

CHAPITRE 6A

Modèle de l'optique géométrique

La théorie de l'**optique géométrique** repose sur la modélisation de la lumière par un ensemble de **rayons lumineux**, qui matérialisent sa trajectoire. Elle précise comment construire géométriquement ces rayons, en particulier après qu'ils aient atteint l'interface entre deux milieux : on s'appuie alors sur les **lois de Snell-Descartes**.

Comme l'optique géométrique ne prend pas en compte la nature de la lumière (ondulatoire ou corpusculaire), il faut veiller quand on l'applique à rester dans le cadre de son domaine de validité, où cette nature n'a pas d'importance. L'**optique ondulatoire** (ou optique physique) a un cadre d'application plus vaste, mais est plus compliquée.

1 Hypothèses de travail

1.1 Principaux concepts de l'optique géométrique

Dans le cadre de l'optique géométrique, la propagation de la lumière est modélisée par un ensemble de **rayons lumineux**. Chaque rayon est une trajectoire courbe décrite par la lumière pour aller d'un point à un autre, surmontée d'une flèche qui indique le sens de propagation.

Dans les **milieux transparents** (qui n'absorbent pas la lumière) et **homogènes** (dont les propriétés sont les mêmes en tout point), les rayons lumineux sont des segments de droite. Cela suppose l'absence de **diffraction** : tous les obstacles ont des dimensions nettement supérieures à la longueur d'onde.

On appelle **source lumineuse** un système qui produit de la lumière (source primaire) ou qui diffuse la lumière qui l'atteint (source secondaire). Dans le cadre du modèle de la **source lumineuse ponctuelle**, la source est représentée par un point. Nous supposons aussi que l'émission est **isotrope** : elle se fait de la même manière dans toutes les directions.

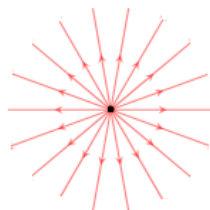
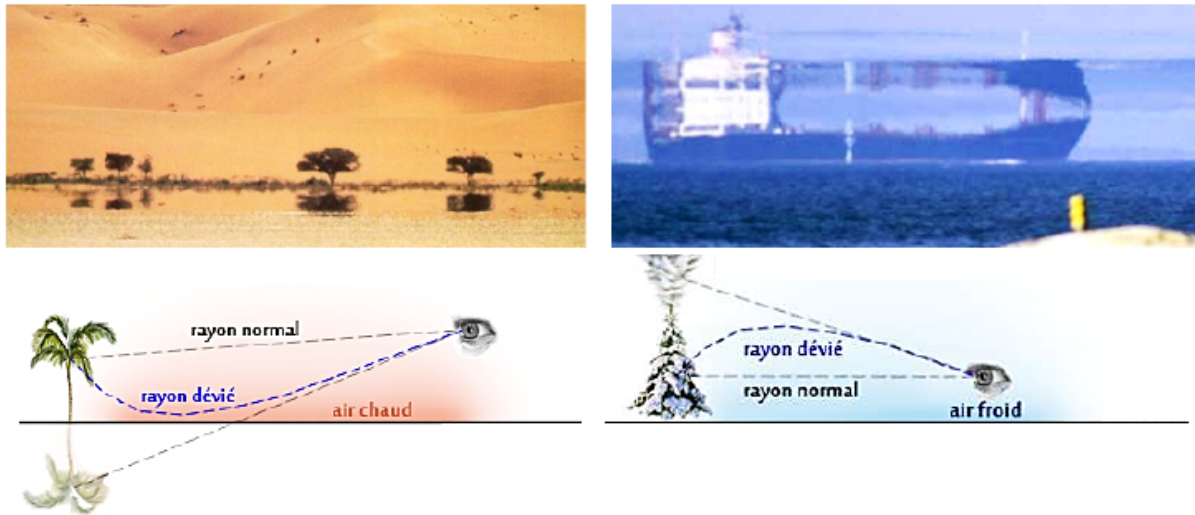


FIGURE 1 – Émission isotrope de rayons lumineux par une source ponctuelle

Une source étendue peut être modélisée par un ensemble de sources ponctuelles. Les rayons lumineux qui en sont issus sont supposés indépendants les uns des autres (ils n'interagissent pas), ce qui suppose qu'il n'y a pas d'**interférences**.

Si un rayon lumineux atteint une interface entre deux milieux transparents et homogènes, la lumière est déviée. Cette déviation est décrite par les lois de Snell-Descartes, décrites plus bas, qui font également partie du modèle de l'optique géométrique.

Dans un milieu inhomogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite. Les rayons lumineux sont courbés, comme illustré ci-dessous dans le cas d'un mirage.



1.2 Approfondissement du modèle

Il est d'usage d'incorporer dans le modèle de l'optique géométrique quelques éléments supplémentaires issus de l'expérience, qui ne peuvent s'interpréter que dans le cadre de théories plus évoluées.

1.2.1 Spectre d'une source lumineuse

Une source lumineuse est caractérisée par son **spectre**, obtenu grâce à un dispositif dispersif (un **prisme** ou un **réseau optique**) qui sépare spatialement les radiations monochromatiques et observé sur un écran ou enregistré par un capteur.

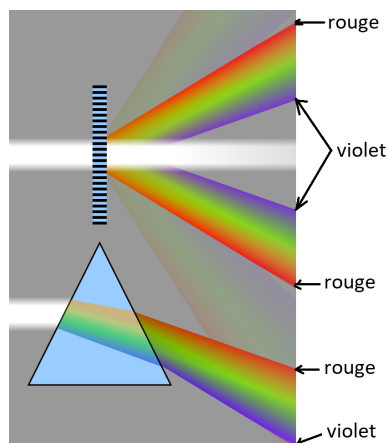


FIGURE 2 – Décomposition de la lumière blanche par un prisme ou un réseau optique

On classe les sources lumineuses dans trois grandes catégories en fonction de leur spectre :

▷ Les **sources de lumière blanche** (lampes à incandescence, à LED blanche, Soleil...) ont un spectre **continu** (constitué de toutes les fréquences dans un intervalle qui peut dépasser le domaine du visible).

▷ Les **lampes spectrales** (notamment à vapeur métallique : mercure, sodium...) ont un spectre caractéristique de l'élément chimique qu'elles contiennent. Ce spectre de raies peut être considéré comme **discret** (constitué seulement de quelques radiations distinctes).

▷ Les **lasers** émettent une lumière qui peut être considérée comme **monochromatique** (une seule couleur, donc une seule raie) en première approximation.

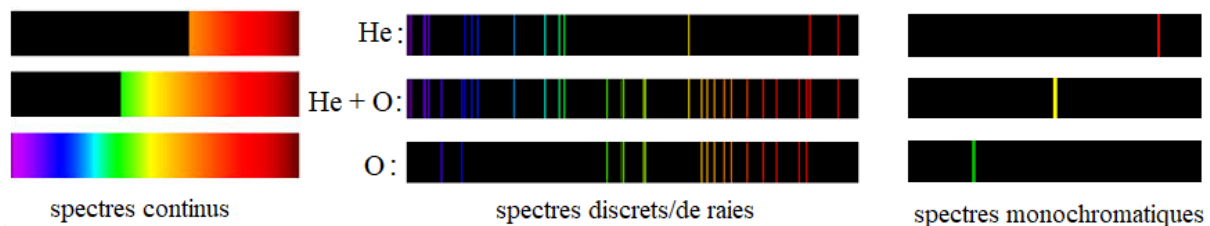


FIGURE 3 – Exemples de spectres d'émission

1.2.2 Indice optique d'un milieu

La **célérité** de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage.

Dans le vide, elle vaut $c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ exactement, qu'on arrondit souvent à $3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dans tout autre milieu, l'expérience montre que sa célérité v vérifie $v < c$, de sorte qu'on peut poser

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

où $n \geq 1$ est l'**indice optique** du milieu. Cette grandeur sans unité est constante dans un milieu homogène, et permet donc de le caractériser. Elle dépend légèrement de la fréquence de l'onde lumineuse, ce dont nous ne tiendrons pas souvent compte.

Des valeurs courantes d'indice optique sont : $n = 1$ dans le vide par définition, $n = 1,0003$ dans l'air, $n = 1,33$ pour l'eau, et entre 1,5 et 1,8 typiquement pour les verres.

Une **onde lumineuse monochromatique** a une **fréquence** ν déterminée par la source lumineuse qui l'a émise, tandis que sa **longueur d'onde** $\lambda = \frac{v}{\nu}$ dépend du milieu dans lequel elle se propage.

Si on note $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ la **longueur d'onde dans le vide**, alors dans un milieu quelconque :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}.$$

C'est la fréquence de l'onde (ou sa longueur d'onde dans le vide) qui code la couleur d'une lumière monochromatique.

longueur d'onde (nm)	400 - 435	435 - 480	480 - 500	500 - 560	560 - 580	580 - 595	595 - 625	625 - 750
couleur	violet	bleu	bleu-vert	vert	vert-jaune	jaune	orange	rouge

FIGURE 4 – Échelle des couleurs (pour des longueurs d'onde dans le vide)

Nous supposerons que les milieux traversés par la lumière sont linéaires : il n'y a pas de modification de la fréquence de l'onde lumineuse au cours de sa propagation.

2 Phénomènes associés à un changement de milieu

Dans toute cette section, les milieux sont supposés **homogènes, linéaires, isotropes et transparents**.

2.1 Description qualitative des phénomènes

Lorsqu'un rayon lumineux, dit **incident**, atteint l'interface (ou surface de séparation) entre deux milieux d'indices optiques différents, qu'on appelle un **dioptre**, il se sépare en deux en subissant deux phénomènes :

- ▷ La **réflexion** : le rayon incident donne naissance à un **rayon réfléchi**, qui repart dans le milieu initial.
- ▷ La **réfraction** ! le rayon incident donne généralement naissance à un **rayon réfracté**, transmis dans le deuxième milieu et éventuellement dévié.

Au niveau du point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre (le **point d'incidence**), on définit la **normale au dioptre** : une droite perpendiculaire au dioptre. Cette droite et le rayon incident définissent le **plan d'incidence**.

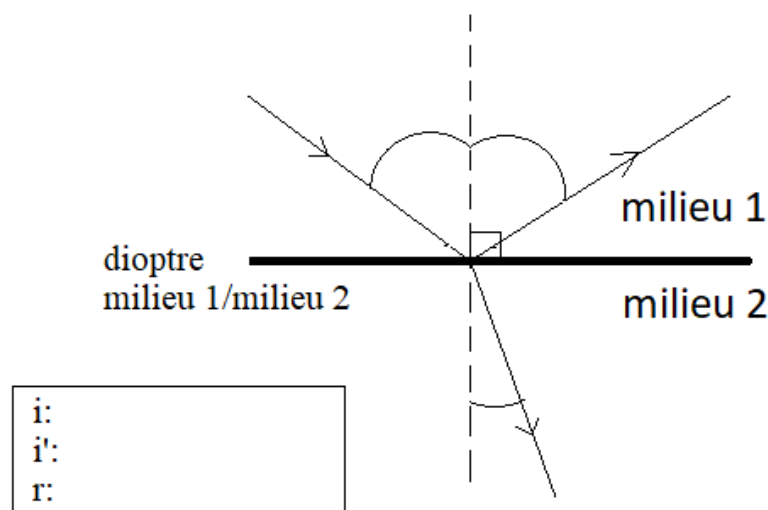


FIGURE 5 – Schéma (à compléter) qui illustre le vocabulaire introduit ci-dessus

2.2 Description quantitative des phénomènes : lois de Snell-Descartes



FIGURE 6 – Gauche : portrait de Willebrord Snell (1580-1626) ; droite : portrait de René Descartes (1596-1650)

Les **lois de Snell-Descartes** décrivent les phénomènes de **réflexion** et de **réfraction** au niveau d'un dioptre.

► La **première loi de Snell-Descartes** précise que les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence.

Autrement dit, la direction de propagation de la lumière est déviée vers le haut ou vers le bas lors de la traversée d'un dioptre horizontal, mais pas vers le côté.

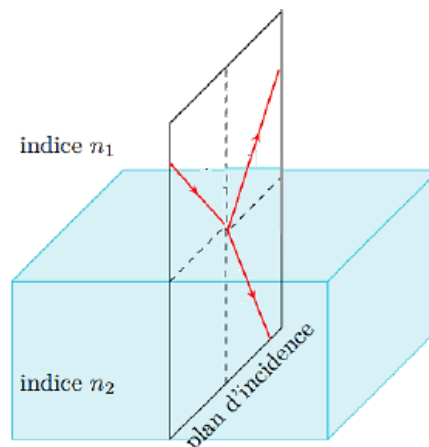


FIGURE 7 – Illustration de la première loi de Snell-Descartes

► La **deuxième loi de Snell-Descartes** précise que l'**angle de réflexion** i' , entre la normale au dioptre dans le milieu 1 et le rayon réfléchi, a la même valeur que l'**angle d'incidence** i entre la normale au dioptre et le rayon incident :

$$i' = i.$$

Autrement dit, les directions des rayons incident et réfléchi sont symétriques par rapport à la normale au dioptre.

► La **troisième loi de Snell-Descartes** relie l'angle d'incidence i et l'**angle de réfraction** r entre la normale au dioptre dans le milieu 2 et le rayon réfracté. Si on attribue au milieu 1 et au milieu 2 des **indices de réfraction** (égaux aux indices optiques

définis plus haut), notés n_1 et n_2 , alors :

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r),$$

où $\sin$ représente la fonction sinus.

Le plus souvent, on applique cette loi dans le but de déterminer l'angle de réfraction r connaissant l'angle d'incidence i et les indices de réfraction n_1 et n_2 . Si $n_2 \geq n_1$, alors

$$r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \times \sin(i)\right),$$

où $\arcsin$ désigne la fonction arc sinus (fonction réciproque de la fonction sinus).

Si le dioptré n'est pas plan, ces trois lois restent vraies en remplaçant le dioptré par son plan tangent au niveau du point d'incidence.

Exercice d'application 1 :

Un rayon lumineux diffusé par un arbre fait un angle de 30° avec la surface d'un lac.

Déterminer les valeurs de l'angle d'incidence i , de l'angle de réflexion i' et de l'angle de réfraction r au niveau du dioptré atmosphère/lac, sachant que l'indice de réfraction de l'air vaut $n_{\text{air}} = 1,00$ et que l'indice de réfraction de l'eau vaut $n_{\text{eau}} = 1,33$.

2.3 Conséquences des lois de Snell-Descartes

2.3.1 Cas de l'incidence normale

Un rayon incident formant un angle droit avec un dioptré est **en incidence normale**. L'angle d'incidence vaut $i = 0$. La deuxième loi de Snell-Descartes nous apprend que $i' = 0$: le rayon réfléchi est superposé au rayon incident. La troisième loi de Snell-Descartes nous enseigne que $r = 0$: le rayon n'est pas dévié en traversant le dioptré.

2.3.2 Illusions d'optique

L'évolution a permis au cerveau humain d'intégrer profondément les conséquences de la propagation en ligne droite de la lumière dans les milieux homogènes : on voit les objets dans la bonne direction. Néanmoins, il n'a pas intégré les cas plus rares où la réflexion et la réfraction ont lieu : on voit les objets au mauvais endroit, ce qui donne lieu à des illusions d'optique.

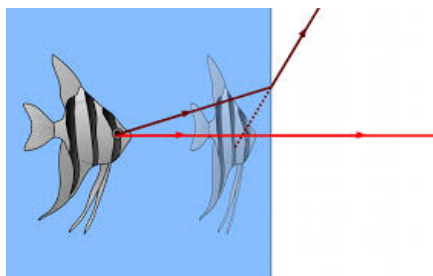


FIGURE 8 – Vision d'un poisson dans un aquarium

2.3.3 Phénomène de réflexion totale

Lorsqu'un rayon incident passe d'un milieu 1 à un milieu 2 moins réfringent ($n_1 > n_2$), on peut sous certaines conditions observer le **phénomène de réflexion totale** : le rayon réfracté n'existe pas lorsque l'angle d'incidence dépasse une valeur seuil, appelée **angle d'incidence critique** et notée i_C . Seul subsiste le rayon réfléchi.

Pour visualiser :

<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/Descartes.php>

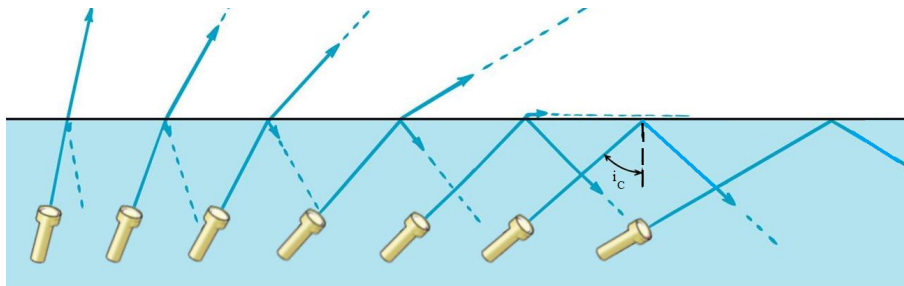


FIGURE 9 – Illustration du phénomène de réflexion totale lors du passage de l'eau (milieu 1) à l'air (milieu 2)

Exercice d'application 2 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Établir la condition de réflexion totale.

1. En vous appuyant sur l'illustration ci-dessus ou l'animation dont le lien est donné ci-dessus, ainsi que la troisième loi de Snell-Descartes, expliquer qualitativement le phénomène de réflexion totale.

2. Montrer que l'angle d'incidence critique vaut alors :

$$i_C = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

2.3.4 Principe de retour inverse de la lumière

Dans un milieu isotrope, la propagation des rayons lumineux vérifie le **principe de retour inverse de la lumière** : si on échange les positions de la source lumineuse et d'un point atteint par la lumière issue de cette source, il existe un rayon lumineux qui les relie, orienté en sens inverse de celui qu'il aurait eu dans la configuration de départ.

Cela implique notamment que si vous voyez les yeux de quelqu'un, cette personne peut aussi voir les vôtres.

2.4 Lois de Snell-Descartes et instruments d'optique

2.4.1 Miroir plan

Un **miroir** est un dioptré qui réfléchit les rayons lumineux mais ne les réfracte pas. Si un miroir a une surface plane, on le qualifie de **miroir plan**.

Pour comprendre le fonctionnement d'un miroir, il nous faut étudier la position de l'**image** d'un point à travers ce miroir. Si elle existe, elle se situe au croisement de plusieurs rayons issus du point objet observé. Une image est qualifiée de **réelle** si on peut l'observer sur un écran, et de **virtuelle** si elle se situe à un endroit où il n'est pas possible de placer un écran pour l'observer.

Exercice d'application 3 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Construire l'image d'un objet par un miroir plan, identifier sa nature réelle ou virtuelle.

L'intersection d'un grand nombre de rayons incidents, ou de leurs prolongements, est appelée **point objet**. Il est réel si les rayons sont vraiment issus de ce point, et virtuel si seuls les prolongements des rayons convergent vers ce point.

L'intersection d'un grand nombre de rayons qui émergent de l'instrument d'optique, ou de leurs prolongements, est appelée **point image**. Il est réel si les rayons atteignent réellement ce point, et virtuel si seuls les prolongements des rayons convergent vers ce point.

1. Dans chacune des deux situations schématisées ci-dessous, contruire l'image A' de l'objet A à travers le miroir plan (dont le symbole est une surface plane hachurée), en vous appuyant sur la deuxième loi de Snell-Descartes.

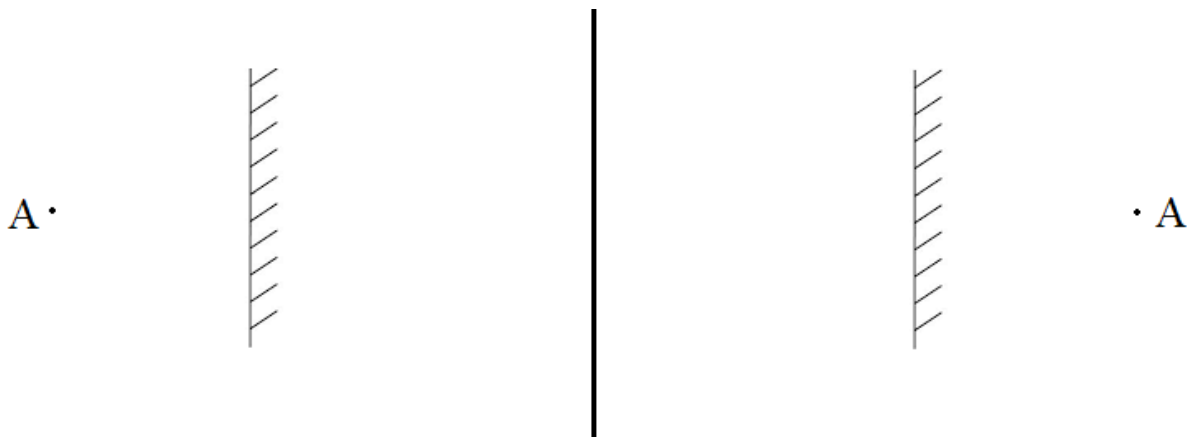


FIGURE 10 – Gauche : situation 1, objet A réel ; droite : situation 2, objet A virtuel

2. Dans chacune des deux situations, indiquer, en justifiant, si l'image est réelle ou virtuelle.

On retiendra que l'image d'un point objet par un miroir plan est un point image symétrique du point objet par rapport au plan du miroir.

Pour visualiser :

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/miroirs/miroir_plan.php

On remarque que le miroir plan est un **système optique stigmatique** : l'image d'un point à travers ce dernier est toujours un point (et non un ensemble de points, ce qui donnerait une tache étendue et rendrait potentiellement cette image floue). C'est ce qui assure la netteté de la vision dans un miroir. Le miroir plan est en fait le seul instrument d'optique à assurer un stigmatisme rigoureux.

Si un système optique est stigmatique, il suffit de déterminer l'intersection de deux rayons issus d'un point objet pour trouver la position du point image associé.

2.4.2 Modèle de la fibre optique à saut d'indice

Exercice d'application 4 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

Les câbles à fibre optique permettent la transmission à haut débit de tous types de signaux électromagnétiques, sur de longues distances avec très peu d'atténuation. Chaque câble comporte un grand nombre de fibres optiques très fines.



Une **fibre optique à saut d'indice** est un guide d'onde, dans le sens où elle guide une onde incidente de son entrée jusqu'à sa sortie.

Elle est assimilée à un cylindre de révolution d'axe (Ox), de longueur L, constitué d'un cœur en polyméthacrylate de méthyle, de rayon a (de l'ordre de 8 à 50 μm) et d'indice optique $n_c = 1,49$, entouré d'une couche cylindrique de polymère fluoré, la gaine, d'épaisseur $b - a$ et d'indice optique $n_g = 1,40$. On supposera que le milieu extérieur est l'air, dont l'indice optique vaut $n_{\text{air}} = 1,00$.

Un rayon pénètre dans la fibre en O, en faisant un angle θ avec l'axe (Ox).

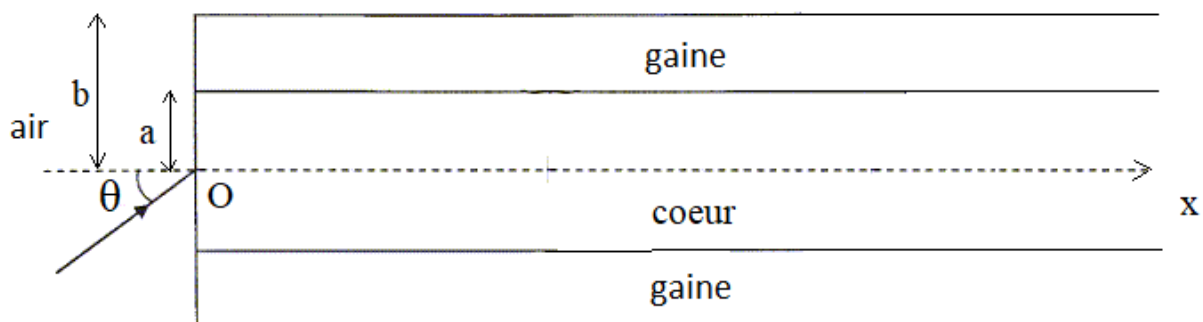


FIGURE 11 – Schéma de la fibre optique vue en coupe dans un plan qui contient son axe de symétrie par rotation (Ox)

1. Expliquer qualitativement le fonctionnement de la fibre, en identifiant les phénomènes qui permettent la transmission du signal par cette dernière.

2. Déterminer la valeur maximale admissible θ_a de l'angle θ pour que le rayon puisse être guidé dans la fibre, et calculer l'**ouverture numérique** $O.N. = n_{\text{air}} \sin(\theta_a)$. Définir alors la notion de **cône d'acceptance** d'une fibre optique.

3. On note τ la durée du trajet d'un rayon lumineux dans la fibre. Déterminer l'intervalle de temps $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ entre les rayons qui atteignent le plus lentement et le plus vite la sortie de la fibre (on supposera que cela se fait sur son axe), en fonction de n_c , n_g , L , et de la célérité c de la lumière dans le vide. Calculer $\Delta\tau$ pour $L = 1,0$ km.

4. Lors d'une communication par cette fibre optique, on envoie à l'entrée de la fibre des impulsions lumineuses à une fréquence f . On souhaite récupérer ces impulsions dans le même ordre en sortie. Montrer que la fréquence f doit être inférieure à une certaine valeur f_c , que vous exprimerez.

Pour visualiser :

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php