

Transmission par fibre Optique



Prof : Elmagroud

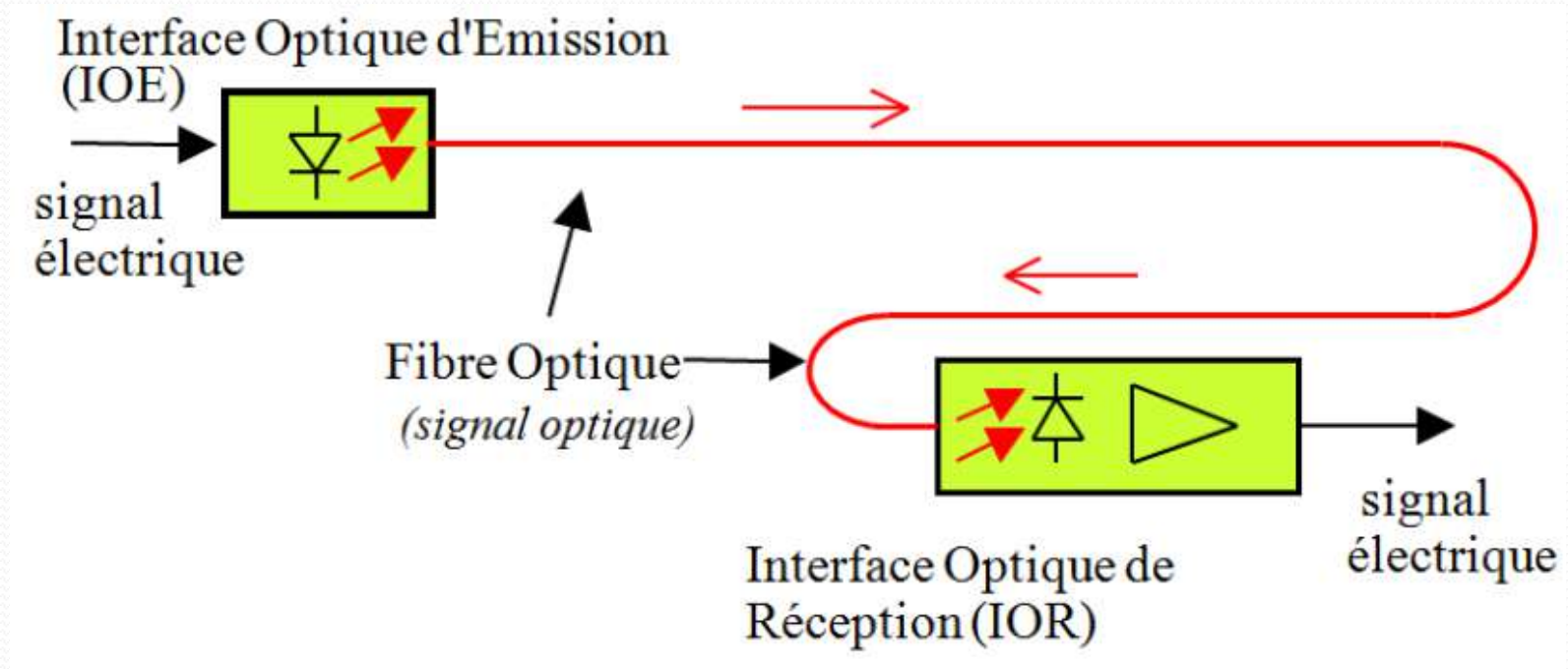
Plan du cours

1. Introduction
2. Fibre optique
3. Emetteur et récepteur optoélectronique
4. Système de transmission sur fibre optique
5. Exemples d'applications



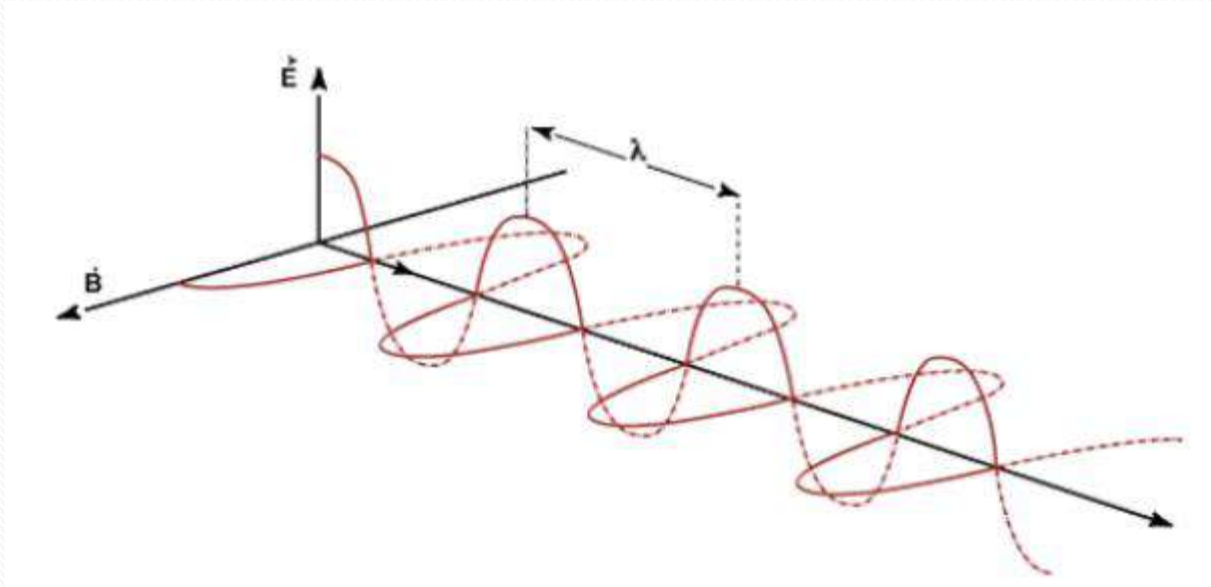
1.Introduction

Éléments d'une chaîne de communication optique



- Interface optique d'émission: diode électroluminescente (DEL) ou diode laser (DL)
- Support de transmission: fibre optique
- Interface optique de réception: photodiode

Lumière: nature ondulatoire



La lumière est une onde électromagnétique, caractérisée par un champ électrique \vec{E} , un champ magnétique \vec{B} et une longueur d'onde λ [m] tel que :

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

où c [m.s^{-1}] est la vitesse de la lumière dans le vide et ν [Hz] est la fréquence

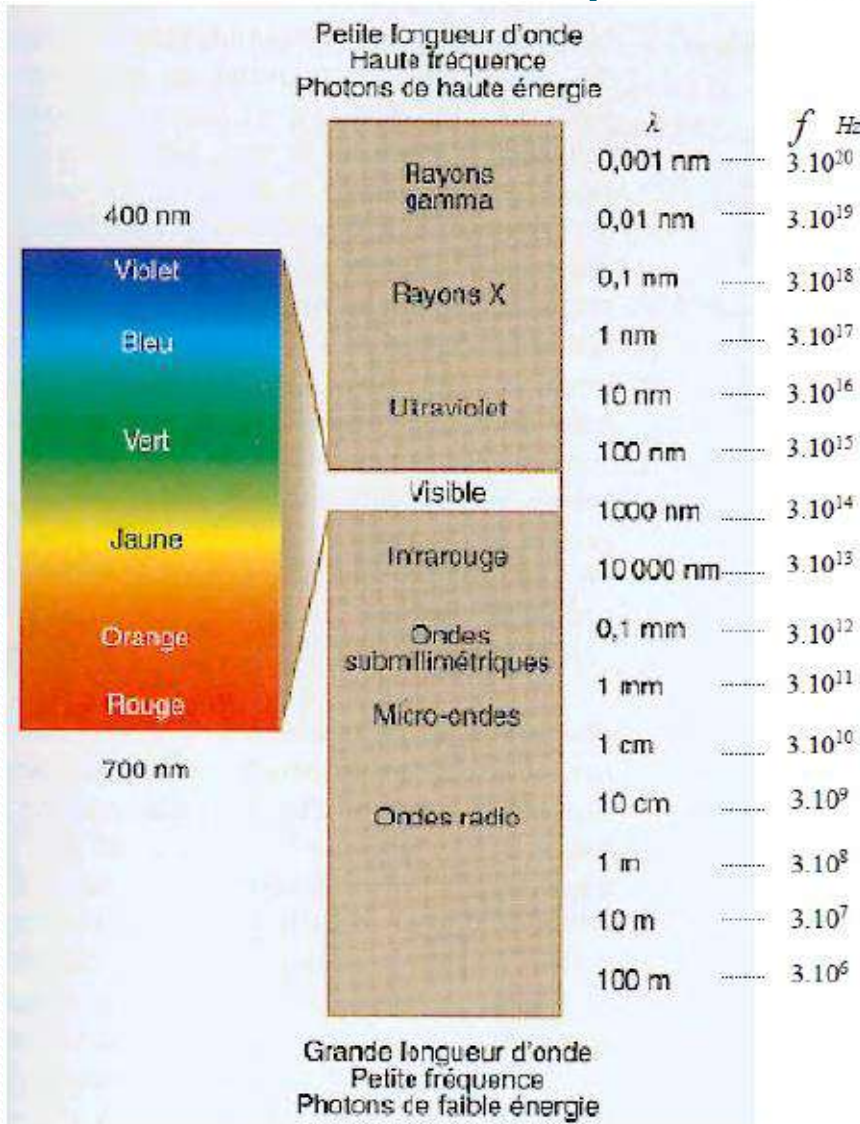
Lumière: nature corpusculaire

La lumière est constituée de particules appelées photons, chaque photon transporte une énergie élémentaire:

$$E_{\phi} = h \cdot \nu$$

où $h = 6,626, 10^{-34}$ [J,s] est la constante de Planck

Spectre de lumière



- La lumière visible s'étend du violet au rouge, ce qui correspond aux longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm
- La lumière visible n'est qu'une partie du spectre de la lumière
- Le spectre de lumière est constitué de la partie visible + infrarouge + ultraviolet

Indice de réfraction

Définition

L'indice de réfraction n d'un milieu est

- défini par le rapport entre c et la vitesse de phase v_ϕ de la lumière dans le milieu considéré $n = \frac{c}{v_\phi}$
- lié à la permittivité diélectrique ε du milieu $n^2 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

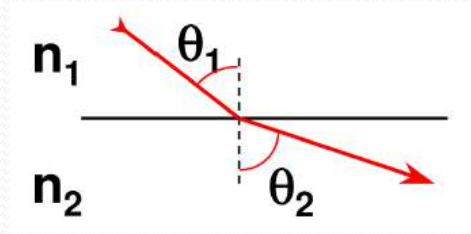
où $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ est la permittivité diélectrique du Vide

- Indice de réfraction de quelques matériaux :

Air	Eau	Huile	Verre	Plastique
1,0002	1,333	1,5	1,47 - 2,72	1,22

Théorie de l'optique géométrique

- Soit une onde incidente qui traverse le dioptre entre deux milieux diélectriques d'indices respectifs n_1 et n_2

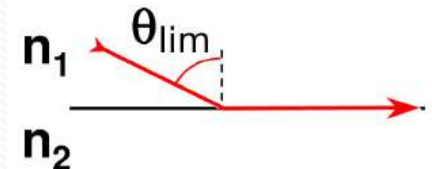


- D'après la loi de Snell-Descartes, l'angle d'incidence et l'angle réfracté sont liés par la relation

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

- Réflexion totale :

si $n_1 > n_2$ il existe un angle limite θ_{lim} tel que



- si $\theta_1 \geq \theta_{lim}$ on a réflexion totale et $\theta_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$



2. Fibre optique

Fibre optique

Nécessité d'un guidage de la lumière :

- La lumière est capable de se propager en espace libre
- Est-il possible de réaliser des communications optiques en espace libre ?

Fibre optique : Diffraction

Nécessité d'un guidage de la lumière :

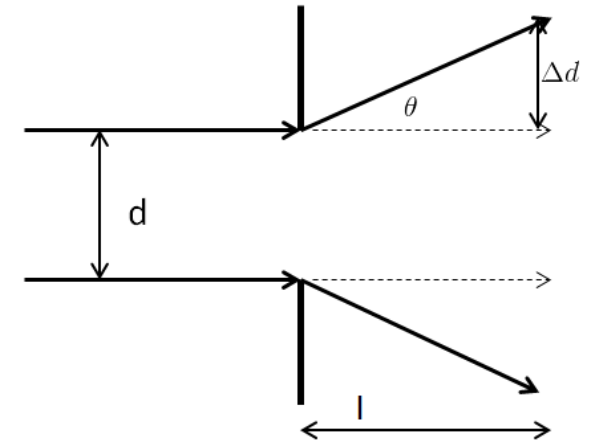
- Diffraction: flux lumineux de dimension transverse d et de longueur d'onde λ subit une divergence naturelle :

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d}$$

- Est-il possible de réaliser des communications optiques en espace libre ?

Fibre optique : Diffraction

Nécessité d'un guidage de la lumière :



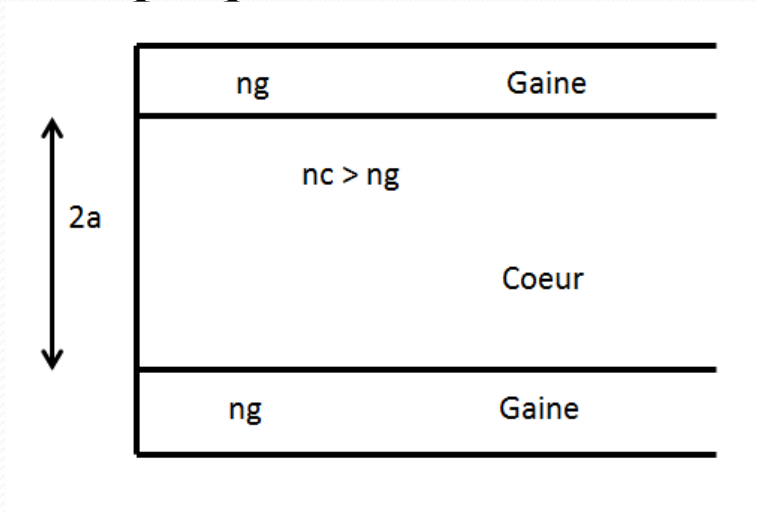
- Pour un faisceau lumineux de diamètre $d = 5 \text{ mm}$ et à une longueur d'onde $\lambda = 500 \text{ nm}$, calculer l'élargissement du faisceau Δd après propagation sur une distance $l = 1 \text{ Km}$

Réponse : $\Delta d = 10 \text{ cm}$

➡ Seul un guidage de la lumière permet d'éviter la perte de l'énergie par diffraction

Fibre optique : Constitution

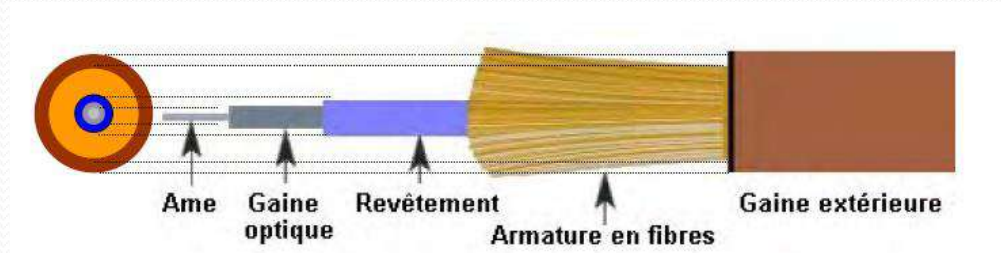
Constitution d'une fibre optique :



- Coeur diélectrique cylindrique d'indice de réfraction n_c et de diamètre $2a$ entouré par la gaine d'indice $n_g < n_c$
- Matériau diélectrique utilisé: verre de silice dopé par du Bore ou du Germanium pour obtenir une différence d'indice

Fibre optique : Constitution

Constitution d'une fibre optique :



- L'âme ou le cœur est la région de la fibre dans laquelle se propage la lumière
- La gaine se comporte comme un miroir réfléchissant pour la lumière à l'interface cœur/ gaine
- Le revêtement est une couche en plastique qui entoure la fibre pour la renforcer, elle aide à absorber les chocs
- L'armature en fibres permet de protéger le cœur contre les forces d'écrasement et les tensions mécaniques excessives lors de l'installation
- La gaine extérieure complète la protection mécanique du cœur, elle est généralement de couleur orange, noire ou jaune

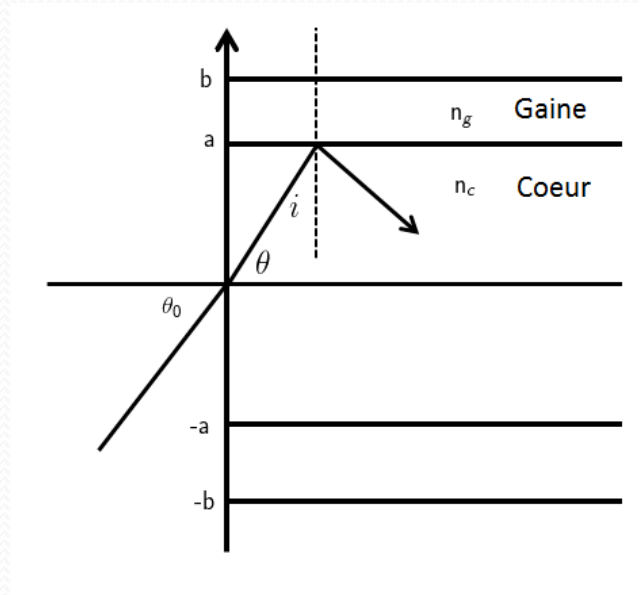
Fibre optique : Notations et valeurs typiques

- Indice de réfraction du cœur n_c , exemple: $n_c = 1,45$
- Différence d'indice relative : $\Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2n_c^2}$

exemple : $\Delta = 10^{-4} \text{ à } 10^{-2}$

- Diamètre du cœur $2a$, exemple : $2a = 5 \text{ à } 100 \mu m$
- Diamètre extérieur de la gaine $2b$, exemple: $2b = 125 \mu m$

Condition de guidage



$$\sin i \geq \frac{n_g}{n_c}$$

$$\Rightarrow \cos \theta \geq \frac{n_g}{n_c}$$

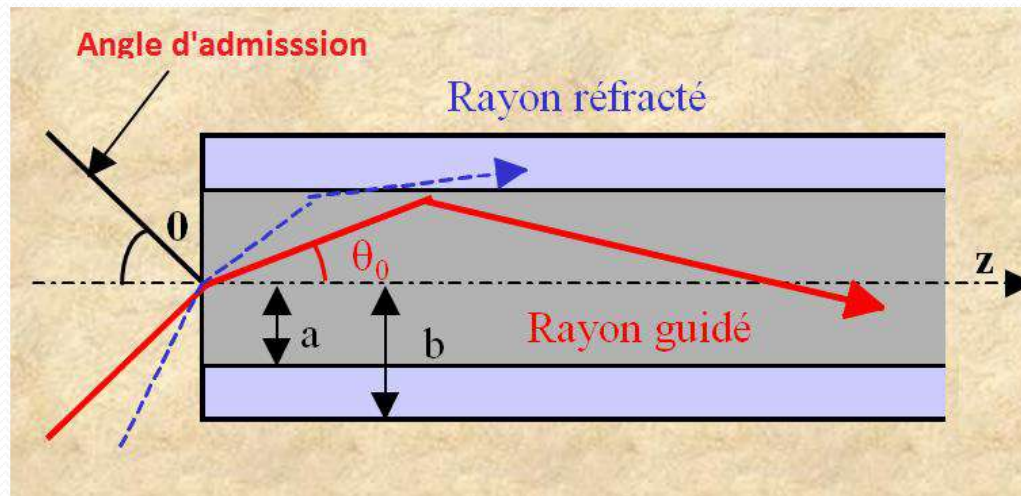
$$\Rightarrow \sin \theta_0 \leq \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Angle d'admission et ouverture numérique

Définition

- **Angle d'admission** : l'angle maximum θ_{0max} du faisceau lumineux à l'entrée de la fibre pour assurer sa propagation guidée dans le cœur
- **Ouverture numérique**: $ON = \sin \theta_{0max}$
- Une grande ON permet d'injecter une grande quantité de lumière issue d'une source assez divergente
- Une petite ON n'autorise que l'injection d'un faisceau lumineux issu d'une source très directive

Angle d'admission



Les rayons incidents doivent nécessairement appartenir à un cône de demi-angle au sommet égal à l'angle d'admission

Ouverture numérique

- L'ouverture numérique d'une fibre optique est donnée par:

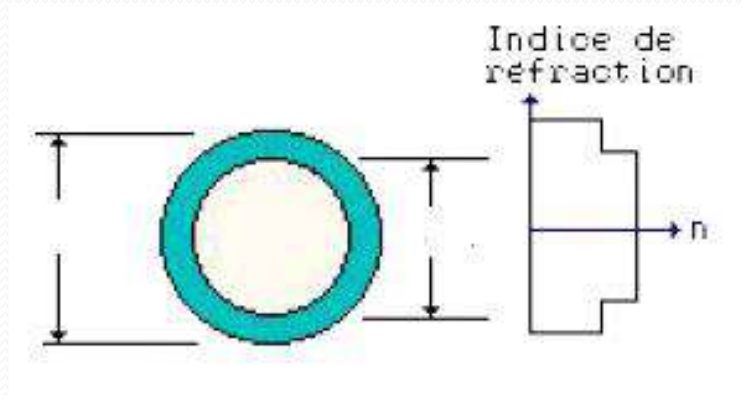
$$\begin{aligned} ON &= \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \\ &= n_c \sqrt{2\Delta} \end{aligned}$$

Exemple :

Pour des valeurs usuelles $n_c = 1,45$ et $\Delta = 7 \cdot 10^{-3}$, calculer l'ouverture numérique et l'angle d'admission

Réponse : $ON = 0,17$ et $\theta_{0max} = 10^\circ$

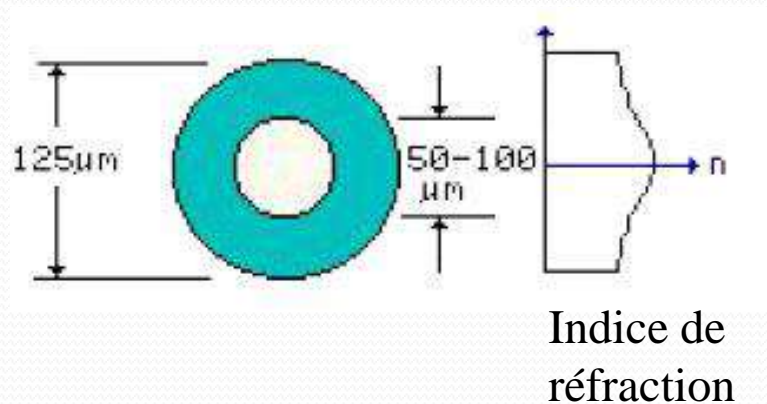
Fibre à saut d'indice



- Indice n_c du cœur et l'indice n_g de la gaine sont constants, $n_c > n_g$
- Saut d'indice à la surface de séparation entre les deux milieux (cœur et gaine)
- L'ouverture numérique est constante sur toute la face d'entrée de la fibre

Fibre à gradient d'indice 1/2

Constitution d'une fibre optique :



- Décroissance progressive et continue de l'indice de réfraction du cœur
- L'ouverture numérique est variable à la face d'entrée de la fibre

Fibre à gradient d'indice 2/2

- Profil d'indice du cœur est donné par la loi :

$$n_c(r) = n_c(0) \sqrt{1 - 2 \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

où α est le coefficient du profil, on distingue

- $\alpha = 1$: profil triangulaire
 - $\alpha = 2$: profil parabolique
 - $\alpha = \infty$: profil à saut d'indice
- On définit l'ouverture numérique locale

$$ON_{loc} = \sqrt{n_c^2(r) - n_g^2} = ON(r)$$

- L'ouverture numérique est maximale au centre du cœur et décroît avec r

Fréquence normalisée

Définition

La **fréquence normalisée** V est une caractéristique des dimensions de la fibre par rapport à la longueur d'onde pondérée par les propriétés de guidage et elle est définie par:

$$\begin{aligned} V &= \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \\ &= \frac{2\pi a}{\lambda} ON = \frac{2\pi a}{\lambda} n_c \sqrt{2\Delta} \end{aligned}$$

Modes guidés et nombre de modes

- Selon la valeur de la fréquence normalisée, il peut exister plusieurs modes guidés dans la fibre.
- Chaque mode est caractérisé par sa propre vitesse de propagation
- Le nombre de modes M peut être approximé par:
 - $M \cong \frac{V^2}{2}$: fibre à saut d'indice
 - $M \cong \frac{\alpha}{\alpha+2} \cdot \frac{V^2}{2}$: fibre à gradient d'indice de profil α

Exemple :

Pour une fibre à saut d'indice, $n_c = 1,45$; $\Delta = 7 \cdot 10^{-3}$;

$2a = 50\mu m$ et $\lambda = 900nm$, on a $V = 29,95$ et $M = 448$

Fibre monomode et fibre multimode

Selon la valeur de la fréquence normalisée V , on distingue deux types de fibre optique :

- Si $V > 2,405$, il y a possibilité d'avoir plusieurs modes de propagation on parle de : **fibre multimode**
- Si $V \leq 2,405$, un seul mode de propagation possible, on parle alors de : **fibre monomode**

Condition de propagation monomode

$$\begin{aligned} V \leq 2,405 &\Rightarrow \frac{2\pi a}{\lambda} n_c \sqrt{2\Delta} \leq 2,405 \\ &\Rightarrow 2\pi a \cdot \sqrt{2\Delta} \leq \frac{2,405 \cdot \lambda}{n_c} \end{aligned}$$

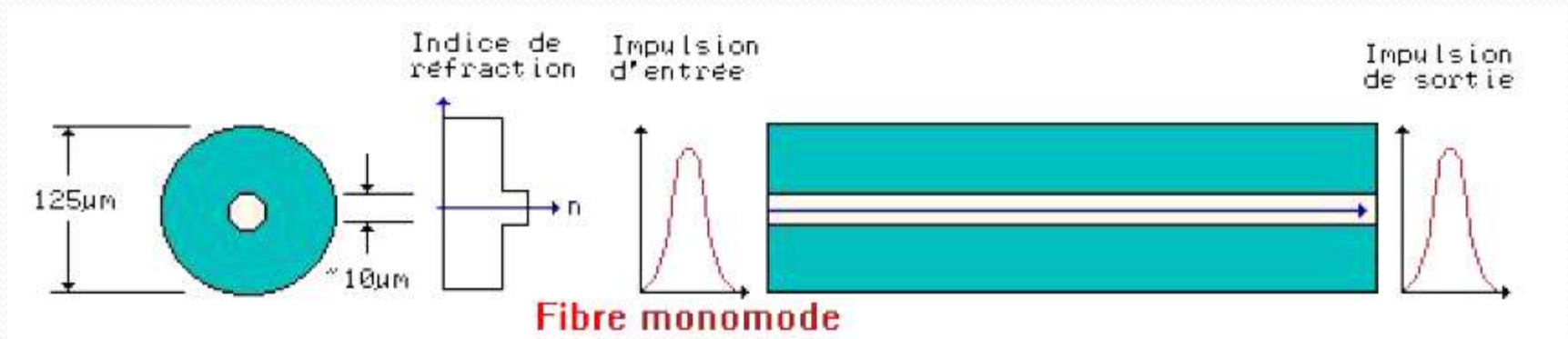
- Petit diamètre du cœur $2a$ (moins de $10\mu m$)
- Faible différence d'indice relative Δ (moins de 0,5 %)

Longueur d'onde de coupure λ_c

$$V \leq 2,405 \Rightarrow \lambda \geq \lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} n_c \sqrt{2\Delta}$$

Fibre monomode

Caractéristiques du fibre monomode :



- Avantage : Chemin de propagation pratiquement direct
- Inconvénient : Petit diamètre du cœur (difficulté de fabrication et de connexion)

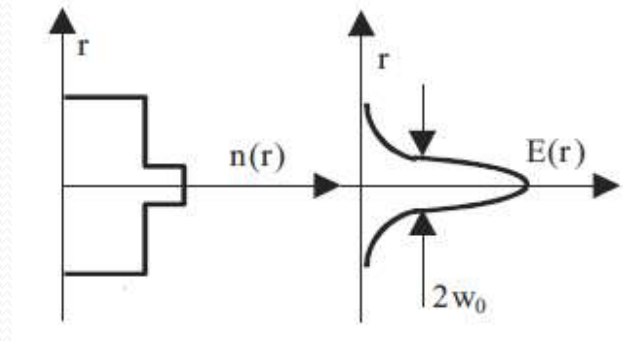
Fibre monomode

Paramètres de la fibre monomode :

- Le profil de l'intensité du champ est d'allure gaussienne

$$E(r) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right)$$

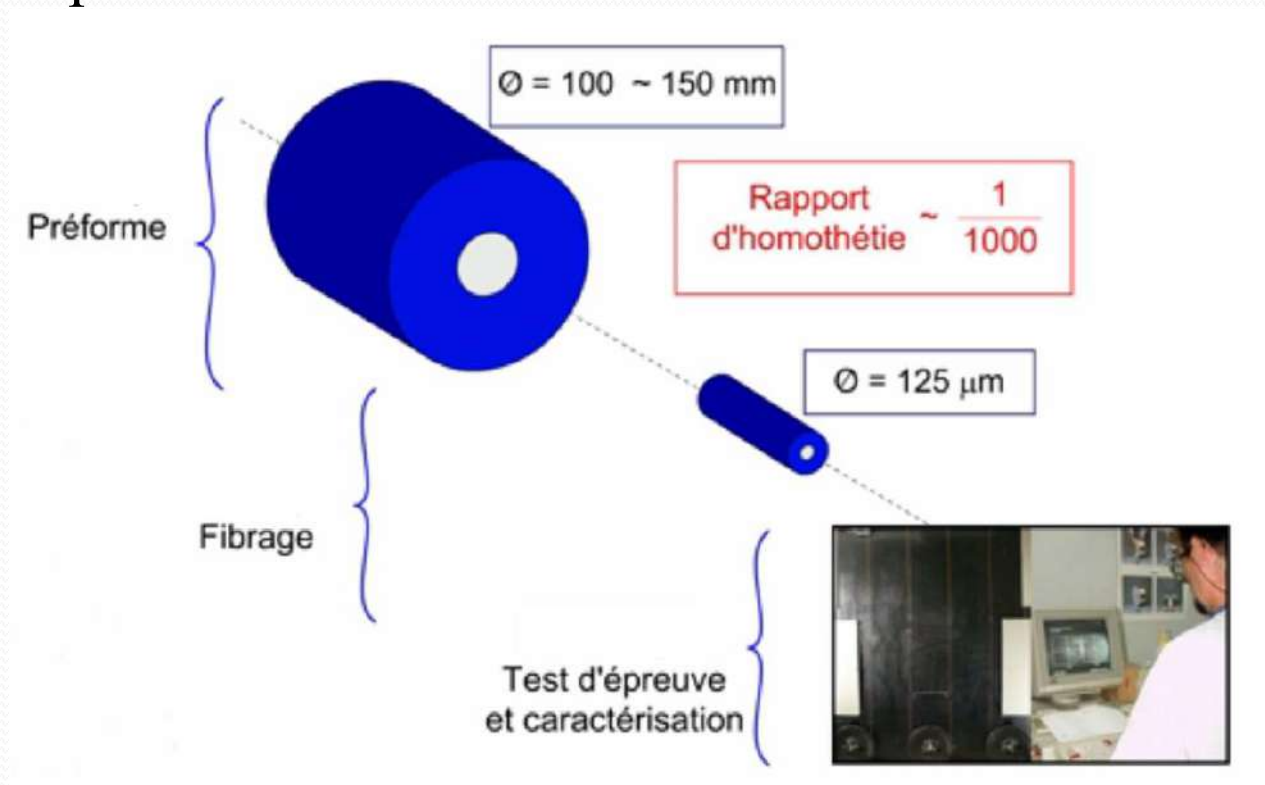
Où $2w_0$ est appelé diamètre de mode



- L'approximation gaussienne est particulièrement valable pour des valeurs $1,8 < V < 2,4$; c'est-à-dire proche de la coupure
- Le champ peut s'étaler dans la gaine optique si $w_0 > a$

Techniques fabrication d'une fibre optique

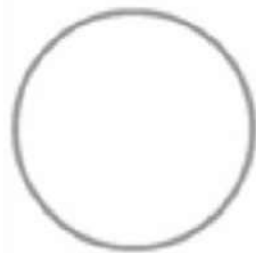
- Préforme
- Fibrage
- Test d'épreuve et caractérisation



Techniques fabrication d'une fibre optique

Fabrication de la préforme :

- La **préforme** est un objet en verre de diamètre 100 à 150 mm
- Utilisation d'un tube et dépôt des couches à l'intérieur du tube en phase vapeur
- Lorsque le tube est rempli, il sera fermé: c'est l'étape de rétreint où on obtient le barreau du cœur
- Des couches de verre sont rajoutées à l'extérieur pour obtenir la préforme aux dimensions voulues



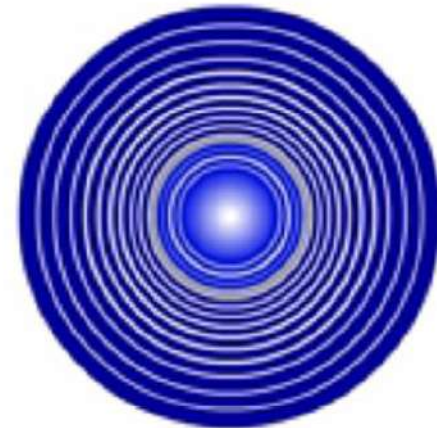
Tube de
dépôt



Tube
rempli



Tube
fermé

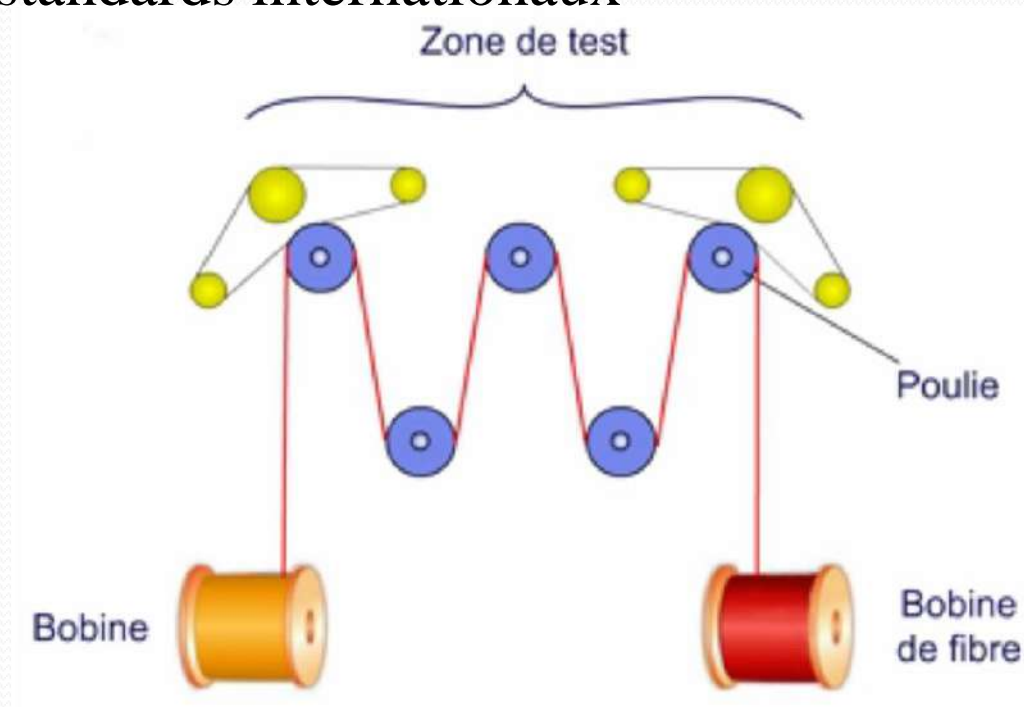


PREFORME

Techniques fabrication d'une fibre optique

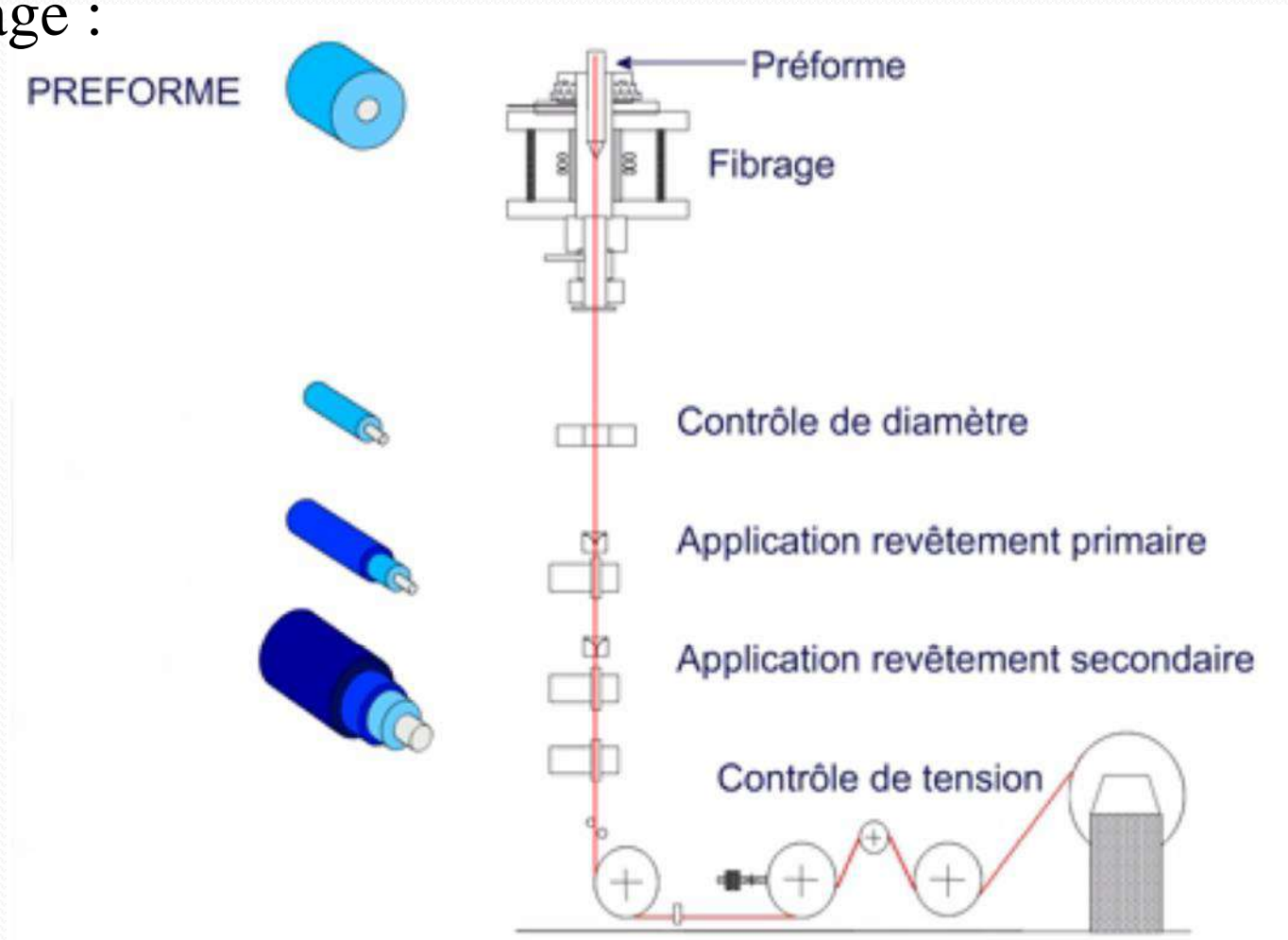
Test d'épreuve et caractérisation

- Test d'épreuve: les points faibles de la fibre sont éliminés afin d'assurer une longue durée de vie
- Caractérisation: plusieurs paramètres de la fibre sont mesurés selon les standards internationaux



Techniques fabrication d'une fibre optique

Fibrage :



Atténuation

1- Atténuation intrinsèque :

- La puissance optique transportée décroît au cours de la propagation selon la loi

$$P_s = P_e \cdot 10^{-\frac{\alpha L}{10}}$$

où P_e est la puissance optique à l'entrée de la fibre, L est la longueur de la fibre et α [dB/Km] est le coefficient d'atténuation

- Le coefficient d'atténuation α dépend du matériau et de la longueur d'onde λ

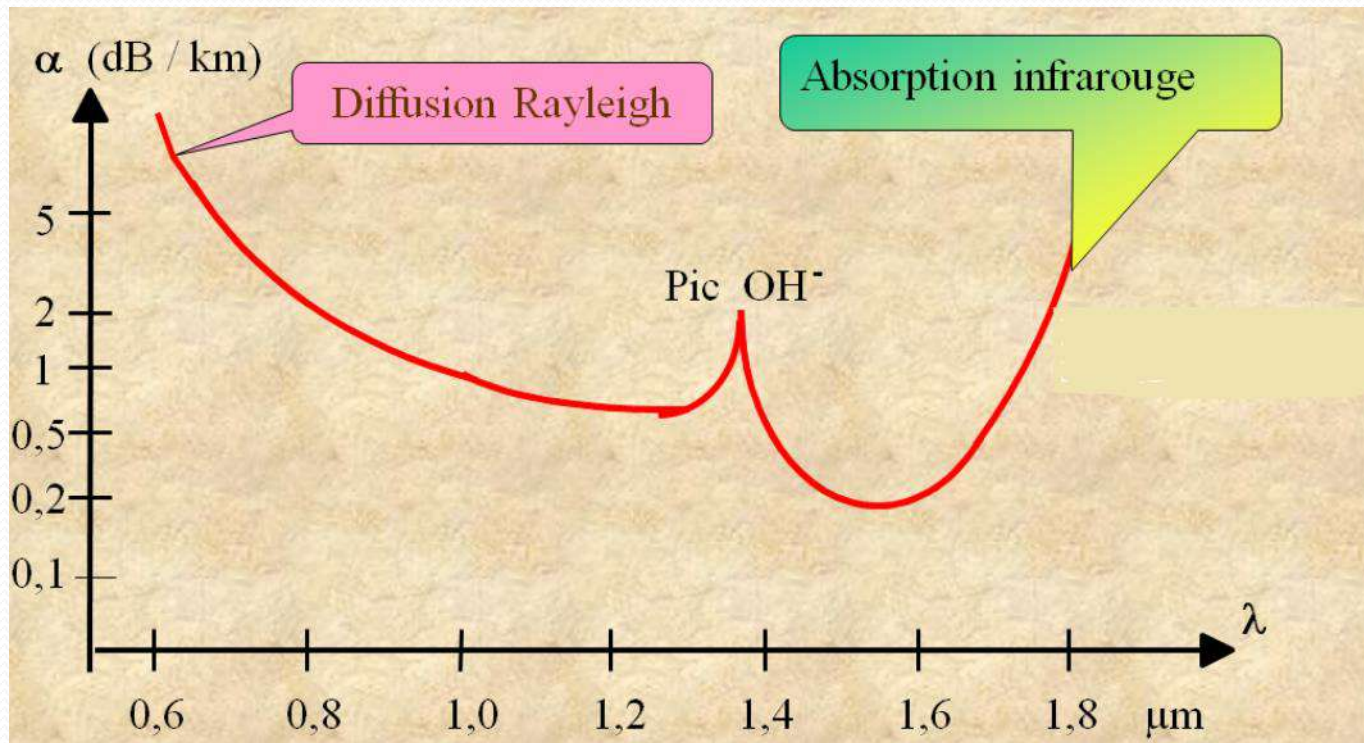
 Impact direct sur la portée de la liaison

Atténuation

1- Atténuation intrinsèque : Origines physiques

- L'absorption par le matériau qui intervient surtout dans le domaine de l'infrarouge
- Des pics d'absorption par diverses impuretés, le plus gênant dans la silice est la présence des ions OH^-
- Diffusion Rayleigh, due à l'interaction de la lumière avec le matériau, qui la diffuse de façon isotrope. Elle diminue rapidement avec la longueur d'onde suivant une loi $\propto 1/\lambda^4$

Atténuation spectrale de la fibre de silice

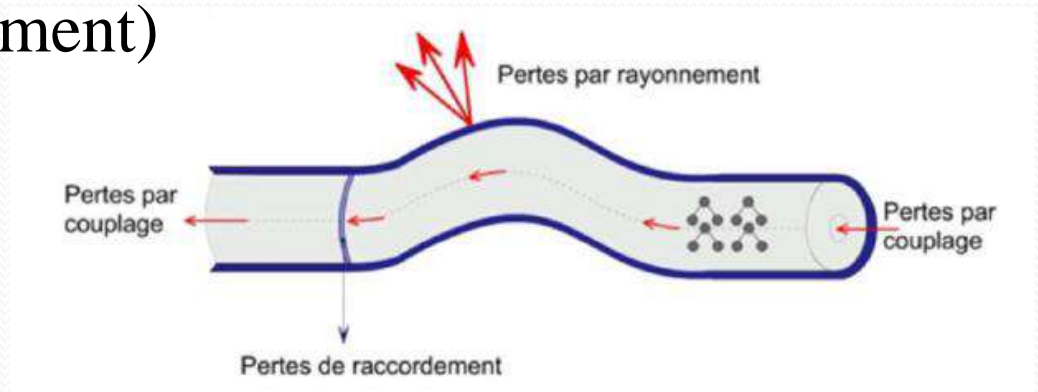


- Minimum relatif autour de 0,35 dB/Km à 1,3 μm
- Minimum absolu autour de 0,17 dB/Km à 1,55 μm

Atténuation

2- Atténuation extrinsèque :

- Il s'agit de fuites de la lumière hors du guide, provoquées par des déformations ou des discontinuités de celui-ci
- Pertes par courbures ou micro-courbures
- Pertes aux raccordements: différence entre les paramètres des deux fibres, mauvais positionnement (excentrement, désalignement, écartement)
- Pertes par couplage



La dispersion

Définition :

Élargissement temporel des impulsions de lumière au cours de la propagation

➤ Origines:

- Dispersion intermodale
- Dispersion chromatique: dispersion du matériau et dispersion de guidage

➤ Conséquences:

- Limitation du débit
- Limitation de la portée pour un débit fixé

La dispersion

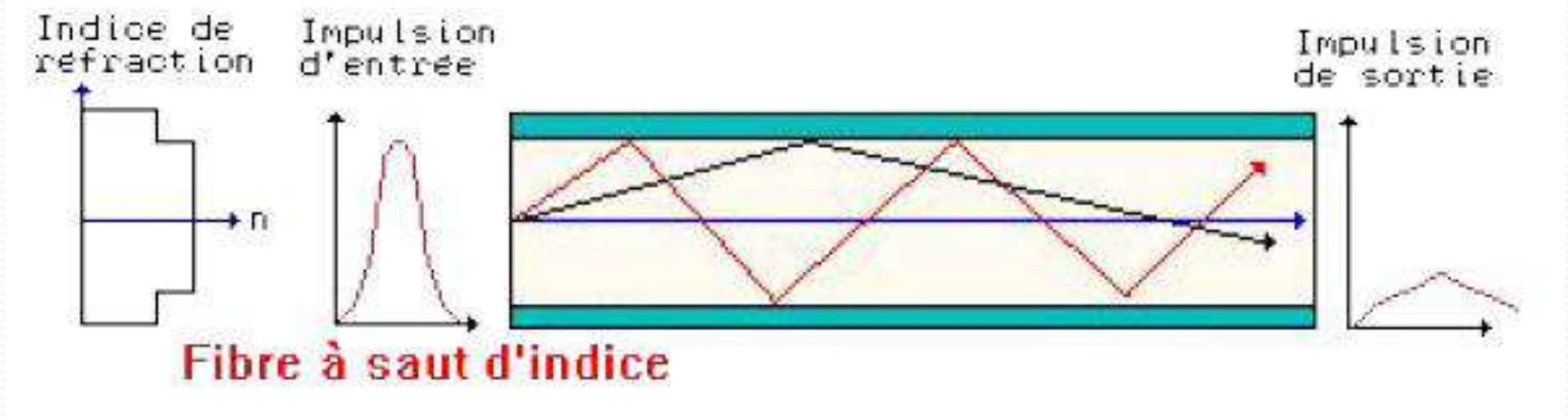
1- Dispersion intermodale

- Coexistence de plusieurs modes de propagation dans la fibre multimode
- Chaque mode ayant sa propre vitesse de propagation
- L'impulsion à la sortie de la fibre est élargie par la différence du temps de propagation entre le mode le plus rapide et le mode le moins rapide

La dispersion

1- Dispersion intermodale

Trajectoire des rayons dans la fibre à saut d'indice



➡ Les rayons lents subissent des réflexions multiples à l'interface cœur/gaine

La dispersion

1- Dispersion intermodale

Dispersion intermodale dans la fibre à saut d'indice :

- L'étalement (élargissement $\Delta\tau_{im}$) temporel dû à la dispersion intermodale dans la fibre à saut d'indice est donné par la relation:

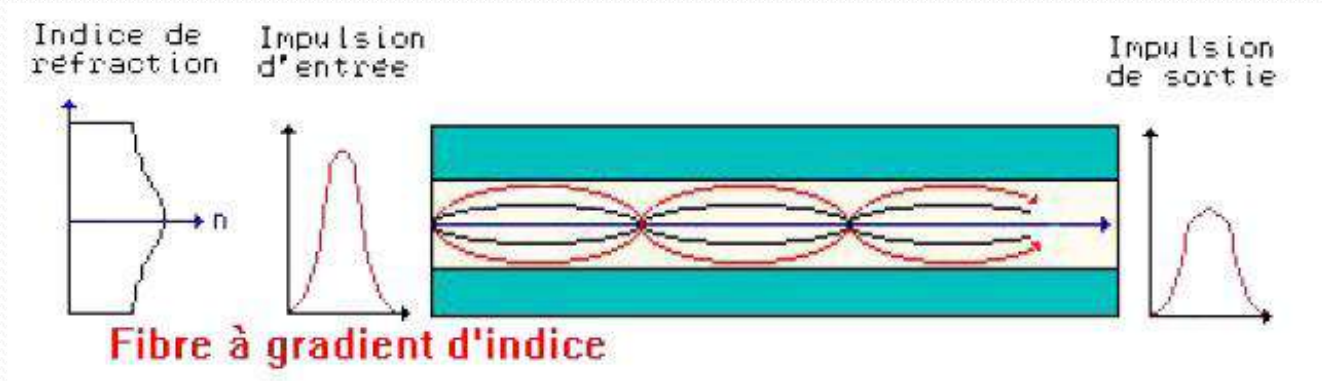
$$\Delta\tau_{im} = \frac{L}{2c} \cdot \frac{ON}{n_c} = \frac{L \cdot n_c \cdot \Delta}{c}$$

- Si l'ON diminue, la dispersion intermodale diminue
- Mais, si l'ON diminue, la puissance injectée dans la fibre diminue aussi
- Choix de l'ON est un compromis

La dispersion

1- Dispersion intermodale

Trajectoire des rayons dans la fibre à gradient



➡ La trajectoire des rayons a une allure curviligne

La dispersion

1- Dispersion intermodale

Dispersion intermodale dans la fibre à gradient d'indice:

- Le profil à gradient parabolique $\alpha \simeq 2$ minimise la dispersion intermodale
- L'étalement temporel dû à la dispersion intermodale dans la fibre à gradient d'indice optimisé (parabolique) est donné par la relation :

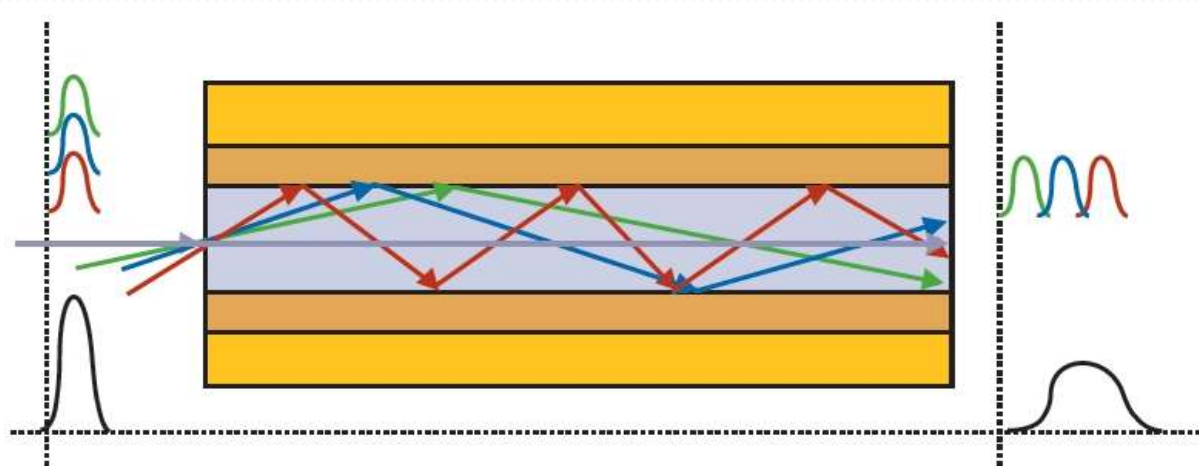
$$\Delta\tau_{im} = \frac{L}{32c} \cdot \frac{ON_{max}^4}{n_c(0)^3} = \frac{L \cdot n_c(0) \cdot \Delta^2}{8c} < \Delta\tau_{im} / \text{saut d'indice}$$

- Gain en bande passante d'un facteur entre 100 et 1000 par rapport à la fibre multimode à saut d'indice

La dispersion

2- Dispersion du matériau

- La source de lumière n'est pas parfaitement monochromatique et présente une certaine largeur spectrale $\Delta\lambda$
- L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde
- Propagation des différentes composantes spectrales de la lumière avec des vitesses différentes
- Phénomène d'étalement dans le temps (dispersion)



La dispersion

2- Dispersion du matériau

- L'étalement temporel dû à la dispersion du matériau est donné par :

$$\Delta\tau_M = |D_M(\lambda)| \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

où

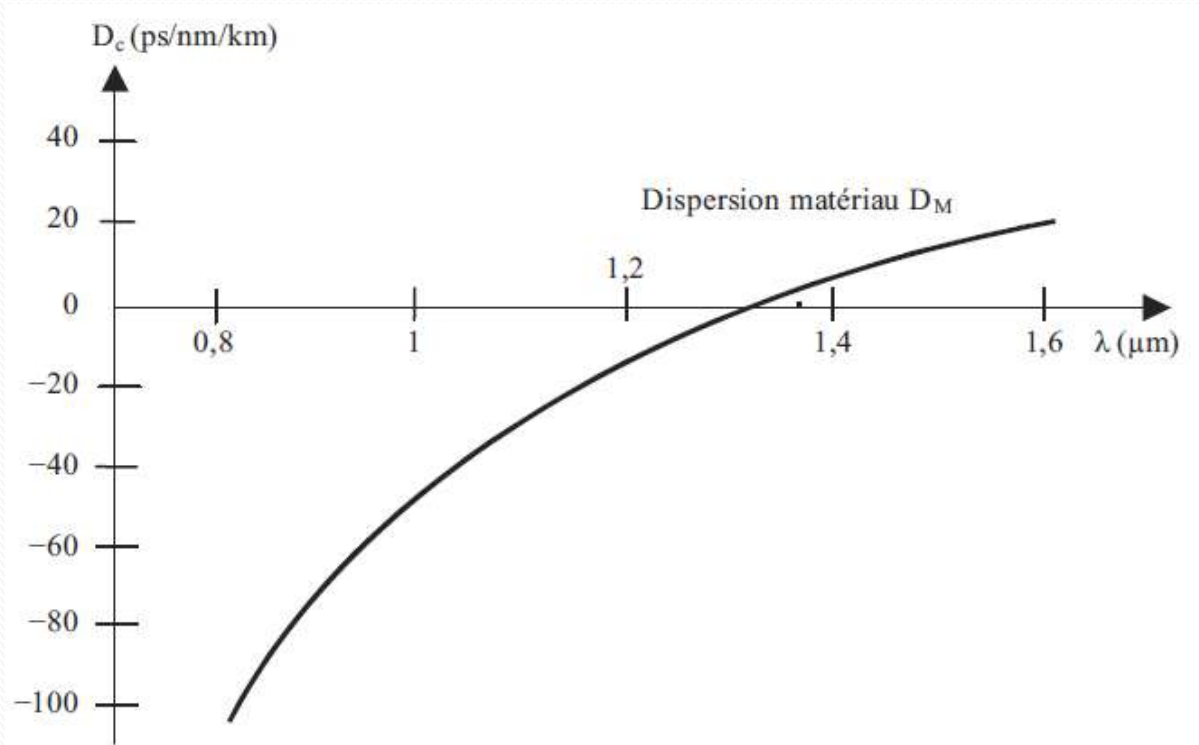
$$D_M(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right)$$

est le coefficient de dispersion du matériau [ps/ (Km.nm)]

- $D_M < 0$: le rouge est le plus rapide (dispersion ordinaire)
- $D_M > 0$: le bleu est le plus rapide (dispersion extraordinaire)

La dispersion

2- Dispersion du matériau



- Dispersion matériau de la fibre à silice s'annule au voisinage de $1,3\mu\text{m}$

La dispersion

3- Dispersion du guidage

- Elle est due à la variation de la vitesse de propagation avec la longueur d'onde pour chaque mode
- L'étalement temporel dû à la dispersion du guidage est donné par :

$$\Delta\tau_G = |D_G| \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

où D_G [ps/(Km.nm)] est le coefficient de dispersion du guidage

- La valeur du coefficient de dispersion du guidage est faible et toujours négative

La dispersion

4- Dispersion chromatique

- La dispersion chromatique provient des contributions de la dispersion du matériau et la dispersion de guidage
- L'étalement temporel dû à la dispersion chromatique est donné par :

$$\Delta\tau_c = |D_c(\lambda)| \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

où $D_c = D_M + D_G$ est le coefficient de dispersion chromatique [ps/(Km.nm)]

Bande passante

4- Dispersion chromatique

- L'étalement temporel total dû à la dispersion (intermodale et chromatique) est calculé par

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_{im}^2 + \Delta\tau_c^2}$$

- La bande passante de la fibre peut être approximée par

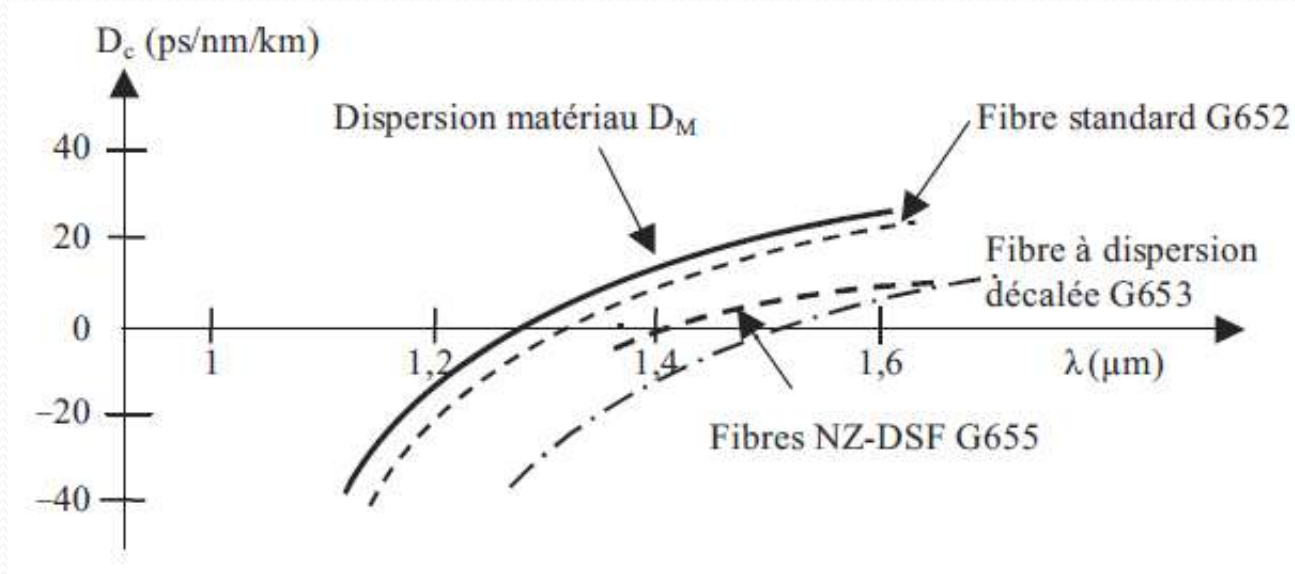
$$B \cong \frac{1}{2\Delta\tau}$$

- La fibre peut être caractérisée aussi par la bande passante kilométrique qui est la bande passante mesurée à 1 Km[MHz.Km]

Fenêtres de transmission

Fenêtre	Première	Deuxième	Troisième
Longueur d'onde	Autour 850 nm	Autour 1300 nm	Autour 1550 nm
Type de fibre	Multimode	Multimode et monomode	Monomode
Atténuation	Forte (2 à 4 dB/Km)	Faible (0;4 à 1 dB/Km)	Très faible (0;2 dB/Km)
Dispersion chromatique	Forte	presque nulle	Faible mais non nulle
Coût	Faible	Moyen	Elevé

Exemple de fibres standardisées



- Fibre standard G652 : diamètre du cœur 9 μm , utilisation optimale à 1,3 μm où la dispersion chromatique s'annule
- Fibre à dispersion décalée G653 : diamètre du cœur 7 μm , profil d'indice plus complexe, la dispersion s'annule vers 1,55 μm
- Fibre à dispersion décalée non nulle G655: dispersion chromatique réduite à une valeur faible mais non nulle dans la troisième fenêtre



Fin partie 1