CHAPITRE OS1

Modèle de l'optique géométrique

Problématique

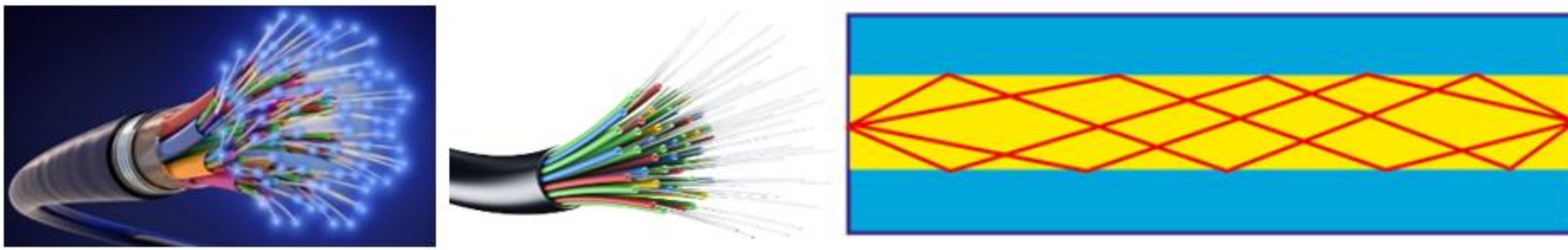


FIGURE 1 : Fibre optique

Question :

Comment expliquer l'allure des différents trajets suivis par la lumière à l'intérieur d'une fibre optique ?

1 Sources de lumière

1.1 Laser

- <u>Sigle</u>

Light

Amplification by

Stimulated

Emission of

Radiation

(amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement)

1.1 Laser

➢ Principe

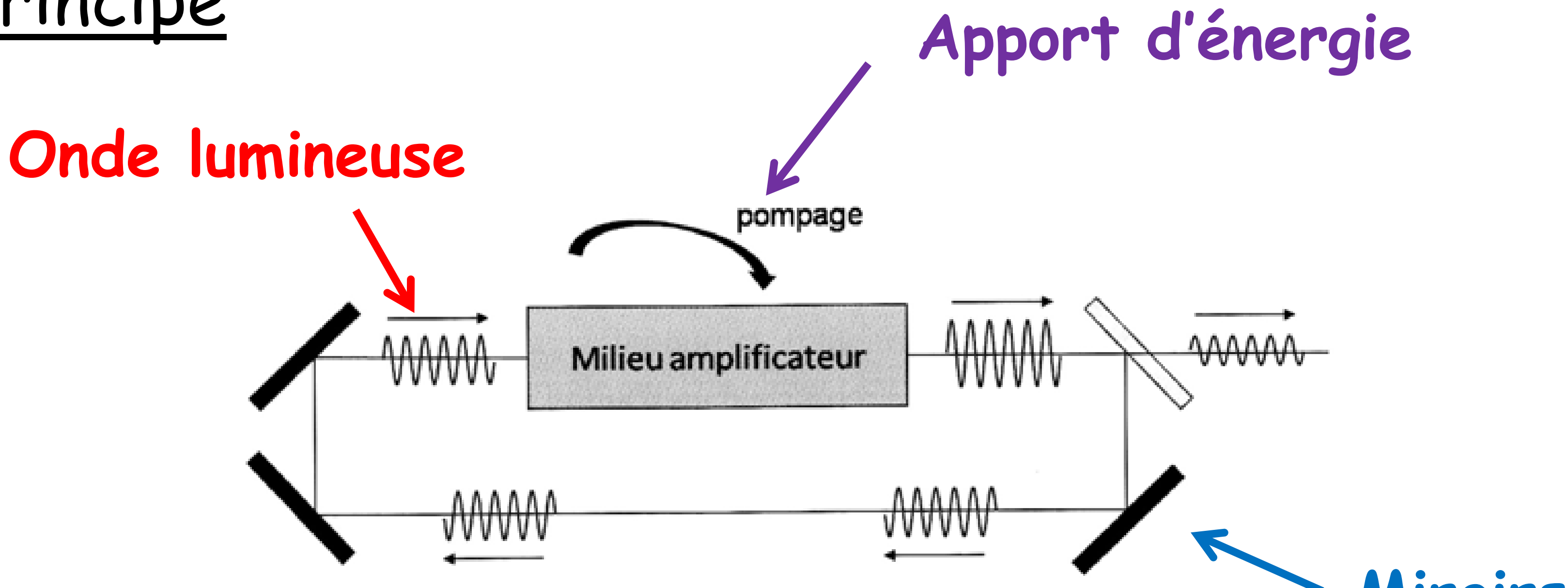


FIGURE 2 : Principe de fonctionnement d'un laser

Amplification: émission stimulée de photons :

⇨ Photon incident + atome excité

Nécessité d'un gd nbre d'atomes excités

(inversion de population par apport d'énergie)

1.1 Laser

- **Spectre**

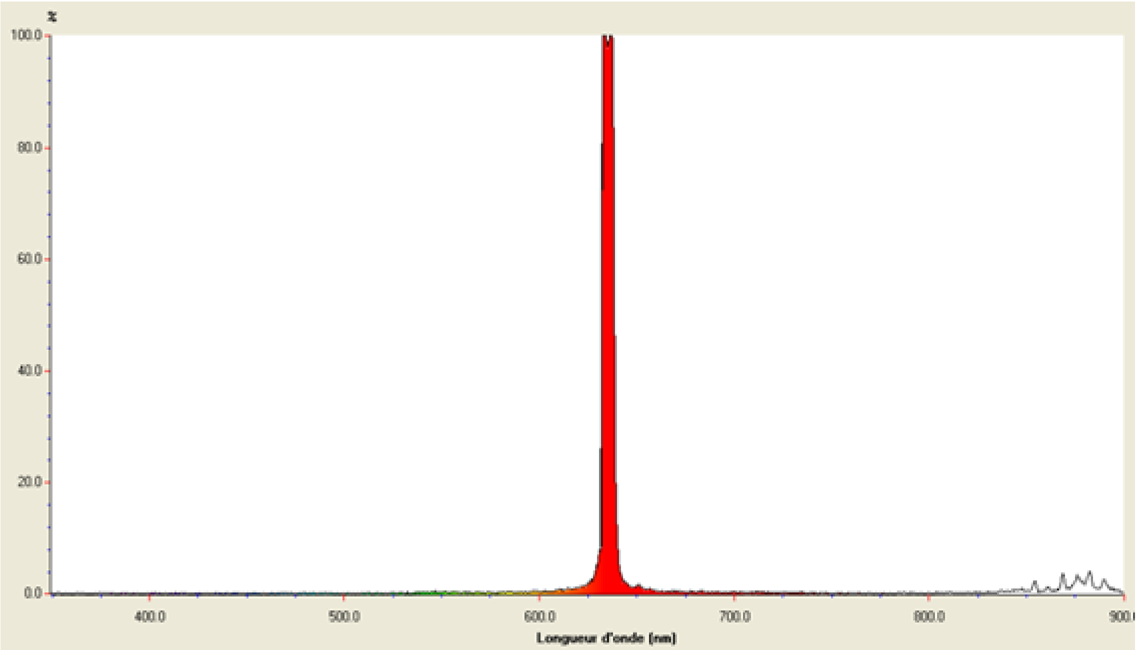


FIGURE 3 : Spectre d'une source laser

- **Caractéristiques**
  - **Définition** :

Monochromatique

  - **Propriété** :

Laser = source monochromatique

1.2 Sources spectrales

➢ <u>Principe</u>

ampoule avec vapeur atomique
+ excitation électrique
= atomes de vapeur excités

Désexcitation : émission de **photons dont la fréquence est quantifiée**

$$\boxed{\nu = \frac{E_n - E_p}{h} = \frac{c}{\lambda}}$$

h : cste de Planck (J.s), n et p : entiers

c : célérité de la lumière ($m.s^{-1}$), λ : longueur d'onde (m)

➢ Spectre

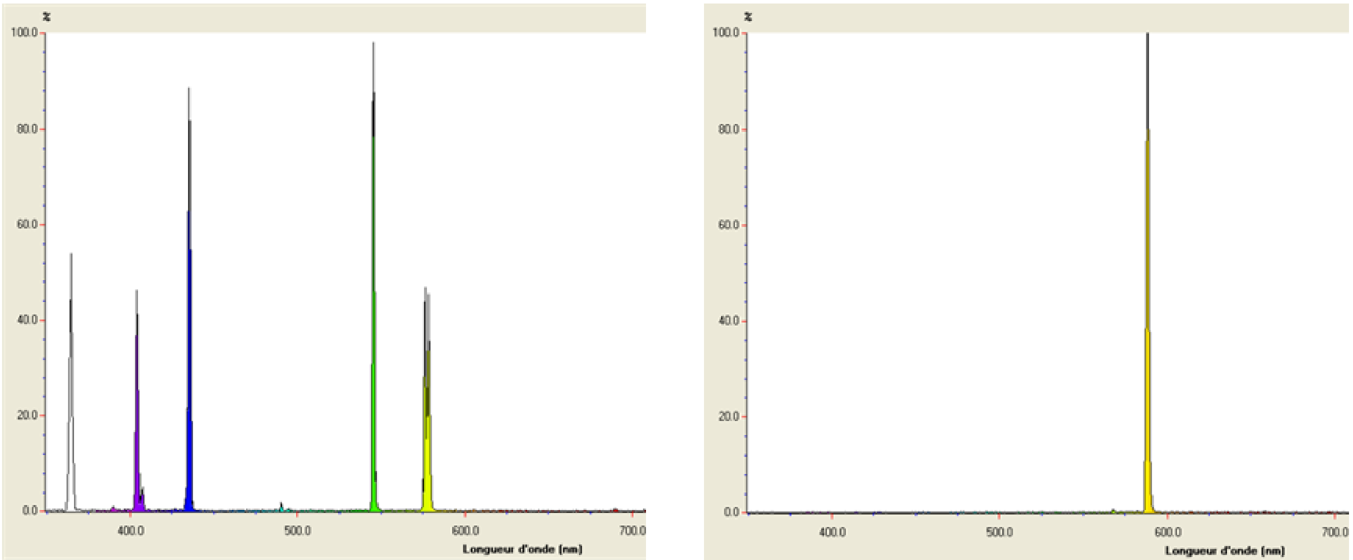


FIGURE 4 : Spectres d'une lampe à vapeur de mercure (à gauche) et d'une lampe à vapeur de sodium (à droite)

➢ Caractéristiques

- **Définition** : **Polychromatique**
- **Définition** : **Discontinu / Discret**
- **Propriété** :

1.3 Sources thermiques

- **Exemples**
- **Principe d'une lampe à incandescence**

Filament + haute T°C : rayonnement visible

- **Spectre**

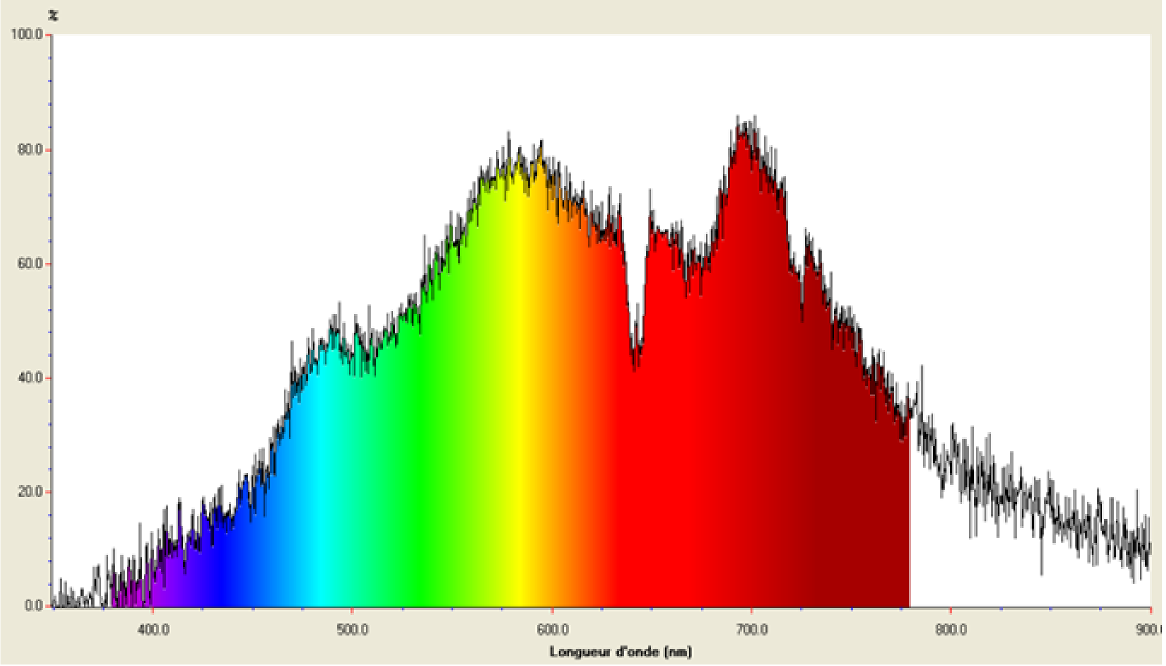


FIGURE 5 : Spectre d'une lampe à incandescence

- **Caractéristiques**
  - **Propriété :**

Spectre continu, polychromatique

1.4 Modèle de la source ponctuelle monochromatique

- Hypothèses
  - Ponctuelle : pas d'extension spatiale
  - Monochromatique : onde purement sinusoïdale
- Modèle = idéalisation du comportement du laser

2 La lumière : une onde électromagnétique

2.1 Qu'est-ce qu'une OEM ?

➢ <u>Définition:</u> OEM

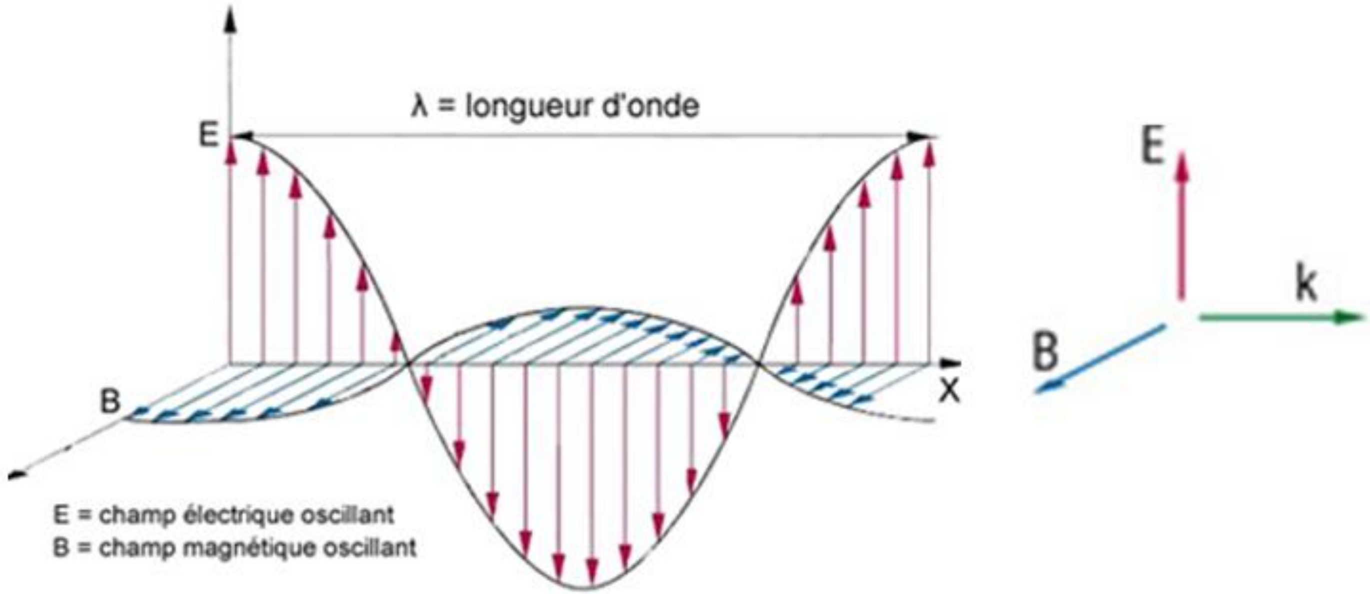


FIGURE 6 : Propagation d'une onde électromagnétique

Animation 1 : Physique et simulations numériques / Électricité / Équations de Maxwell / Ondes EM progressives
http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/oem1.html

2 La lumière : une onde électromagnétique

2.1 Qu'est-ce qu'une OEM ?

➢ Description

double périodicité

Variations temporelles

Période T Fréquence ν

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \nu = \frac{1}{T}$$

Pulsation ω

Variations spatiales

Longueur d'onde λ

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

➢ Propriété

longueur d'onde λ_0 dans le vide

$$\boxed{\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu}}$$

$$c \simeq 3{,}00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

2.2 Spectre de la lumière visible

➢ Spectre des OEM

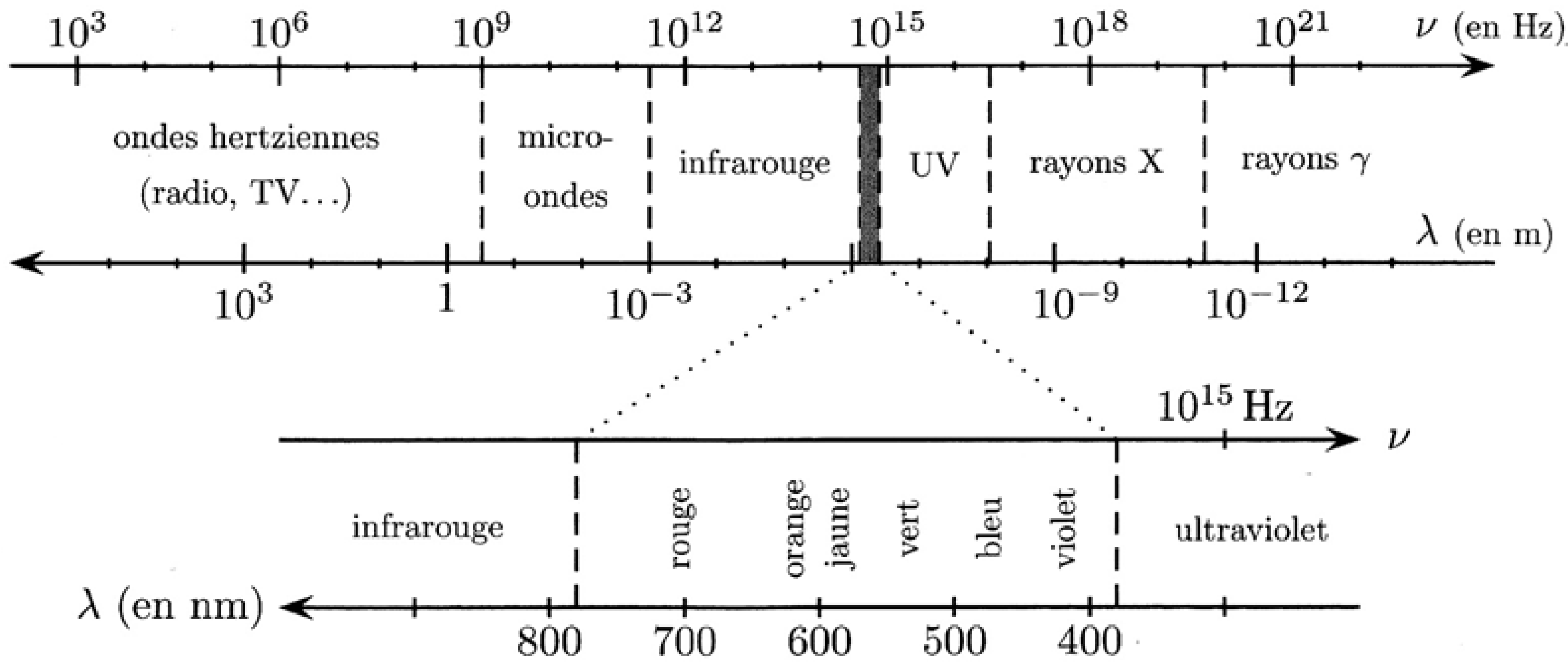


FIGURE 7 : Position du spectre de la lumière visible dans le spectre des ondes électromagnétiques

2.3 Propagation dans un milieu transparent

2.3.1 Milieux de propagation

- Cas du vide
- Milieux TLHI

Définition

Transparent :

Linéaire :

Homogène :

Isotrope :

- Effets d'un milieu TLHI sur la propagation
  - Vitesse v **plus faible** que ds le vide, propagation en ligne droite
  - Modification direction des rayons: **réflexion** et **réfraction**
  - Vitesse v dépend de λ : **dispersion**

2.3.2 Indice du milieu

- <u>Définition</u>

indice de réfraction *n* d'un milieu

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

c : célérité de la lumière dans le **vide**

v : vitesse de propagation dans le **milieu**

- <u>Exemples</u>

$$\text{vide} : n = 1$$
$$\text{air} : n = 1{,}0003 \approx 1$$
$$\text{eau} : n = 1{,}33$$
$$\text{verre} : 1{,}35 < n < 2 \ (1{,}5 \text{ typiquement})$$
$$\text{diamant} : n = 2{,}42$$

2.3.3 Longueur d'onde dans le milieu

- Caractéristiques temporelles

Ch. composante: période T, fréquence ν, pulsation ω

Propriété :

Grandeurs **temporelles indépendantes** du milieu

- Caractéristiques spatiales

Définition:

longueur d'onde λ_{milieu} **dans un milieu** transparent

$$\boxed{\lambda_{milieu} = vT = \frac{c}{n}T = \frac{\lambda_0}{n} \leq \lambda_0}$$

2.3.4 Dispersion

- **Loi de Cauchy**

$$\boxed{n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}}$$

A et B : constantes spécifiques du milieu

- **Conséquence**

Dispersion

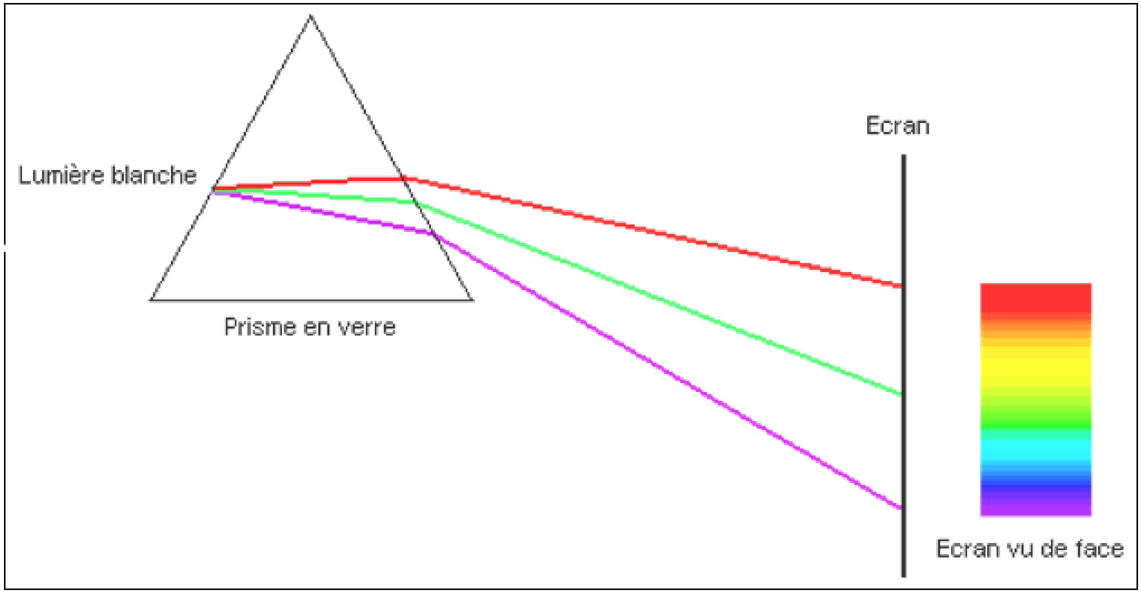


FIGURE 8 : Dispersion de la lumière par un prisme

3 Modèle de l'optique géométrique

3.1 Rayon lumineux

➢ Modélisation

- Onde plane rectiligne
- Description propagation sans nature ondulatoire :

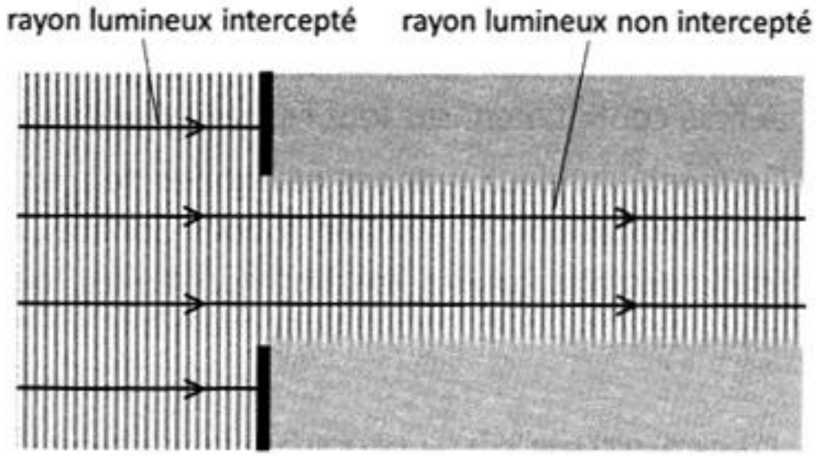


FIGURE 9 : Notion de rayons lumineux

Lignes orientées ⊥ front d'onde :

rayon lumineux (orientation : sens propagation)

- **Propriété** :

Indépendance des rayons lumineux

- <u>Modèle de l'optique géométrique</u>

Modèle **simple** et **fonctionnel** :

explication phénomènes réels lumineux

- <u>Domaine de validité</u>

λ **<< dimensions du milieu**

- <u>Allure du rayon lumineux</u>

Demi-droite

3.2 Trajectoires des rayons lumineux

- Dans un milieu homogène

Propriété :

trajectoires **rectilignes** : principe moindre temps

- Changement de milieu

Définition : Dioptre

Rayon incident → Rayon réfléchi

Rayon incident → Rayon réfracté

Animation 2 : Physique et simulations numériques / Optique géométrique / Dioptres / Réfraction (lentille hémisphérique)

- <u>Direction des rayons réfléchi et réfracté</u>

lois de Snell - Descartes

Traversée de différents milieux : **lignes brisées**

- <u>Intensité des rayons réfléchi et réfracté</u>

- <u>Retour inverse de la lumière</u>

<u>Propriété</u>

3.3 Réflexion et réfraction des rayons lumineux

3.3.1 Lois de Snell-Descartes

- <u>Définition</u> : Plan incident
- <u>Les 3 lois de Snell-Descartes</u>
  - **Planéité**
  - **Loi de la réflexion** $\boxed{r = -i_1}$
  - **Loi de la réfraction** $\boxed{n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)}$
- <u>Remarque</u>
- <u>Convention</u>

[1] J.-M. Courty, É. Kierlik, Se faire invisible ou presque, *Pour la Science*, n°384, p. 96-98, Octobre 2009
[2] J.-M. Courty, É. Kierlik, Réflexions sur la réflexion, *Pour la Science*, n°296, p. 106-107, Juin 2002
[3] J.-M. Courty, É. Kierlik, Vers l'horizon et au-delà !, *Pour la Science*, n°502, p. 88-90, Août 2019

3.3.2 Condition d'existence du rayon transmis

➢ Influence de la réfringence du milieu

Animation 3 : Figures animées pour la physique / Optique géométrique / Dioptres / Dioptre plan : réfraction

Propriété

Propriété

➢ Angle de réfraction limite

- Condition d'existence de i_{2l} : $\boxed{n_2 > n_1}$
- Expression

$$\boxed{\sin\left(i_{2l}\right) = \frac{n_1}{n_2} < 1}$$

Propriété

➢ Angle d'incidence critique

- Condition d'existence de i_{1c} : $\boxed{n_2 < n_1}$
- Expression

$$\boxed{\sin(i_{1c}) = \frac{n_2}{n_1} < 1}$$

Propriété :

Réflexion totale

3.4 Angle de déviation d'un rayon lumineux

- <u>Définition</u> : **angle de déviation**

- <u>Rayon émergent réfléchi</u>

- <u>Rayon émergent réfracté</u>

Outils mathématiques 1 : Trigonométrie

3.5 Application de la réflexion totale

➢ Retour à la problématique : fibre optique à saut d'indice

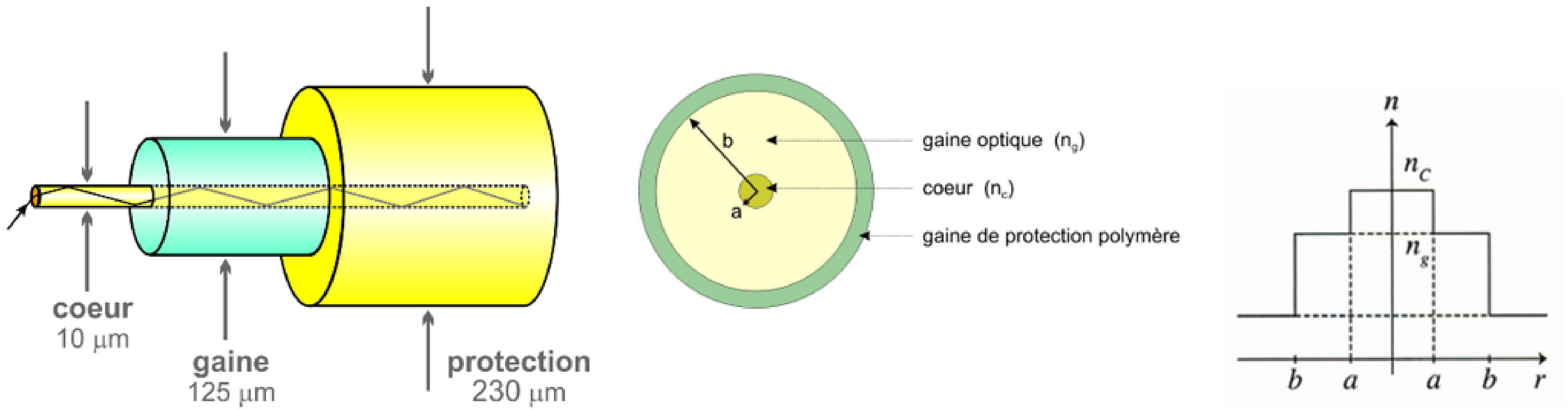
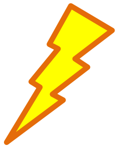


FIGURE 10 : Fibre optique à saut d'indice

réflexions totales sur la gaine

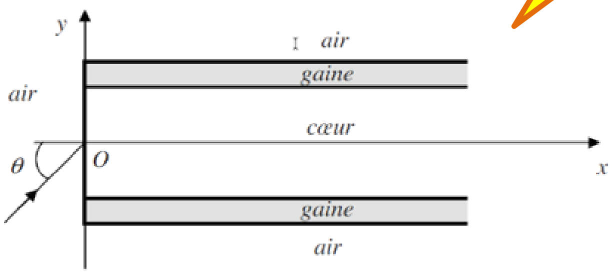
3 Modèle de l'optique géométrique

3.5 Application de la réflexion totale



Exercice d'application 1 : angle d'acceptance et ouverture numérique d'une fibre optique

L'axe (Ox) de la fibre est normal au dioptre air-cœur. En raison de la symétrie de révolution de la fibre autour de l'axe (Ox), on se restreint à une étude dans le plan (xOy). On considère que l'indice de l'air est $n_{air} = 1$.



Un rayon lumineux monochromatique se propageant dans l'air, situé dans le plan (xOy), pénètre dans le cœur de la fibre en O avec un angle d'incidence θ.

1. Représenter le trajet du rayon lumineux issu de O qui se propage en restant confiné dans le cœur.
2. Montrer que le rayon reste dans le cœur si l'angle θ est inférieur à un angle limite θ_L, appelé angle d'acceptance de la fibre optique, avec $\theta_L = \sin^{-1}\left(\sqrt{n_c^{\ 2} - n_g^{\ 2}}\right)$. Calculer la valeur de θ_L pour $n_c = 1{,}500$ et $n_g = 1{,}485$.
3. Exprimer et calculer l'ouverture numérique de cette fibre définie par $ON = n_{air} \sin(\theta_L)$.

3 Modèle de l'optique géométrique

3.5 Application de la réflexion totale

Exercice d'application 2 : dispersion intermodale d'une fibre optique

On considère maintenant que la fibre optique utilisée dans l'exercice d'application 1 est de longueur L. Le rayon entre dans la fibre avec un angle d'incidence θ variable compris entre 0 et θ_L.

1. Pour quelle valeur de θ le rayon traverse-t-il le plus rapidement la fibre ? Exprimer, en fonction de L, c et n_c, la durée de parcours T_1 de ce rayon.
2. Pour quelle valeur de θ le rayon met-il le plus de temps à traverser la fibre ? Exprimer, en fonction de L, c, n_g et n_c la durée de parcours T_2 de ce rayon.
3. Cette différence de durée de parcours entre les différents modes s'appelle la dispersion intermodale. Exprimer l'intervalle de temps $\delta T = T_2 - T_1$ en fonction de L, c, n_g et n_c. On posera $2\Delta = 1 - \left(\dfrac{n_g}{n_c}\right)^2$ avec $\Delta << 1$. Dans ces conditions, montrer que δT s'écrit $\delta T = \dfrac{n_c L \Delta}{c}$.

   Calculer la valeur de δT pour $L = 10\ \text{km}$.

   Rappel mathématique : $(1-x)^\alpha \simeq 1 - \alpha x$ pour $x << 1$

➢ Types de fibre optique

- Fibre multimode à saut d'indice :

forte dispersion intermodale

- Fibre multimode à gradient d'indice :

faible dispersion intermodale

- Fibre monomode :

pas de dispersion intermodale

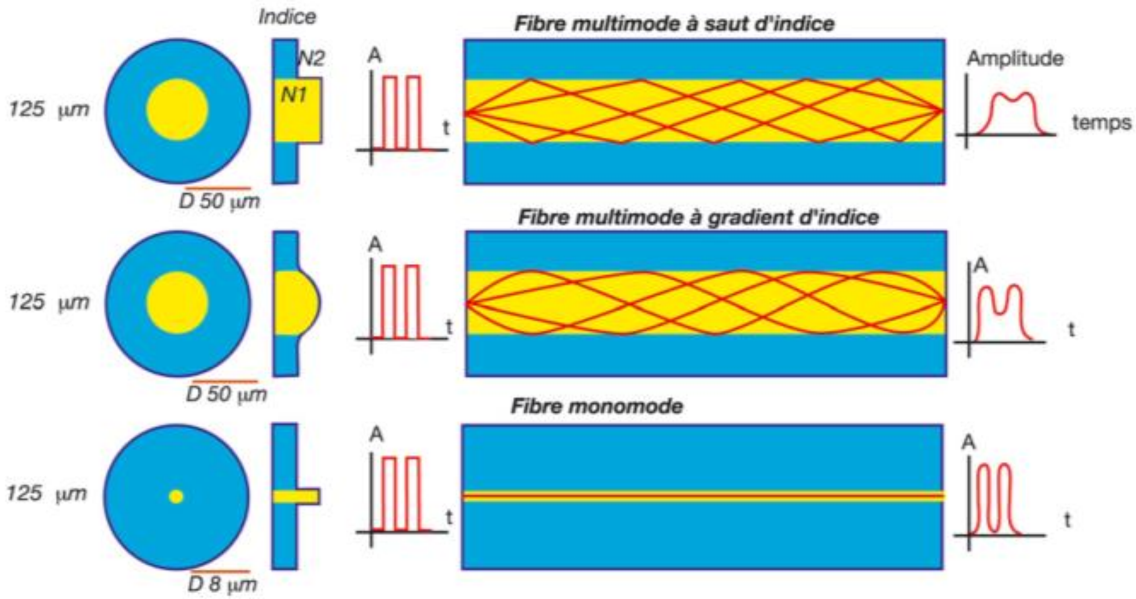


FIGURE 11 : Différents types de fibre optique