

## Transmission optiques

Éléments d'une chaîne de communication optique :

- ✓ Interface optique d'émission : Diode électroluminescente ou diode laser.
- ✓ Support de transmission : Fibre optique.
- ✓ Interface optique de réception : photodiode.

Avantages de la fibre optique :

- Très faible atténuation sur une grande plage de fréq.
- Très grande bande passante.
- Adaptation pour les communications haut débit.
- Adaptation pour les " à grandes distances.
- Immunité aux perturbation EM.

Lumière : Nature ondulatoire

↳ La lumière est une onde EM, caractérisée par un champ électrique  $\vec{E}$ , un champ magnétique  $\vec{B}$  et une longueur d'onde  $\lambda [m]$  Tq :  $\lambda = \frac{c}{f}$

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

$$E_p = h \cdot \nu$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-36} \text{ J.s}$$

cste 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

Il est défini par le rapport entre c et la vitesse de phase  $v_p$  de la lumière dans le milieu considéré

$$n = \frac{c}{v_p}$$

Il est lié à la permittivité diélectrique  $\epsilon$  du milieu

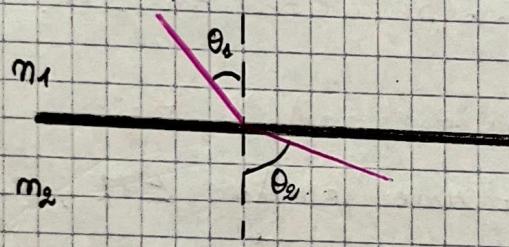
$$n^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

permittivité diélectrique du vide.

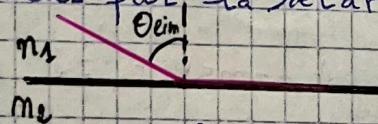
## Théorie de l'optique géométriques

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'indice 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  $\theta_{\text{lim}}$  tel que si  $\theta_1 > \theta_{\text{lim}}$  on a une réflexion totale et :  $\theta_{\text{lim}} = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$

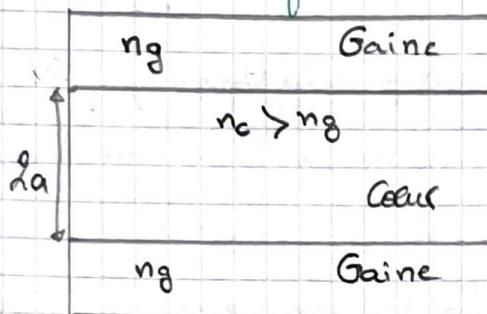
## Fibre optique :

• la diffraction : flux lumineux de dimension transverse  $d$  et de longueur d'onde  $\lambda$  subit une divergence naturelle  $\Theta \approx \frac{\lambda}{d}$

↳ Pour les longueurs d'onde optiques,  $\Theta$  est très petit.

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

Constitution d'une fibre optique :



✓ Cœur 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

Caractéristiques 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 du couleur rouge, noire ou jaune

↳ Différence d'indice relatifs  $\Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2n_c^2}$

↳ Diamètre du cœur  $2a$ .

↳ Diamètre extérieur de la gaine  $2b$ .

Condition du guidage:  $\sin \theta_o < \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$

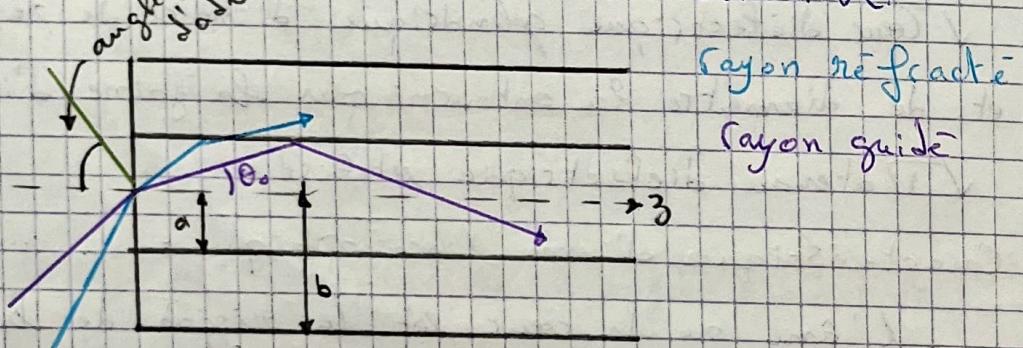
Angle d'admission: C'est l'angle max  $\theta_{o\max}$  du faisceau lumineux à l'entrée de la fibre pour assurer sa propagation guidée dans le cœur.

$$= n_c \sqrt{2\Delta}$$

Ouverture numérique:  $ON = \sin \theta_{o\max}$   $ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$

✓ une grande ouverture permet d'injecter une grande quantité de lumière issu d'une source assez divergente.

✓ Une petite ON n'autorise que l'injection d'un faisceau lumineux issu d'une source très directive.



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

Fibre à saut d'indice:

↳ Indice du cœur et de la gaine sont ces:  $n_c > n_g$

↳ Saut d'indice à la surface de séparation entre les 2 milieux (cœur et gaine)

↳ l'ouverture numérique est constante sur toute la face d'entrée de la fibre

Fibre à gradient d'indice:

↳ Decroissance progressive et continue de l'indice de refraction du cœur.

ON est variable à la face d'entrée de la fibre

Profil d'indice du cœur

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

où:  $\alpha$  est le coeff du profil, on distingue:

$\rightarrow \alpha = 1$  : profil triangulaire

$\rightarrow \alpha = 2$  : profil parabolique

$\rightarrow \alpha = \infty$  : profil à saut d'indice.

Ouverture numérique locales

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

Elle est max au centre du cœur et 0 avec  $r$ .

Fréquence normalisée =  $V$

Une caractéristique des dimensions de la fibre par rapport à la longueur d'onde pondérée par les propriétés de guidage :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} ON = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot n_c \sqrt{2\Delta}$$

Nombre guidés et nbr de modes

Le nombre de modes guidés dépend de la valeur de la fréq normalisée, il peut exister plusieurs modes guidés dans la fibre.

Chaque mode est caractérisé par sa propre vitesse de propagation

Le nbr de modes  $N$  peut être approximé par :

$$N \approx \frac{V^2}{2} ; \text{ Fibre à saut d'indice}$$

$$N \approx \frac{\alpha}{\alpha + 2} \cdot \frac{V^2}{2} ; \text{ Fibre à gradient d'indice de profil } \alpha.$$

## Types de fibre optiques

- ↳  $V > 2,405$ : fibre multimode
- ↳  $V \leq 2,405$ : fibre monomode

## Condition de propagation monomode

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

- ↳ Petit diamètre du cœur  $a$  (moins de 10 μm)
- ↳ Faible différence d'indice rélatif  $\Delta$  (moins de 0,5%)
- longueur d'onde de coupure:

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

## Caractéristiques

- ⊕ Chemin de propagation pratiquement direct
- ⊖ Petit diamètre du cœur (Difficulté de fabrication et de connexion.)

## Modèle gaussien de la fibre monomode

↳ le profil de l'intensité du champ est d'allure gaussienne

$$| E(r) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2W_0^2}\right) | \quad \text{diamètre de mode.}$$

↳ l'approximation gaussienne est particulièrement valable pour des valeurs  $1,3 \leq V \leq 2,4$

càd: proche de la coupure

↳ le champ peut s'étaler dans la gaine optique si  $W_0 \gg a$

## Paramètres de la fibre monomode :

- La fibre monomode peut être caractérisée par des paramètres suivants :
  - longueur d'onde de coupure.
  - Diamètre de mode qui peut être exprimé par la relation empirique :

$$\left( \frac{w_0}{a} \approx 0,65 + 1,619 V^{-1/5} + 2,879 V^{-6} \right)$$

- le diamètre de mode est proche de la près de la coupure, mais il augmente rapidement lorsque  $V$ .  
On prend une marge par rapport à la coupure ( $V = 2,405$ ) pour garantir la condition de propagation monomode.
- Domaine optimal de  $V$  entre 1,8 et 2,2.

Etapes de fabrication : préforme → Fibrage → et caractérisation

→ Préforme : c'est un objet en verre de diamètre 100 à 150mm, 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 rétrécissement où on obtient le barreau de cœur, les couches de verre sont rajoutées à l'extérieur pour obtenir la préforme au dimensions voulues.

→ Fibrage : Préforme → Fibrage → Contrôle de diamètre → Application revêtement primaire → Application revêtement secondaire → Contrôle de tension.

→ Test d'épreuve : les défauts de la fibre sont éliminés afin d'assurer une longue durée de vie

→ Caractérisations : Plusieurs paramètres de la fibre sont mesurés selon les standards internationaux.

## Atténuation intrinsèque :

- La puissance optique transportée décroît au cours de la propagation selon la loi :  $P_s = P_e \cdot 10^{-\alpha L/10}$ 
  - avec :  $P_e$  : puissance optique à l'entrée de la fibre
  - $L$  : longueur de la fibre
  - $\alpha$  : coefficient d'atténuation [dB/km]
  - Dépend du matériau et de  $\lambda$ .

- Elle a un impact direct sur la portée de la liaison.

## Origines physiques de l'atténuation intrinsèque

- 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  $\text{OH}^-$ .

- 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 suiv une loi en  $1/\lambda^4$ .

Pour la fibre de silice :

$T_{\text{lim}} \text{ relatif autour de } 0.35 \text{ dB/km}$ $\text{à } 1.3 \mu\text{m}$	$T_{\text{lim}} \text{ absolue autour de } 0.17 \text{ dB/km}$ $\text{à } 1.55 \mu\text{m}$
---	--

## Atténuation extrinsèque :

- Il s'agit de pertes de la lumière hors du guide, provoquées par des déformations ou des discontinuités de celui-ci.
  - Pertes de couplage.

- Pertes par courbures ou micro-courbures.

- Pertes aux raccordements : Diff entre les paramètres des 2 fibres, mauvais positionnement.

## La dispersion

→ Élargissement temporel des impulsions de lumière au cours de la propagation.

- Origines : Dispersion inter-mode

- Dispersion chromatique (du matériau et du guidage)

- Conséquences : limitation du débit

- limitation de la portée pour un débit fixé.

### Dispersion inter-mode

→ 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 étirée par la différence du temps de propagation entre le mode le plus rapide et le mode le moins rapide.

→ Dans la fibre à saut d'indice, les rayons lents subissent des réflexions multiples à l'interface cœur/gaine.

↳ L'étalement (étirement) temporel due à la dispersion inter-mode dans la fibre à saut d'indice :

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

↳ si on diminue ON, la dispersion intermodal ainsi que la puissance injectée dans la fibre.

⇒ Donc le choix de ON est un compromis.

→ Dans la fibre à gradient d'indice la trajectoire des rayons a une allure curviligne.

↳ de profil à gradient parabolique ( $\alpha \approx 2$ ) minimise la dispersion intermodale

↳ l'étalement temporel du à la dispersion intermodale dans la fibre à gradient d'indice est donnée par :

$$\Delta t_{\text{im}} = \frac{L}{32c} \cdot \frac{n^4_{\text{max}}}{n^4(0)^3} = \frac{L \cdot n(0) \cdot \Delta^2}{8c} \quad \Delta t_{\text{im}} \text{ Saut du}$$

↳ Gain en bande passante d'un facteur entre 100 et 1000 par rapport à la fibre multimode à SI.

### Dispersion du matériau :

- la source de lumière n'est pas parfaitement monochromatique et présente une certaine largeur spectral
- 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)

d'étalement temporel du à la dispersion du matériau

$$(\Delta \tau_m = |D_n(\lambda)| \cdot \Delta \lambda \cdot L) \text{ où: } D_n(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \left( \frac{d^2 n}{d \lambda^2} \right)$$

coeff de dispersion du matériau

- $D_n < 0$  : le rouge le plus rapide (Dispersion ordinaire)
- $D_n > 0$  : le bleu le plus rapide (- extraordinaire)

→ Pour la silice, dispersion matériau s'annule au voisinage de 1.3 μm

## Dispersion du guidage :

✓ Due à la variation de la vitesse de propagation avec la longueur d'onde pour chaque mode.

✓ L'étalement temporel du à la dispersion du guidage :  $(\Delta \tau_g = |D_g| \cdot \Delta \lambda \cdot L)$

Coeff de dispersion du guidage.

✓ La valeur du coeff de dispersion du guidage est faible et très négative.

## Dispersion chromatique :

✓ Proviens des contributions de la dispersion du matériau et la dispersion de guidage.

L'étalement temporel du à la dispersion chromatique est donné par :  $(\Delta \tau_c = |D_c(\lambda)| \cdot \Delta \lambda \cdot L)$

$D_c = D_m + D_g$  ; Coeff de dispersion chromatique [ps/(km.nm)]

## Bandes passantes :

• L'étalement temporel total du à la dispersion (interne et chromatique) :  $(\Delta \tau = \sqrt{\Delta \tau_{im}^2 + \Delta \tau_c^2})$

• La bande passante de la fibre :  $(B \approx \frac{1}{2\Delta \tau})$

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