide.
- La relation entre célérité de la lumière dans le vide et dans un milieu transparent.
- Le lien entre longueur d'onde dans le vide et celle dans un milieu.
- Le lien entre longueur d'onde dans le vide et couleur.
- Les limites du spectre visible (longueurs d'onde extrêmes et couleur)
- Le modèle de la source ponctuelle monochromatique
- Le modèle de l'optique géométrique et ses limites.
- Les lois de Snell-Descartes.

Ce qu'il faut savoir faire

- Exploiter la relation longueur d'onde - fréquence (EC1 et EC2).
- Exploiter les relations pour la célérité et la longueur d'onde dans un milieu transparent (EC3).
- Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- Exploiter les lois de Snell-Descartes (EC4 et EC5).
- Établir l'angle de réfraction limite.
- Établir la condition de réflexion totale.

I - La lumière, toute une histoire !

Depuis l'Antiquité, les conceptions autour de la nature de la lumière ont été nombreuses, et sa nature a suscité de nombreuses interrogations. Nous allons ici donner quelques dates clés ainsi que les idées associées aux grands penseurs de la lumière, pour donner une vision globale de l'histoire particulière qu'occupe la lumière dans l'évolution de la physique.

☛ Dans l'Antiquité, deux visions de la lumière s'opposent :

- ▷ pour certains, il s'agit de **minuscules particules** envoyées vers l'oeil à très grande vitesse
- ▷ pour d'autres, il s'agit de rayons : Euclide, au III^e siècle av. JC, avait déjà introduit l'idée de **rayon lumineux**.

☛ Le mathématicien arabe Alhazen reprend le concept de rayon lumineux et pose formellement les bases de la théorie des rayons lumineux dans son *Traité d'optique*, en 1021.

☛ L'optique se développe par la pratique : on maîtrise mieux les propriétés des lentilles, leur fabrication. Apparaissent alors les premiers instruments d'optique (lunette astronomique) sous l'impulsion de grands physiciens de l'époque : Galilée, Kepler, Tycho Brahé.

☛ Au XVII^e siècle, René Descartes relance le débat autour de la nature de la lumière. Il étudie l'optique et publie son ouvrage *La dioptrique* en 1637, dans lequel apparaît la loi qui porte aujourd'hui son nom. Indépendamment, un scientifique anglais, Willebrord Snell, avait déjà travaillé sur ce sujet en 1625 et établi une loi similaire. C'est pour cela que ces lois portent aujourd'hui le nom de **lois de Snell-Descartes**. Descartes considère par ailleurs que la propagation de la lumière est instantanée.

☛ En 1676, Rømer, un scientifique danois, détermine expérimentalement à l'aide de l'étude des satellites de Jupiter, une première mesure de la vitesse de la lumière. La propagation n'est donc pas instantanée, comme le pensait Descartes.

☛ La même année, le scientifique néerlandais Christian Huygens publie son *Traité de la lumière*, où il considère la lumière comme une onde, à la manière des ondes à la surface de l'eau. Il pose les bases de la **théorie ondulatoire de la lumière**.

☛ En 1704, Isaac Newton publie *Opticks*, son traité sur la lumière où il décrit certains phénomènes optiques, comme la décomposition de la lumière à travers un prisme. Il considère cependant que la lumière a une nature **corpusculaire**, et qu'elle est donc constituée d'infimes particules qui se propagent à grande vitesse. Newton, fort de sa théorie de la gravitation, éclipse la théorie de Huygens pendant plus d'un siècle.

☛ Au XIX^e siècle, deux scientifiques (Thomas Young, anglais, et Augustin Fresnel, français) reprennent et développent la théorie ondulatoire de Huygens : ils expliquent ainsi les phénomènes d'interférences et de diffraction de la lumière.

☛ En 1864, James Clerk Maxwell, un scientifique écossais, interprète la lumière comme une onde électromagnétique, qui obéit aux équations qui portent aujourd'hui son nom. La lumière n'est donc qu'une partie d'un spectre plus large appelé spectre électromagnétique, qui s'étend des rayons gamma aux ondes radio. Elle se propage donc, selon sa théorie, à la célérité c dans un milieu particulier, appelé **l'éther**.

☛ Au début du XX^e siècle, Max Planck étudie le rayonnement du corps noir et suppose, pour mener à bien son raisonnement, que les échanges d'énergie entre lumière et matière sont quantifiés : ils ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur, ce sont nécessairement des multiples de $h\nu$, où ν désigne la fréquence de l'onde.

☛ En 1905, année miraculeuse de la physique, Einstein montre que l'éther n'existe pas et que la lumière se propage à la célérité c indépendamment du référentiel. C'est la naissance de la relativité.

☛ Tout au long du XX^e siècle se développe la **mécanique quantique**, et avec elle la découverte du **photon**, corpuscule de lumière qui avait déjà été entrevu par Planck au début du siècle.

En résumé, la nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière ne sont pas contradictoires : on parle ainsi aujourd'hui de **dualité onde-corpuscule**. L'une ou l'autre de ces natures se manifeste selon les phénomènes étudiés (nature ondulatoire lors des phénomènes d'interférences ou de diffraction, et nature corpusculaire pour l'effet photoélectrique, par exemple). Dans ce chapitre, nous allons donc passer en revue les différentes modélisations de la lumière et voir comment la modélisation du rayon lumineux nous permet d'expliquer certains phénomènes optiques.

II - Propagation de la lumière

II.A - Célérité et indice optique

• Dans le vide

En 1676, une première mesure de la vitesse de la lumière est réalisée par Rømer. Il estime celle-ci à 220 000 km/s, ce qui est une valeur 26% plus faible que celle que l'on connaît, remarquable compte tenu des moyens de l'époque ! Des mesures sont ensuite réalisées tout au long du XIX^e siècle, et Michelson réalise la première mesure compatible avec les résultats actuels en 1929.

Aujourd'hui, la définition du mètre fixe conventionnellement la vitesse de la lumière dans le vide : un mètre est la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ s.

Célérité de la lumière dans le vide

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

• Dans un milieu transparent

Un milieu est dit **transparent** si la lumière peut le traverser. Attention, il ne faut pas confondre transparent et incolore : un sirop de grenadine est coloré et pourtant transparent, car la lumière peut s'y propager, alors qu'une grosse épaisseur de verre est incolore et peut pourtant être opaque (la lumière ne peut la traverser).

Célérité de la lumière dans un milieu transparent

Dans un milieu transparent, la vitesse de la lumière est donnée par :

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

où n désigne l'**indice optique** du milieu.

La vitesse de la lumière dans un milieu est toujours inférieure à c . L'indice optique d'un milieu est donc toujours supérieur à 1.

Valeurs des indices optiques usuels :

$$\begin{aligned} \triangleright n_{\text{air}} &= 1,0003 \simeq 1 & \triangleright n_{\text{eau}} &= 1,33 \\ \triangleright n_{\text{verre}} &\simeq 1,5 & \triangleright n_{\text{diamant}} &= 2,4 \end{aligned}$$

Remarque : Plus l'indice optique est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

• Différents milieux transparents

- ▷ On parle de milieu **homogène** lorsque l'indice optique prend la même valeur partout (contre exemple : l'atmosphère sous certaines conditions → mirages).
- ▷ On parle de milieu **isotrope** lorsque la propagation de la lumière se fait de la même façon quelle que soit la direction (contre exemple : certains cristaux, qui sont dits *anisotropes*).
- ▷ On parle de milieu **dispersif** lorsque l'indice optique dépend de la longueur d'onde de la lumière. C'est le cas de tous les milieux (sauf le vide). Ceci explique par exemple les arc-en-ciel, car les différentes couleurs ne sont pas déviées d'un même angle dans les gouttes d'eau (loi de Snell-Descartes).

⚙️ **Expérience de cours : décomposition de la lumière blanche par un prisme**

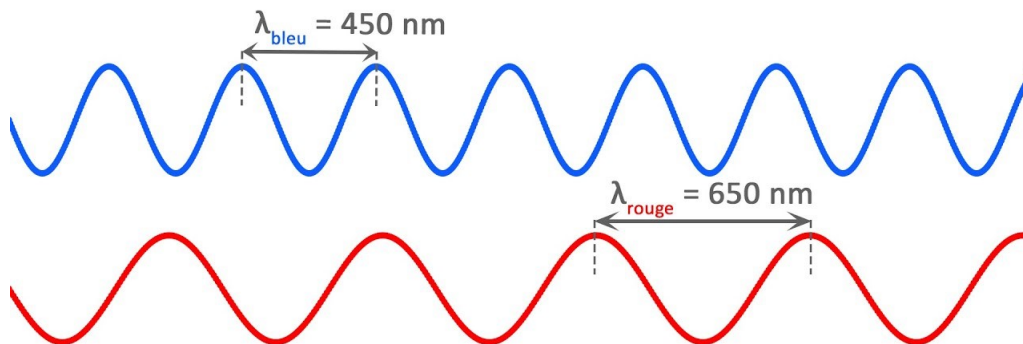
II.B - Longueur d'onde et fréquence

Avec l'exemple du prisme, on voit donc que la lumière est composée de différentes couleurs : ces couleurs correspondent chacune à une **longueur d'onde** dans le vide. Une **onde monochromatique** (littéralement, une seule couleur) est une vibration lumineuse oscillant à une seule longueur d'onde, qui fixe sa couleur.

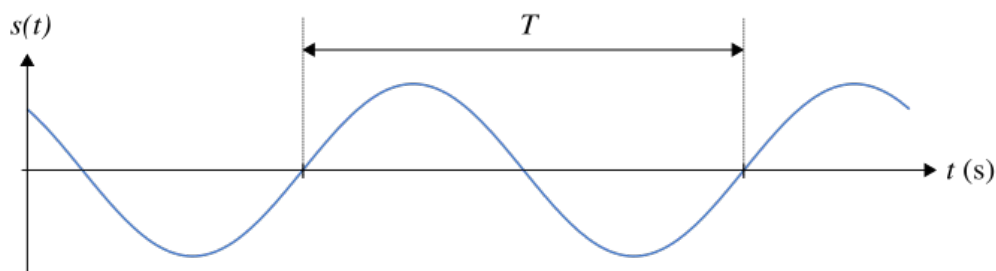
• Rappels sur les ondes monochromatiques

Une onde monochromatique est caractérisée par une **double périodicité** : spatiale et temporelle.

► La périodicité spatiale de l'onde est appelée la **longueur d'onde**, notée λ . La dimension de λ est donc celle d'une longueur : $[\lambda] = L$. La longueur d'onde caractérise la distance minimale entre deux états identiques de l'onde. Plus la longueur d'onde est grande, plus la distance entre deux maxima successifs de l'onde est grande : c'est par exemple le cas des ondes radio, dont la longueur d'onde peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres.



► La périodicité temporelle de l'onde est appelée **période** de l'onde, notée T . La dimension de T est donc celle d'un temps : $[T] = T$.



▷ On définit alors la **fréquence** ν (aussi notée f) de l'onde comme l'inverse de la période :

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

La fréquence s'exprime en Hz ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) et caractérise son nombre d'oscillations par seconde : une fréquence de 10 Hz signifie que l'onde oscille 10 fois par seconde. Plus la fréquence est grande, plus l'onde oscille rapidement dans le temps.

Relation entre fréquence et longueur d'onde

Dans le vide, la longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique λ_0 et sa fréquence ν_0 sont liées par la relation :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = c \times T_0$$

où c désigne la célérité de la lumière dans le vide.

EC1 : Longueur d'onde et fréquence

1. On considère un rayonnement de période $T_0 = 50 \mu\text{s}$. Calculer sa longueur d'onde.
2. On considère un rayonnement de longueur d'onde $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$. Calculer sa fréquence.

• Dans le vide

Depuis la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell à la fin du XIX^e siècle, la lumière est considérée comme une onde électromagnétique, à l'image des rayons X, des rayons infrarouges ou encore des ondes radio. La lumière, ou rayonnement visible, ne constitue qu'une faible partie du **spectre électromagnétique** représenté ci-dessous, en fonction de la longueur d'onde **dans le vide** ou de la fréquence, les deux étant inversement proportionnels. En effet, le domaine du visible s'étend sur des longueurs d'onde d'environ 400 nm à 800 nm, allant donc du violet au rouge.

Ce domaine est entouré, à gauche (c'est-à-dire pour des longueurs d'onde plus faibles que 400 nm) du domaine ultraviolet (dit aussi UV), des rayons X et ensuite des rayons gamma. Ces derniers sont les plus énergétiques : en effet, selon la relation de Planck, un photon possède une énergie $E = \frac{hc}{\lambda}$ donc plus la longueur d'onde est faible, plus l'énergie est grande.

À droite du domaine visible, c'est-à-dire pour les longueur d'onde plus grandes (rayonnements moins énergétiques), on retrouve le rayonnement infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio, dont la longueur d'onde peut aller jusqu'à plusieurs kilomètres. C'est pour cela qu'elles sont utilisées pour la communication !

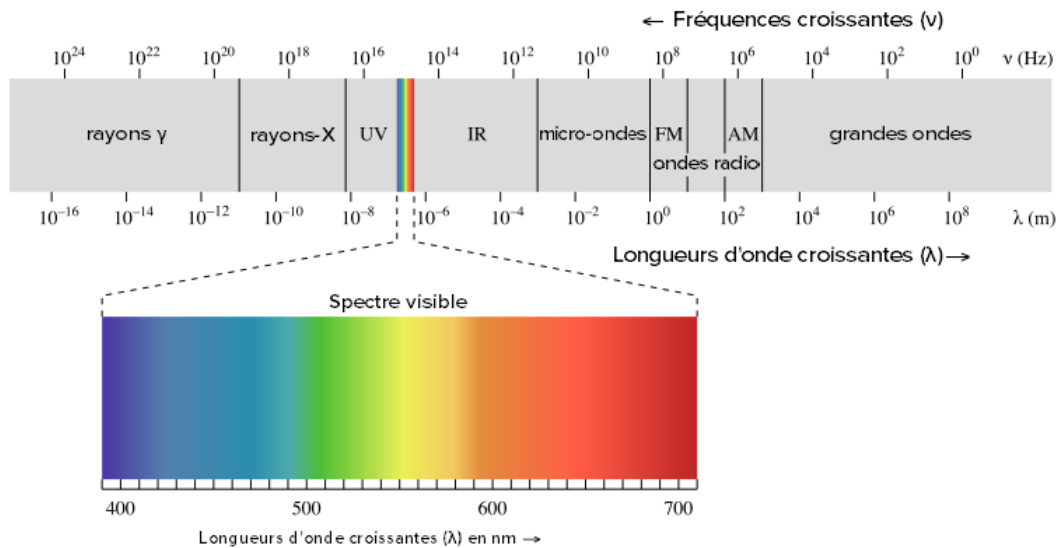


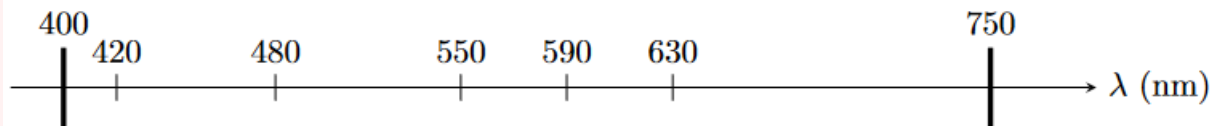
FIGURE 1 – Illustration du spectre électromagnétique

Limites du spectre visible

La longueur d'onde **dans le vide** des ondes monochromatiques visibles est comprise dans l'intervalle

$$[400 ; 800] \text{ nm}$$

Chaque longueur d'onde **dans le vide** est associée à une couleur pure :



Remarque : Cette correspondance entre couleur et longueur d'onde concerne les longueurs d'onde **dans le vide**.

EC2 : Fréquences extrêmes du domaine visible

Calculer les fréquences extrêmes du domaine visible des ondes électromagnétiques.

• Dans un milieu transparent

Dans un milieu transparent, la vitesse de la lumière est modifiée : $v = \frac{c}{n}$, il faut donc que la longueur d'onde du rayonnement soit modifiée pour que la relation liant longueur d'onde et fréquence soit vérifiée.

Longueur d'onde dans un milieu transparent**EC3 : Longueur d'onde d'un laser**

Un laser émet un rayonnement quasi-monochromatique de fréquence $\nu = 4,73 \cdot 10^{14}$ Hz.

1. Quelle est la longueur d'onde dans le vide de ce laser ? Quelle est sa couleur ?

On considère maintenant que cette radiation se propage dans un milieu d'indice $n = 1.66$.

2. Quelle est la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu ? Quelle est alors la longueur d'onde du rayonnement ? Quelle est sa couleur ?

Remarque : comme l'indice optique d'un milieu est toujours supérieur à 1, la longueur d'onde dans un milieu transparent est toujours inférieure à celle dans le vide.

II.C - Sources de lumière, notion de spectre

Une source de lumière est caractérisée par un **spectre**, qui nous renseigne sur l'énergie lumineuse du rayonnement émis par la source en fonction de sa longueur d'onde. Un spectre permet de caractériser la source de lumière.

🔧 Expérience de cours : caractérisation de différentes sources de lumière

• Les sources de lumière blanche

Les sources de lumière blanche, comme le Soleil ou les ampoules, sont des sources de lumière présentant un spectre **continu**, c'est-à-dire qui contient plus ou moins toutes les longueurs d'onde. On dit qu'elles sont **polychromatiques** (littéralement, plusieurs couleurs), et c'est la superposition de toutes les longueurs d'onde qui produit cet effet de blanc. Cette émission est le résultat d'un corps chauffé, et c'est sa température qui définit la "couleur" de la source. C'est ce qu'on appelle le **rayonnement du corps noir**, que vous étudierez en détails en deuxième année. Ci-dessous sont représentés les spectres d'émission du Soleil, d'une lampe à économie d'énergie et d'une lampe à incandescence.

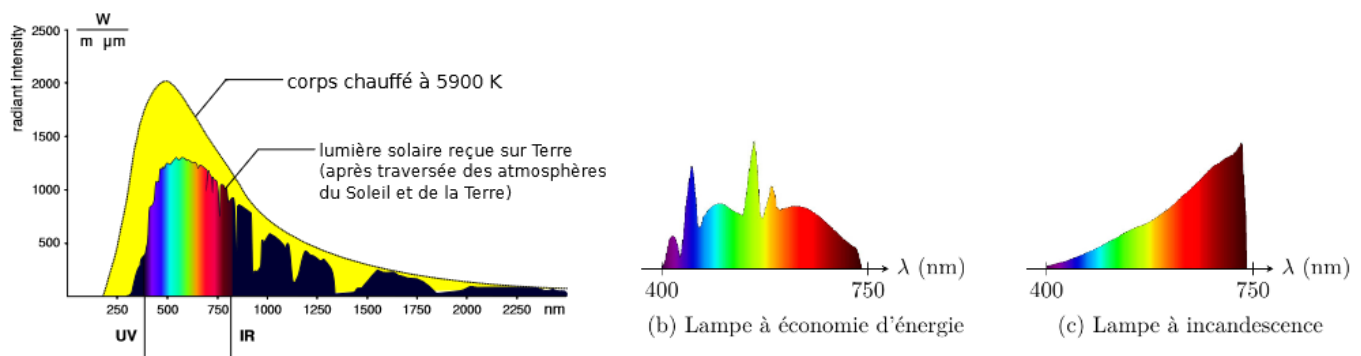


FIGURE 2 – Spectre d'émission de plusieurs sources de lumière blanche : à gauche, celui du Soleil, à droite les spectres d'une LED (b) et d'une lampe à filament (c).

On voit ainsi que le spectre d'émission du Soleil est centré autour d'un rayonnement visible d'environ 500 nm : la plupart de l'énergie du Soleil nous est fournie sous forme de rayonnement visible. Mais il produit également des rayonnements UV dont les plus énergétiques sont filtrés par l'atmosphère, mais certains nous parviennent tout de même, et c'est ce qui nous permet de bronzer ou, à défaut, de développer des cancers de la peau si l'exposition est trop importante.

• Les lampes spectrales

Les lampes spectrales sont constituées d'une ampoule renfermant un certain gaz : les plus courantes sont les lampes à hydrogène (H), à sodium (Na) et à mercure (Hg). Lorsqu'ils sont soumis à une décharge électrique, les atomes du gaz passent dans des niveaux excités et se désexcitent pour retourner dans leur état fondamental en émettant un rayonnement de fréquence $\nu = \Delta E/h$, où ΔE est la différence d'énergie entre le niveau fondamental et le niveau excité et h la constante de Planck. La fréquence de l'onde est donc toujours la même et dépend seulement de la nature du gaz enfermé.

Le spectre émis par une lampe spectrale est donc **discret** par opposition au spectre continu, c'est-à-dire qu'il ne présente que certaines valeurs de fréquence (ou de longueur d'onde). Ci-dessous sont présentées les spectres d'une lampe à vapeur de sodium et à vapeur de mercure.

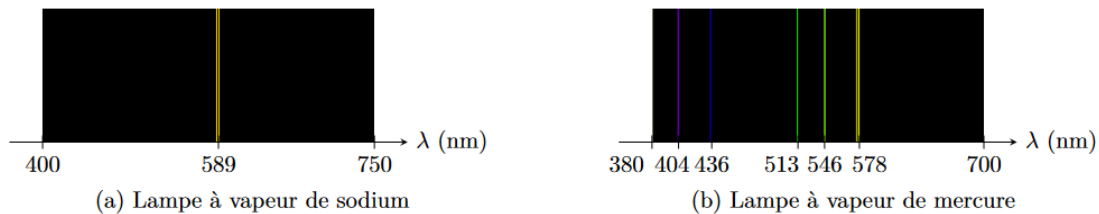


FIGURE 3 – Spectre d'une lampe spectrale : à gauche celui d'une lampe à sodium (Na), et à droite celui d'une lampe à mercure (Hg)

La couleur d'une lampe spectrale est une superposition des différentes raies présentes dans son spectre. La lampe à vapeur de sodium aura une couleur jaune-orangée (c'est ce qu'on utilise dans les lampadaires la nuit) et la lampe à vapeur de mercure sera plutôt bleutée.

• Les lasers et la source ponctuelle monochromatique

Le laser (acronyme pour **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, en français Amplification de la Lumière par Émission Stimulée du Rayonnement) est un appareil permettant d'émettre un rayonnement **directif** (qui se propage dans une seule direction) et **quasi-monochromatique**, c'est-à-dire que son spectre est composé d'une raie unique, très fine, centrée autour d'une certaine longueur d'onde, comme sur la figure ci-dessous ou est présenté le spectre d'un laser rouge, de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (laser rouge).

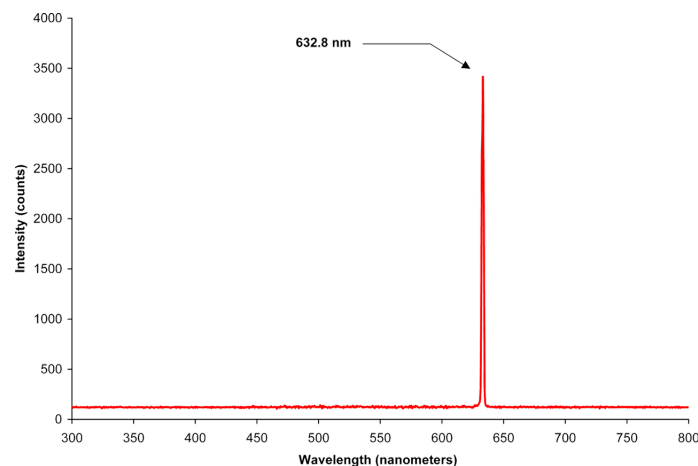


FIGURE 4 – Spectre d'émission d'un laser rouge

Le spectre d'un laser est donc centré autour d'une longueur d'onde, et sa **largeur spectrale** est très faible, ce qui signifie que toute l'énergie lumineuse est contenue dans une zone très piquée autour de cette longueur d'onde. Pour le laser rouge présenté ci-dessus, la largeur spectrale $\Delta\lambda$ est d'environ $0,002 \text{ nm}$.

Le modèle de la source ponctuelle monochromatique

Une **source ponctuelle monochromatique** est une source d'étendue réduite à un point (ponctuelle) et émettant une seule longueur d'onde (monochromatique). Le laser est la source de lumière permettant de s'en approcher au mieux.

III - Théorie de l'optique géométrique

III.A - Modèle de l'optique géométrique

Toute l'optique géométrique qui va suivre, et qui sera traitée plus en détails dans le chapitre suivant, se base sur l'étude de la propagation des **rayons lumineux**.

Notion de rayon lumineux

Le rayon lumineux correspond au trajet suivi par l'énergie lumineuse.

Il convient de donner plusieurs hypothèses et propriétés qui sont à la base de l'optique géométrique.

- ▷ Deux rayons ne peuvent pas se perturber : ils sont **indépendants**. On néglige donc le phénomène d'**interférences**.
- ▷ Les rayons ne sont pas perturbés par les obstacles : on néglige donc le phénomène de **diffraction**.
- ▷ Dans un milieu homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite.

⚙️ Expérience de cours : mise en évidence de la diffraction

Validité de l'optique géométrique

En résumé, l'optique géométrique ne prend pas en compte les effets ondulatoires de la lumière. Elle s'intéresse uniquement à la propagation des rayons lumineux. Il faut donc pour cela que

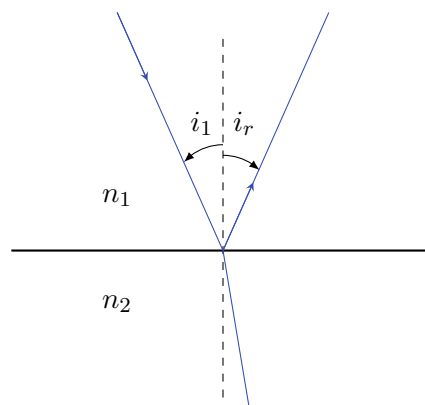
$$\lambda \ll a$$

où a désigne la taille typique des systèmes optiques étudiés, et λ la longueur d'onde du rayonnement mis en jeu. Un bon ordre de grandeur est $a > 1000 \lambda \approx 1 \text{ mm}$.

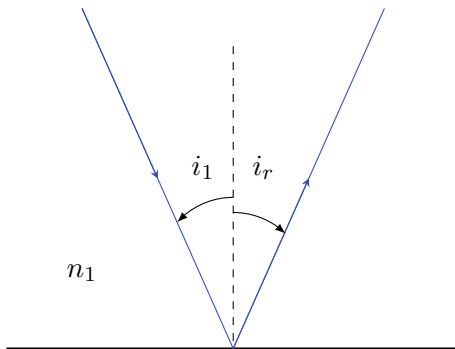
III.B - Lois de Snell-Descartes

Dans un milieu homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite. Que se passe-t-il lorsque celui-ci passe d'un milieu à un autre ? Celui-ci est partiellement **réfléchi**, et partiellement transmis, ou **réfracté**.

On repère tous les angles par rapport à la normale au dioptre !



• Lois de Snell-Descartes pour la réflexion



Lois de la réflexion

- ▶ Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence.
- ▶ L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réflexion i_r sont égaux en valeur absolue :

$$i_1 = -i_r$$

(Si les angles sont non orientés, $i_1 = i_r$)

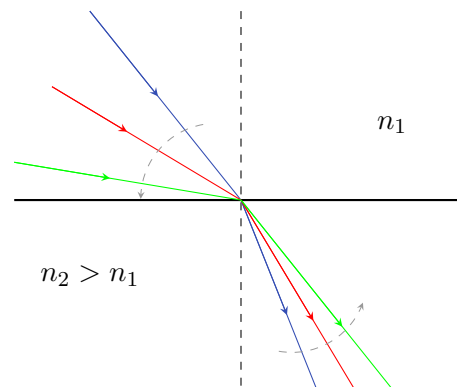
• Lois de Snell-Descartes pour la réfraction

Lois de la réfraction

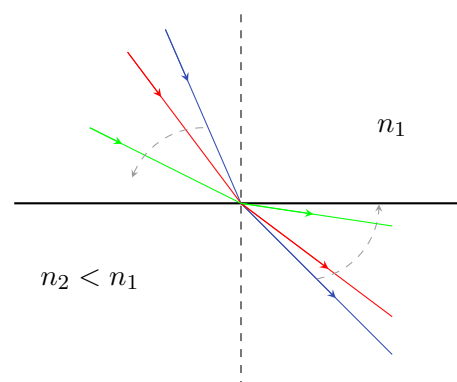
- ▶ Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence.
- ▶ L'angle de réfraction i_2 et l'angle d'incidence i_1 vérifient la relation :

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

▷ Dans le cas où le milieu 2 est **plus réfringent** que le milieu 1 ($n_2 > n_1$), le rayon réfracté se rapproche de la normale.

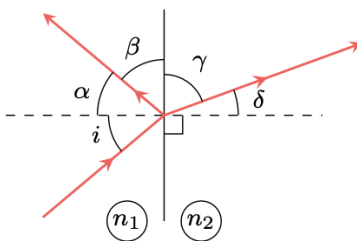


▷ Dans le cas où le milieu 2 est **moins réfringent** que le milieu 1 ($n_2 < n_1$), le rayon réfracté se rapproche de la surface du dioptre.



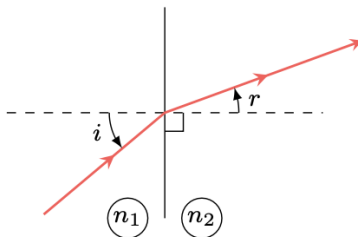
⚙️ Expérience de cours : le crayon "brisé"**EC4 : Utiliser les lois de Snell-Descartes (I)**

On considère un rayon incident arrivant sur un dioptre séparant deux milieux d'indice respectif n_1 et n_2 . Ce rayon fait un angle i avec la normale au dioptre. Tous les angles figurant sur le schéma sont non orientés. Exprimer les angles α , β , γ et δ en fonction de i et/ou de n_1 et n_2 (en radians).



EC5 : Utiliser les lois de Snell-Descartes (II)

On considère un rayon incident arrivant sur un dioptre séparant deux milieux d'indice respectif n_1 et n_2 . Ce rayon fait un angle i avec la normale au dioptre alors que le rayon réfracté fait un angle r . On donne $n_1 = 1,00$ et $n_2 = 1,45$.



1. Pour $i = 24,0^\circ$, que vaut r en degré ?
2. Pour $i = 6,74 \cdot 10^{-1}$ rad, que vaut r en degré ?
3. Pour $r = 15,0^\circ$, que vaut i en degré ?

III.C - Réfraction limite et réflexion totale

- **Angle de réfraction limite**

Considérons un rayon incident se propageant dans un milieu d'indice n_1 arrivant sur un dioptre le séparant d'un milieu d'indice n_2 , avec $n_2 > n_1$.

- **Réflexion totale**

Même situation que précédemment, avec cette fois $n_2 < n_1$.

EC6 : Réflexion totale

On considère un dioptre séparant deux milieux d'indices respectifs $n_1 = 1,5$ et $n_2 = 1,3$. Un rayon lumineux arrive sur ce dioptre en formant un angle i par rapport à sa normale.

1. Pour $i = 44^\circ$, y a-t-il réflexion totale ?
2. Donner, en degrés, l'angle i_l tel qu'il y a réflexion totale si $i > i_l$.

III.D - Limites du modèle de l'optique géométrique

▷ L'optique géométrique néglige tout phénomène ondulatoire : il est donc impossible d'expliquer les interférences ou la diffraction avec cette théorie.

▷ Son domaine de validité est limité : elle est valable "aux faibles longueurs d'onde". Si la taille des systèmes mis en jeu se rapproche de λ , celle-ci devient caduque.

▷ Il est impossible d'avoir des informations sur la quantité de lumière (intensité lumineuse) : on ne s'intéresse qu'au trajet des rayons.