

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

Table des matières

1.	Modèles descriptifs de la lumière :	2
1.1.	Modèle ondulatoire de la lumière :	2
1.1.1	Description d'une onde électromagnétique	2
1.1.2	Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique	3
1.2	Modèle corpusculaire de la lumière :	4
1.2.1	Description	4
1.2.2	Effet photoélectrique :	4
1.2.3	La photo-ionisation :	6
1.3	Source lumineuse :	6
2	Propagation de la lumière dans un milieu matériel	7
2.1	Caractéristiques des milieux matériels étudiés	7
2.2	Rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique :	8
3	Loi de Snell Descartes	9
3.1	Loi de la réflexion : 1 ^{ère} loi de Snell Descartes	9
3.2	Loi de la réfraction : 2 ^{ème} loi de Snell Descartes	11
4	Réfraction limite – Réflexion totale :	13
4.1	Compréhension du phénomène	13
4.2	Réfraction limite :	14
4.3	Réflexion totale :	15
4.4	Zone d'ombre sismique :	17
4.5	Une application : les fibres optiques :	20
	TD de physique n°3 :	23

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, etc.

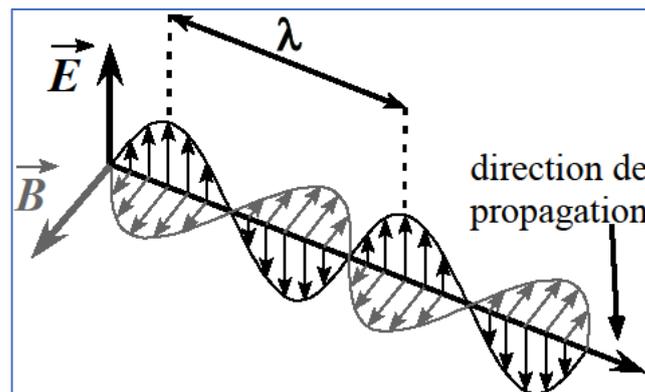
1. Modèles descriptifs de la lumière :

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

1.1. Modèle ondulatoire de la lumière :

1.1.1 Description d'une onde électromagnétique

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique 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).

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).

A retenir :

L'onde électromagnétique possède une double périodicité :

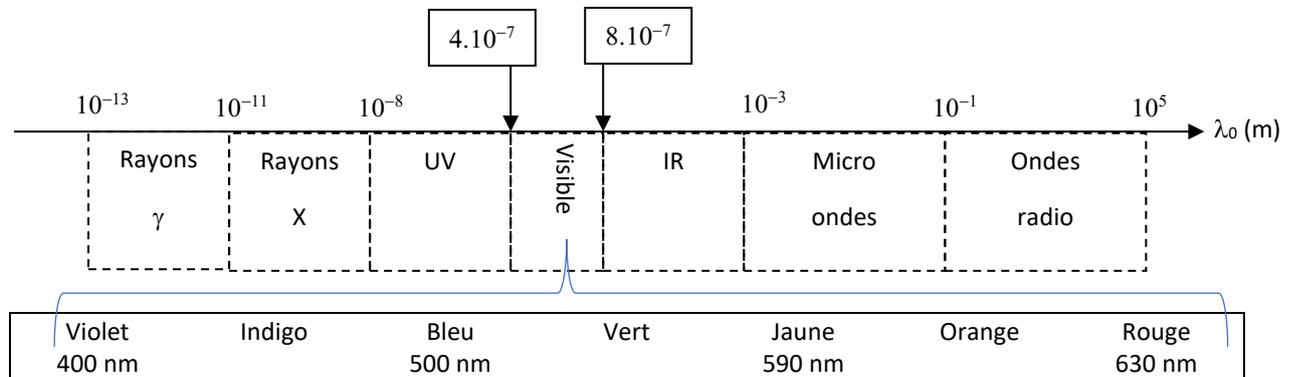
- périodicité temporelle, **indépendante** du milieu traversé : la période $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$
- périodicité spatiale, **dépendante** du milieu traversé : la longueur d'onde $\lambda_{milieu} = c_{milieu} \cdot T$

Notons que la vitesse, c_{milieu} , de l'onde dépend du milieu dans lequel elle se propage, ainsi, pour une période constante, la longueur d'onde dépend du milieu

Rappel : la célérité de la lumière dans le vide : $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s

1.1.2 Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique

Nous pouvons classer des domaines en fonction de la **longueur dans le vide** dans le spectre électromagnétique ci-dessous :



Exemples d'applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux :

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

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

Rayonnement ultra-violet (UV) - Rayonnement visible : 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) : Les utilisations des rayons sont diverses :

- Enregistrés par une caméra thermique, les rayons émis par un corps, permettent la détermination de sa température et sa localisation.
- Grâce à la spectroscopie, 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 : Le rayonnement micro-onde est utilisé pour chauffer les aliments grâce à l'agitation thermique qu'il confère aux molécules d'eau

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

1.2 Modèle corpusculaire de la lumière :

1.2.1 Description

La lumière peut aussi être vue comme un « grain » de lumière, c'est-à-dire un photon : particule sans masse dont l'énergie dépend de la fréquence de l'onde associée.

Pour une radiation de longueur d'onde λ dans le vide et de fréquence ν , chaque photon transporte un **quantum*** d'énergie :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

(formule de Planck)

** un quantum est la plus petite quantité d'une grandeur pouvant être échangée.*

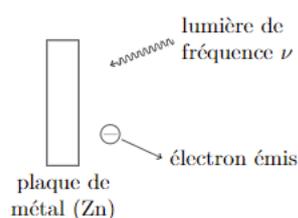
E en joule (J) ν en hertz (Hz) λ en mètre (m)

h est la **constante de Planck** : $h = 6,624 \times 10^{-34}$ J.s

1.2.2 Effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron.

Principe



Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs fixes entre lesquels circulent des électrons libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau. Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie W_s , appelée travail d'extraction.

Exemple : Une plaque de zinc est éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de Hg, lumière riche en UV.

La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal : c'est l'effet photoélectrique.

Lors de l'interaction photon-électron, trois cas sont envisageables :

- 1) L'énergie du photon est égale au travail d'extraction de l'électron. $h\nu = W_s$. L'énergie du photon suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal. La fréquence du photon est égale à la fréquence de seuil du métal : $\nu_s = W_s/h$.
- 2) L'énergie du photon est inférieure au travail d'extraction $h\nu < W_s$. L'électron reste prisonnier du réseau métallique.
- 3) L'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction $h\nu > W_s$. Une partie de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique ; l'électron emporte l'excédent sous forme d'énergie cinétique $E_c = h\nu - W_s$.

Application : la cellule photovoltaïque

Voir principe de fonctionnement dans le document ci-après.

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p : le matériau n devient positif et le matériau p devient négatif : un champ électrique est donc créé entre les 2 zones.

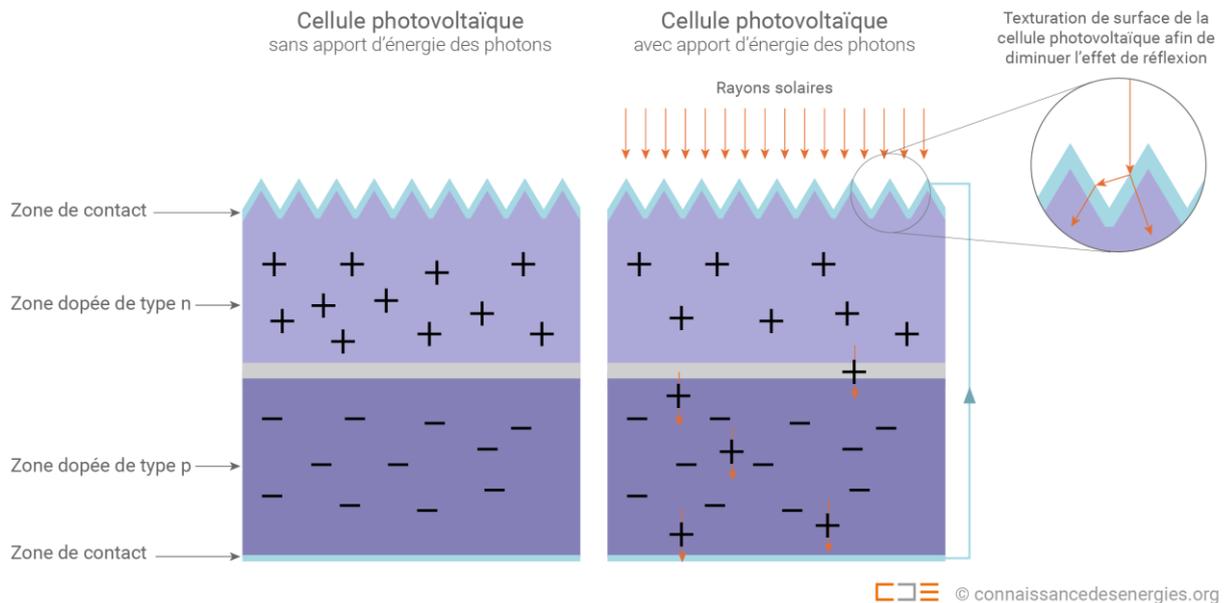


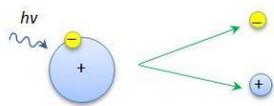
Figure : Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche p. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

Explications plus précises : <https://www.youtube.com/watch?v=kKUGHCxtQzk>

1.2.3 La photo-ionisation :

Principe :



Dans un gaz soumis à un rayonnement ultraviolet, une molécule peut absorber un photon ayant une énergie **supérieure à son énergie d'ionisation** : la molécule perd un électron et devient **un cation**. Cet effet se produit naturellement dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement solaire.

Application : détecteur à photoionisation pour analyser la composition d'un gaz.

Le gaz est bombardé par des photons, ce qui permet d'arracher des électrons aux molécules du gaz, les transformant ainsi en cations. Le gaz est alors ionisé, ce qui permet l'établissement d'un courant électrique, qui est le signal de sortie. Ce courant est alors amplifié et affiché sur un ampèremètre

Un détecteur à photo-ionisation permet de connaître la composition d'un gaz immédiatement et de la contrôler en continu. Les détecteurs à photo-ionisation sont largement employés dans l'industrie et l'armée.

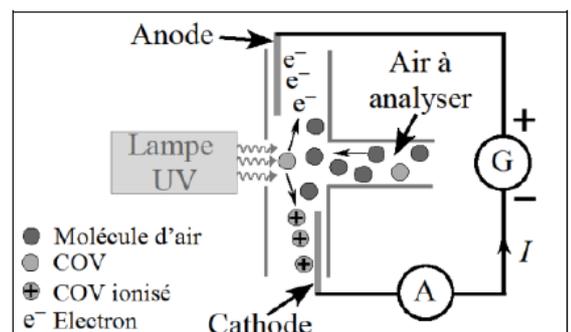


Figure 1 : Schéma d'un détecteur à photo-ionisation de COV (composé organique volatil)

1.3 Source lumineuse :

Source lumineuse primaire : Emission de lumière intrinsèque

- Sources à incandescence : corps chaud qui émet un rayonnement dans le visible (soleil, lampe à filament)
- Sources à luminescences : sous l'effet d'une excitation (atomique par exemple), une vapeur atomique s'excite puis émet de la lumière en se désexcitant. (lampe à vapeur de mercure, de sodium ou plus récemment les LED)
- Le LASER : source lumineuse basée sur l'amplification d'une émission stimulée de rayonnement (contrairement à des émissions spontanées). Il produit un faisceau très directif, monochromatique et de forte intensité lumineuse.

Source lumineuse secondaire : Tout objet recevant de la lumière peut donner lieu à 3 phénomènes

- Transmission : l'objet est traversé par la lumière
- Diffusion : l'objet renvoie la lumière dans toutes les directions
- Absorption : si il absorbe le rayonnement.

Un objet est lumineux s'il diffuse une partie de la lumière qu'il reçoit d'une source primaire.

2 Propagation de la lumière dans un milieu matériel

2.1 Caractéristiques des milieux matériels étudiés

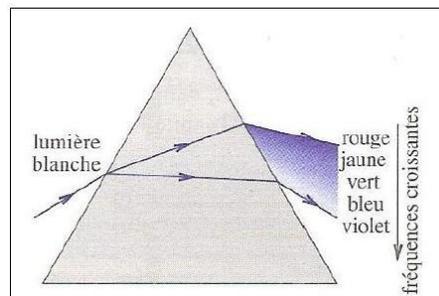
Dans la suite, ce cours se limitera à l'étude des **milieux homogènes transparents et isotropes (MHTI)**.

- Transparent : le terme transparent fait référence ici à un milieu non absorbant.
- Homogène : les propriétés du milieu sont les mêmes en tout point de l'espace.
- Isotrope : les propriétés du milieu sont les mêmes dans toutes les directions.

Indice de réfraction d'un milieu :

Lorsque la lumière se propage dans un milieu transparent (air, eau, verre...), elle interagit avec celui-ci. Il peut changer sa vitesse.

Dans certains milieux, tel le verre, la vitesse est plus importante pour le rouge que pour le bleu. Ce phénomène est appelé **dispersion**. Il est utilisé, depuis Newton, dans les prismes, pour décomposer la lumière.



Expérimentalement, on constate que la lumière va moins vite dans les MHTI.

A retenir :

On définit l'indice de réfraction d'un milieu par le rapport de la vitesse de l'onde dans le vide c_0 sur la vitesse de l'onde dans le milieu c_{milieu} :

$$n = \frac{c_0}{c_{milieu}}$$

Vocabulaire : Le milieu est d'autant plus **réfringent** que n augmente.

La vitesse dans un milieu HTI étant toujours inférieure à celle dans le vide, n est toujours supérieur à 1.

L'indice optique d'un milieu dépend de la fréquence de la vibration qui s'y propage, un tel milieu est appelé milieu dispersif.

Si on transpose la définition de la longueur d'onde d'une radiation dans le vide à un milieu dispersif, on voit que cette longueur d'onde dépend du milieu :

$$\lambda_{milieu} = c_{milieu} \times T = \frac{c_0}{n} \times T = \frac{\lambda_{vide}}{n}$$

Ainsi, $\lambda_{milieu} < \lambda_{vide}$: On dit qu'un milieu transparent comprime les longueurs d'onde.

Pour éviter la profusion des longueurs d'ondes, on choisit la longueur d'onde dans le vide pour définir une onde lumineuse.

Loi empirique de Cauchy :

Pour la propagation de la lumière visible dans la plupart des milieux T.H.I, Cauchy propose une modélisation qui permet d'illustrer la dépendance de l'indice du milieu avec la longueur d'onde :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad \text{avec A et B des constantes positives propres à chaque matériau.}$$

Avec λ longueur d'onde de la lumière dans le vide

Indice du milieu pour la radiation jaune du sodium ($\lambda_{\text{vide}} = 589 \text{ nm}$)

Substance	Air	Eau	Verre
Indice de réfraction	1,000 29 (à P=1 bar et T=0°C)	1,33	≈ 1,6

Dans l'air, la variation de l'indice de réfraction en fonction de la fréquence est très faible, ainsi on retiendra $n_{\text{air}} \approx 1$, quelle que soit la fréquence.

Pour les ondes lumineuses, l'air est donc assimilable au vide

2.2 Rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique :

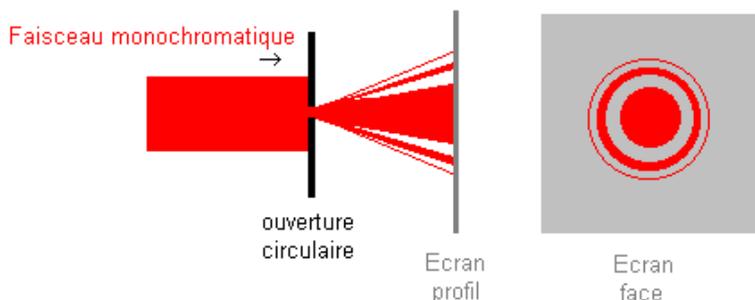
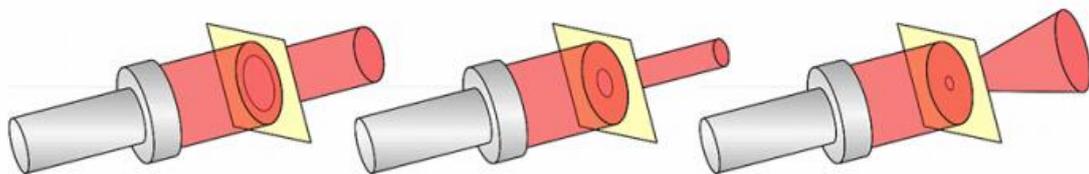
Un rayon lumineux n'a pas d'existence physique réelle et représente le cas idéal où il serait possible de sélectionner un faisceau parallèle infiniment fin de lumière.

Une manière d'approcher la notion de rayon lumineux par l'expérience est l'utilisation d'un laser dont le faisceau est très fin.

Pouvons-nous réduire de la taille de celui-ci afin de n'obtenir qu'un seul rayon lumineux ?

Pour cela, plaçons un diaphragme devant ce premier. Si on diminue le rayon de celui-ci, le faisceau voit son diamètre diminuer. On observe sur un écran que la tache que fait le laser diminue, mais reste uniformément éclairée.

Mais lorsque le rayon du diaphragme atteint des valeurs de l'ordre du micromètre, le pinceau se met à diverger, la tache grossit et on voit apparaître des anneaux autour de celle-ci. Nous venons de mettre en évidence le phénomène de diffraction.



Tache d'Airy :

Image de diffraction obtenue lorsque le rayon du diaphragme r devient proche de la longueur λ d'onde du rayonnement lumineux : $r \leq \lambda$.

On est à la limite du modèle de l'optique géométrique

A retenir :

Modèle de l'optique géométrique

La lumière se propage rectilignement dans un MHTI

La notion de rayon lumineux est illustrée par un pinceau lumineux cylindrique obtenu avec un petit diaphragme de rayon r (tel que $r \gg \lambda$)

Le rayon lumineux caractérise le transport « rectiligne » de l'énergie lumineuse dans un MHTI.

Principe de Fermat (ou des moindres temps) :

Le chemin suivi par la lumière correspond au chemin le plus court en temps.

Dans un milieu homogène et isotrope, les rayons lumineux sont des droites.

Principe de retour inverse :

Si on inverse le sens de propagation, la lumière prendra le même chemin en sens inverse.

Que la lumière se propage de A vers B ou de B vers A, elle emprunte la même trajectoire (A et B sont sur le même rayon lumineux).

Indépendance des rayons lumineux

Il n'y a pas d'interaction entre deux rayons lumineux, un rayon ne peut pas en dévier un autre.

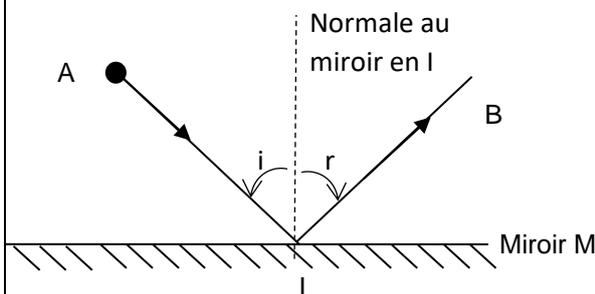
3 Loi de Snell Descartes

3.1 Loi de la réflexion : 1^{ère} loi de Snell Descartes

A retenir :

Un miroir est une surface qui réfléchit totalement la lumière.

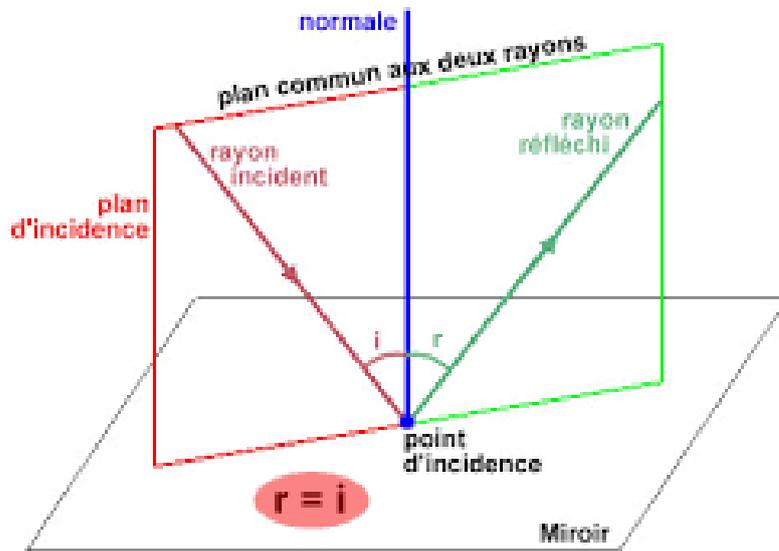
Soit un rayon incident issu d'un objet « réel » A et parvenant au point I d'un miroir plan (M) :



Le rayon réfléchi IB appartient au **plan d'incidence** défini par le rayon incident AI et la normale au miroir.

L'angle de réflexion r est égal en valeur absolue à l'angle d'incidence i : $i = -r$ ou $|i| = |r|$

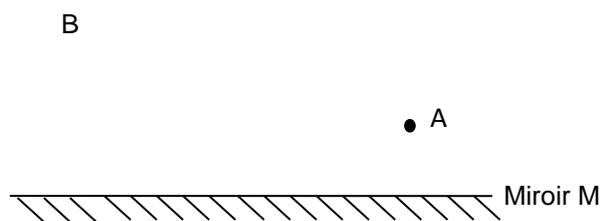
Plan d'incidence : plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre.



Capacité n°1 : image à travers un miroir plan (Utiliser la première loi de Snell Descartes)

L'œil d'un observateur en B, regarde une source ponctuelle fixe en A, à travers un miroir plan. Tracer deux rayons issus de la source ponctuelle associés à leur rayon réfléchi : les deux rayons réfléchis convergent-ils à la sortie du miroir ?

Où se trouve l'image de la source A, sachant qu'elle est obtenue par l'intersection des rayons réfléchis ?



3.2 Loi de la réfraction : 2^{ème} loi de Snell Descartes

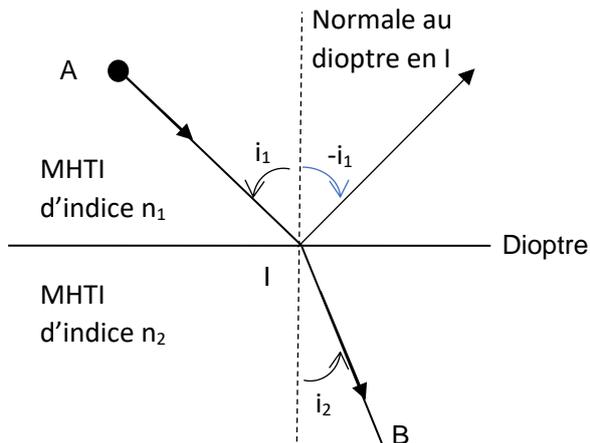
A retenir :

Un **dioptre** désigne une surface séparant deux MHTI d'indices différents n_1 et n_2 .

Considérons un rayon incident, issu de A, se propageant dans un MHTI d'indice n_1 .

Au point I du dioptre plan, en général, on observe :

- un rayon réfléchi
- un rayon réfracté

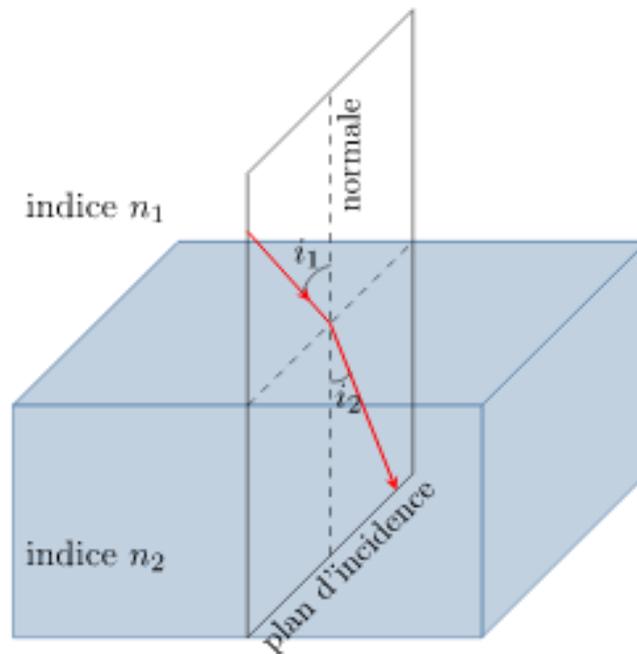


Le rayon réfracté IB appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident AI et la normale au dioptre.

L'angle de réfraction i_2 est donné par la relation :

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

Plan d'incidence :



Capacité n°2 : Utiliser la deuxième loi de Snell Descartes

Un rayon lumineux se propageant dans l'air ($n_1 = 1,00$) traverse la surface d'un plan d'eau ($n_2 = 1,33$)

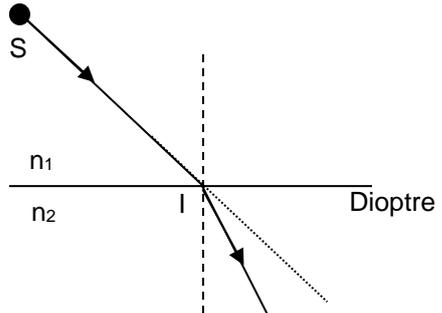
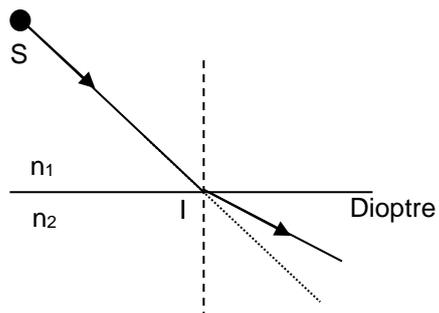
- Sachant que ce rayon incident fait un angle de 50° avec le plan horizontal, quel est l'angle de réfraction ?

- Quel est l'angle de déviation D du rayon incident à la traversée du dioptre plan ?

- Un autre rayon incident parallèle au précédent heurte le plan d'eau à un endroit où se trouve une grosse flaque d'huile. La déviation est multipliée par 1,6. Quel est l'indice de l'huile ?

4 Réfraction limite – Réflexion totale :

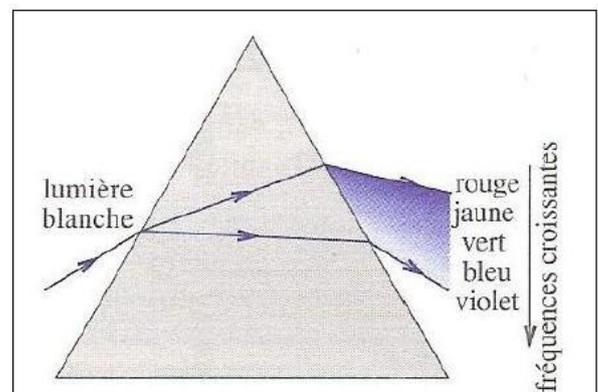
4.1 Compréhension du phénomène

<p>Passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu plus réfringent d'indice $n_2 > n_1$.</p> $\frac{n_1}{n_2} < 1$ $\frac{\sin i_2}{\sin i_1} < 1$ $\sin i_2 < \sin i_1$ $i_2 < i_1$ <p>Le rayon réfracté se rapproche de la normale.</p> 	<p>Passage du milieu d'un milieu d'indice n_1 à un milieu moins réfringent d'indice $n_2 < n_1$.</p> $\frac{n_1}{n_2} > 1$ $\frac{\sin i_2}{\sin i_1} > 1$ $\sin i_2 > \sin i_1$ $i_2 > i_1$ <p>Le rayon réfracté s'éloigne de la normale.</p> 
--	---

Retour sur la dispersion de la lumière blanche :

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. (phénomène de dispersion)



4.2 Réfraction limite :

Le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu plus réfringent d'indice $n_2 > n_1$.

L'angle i_1 peut varier de 0 à $\frac{\pi}{2}$:

nous noterons : l'angle d'incidence minimum par rapport à la normale $i_1^{min} =$

l'angle d'incidence maximum par rapport à la normale $i_1^{max} =$

nous pouvons calculer les angles de réfraction limite correspondant :

si $i_1^{min} =$

Alors

Alors

Alors $i_2 =$

si $i_1^{max} =$

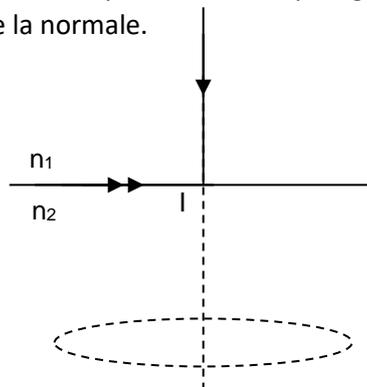
Alors

Alors

Alors $i_2 =$

Remarquons que le rayon incident d'angle le plus faible avec la normale deviendra le rayon réfracté d'angle le plus faible avec la normale.

Remarquons aussi le corolaire : le rayon incident de plus grand angle avec la normale deviendra le rayon réfracté de plus grand angle la normale.



4.3 Réflexion totale :

Le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu moins réfringent d'indice $n_2 < n_1$.

Nous allons effectuer le même raisonnement qu'au 4.2. mais en partant du rayon réfracté

L'angle i_2 peut varier de 0 à $\frac{\pi}{2}$:

nous noterons : l'angle de réfraction minimum par rapport à la normale $i_2^{min} = 0$

l'angle de réfraction maximum par rapport à la normale $i_2^{max} = \frac{\pi}{2}$

nous pouvons calculer les angles de réfraction limite correspondant :

$$\text{si } i_2^{min} = 0$$

$$\text{Alors } n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2^{min} = 0$$

$$\text{Alors } \sin i_1 = 0$$

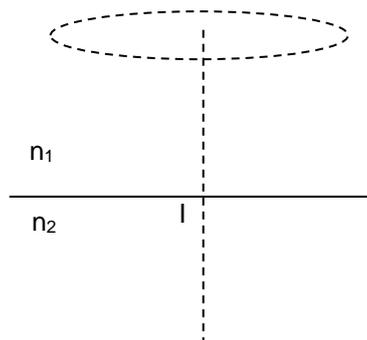
$$\text{Alors } i_1 = 0$$

$$\text{si } i_2^{max} = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Alors } n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2^{max} = n_2$$

$$\text{Alors } \sin i_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{Alors } i_1 = \text{Arcsin}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

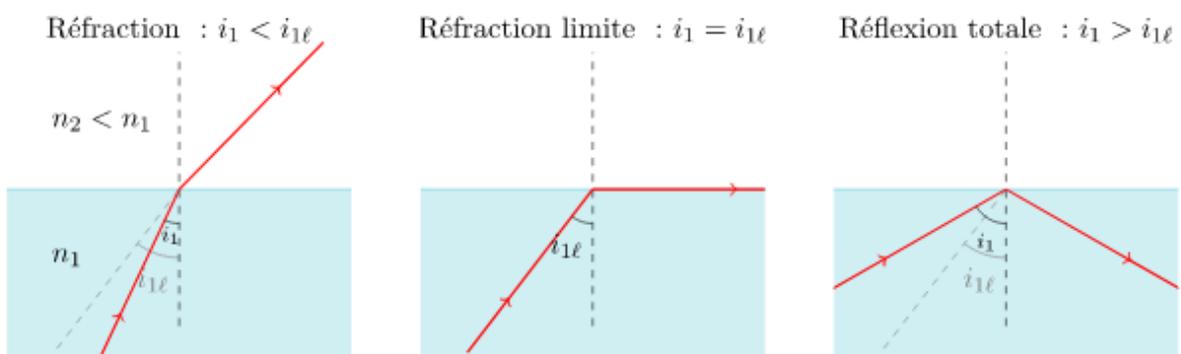


A retenir :

Si le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu moins réfringent d'indice $n_2 < n_1$.

Le phénomène de réflexion totale peut être observé.

On définit un angle d'incidence limite : $i_\ell = \text{Arcsin}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ tel que :



Capacité n°3 : Réflexion totale

Un rayon lumineux se propage dans un tube de plexiglas (verre synthétique) d'indice $n_1 = 1,50$.

Il rencontre l'interface avec l'air sous l'incidence par rapport à la normale de 50° . On constate que ce rayon est entièrement réfléchi. Justifier ce phénomène.

Désormais, ce tube de plexiglas est placé dans l'huile de clous de girofle, d'indice $n_2 = 1,56$. Le phénomène précédent peut-il se produire ?

4.4 Zone d'ombre sismique :

L'étude d'un sismogramme après un séisme nous montre deux « trains d'ondes ».

Celles qui sont enregistrées en premier par le sismographe sont celles qui sont arrivées le plus rapidement du foyer du séisme. On les appelle les **ondes P** (premières). Le second train d'onde représente les **ondes S** (secondes), plus lentes à se propager.

On enregistre également un troisième train d'onde, encore plus lentes, appelées les **ondes L**.

Ces ondes ont les propriétés suivantes :

Ondes P : les plus rapides. Ondes longitudinales de compression et de décompression se déplaçant dans les solides et les fluides ;

Ondes S : les secondaires. Ondes transversales de cisaillement se déplaçant dans les solides (pas en milieu liquide) ;

Ondes L : ondes de surface. Les moins rapides, correspondent à un mouvement de torsion ;

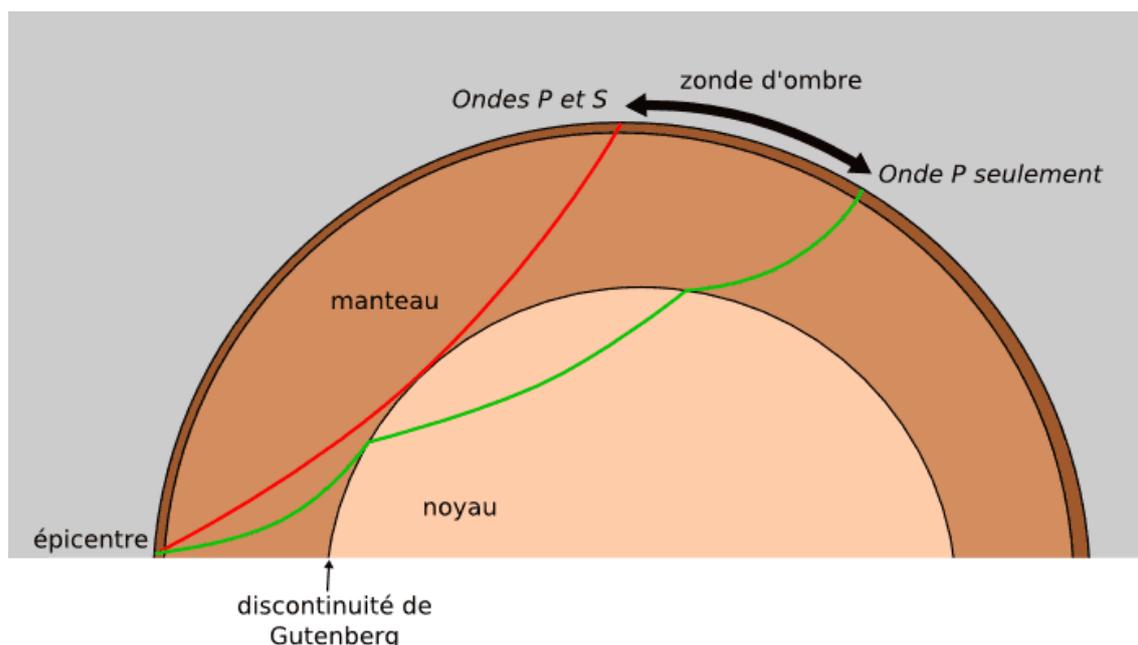
La zone d'ombre :

Les stations situées jusqu'à 11500 km (105°) de l'épicentre d'un séisme enregistrent des ondes P et S directes. Au-delà de cette limite et jusqu'à 14500 km (142°), il existe ce qu'on appelle la zone d'ombre, qui est une zone où les stations n'enregistrent pas les ondes dues au séisme. Ensuite, seules les ondes P réapparaissent.

Cette zone d'ombre est due au fait que les ondes sont réfractées deux fois sur une discontinuité interne. Les calculs amènent à penser que cette discontinuité est située à 2900 km de profondeur, elle est appelée discontinuité de Gutenberg, séparant le manteau du noyau.

Le fait que les ondes S ne réapparaissent pas conduit à conclure que ce noyau est liquide (les ondes S ne se propagent pas dans les liquides).

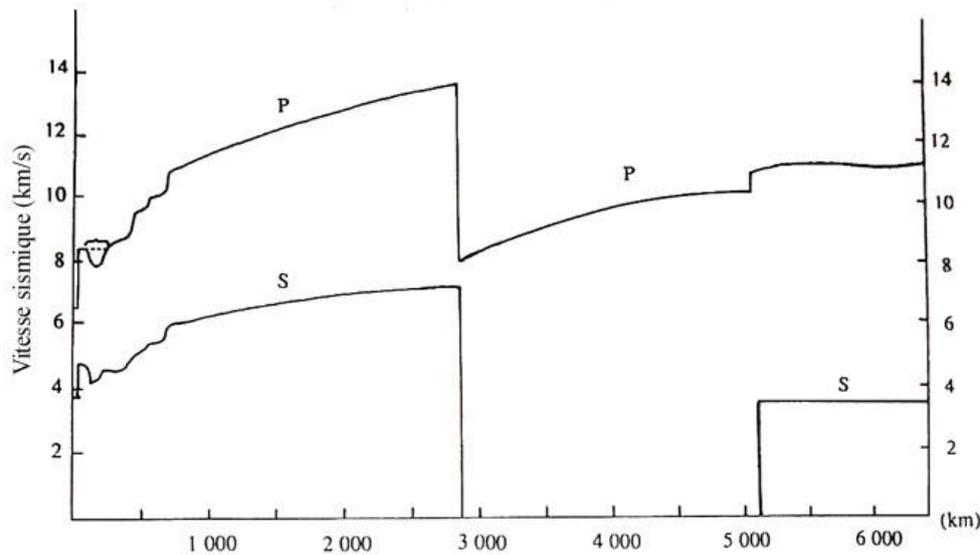
La zone d'ombre



Simplification du phénomène (vision physicienne) :

Etude des vitesses des ondes en fonction de la profondeur :

La courbe suivante présente la vitesse des ondes P et S en fonction de la profondeur :



Toutes les stations d'observations à la surface du globe enregistrent le même type de courbe. On peut donc penser que **le globe est composé d'enveloppes concentriques**.

On peut remarquer trois « cassures » nettes dans les courbes :

- au tout début de la courbe (entre 10 et 70 km de profondeur) augmentation très rapide de la vitesse,
- à 2 900 km de profondeur, grande chute de la vitesse,
- à 5 400 km, augmentation brutale.

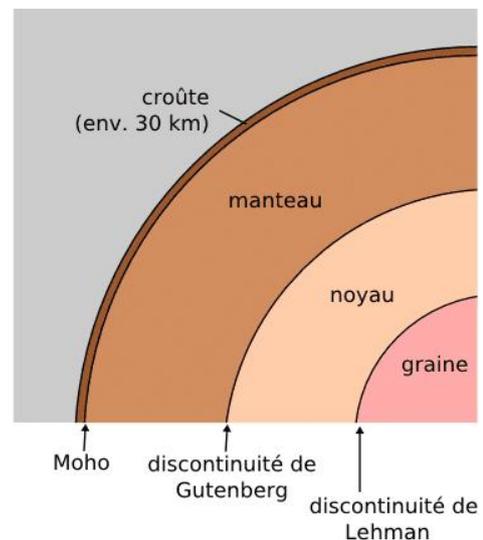
Ces cassures mettent en évidence **3 discontinuités** dans la constitution de la terre :

- **Le Moho** entre 10 et 70 km de profondeur,
- **la discontinuité de Gutenberg** à 2900 km,
- **la discontinuité de Lehman** à 5400 km.

Ces 3 discontinuités délimitent **4 enveloppes concentriques** constituant le globe :

- **la croûte,**
- **la manteau,**
- **le noyau,**
- **la graine.**

Coupe transversale de la terre



Les ondes S ne se propagent pas dans le noyau, c'est donc certainement un milieu liquide.

On distingue **3 zones dans le manteau** :

- le manteau supérieur (avant 100 km de profondeur)
- l'asthénosphère (entre 100 et 300 km)
- le manteau inférieur.

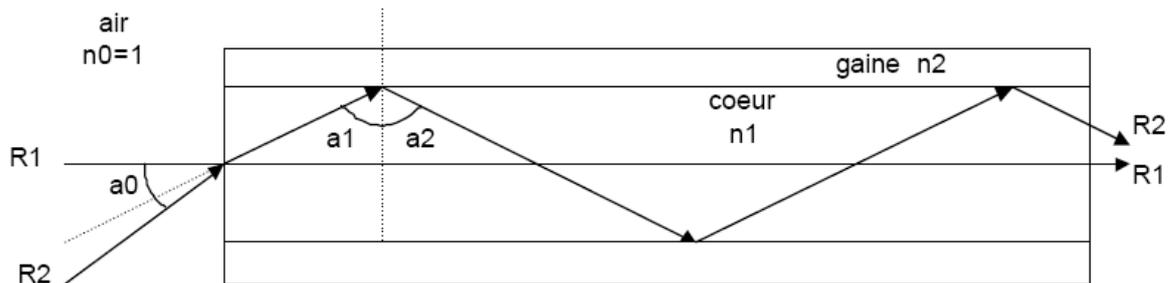
La croûte et le manteau supérieur sont cassants. On nomme ces deux couches **la lithosphère**. L'asthénosphère est plus ductile, et peut donc se déformer sans casser. L'asthénosphère et la lithosphère sont séparées par **la discontinuité LVZ** (Low Velocity Zone, zone des faibles vitesses).

4.5 Une application : les fibres optiques :

Intérêt : La fibre optique est un dispositif qui piège la lumière, et permet ainsi la transmission de signaux lumineux sur de longues distances.

Principe du guidage :

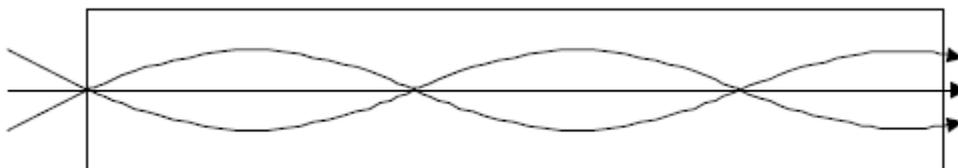
Une fibre optique est formée de deux milieux transparents : le "cœur", cylindrique, d'indice (n_1) constant ou variable, entouré par la "gaine", d'indice (n_2) plus petit. L'ensemble est entouré d'une enveloppe protectrice opaque.



Si le phénomène de réflexion totale se produit à l'interface entre le cœur de la fibre et la gaine, la lumière peut être guidée tout au long de celle-ci, avec très peu d'atténuation.

Autre type de fibre optique : à gradient d'indice

L'indice diminue progressivement du centre à l'extérieur (pas de saut entre cœur et gaine) : Les rayons sinusoïdaux parcourent un chemin géométrique dans le cœur plus grand que celui se propageant sur l'axe. Par contre, ils se propagent plus vite car ils voient un indice en moyenne plus faible. La différence de temps de parcours entre deux rayons est donc moindre que dans une fibre à saut d'indice., ce qui réduit la dispersion à l'arrivée, donc permet un débit élevé.



Application en milieu médical : l'endoscope

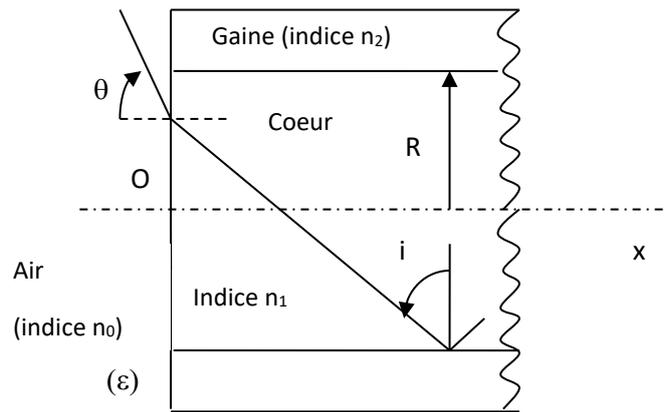


Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibre optique qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et ce, en temps réel. L'endoscope est particulièrement utilisé en gastro-entérologie (concernant l'appareil digestifs et ses maladies).

Capacité n°4 : Fibre optique

Une fibre optique cylindrique d'axe (Ox) est constituée d'un cœur transparente, homogène et isotrope, d'indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine, elle aussi transparente, homogène et isotrope, dont l'indice de réfraction n_2 est inférieur à n_1 . On désigne par R le rayon du cœur.

Soit un rayon lumineux situé dans le plan contenant l'axe (Ox)



a) Montrer que le rayon lumineux ne peut se propager à l'intérieur de la fibre que si l'angle d'incidence i est supérieur à un angle i_0 que l'on déterminera en fonction de n_1 et n_2 .

b) La face d'entrée (ϵ) de la fibre est plane et normale à l'axe (Ox). On désigne par θ l'angle que fait dans l'air (d'indice n_0) le rayon R avec la normale à (ϵ).

Déterminer en fonction de n_1 , n_2 et n_0 , l'angle θ_0 correspondant à i_0 .

On donne : $n_0 = 1,00$, $n_1 = 1,50$ et $\frac{n_2}{n_1} = 0,99$.

Calculer i_0 et θ_0 .

c) L'atténuation de la lumière dans les fibres optiques est due à l'absorption et à la diffusion par le matériau constitutif du cœur et par ses impuretés (Fe^{2+} , Cu^{2+} , OH^-). Elle se mesure en décibels par km :

$A_{dB/km} = \frac{10}{l(km)} \log \left(\frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right)$ où Φ_1 et Φ_2 désignent les flux lumineux dans les plans de front successifs 1 et 2 distants de l .

On parvient couramment à réaliser des fibres dans lesquelles le flux, après un parcours de 50 km, représente 10% du flux incident. Calculer l'atténuation de telles fibres.

Ex. 5 : question ouverte : la pièce invisible (difficile)

Une pièce est mise au fond d'un mug vide et reste invisible pour un observateur. On demande à cet observateur de trouver une méthode pour visualiser au moins un petit morceau de la pièce, sans déplacer le mug. Il dispose pour cela d'un peu d'eau. L'observateur décide de remplir le mug d'eau, et visualise en effet la pièce.



Dans un premier temps il vous est demandé d'expliquer qualitativement le phénomène (une modélisation des différentes situations à l'aide d'un schéma est la bienvenue).

Dans un second temps il vous est demandé d'évaluer la hauteur minimale d'eau qu'il faut verser pour observer la pièce.

Aide : pour simplifier les calculs si nécessaire on pourra utiliser l'approximation des petits angles :
Si $i \ll 1 \text{ rad}$, alors $\sin i \approx \tan i \approx i$, avec i en radians.

Réponses :

Ex.2 : 2. $\frac{OP}{OP'} \approx \frac{4}{3}$ soit $PP' = 20\text{cm}$

Ex.3 : 2. $T \approx 0,025\text{mm}$

FORMULAIRE

- **La lumière est une onde :**

L'onde électromagnétique possède une double périodicité :

- périodicité temporelle, **indépendante** du milieu traversé : la période $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$
- périodicité spatiale, **dépendante** du milieu traversé : la longueur d'onde $\lambda_{\text{milieu}} = c_{\text{milieu}} \cdot T$

Notons que la vitesse, c_{milieu} , de l'onde dépend du milieu dans lequel elle se propage, ainsi, pour une période constante, la longueur d'onde dépend du milieu

- **Indice du milieu :**

On définit l'indice de réfraction d'un milieu par le rapport de la vitesse de l'onde dans le vide c_0 sur la vitesse de l'onde dans le milieu c_{milieu} :

$$n = \frac{c_0}{c_{\text{milieu}}}$$

- **Modèle de l'optique géométrique:**

La lumière se propage rectilignement dans un MHTI

La notion de rayon lumineux est illustrée par un pinceau lumineux cylindrique obtenu avec un petit diaphragme de rayon r (tel que $r \gg \lambda$)

Le rayon lumineux caractérise le transport « rectiligne » de l'énergie lumineuse dans un MHTI.

Principe de Fermat (ou des moindres temps) :

Le chemin suivi par la lumière correspond au chemin le plus court en temps.

Dans un milieu homogène et isotrope, les rayons lumineux sont des droites.

Principe de retour inverse :

Si on inverse le sens de propagation, la lumière prendra le même chemin en sens inverse.

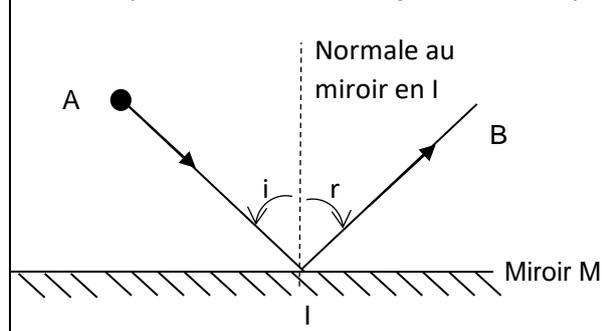
Que la lumière se propage de A vers B ou de B vers A, elle emprunte la même trajectoire (A et B sont sur le même rayon lumineux).

Indépendance des rayons lumineux

Il n'y a pas d'interaction entre deux rayons lumineux, un rayon ne peut pas en dévier un autre.

- **Réflexion :**

Soit un rayon incident issu d'un objet « réel » A et parvenant au point I d'un miroir plan (M) :



Le rayon réfléchi IB appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident AI et la normale au miroir.

L'angle de réflexion r est égal en valeur absolue à l'angle d'incidence i : $i = -r$ ou $|i| = |r|$

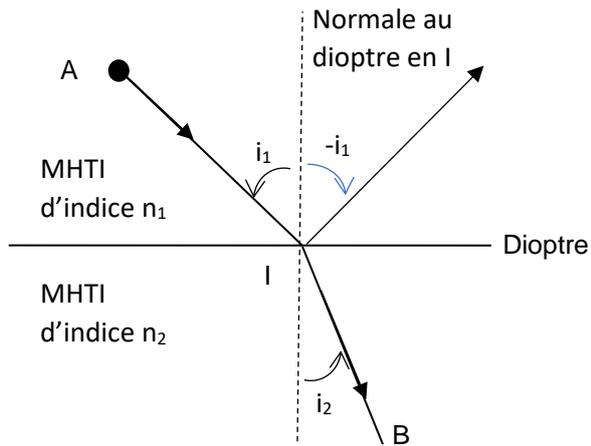
• Réfraction :

Un dioptre désigne une surface séparant deux MHTI d'indices différents n_1 et n_2 .

Considérons un rayon incident, issu de A, se propageant dans un MHTI d'indice n_1 .

Au point I du dioptre plan, en général, on observe :

- un rayon réfléchi
- un rayon réfracté



Le rayon réfracté IB appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident AI et la normale au dioptre.

L'angle de réfraction i_2 est donné par la relation :

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