

Activité expérimentale

Réfraction de la lumière et applications

1. Mise en évidence du phénomène de réfraction

Archimède (287-212 av JC) décrivait la réfraction en ces termes :

« Si nous posons un objet au fond du verre et que nous nous éloignons du verre jusqu'à ce que l'objet ne se voit plus, nous le verrons réapparaître à cette distance dès que nous remplissons le verre d'eau ».

Réaliser l'expérience puis faire un schéma explicatif du phénomène.

2. Lois de Descartes

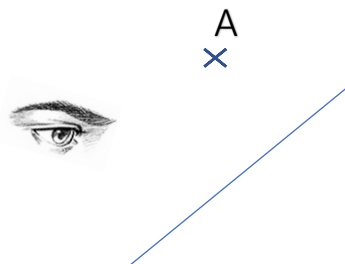
Réflexion de la lumière

Lorsque la lumière est réfléchiée sur une surface réfléchissante les angles d'incidence i et de réflexion r sont égaux. D'après la première loi de Descartes : $i = r$.

Cette loi permet de construire l'image d'un objet dans un miroir.

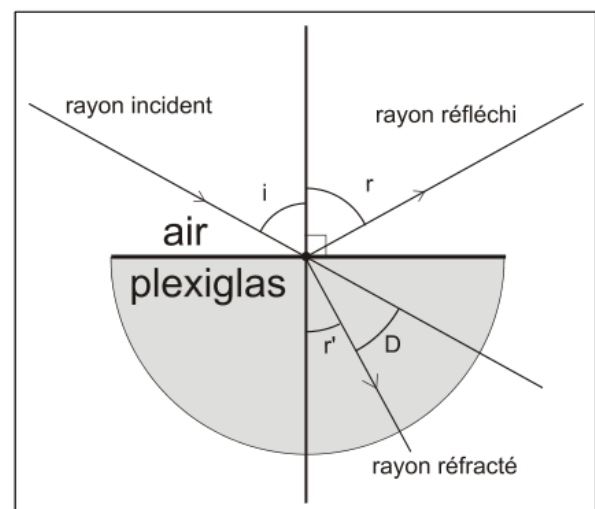
Exemple

Construire un rayon lumineux issu du point A qui atteint l'œil de l'observateur représenté sur le schéma suivant :



Réfraction de la lumière

Lorsque la lumière passe d'un milieu 1 d'indice n_1 à un milieu 2 d'indice n_2 , la lumière est réfractée. On note D l'angle de déviation et r' l'angle de réfraction. On remarque que l'angle d'incidence et de réfraction r' sont définis par rapport à la normale à la surface de séparation entre les deux milieux (cette surface s'appelle un dioptré).



1. A l'aide du matériel disponible, réaliser l'expérience schématisée ci-dessus et relever la valeur de l'angle de réfraction r' pour différentes valeurs de l'angle d'incidence i .
2. Compléter ensuite toutes les colonnes du tableau. On utilise pour cela le logiciel latispro qui permet d'effectuer les calculs de manière automatique. Attention, les angles doivent être exprimés en radian dans Latispro.

$i (^{\circ})$	0	10	20	30	50	70
$r (^{\circ})$						
$\sin(i)$						
$\sin(r)$						

3. Tracer ensuite la courbe $\sin(i)=f(\sin(r))$.
4. Modéliser cette courbe en choisissant le modèle le plus adapté. Noter le modèle choisi ainsi que les paramètres du modèle.
5. Retrouver la deuxième loi de Descartes :

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

n_1 est l'indice du milieu 1

n_2 est l'indice du milieu 2

Pour l'air $n=1,0$.

6. En déduire la valeur de l'indice du plexiglass.

3. Réflexion totale

On reprend le même dispositif expérimental que précédemment mais la lumière pénètre tout d'abord dans le plexiglass avant de ressortir dans l'air.

1. Compléter le tableau de valeurs suivant :

$i (^{\circ})$	0	10	20	30	50	70
$r (^{\circ})$						
$\sin(i)$						
$\sin(r)$						

2. Peut-on remplir la totalité du tableau ? Que se passe-t-il au-delà d'une certaine valeur limite de l'angle d'incidence ?

3. A l'aide de la deuxième loi de Descartes, retrouver la valeur de l'angle limite déterminée expérimentalement à la question précédente.
4. Pourquoi parle-t-on de réflexion totale ?

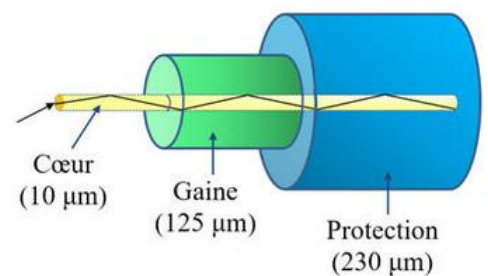
4. Application : la fibre optique

Médecine, instruments de mesure, éclairage, transmission numérique... Aujourd'hui la fibre optique est omniprésente et a permis de très grandes avancées technologiques dans les 50 dernières années.

Constitution de la fibre

La fibre optique se compose de trois parties :

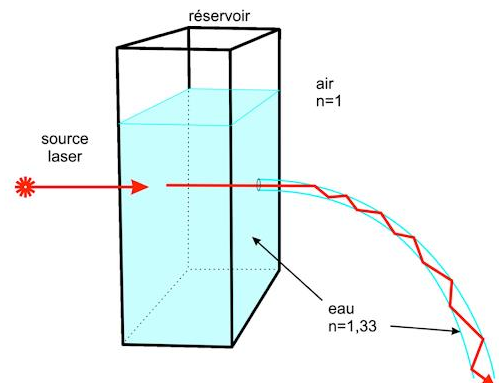
Le cœur où se propage le signal lumineux, la gaine et le cœur. L'indice de réfraction de la gaine doit être inférieur à celui du cœur. La gaine plastique sert uniquement à protéger la fibre de l'extérieur.



Expérience Fontaine lumineuse

On réalise l'expérience schématisée ci-dessous :

Expliquer qualitativement le trajet suivi par le rayon laser.



Voir l'animation sur la fibre optique :

<http://clemspcreims.free.fr/Simulation/fibreoptique.swf>

Différents types de fibre optique

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée : Multimode et Monomode.

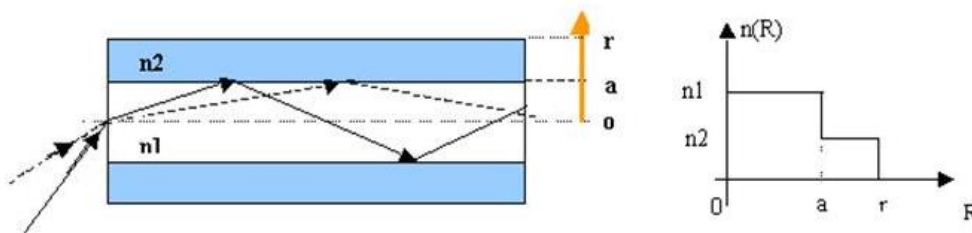
- ✚ Les fibres multimodes ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) grâce à la largeur importante du cœur de la fibre. Elles sont caractérisées par un diamètre

de cœur important de 10 à 100 μm . La propagation du signal peut se faire de deux façons : à saut d'indices ou à gradient d'indices.

Fibre à saut d'indice :

Dans une fibre optique à saut d'indice, l'indice n_1 du cœur est constant puis varie brutalement (saut) à l'interface entre le cœur et la gaine pour atteindre une valeur n_2 ($n_2 < n_1$) constante dans la gaine.

L'indice de réfraction de la gaine étant inférieur à celui du cœur, il va se produire, à condition que les angles mesurés par rapport à l'axe optique soient suffisamment petits, une réflexion totale à l'interface cœur-gaine qui va guider et contraindre la lumière à se propager à l'intérieur du cœur de la fibre. Le guidage se fait donc en dents de scie.

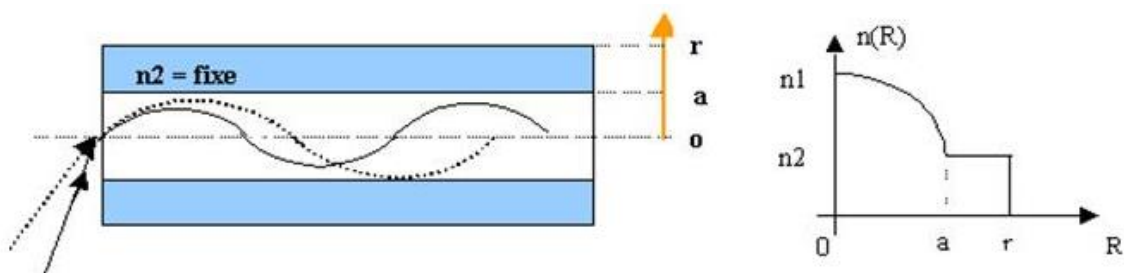


Fibre à gradient d'indice :

Une fibre à gradient d'indice a la même composition qu'à saut d'indice (cœur + gaine). Par contre, l'indice n_1 du cœur varie dans la direction transversale de la fibre. L'indice n_1 décroît jusqu'à atteindre la valeur de l'indice de réfraction n_2 de la gaine.

Le principe de propagation dans une fibre à gradient d'indice repose sur un effet de focalisation. En effet la lumière ne se propage en ligne droite que dans un milieu homogène. Dans une fibre optique à gradient d'indice, le faisceau lumineux est continuellement dévié vers l'axe optique de la fibre par un effet de focalisation.

Les réfractions successives vont avoir tendance à ramener (focaliser) le rayon lumineux vers l'axe optique de la fibre. C'est en subissant ces légères réfractions à l'approche de la gaine que le signal optique forme un signal sinusoïdal.



Dispersion modale des fibres multimodes à saut d'indice

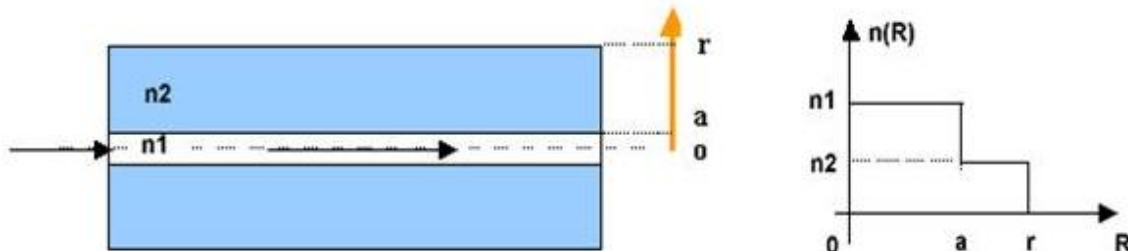
Lorsqu'on utilise une fibre multimodes, la lumière peut prendre plusieurs chemins (modes) lorsqu'elle se propage dans la fibre. Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre, elle se décompose selon les différents modes. Dans une fibre à saut d'indice, toutes les ondes se propagent à la même vitesse, car

l'indice du milieu est constant, seule la longueur du trajet varie. Alors l'impulsion s'étale, on parle de dispersion modale et le signal risque de mal être analysé en sortie de fibre.

Faible dispersion modale des fibres multimodes à gradient d'indice

Les fibres multimodes à gradient d'indice ont été développées pour répondre à ce problème. Puisque l'indice de réfraction n'est pas constant, la longueur du trajet et de la vitesse de propagation de chaque mode va varier. Les modes d'ordre élevé empruntent des trajets plus longs (assez éloignés de l'axe optique) où l'indice de réfraction est plus faible qu'au voisinage de l'axe optique et donc avec une vitesse plus importante que les modes d'ordre moins élevés qui se propagent au voisinage de l'axe optique, donc sur des trajets plus courts mais plus lents. Il en résulte que la dispersion modale d'une fibre à gradient d'indice est comparativement plus faible que celle d'une fibre à saut d'indice.

- Les fibres monomodes sont technologiquement plus avancées car plus fines (de 2 à 10 μm). Elles sont apparues grâce à l'évolution des technologies permettant de fabriquer des fibres avec un cœur très fin. Ce cœur très fin n'admet ainsi qu'un mode de propagation, le plus direct possible c'est-à-dire dans l'axe de la fibre. Elle est utilisée pour le transfert d'informations sur de grandes distances.



Très faible dispersion modale des fibres monomodes

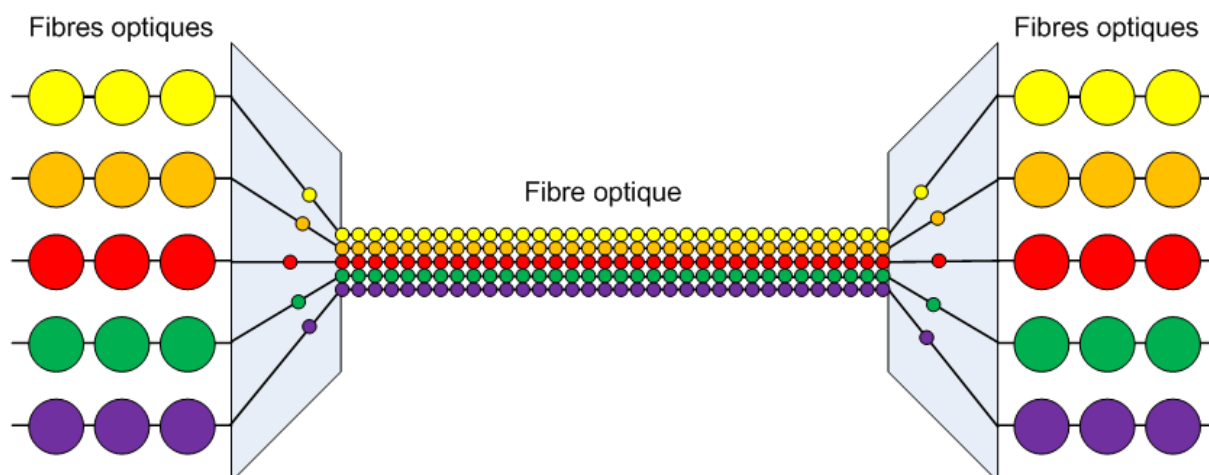
Le mode de propagation étant unique (une ligne droite), il n'y a pas de dispersion due au fait qu'un signal peut prendre plusieurs chemins différents.

Multiplexage en longueur d'onde

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) est une technique utilisée en communication optique qui permet d'augmenter le débit sur une fibre optique en faisant circuler plusieurs signaux de longueurs d'ondes différentes sur une seule fibre, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (Mux) et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (deMux).

Tous les signaux parcourent simultanément la fibre sans interférer les uns avec les autres car ils possèdent des longueurs d'ondes (couleurs) différentes.

Voici un schéma permettant d'illustrer le découpage en longueur d'onde entre les différentes connexions :



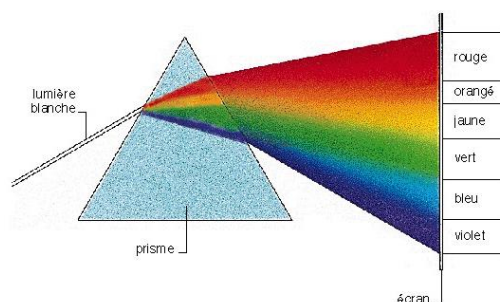
Différents types de WDM existent, leur différence principale est l'espacement entre les canaux optiques utilisés. Ainsi plus les canaux sont rapprochés (c'est-à-dire les longueurs d'ondes proches les unes des autres) plus le nombre de longueurs d'ondes utilisables dans une fenêtre spectrale donnée est important et par conséquent plus le débit augmente :

	Coarse-WDM	Dense-WDM	Ultra-Dense-WDM
Nombre de longueur d'onde	Jusqu'à 16	8 à 128	> 400
Espacement des canaux	20nm à 25nm	0.4nm à 1.6nm	0.08nm
Fenêtre spectrale	~ 1260nm - 1620nm	~ 1500nm - 1600nm	~ 1500nm - 1600nm
Débit par longueur d'onde	1,25 - 2,5 Gbit/s	10Gbit/s - 40Gbit/s	> 40Gbit/s

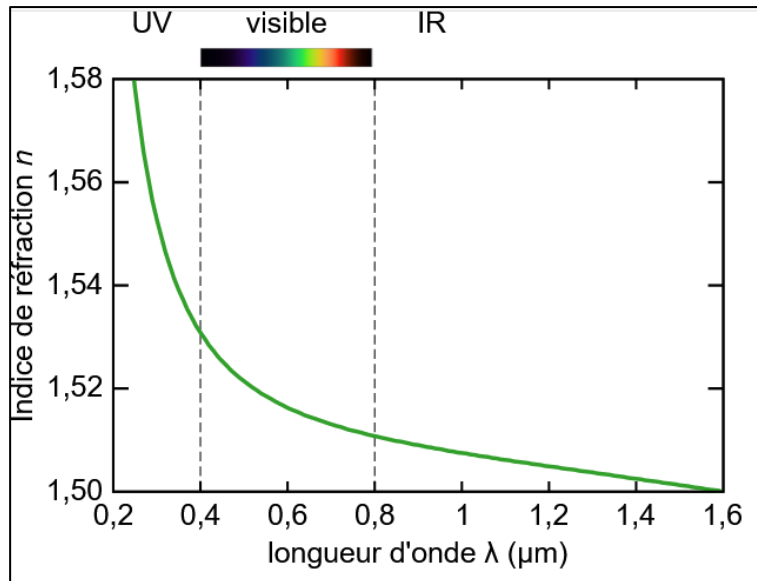
L'intérêt de cette technique réside dans le fait que l'on peut fortement augmenter le débit d'une fibre optique sans changer d'équipement, sans tous les travaux de génie civil nécessaires à la pose de fibre optique. L'accroissement de la capacité se fait de deux façons : en augmentant le nombre de canaux dans une fibre et en augmentant le débit par canal lors de l'émission.

4. Dispersion de la lumière par un prisme

La lumière blanche peut être décomposée, à l'aide d'un prisme, en une infinité de radiations (ou lumières) colorées. On dit que le verre est un milieu dispersif. La figure colorée obtenue est le spectre de la lumière blanche.



L'indice de réfraction pour le verre évolue en fonction de la longueur d'onde comme indiqué sur le schéma suivant :



Voici un schéma du trajet d'un rayon lumineux qui atteint le prisme :

1. Ecrire la deuxième loi de Descartes à l'interface entre l'air et le prisme en verre. On rappelle que $n=1,0$ pour l'air.
2. Exprimer $\sin(r)$ en fonction de $\sin(i)$ et de l'indice du prisme n pour la longueur d'onde étudiée.
3. Comment évolue l'indice du verre quand la longueur d'onde passe du bleu au rouge ?
4. En déduire comment évolue l'angle de réfraction en fonction de la longueur d'onde.
Vérifier le résultat obtenu à l'aide de l'animation à l'adresse suivante : <https://www.maxicours.com/se/cours/phenomene-de-dispersion-de-la-lumiere-blanche-dans-un-prisme-et-dans-la-vie-courante/>
5. Compte tenu de la deuxième réfraction, quelle couleur est la plus déviée par le prisme ?

