Chapitre VIII
Ondes électromagnétiques
et
fibres optiques

I Les Ondes Electromagnétiques

II Les lois de l'optique géométrique

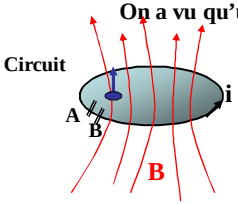
III La fibre optique : un guide de lumière

I Les Ondes Electromagnétiques

I.1 Le champ électromagnétique

Conséquences d'une variation temporelle d'un champ (H ou E)?

On a vu qu'une variation de flux magnétique induit:



$$e = -\frac{d\phi(t)}{dt} = Ri(t)$$

Avec : $d\phi = \vec{B}d\vec{s}$ $\quad \phi = \sum d\phi = \iint_C \vec{B}d\vec{s}$

La f.e.m. induite « e » entre deux points quelconque du circuit, ou différence de potentiel V_A - V_B, est liée à un champ électrique induit « électromoteur » par la relation fondamentale:

$$\vec{E} = -gr\vec{a}dV$$

Alors…: $\int_A^B \vec{E}d\vec{l} = -\int_A^B gr\vec{a}dV d\vec{l} = -\int_A^B dV = V_A - V_B = e$

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \Leftrightarrow \int_A^B \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\iint \vec{B}d\vec{s} = -\iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}d\vec{s}$$ *Si: B(t) et S : constant*

Si un champ magnétique B est fonction du temps alors il y création d'un champ électrique

I.1 Le champ électromagnétique

Et l'inverse ???… si E est fonction du temps ??

On pourrait montrer que…

Si un champ électrique E est fonction du temps alors il y création d'un champ magnétique

En résumé:

Si on a un phénomène électrique (E,V) ou magnétique (H) qui varie avec le temps, on a à la fois E et B.

Si variation avec le temps:
les champs E et B sont indissociables,
on dit que l'on a un « champ électromagnétique »

I.2 Propagation d'un champ Electromagnétique

Conséquence de champs variant localement avec le temps ?

Si B(t) ou E(t) :

On démontre que l'on a alors un phénomène de propagation.

Le « champ électromagnétique » se propage alors avec avec une vitesse v…

Dans un milieu caractérisé par ε et μ
(permittivité diélectrique et perméabilité magnétique absolue)
E et B se propagent avec une vitesse:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Rappel: $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$, et $\mu = \mu_0\mu_r$

On dit que l'on a une « onde électromagnétique », OEM

I.2

Dans le vide: on aura (car $\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$) $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ Soit: **c ≠ 3 x 10^8 m/s** (*c = 299 792 458 m/s*)

Remarque: « c » est une constante, quelque soit la forme de l'onde (impulsion, carré, sinus….).

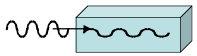
Toutes les OEM se propagent avec la même vitesse dans le vide !!!

Dans un milieu non magnétique ($\mu_r = 1$), de permittivité relative ε_r, :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad \varepsilon_r \geq 1$$

On pose, « indice optique du milieu », n: $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ ⇒ $v = \frac{c}{n}$ $n \geq 1$

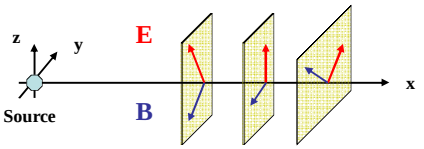
Ex: le verre , n ≠1.5
l'eau n = 1.33
Diamant n = 2.42



I. 3 Structure d'une OEM, plane et sinusoïdale (dans le vide)

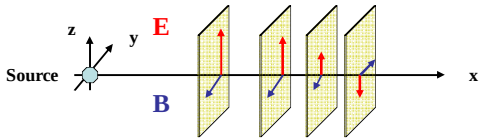
a) Onde plane

A grande distance d'une source, les vecteurs E et B sont perpendiculaires entre eux et sont dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation (ox)



$\vec{E}.\vec{B} = 0$

Si le champ électrique de l'onde n'a qu'une seule composante selon une direction, par ex l'axe oz , pour une propagation selon ox, elle est dite polarisée selon oz



b) Onde plane sinusoïdale

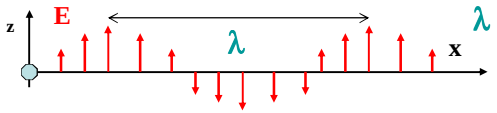
…Si la variation temporelle d'une des grandeurs, E, V, ou B dans la source est de forme sinusoïdale, avec une fréquence N et une pulsation $\omega = 2\pi N$, par exemple : $E = E_0 \sin \omega t$.

Alors l'OEM est « sinusoïdale, » les module des deux champs sont de la forme (Double Fonction, de x et de t !)

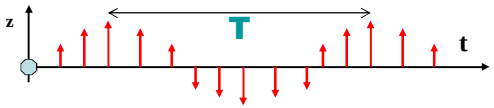
$$E_z = E_{zo} \sin\left(\omega\left(\frac{x}{c} - t\right)\right) = E_{zo} \sin\left(\omega \frac{x}{c} - \omega t\right)$$

$$B_y = B_{yo} \sin\left(\omega\left(\frac{x}{c} - t\right)\right)$$

*Représentation « à un instant t donné » (t const)



*Représentation « en un point x donné » (x const)



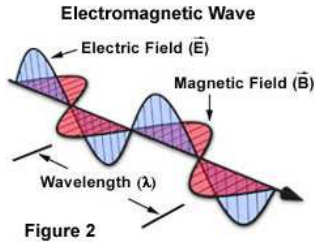


Figure 2

Définitions: **λ = vT, (ou cT) (v=c/n) N = 1/T ω = 2 π N**

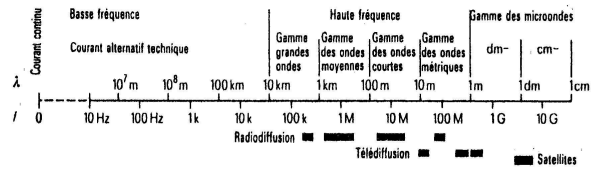
T est la période; N la fréquence; λ la longueur d'onde; ω la pulsation

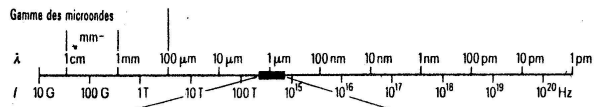
I. 4 Classification des OEM

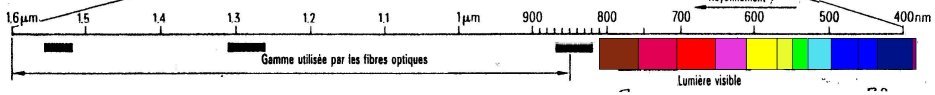
Toute fonction pouvant être décomposée comme une somme de fonctions sinusoïdales (Fourrier)

On classe donc les OEM sinusoïdales selon leur fréquence N,

Rappel: elles ont toutes la même vitesse « c » dans le vide (λ = c/N)

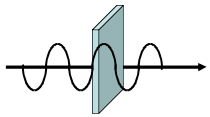






I. 5 Energie associée à une OEM

« L'intensité » de l'onde est la Puissance moyenne rayonnée durant une période T, à travers une surface unité, c'est:



$$W = I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c E^2$$

I prop. à E^2

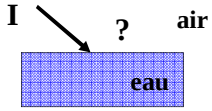
Autre aspect énergétique : une OEM est composée de « grains d'énergie » ou « photons »

Si la fréquence de l'onde est N ⇨ Energie d'un photon : **W = hN**

II Lois de l'optique géométrique

Avec le concept de rayon lumineux…. *(propagation en ligne droite dans un milieu donné)…*

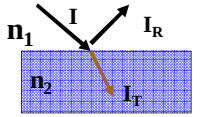
A la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents ???



$$I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c E^2$$

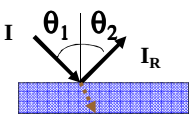
Une partie de l'énergie lumineuse est transmise, l'autre est réfléchie

$$I = I_T + I_R$$



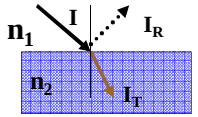
Angles de rélexion et de réfraction ?: lois de Snell-Descartes

Réflexion

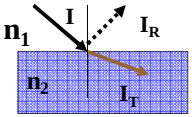


$\theta_1 = \theta_2$

Transmission



$n_2 > n_1$



$n_2 < n_1$

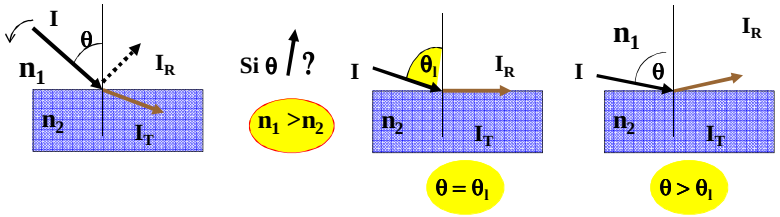
I_T : OEM transmise ou « réfractée »

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

Lois applicables pour une Onde OEM quelconque

*** : Cas de la réflexion totale , ou l'on a $n_2 < n_1$**

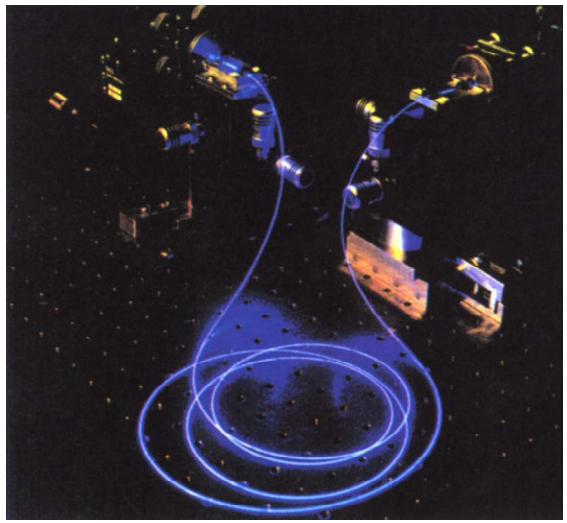
Examinons ce qui se passe si θ augmente…



Pour $\theta = \theta_l$, $\theta_2 = 90°$ $n_1 \sin\theta_l = n_2$ *Ex. Air - eau (n_1 = 1.33), : θ_l = 48°. 8*

si $\theta \geq \theta_l$: rien n'est transmis, toute l'énergie est réfléchie:
On dit que l'on a réflexion totale de l'OEM

III Fibre optique : c'est un guide de lumière…

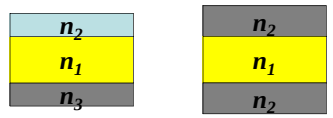


Pourquoi ????

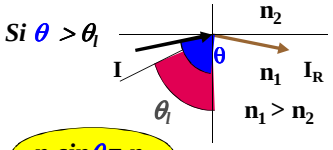
III.1 Principe géométrique du guidage d'une OEM: cas d'une fibre optique

Le guidage d'une OEM dans un milieu est basé sur des réflexions totales successives de l'onde sur les deux milieux qui l'entourent.

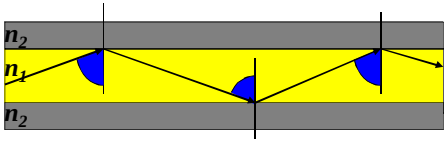
Soit un milieu d'indice n_1 entouré de deux milieux d'indices inférieurs, n_2 et n_3, ou n_2 et n_2



Si $\theta > \theta_l$

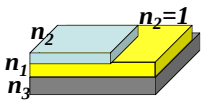


$n_1 \sin\theta = n_2$

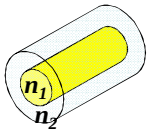


(ici une seule condition, car seulement deux milieux)

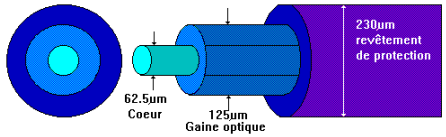
Structures possibles??



Planaires



Cylindriques



cas d'une Fibre optique

III.2 L'injection de lumière : « ouverture numérique »

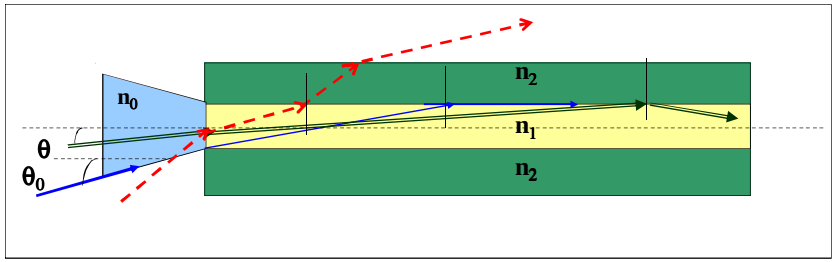
Suivant l'inclinaison des rayons à l'entrée (par rapport à l'axe de la fibre)

Trois cas de figure:

Rayons trop inclinés, angle (à l'intérieur) inférieur à l'angle limite : rayon non guidé

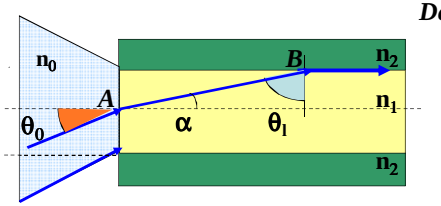
Rayons (à l'intérieur) d'inclinaison égale à l'angle limite: guidage, correspondant à un angle d'injection « θ_0 »

Rayons intérieurs d'inclinaison supérieur à l'angle limite, : guidage (correspond à un angle d'injection dans le cône « d'acceptance », $\theta < \theta_0$)



Angle d'acceptance θ_0 ??

III.2



**On démontre (avec l'application des lois de Snell Descartes au points A et B) que:*

$$n_0 \sin\vartheta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

(dans l'air : $n_0 = 1$)

On a $n_1^2 - n_2^2 = (n_1 - n_2)(n_1 + n_2)$

Comme, $n_1 - n_2 = 10^{-2}$ ou 10^{-3}

On peut donc poser: $n_1 + n_2 = 2n_1 = 2n$; $n_1 - n_2 = \Delta n$

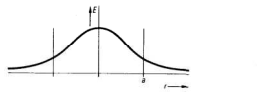
$$ON = n_0 \sin\vartheta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2n\Delta n}$$

III.3 Notion de modes optiques

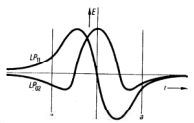
En fait, la description géométrique est insuffisante. Il faut résoudre les équations de propagation (Maxwell) pour déterminer la répartition réelle du champ électromagnétique dans le cœur de la fibre.

Pour $\theta > \theta_l$ seul les rayons faisant certains angles (valeurs discrètes) peuvent se propager, soit des distributions de champ particulières , ou « modes de propagation »

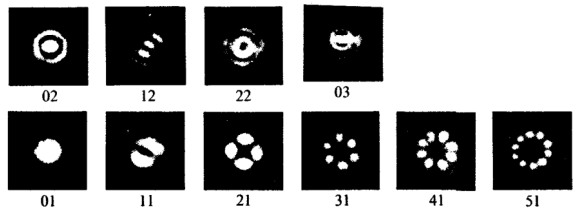
Distributions de l'intensité suivant les modes optiques de propagation



Distribution radiale du champ du mode fondamental LP_{01}

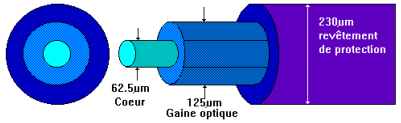


Distribution radiale du champ des modes LP_{11} et LP_{02}

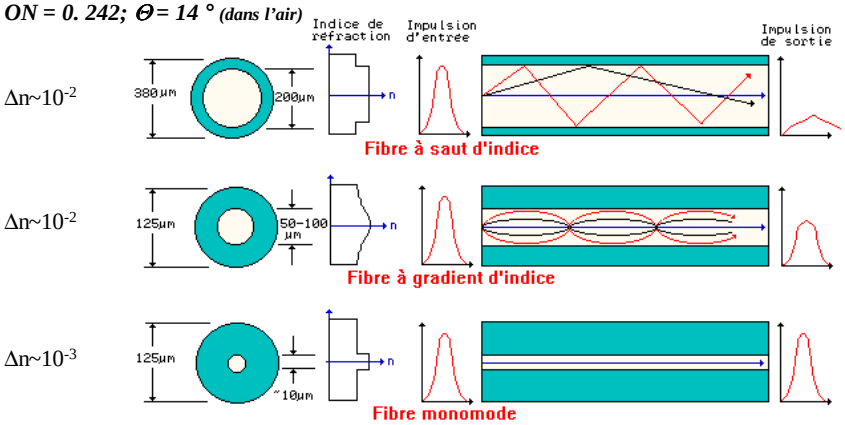


Les 10 premiers modes $LP_{\mu\rho}$ d'une fibre optique

III.4 Fibres typiques

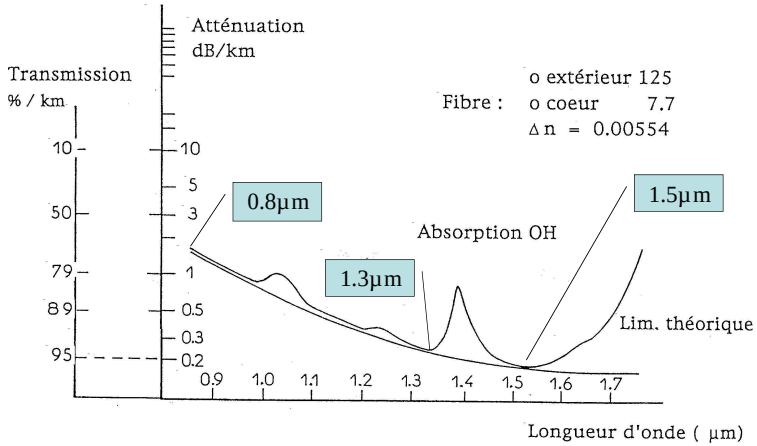


ON = 0. 242; Θ= 14 ° (dans l'air)



ON = 0. 113; Θ= 6.5° (dans l'air)

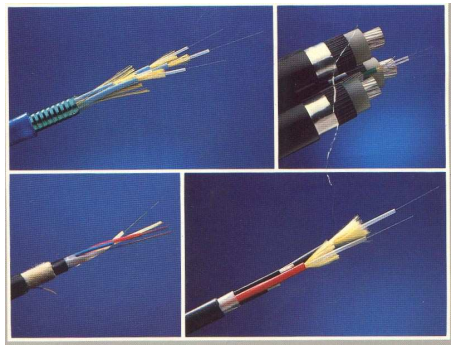
III.5 Les trois fenêtres « télécom »

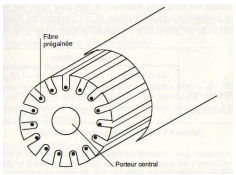


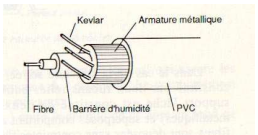
Courbe d'atténuation dans une fibre en verre (silice) dans l'infra rouge et les trois bandes de fréquences (ou longueur d'onde) utilisées (actuellement essentiellement à 1, 5 µm, au minimum d'atténuation)

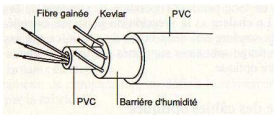
La fibre télécom standart est monomode à 1, 5 µm

III. 6 Fibres et câbles optiques



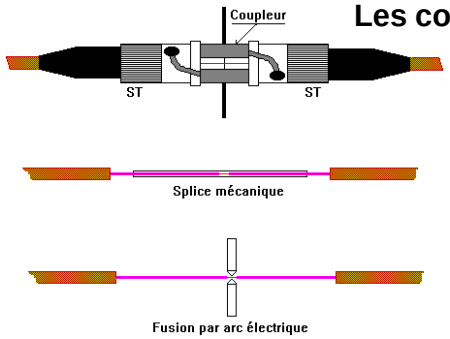


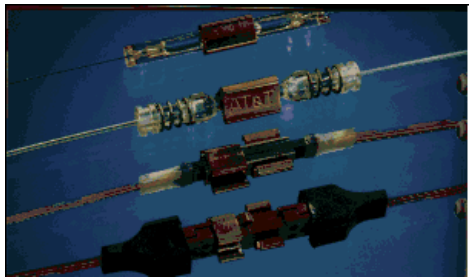




III.7Fibres/coupleurs

Les coupleurs





III. 8 Performances des Fibres: Bandes passantes, débits

- **Etendue des fréquences que la FO peut transmettre sans déformation**
  - **FO multimode à saut d 'indice: 50MHz/km**
  - **FO multimode à gradient d 'indice: 1GHz/km**
  - **FO monomode : 10GHz/km**

Comparaison:

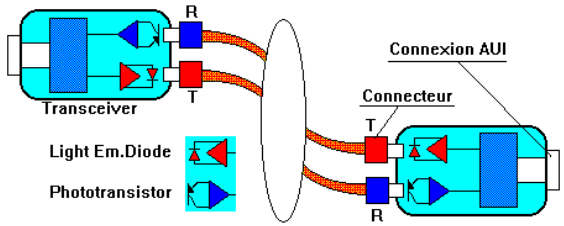
- **Le câble électrique à paires torsadées**
  - **fil de téléphone courant**
- **Le câble coaxial (blindage EM)**
  - **débit plus grand, plus grande distance (qq Gbit/s sur 1 km)**
- **La fibre optique**
  - **Débit limite > 50Tbit/s**

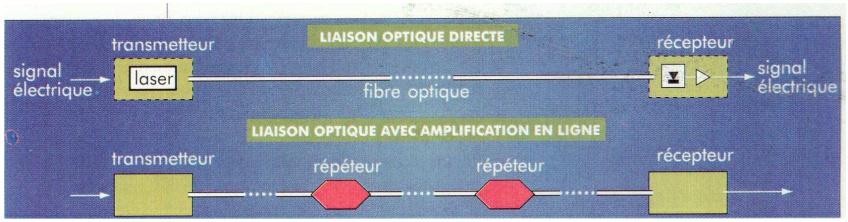
III. 9 Avantages des F.O.

- **Faible atténuation**
- **Grande BP et fréquence du signal élevé**
- **Insensibilité aux OEM et absence de rayonnement**
- **taille et poids réduits**
- **faible coût**
- **Haut débit**

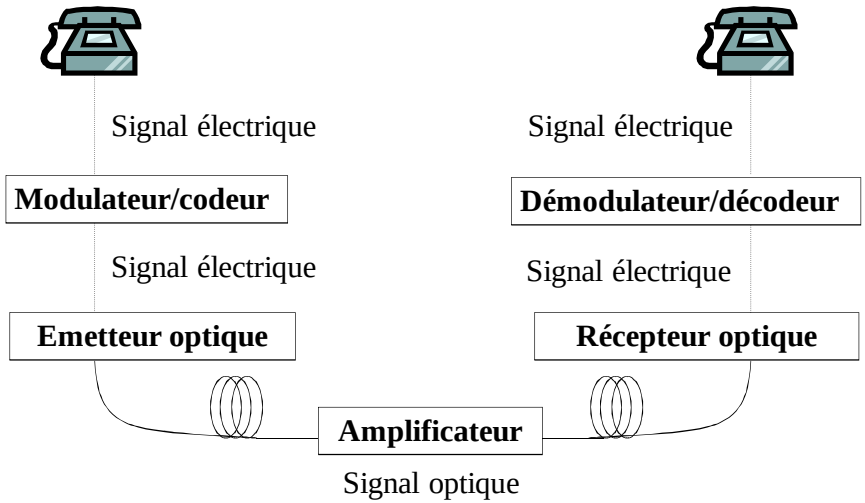
III. 10 Une liaison par fibre optique

Les dispositifs, ordinateur, téléphone…, fonctionnant avec des signaux électriques, il faut des Conversions de signaux électriques -- optiques





Une liaison par fibre optique



IIII. 11 Conclusion

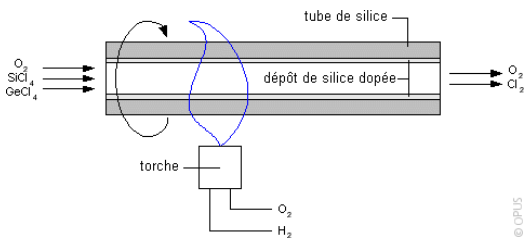
- ✓La transmission d'informations par fibres optiques est actuellement la technique la plus performante pour assurer une liaison à très haut débit en télécommunication terrestre.
- ✓La propagation du signal s'effectue sous forme de lumière infrarouge (OEM à 1, 5 μm, non visible!) que l'on injecte dans le cœur de la fibre.
- ✓Les débits transmissibles peuvent dépasser la centaine de Gbits/s (milliards de bits par seconde).
- ✓Pour mémoire, 1Gbit/s correspond à 100 liaisons ADSL ou 20 000 conversations téléphoniques simultanées.
- ✓Les câbles optiques modernes comportent un minimum de 48 tubes de 12 fibres chacun.

Compléments…..

Fabrication des fibres

On les fabrique à partir d'une préforme de silice que l'on étire. La géométrie de la préforme doit respecter parfaitement le rapport des diamètres du cœur et de la gaine ainsi que leurs indices de réfraction.

la technique utilisée pour fabriquer une préforme est celle de dépôt chimique en phase vapeur (MCVD pour *Modified Chemical Vapor Deposition*).



QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

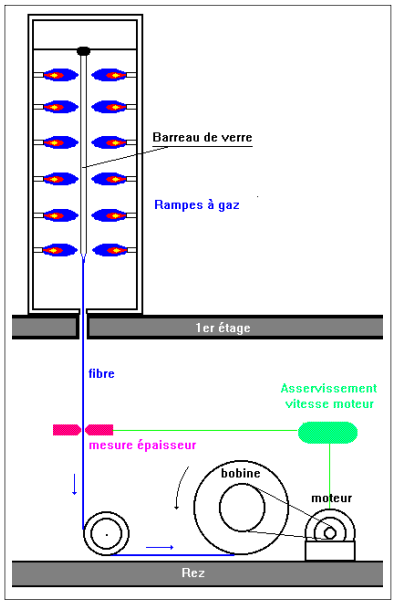
Fabrication des FO

Le fibrage

La préforme terminée, elle est placée verticalement dans une tour de fibrage. Une haute température est appliquée localement à l'extrémité de la tige de verre jusqu'à ce que la silice soit ramollie. Il est alors possible de tirer un brin de fibre du bout de la préforme. Lors de cette opération, il est possible de produire jusqu'à 2000 m de fibre par minute.

La dernière étape de fabrication de la fibre consiste en l'application de sa couche protectrice.

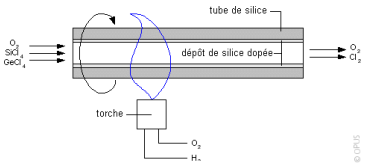
Un barreau d'une longueur de 1 m et d'un diamètre de 10 cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur de 150 km environ!



Fabrication des fibres

On les fabrique à partir d'une préforme de silice que l'on étire. La géométrie de la préforme doit respecter parfaitement le rapport des diamètres du cœur et de la gaine ainsi que leurs indices de réfraction.

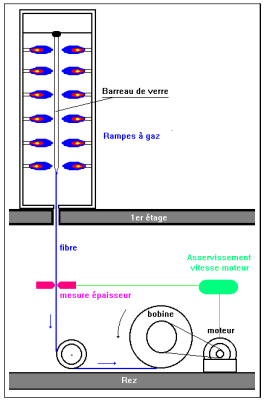
la technique utilisée pour fabriquer une préforme est celle de dépôt chimique en phase vapeur (MCVD pour *Modified Chemical Vapor Deposition*).



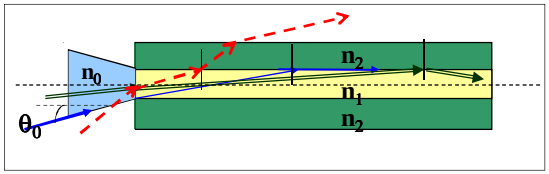
QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

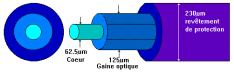
La préforme terminée, elle est placée verticalement dans une tour de fibrage. Une haute température est appliquée localement à l'extrémité de la tige de verre jusqu'à ce que la silice soit ramollie. Il est alors possible de tirer un brin de fibre du bout de la préforme. Lors de cette opération, il est possible de produire jusqu'à 2000 m de fibre par minute.
La dernière étape de fabrication de la fibre consiste en l'application de sa couche protectrice.

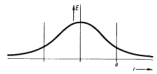
Un barreau d'une longueur de 1 m et d'un diamètre de 10 cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur de 150 km environ!



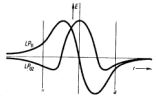
FIBRES OPTIQUES



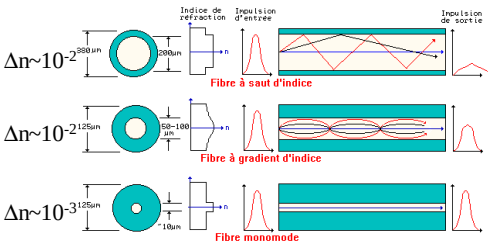


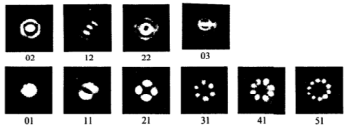


Distribution radiale du champ du mode fondamental LP_{01}



Distribution radiale du champ des modes LP_{11} et LP_{02}





Les 10 premiers modes $LP_{\mu\nu}$ d'une fibre optique

La valeur de ν est l'indice modal azimutal et indique le demi- nombre de points lumineux par anneau lumineux concentrique. Les valeurs de ν peuvent être 0, 1, 2, 3,..., et pour $\nu = 0$ chaque anneau lumineux est présent sans subdivision.

La valeur μ est l'indice modal radial et indique le nombre d'anneaux lumineux concentriques du mode. μ peut prendre les valeurs 1, 2, 3, ...

Le mode fondamental est appelé LP_{01}, le suivant d'ordre plus élevé LP_{11}.