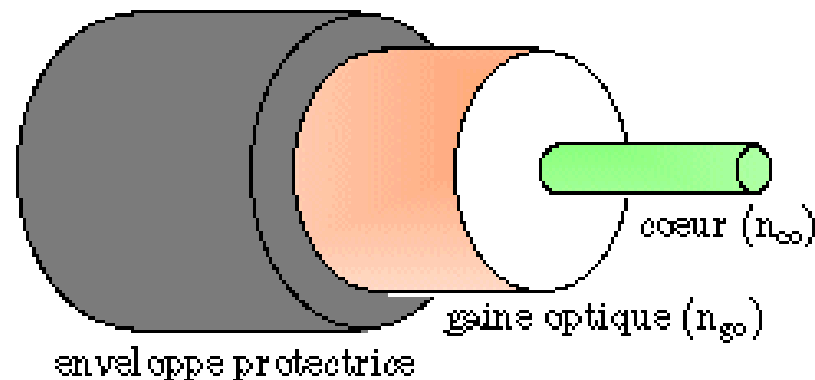




Fibres optiques

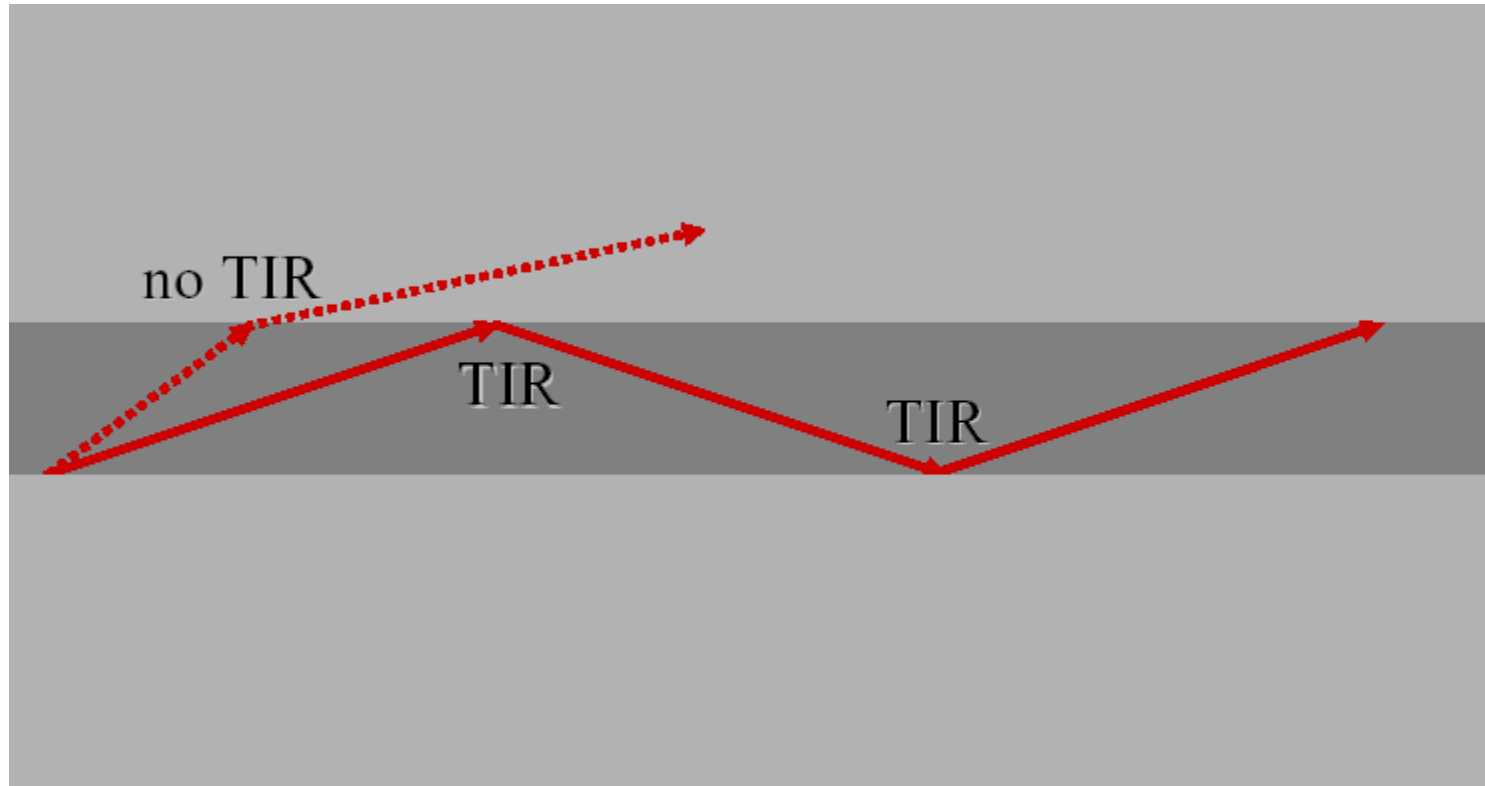
Fibres optiques

Une fibre optique est un guide d'onde optique à section circulaire, constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre.



Rappel

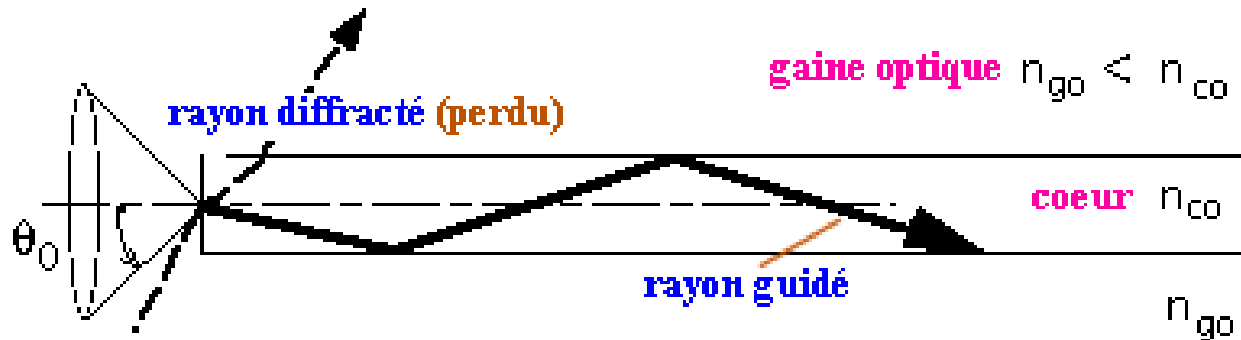
Guides d'ondes optiques



Par exemple:

Guide d'onde planaire = matériaux diélectrique à grand indice pris en sandwich entre deux couches à indice plus petit.

Approche géométrique



Le choix d'un profil à saut d'indice tel celui figuré ci-dessus entraîne les conséquences suivantes:

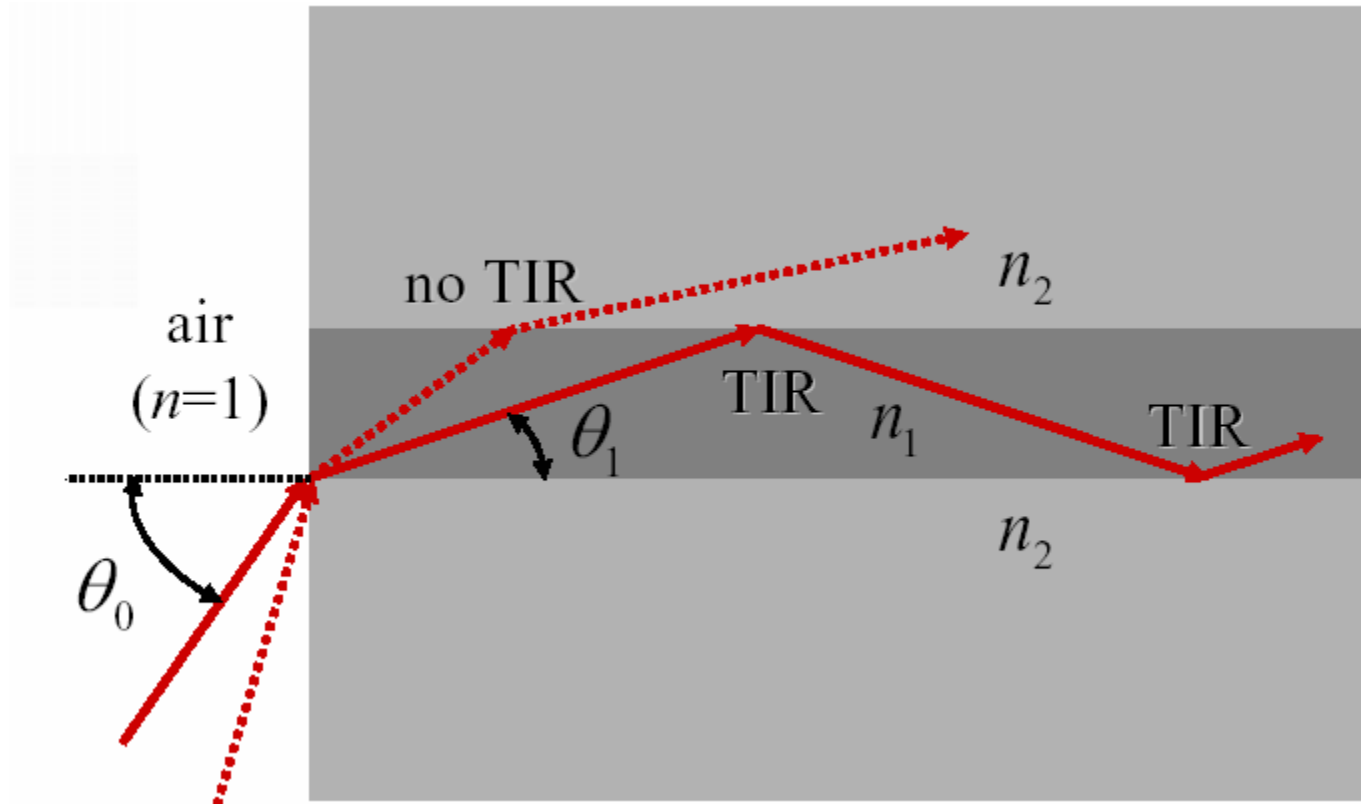
- pour qu'un rayon soit effectivement guidé dans la fibre il faut que sa direction à l'entrée se situe dans un cône dit **d'acceptance**.
- un rayon guidé va subir une réflexion totale à l'interface des deux couches optiques.
- un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée dans la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.
- l'angle d'acceptance permet de définir ce qu'on appelle **l'ouverture numérique** de la fibre, ouverture qui dépend bien évidemment des indices respectifs des deux couches optiques.

Rappel: ouverture numérique pour un guide d'onde

$$\text{O.N.} = n_i \sin(\theta_0)$$

θ_0 = angle le plus grand qui est guidé

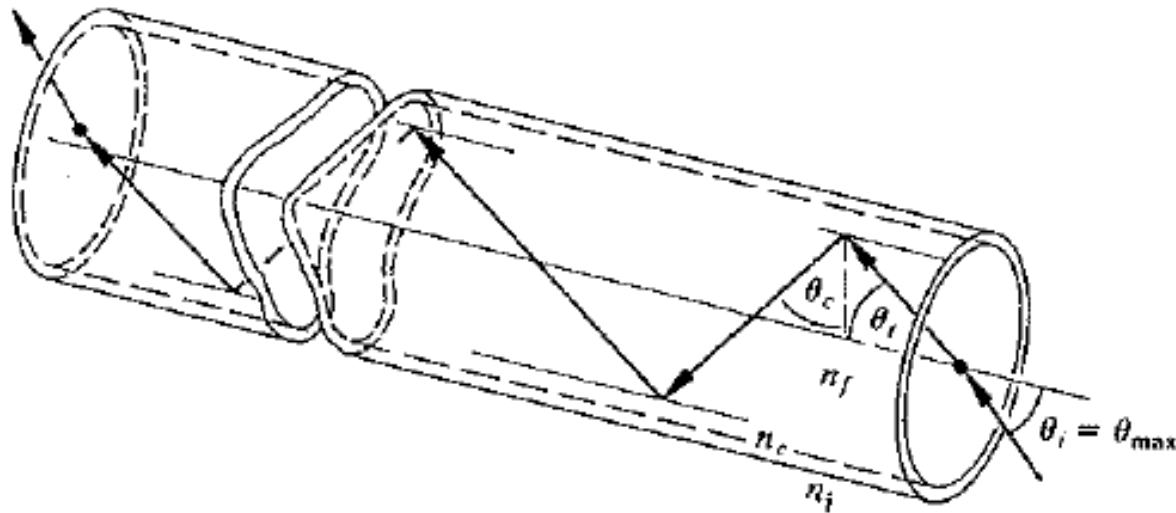
n_i = indice du milieu externe (en général air)



plus n_1/n_2 est grand, plus est élevée la O.N.

Ouverture numérique d'une fibre optique

Afin de se propager la lumière doit subir uniquement des réflexions totales sur les parois du cylindre.



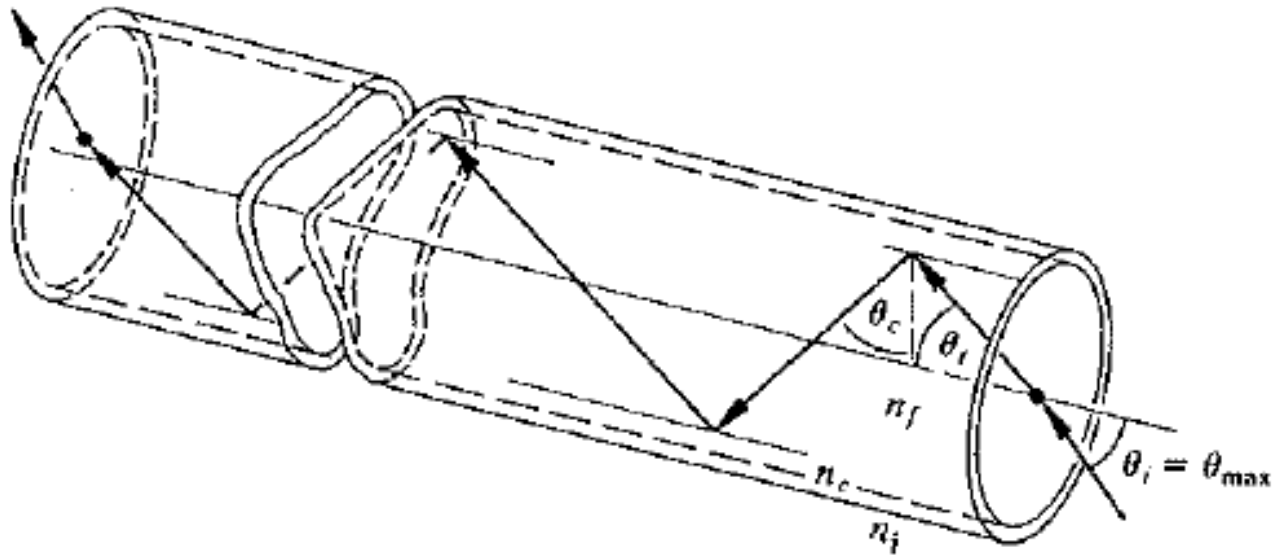
Ainsi les angles d'incidence à la paroi doivent toujours être supérieurs à l'angle critique:

$$\sin \theta_c = \frac{n_{go}}{n_{co}}$$

$$\theta_c = \pi / 2 - \theta_t = \arcsin \left(\frac{n_{go}}{n_{co}} \right)$$

Si le milieu externe est l'air on a pour l'angle d'entrée θ_i dans la fibre

$$O.N. = \sin \theta_i = \sin \theta_t \cdot n_{co} = \cos \theta_c \cdot n_{co} = n_{co} \sqrt{1 - \frac{n_{go}^2}{n_{co}^2}} = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}$$



Ouverture numérique d'une fibre optique

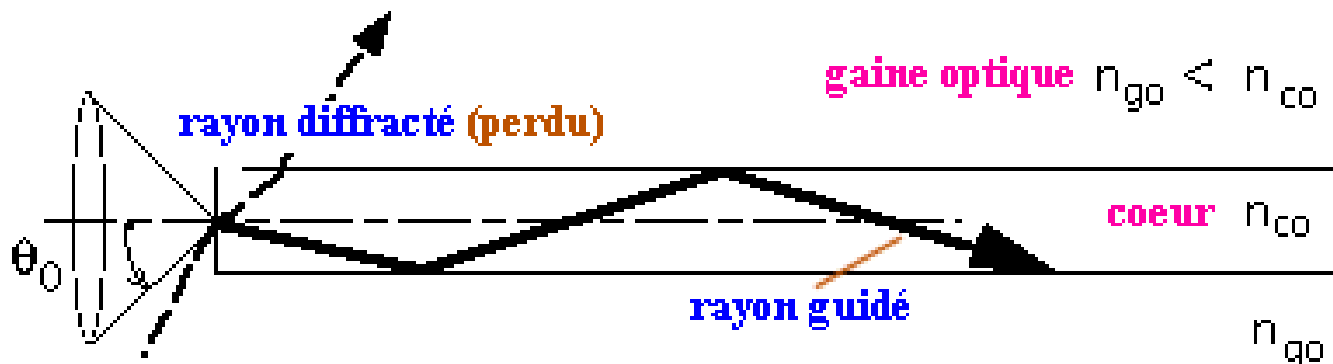
θ_0 = angle le plus grand qui est guidé

n_i = indice du milieu externe (en général air)

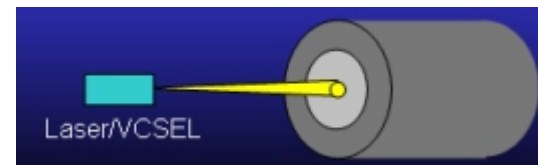
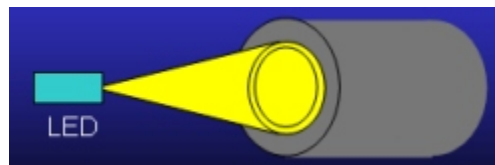
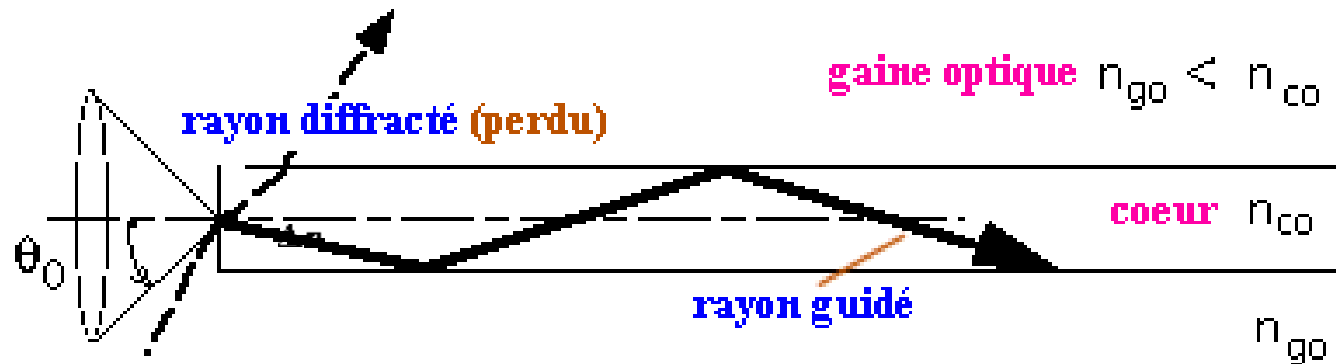
$$O.N. = n_i \sin \theta_0 = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}$$

... et si la différence des indices est petite:

$$O.N. \cong \sqrt{2\bar{n} \cdot \Delta n}$$



Pour exploiter une fibre optique il faut donc faire **converger la lumière** à l'entrée à l'intérieur du cône avec une image qui soit inférieure au diamètre du cœur ce qui est relativement aisé à obtenir avec une source laser mais bien plus difficile avec une source classique.



Pour coupler la lumière dans la fibre il faut :

- 1. faire converger la lumière dans le cône,**
- 2. faire une image de la source de dimension inférieure ou égale à celle du cœur sur l'entrée de la fibre.**

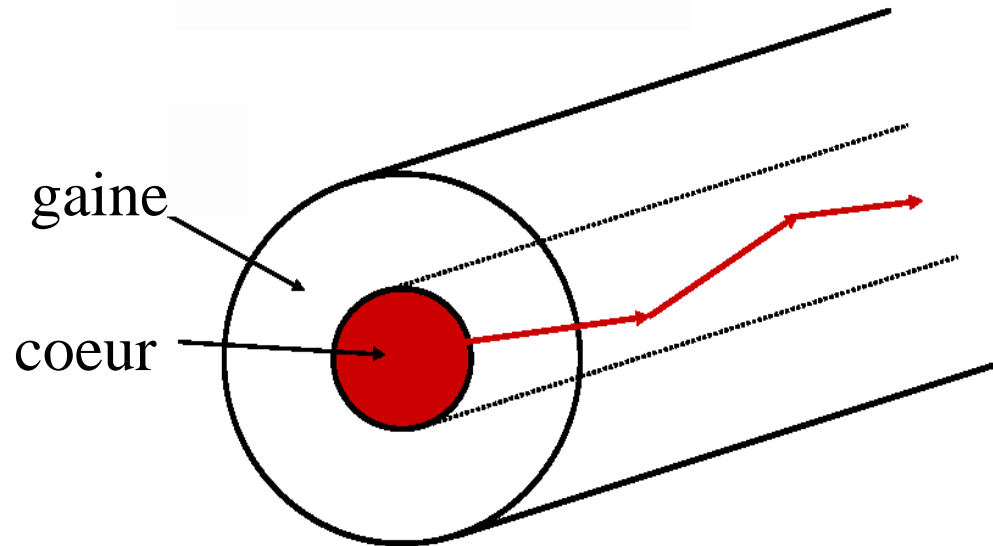
- Les deux conditions ne sont pas indépendantes: pour avoir une petite image il faut une grande convergence et vice-versa. C'est un problème connu en optique de la conservation de l'étendue.
- Avec un laser et un objectif de microscope approprié, c'est facile et on peut atteindre 90% d'efficacité de couplage.
- Avec une source ordinaire, c'est beaucoup plus difficile et l'efficacité du couplage devient très faible.

Remarques :

1. On peut augmenter l'angle du cône d'acceptance en augmentant Δn ; on augmente alors le nombre de modes, mais ceci entraîne des problèmes de dispersion.
2. Il est plus facile de coupler la lumière dans une fibre multimodale que dans une fibre unimodale, car les dimensions du cœur sont plus grandes.

La fibre la plus simple

La fibre la plus simple est à deux couches homogènes séparées par un saut d'indice.



Elle comprend donc:

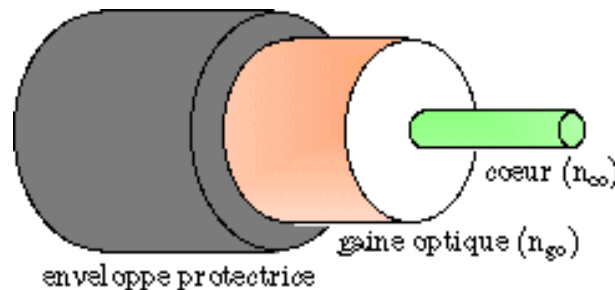
1. La couche centrale dans laquelle est confinée la lumière.
C'est le **coeur** d'indice de réfraction n_{co} .
2. La couche périphérique.
C'est la **gaine** optique d'indice de réfraction $n_{go} < n_{co}$.

La fibre la plus simple

Ce sont ces deux couches qui assurent le guidage.

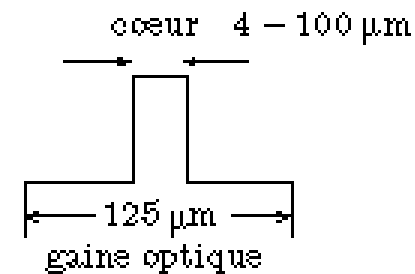
La différence d'indice $\Delta n = n_{co} - n_{go}$ est en général faible, de l'ordre de **quelques millièmes**.

En outre, la deuxième couche est elle-même entourée d'une enveloppe, généralement en plastique, qui a le double rôle de protéger la fibre mécaniquement et de piéger la lumière qui se propage dans la gaine optique, en général indésirable.

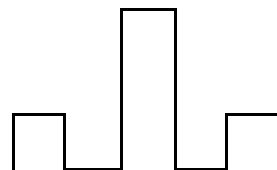


Si l'on dénude la fibre, c'est-à-dire si on enlève cette enveloppe protectrice, le milieu extérieur est l'air.

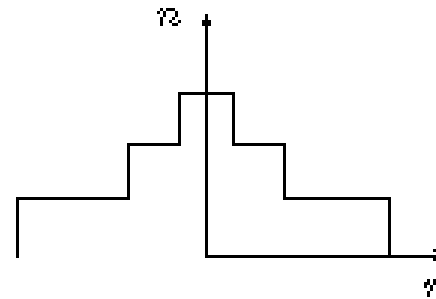
Quelques exemples de profils d'indice de réfraction $n(r)$.



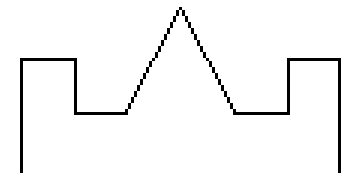
fibres à saut d'indice



**fibres à gaine
semi enterrée**



**fibres à gaine
surélevée**

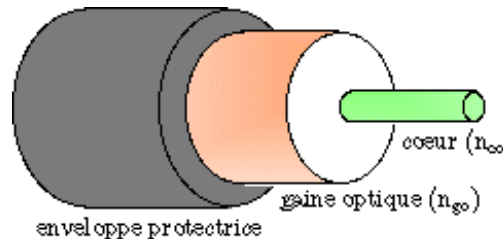


**fibres à coeur
triangulaire**

Fibres unimodales et multimodales

Suivant les dimensions du cœur on peut avoir:

- une fibre **unimodale** – ou **monomode** - (la lumière s'y propage selon un seul mode; le diamètre du cœur est de quelques μm),
- une fibre **multimodale** - ou **multimode** - (diamètre du cœur jusqu'à $100\ \mu\text{m}$).

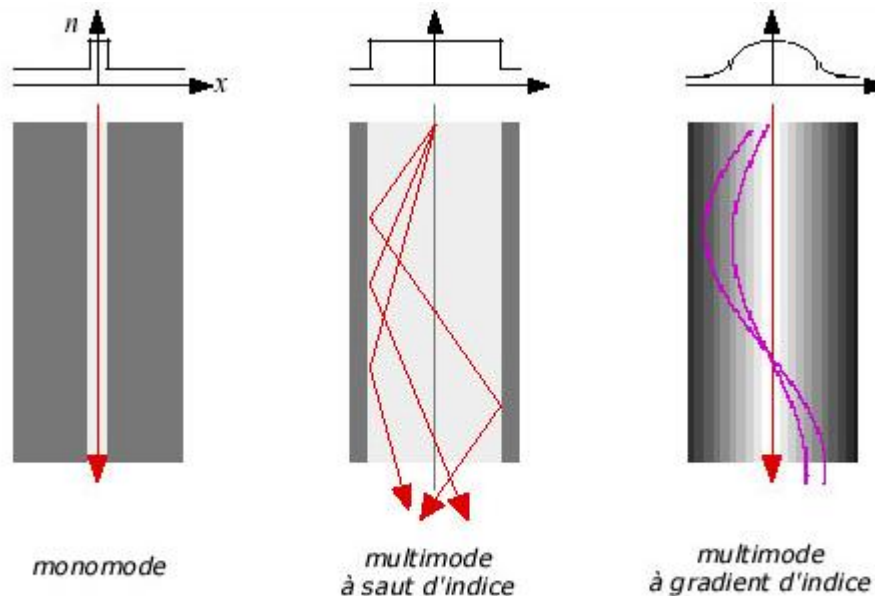


Remarques:

1. Un fil de verre seul (sans gaine) peut par exemple aussi conduire la lumière, mais il n'y a pas confinement au voisinage du centre. Donc ce sera une fibre multimodale. De plus le milieu extérieur peut influencer, par son indice, la propagation et les pertes.
2. Pour les communications sur de longues distances, il est préférable d'utiliser une fibre unimodale pour minimiser les problèmes de dispersion.

Principes de fonctionnement

Comment se transporte la lumière à l'intérieur d'une fibre optique ? Tant que le diamètre de la fibre est grand devant la longueur d'onde de la lumière introduite, le principe de propagation obéit aux lois de l'optique géométrique, sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière. En revanche, dès que ce diamètre devient de l'ordre de λ , le mode de transmission ressemble à la manière dont se propagent les microondes le long des guides d'ondes.



Propagation de la lumière dans une fibre

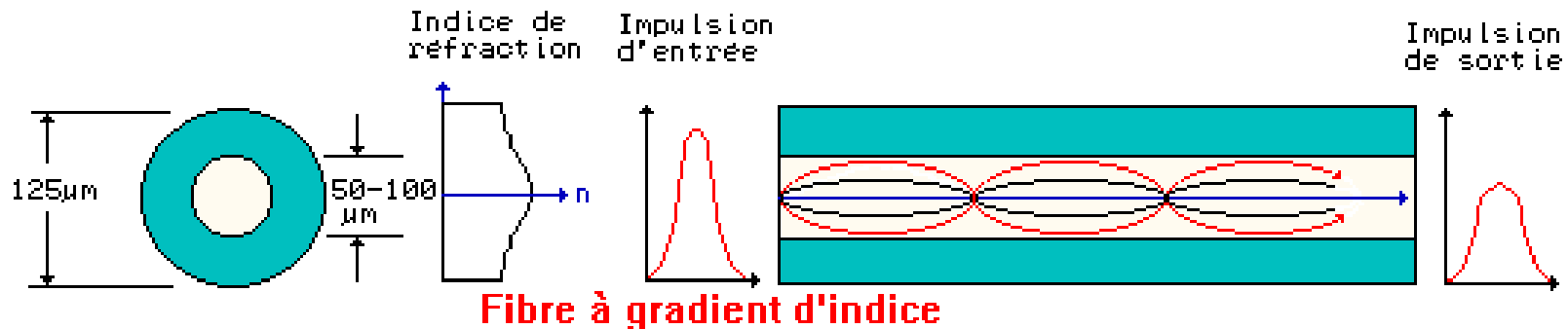
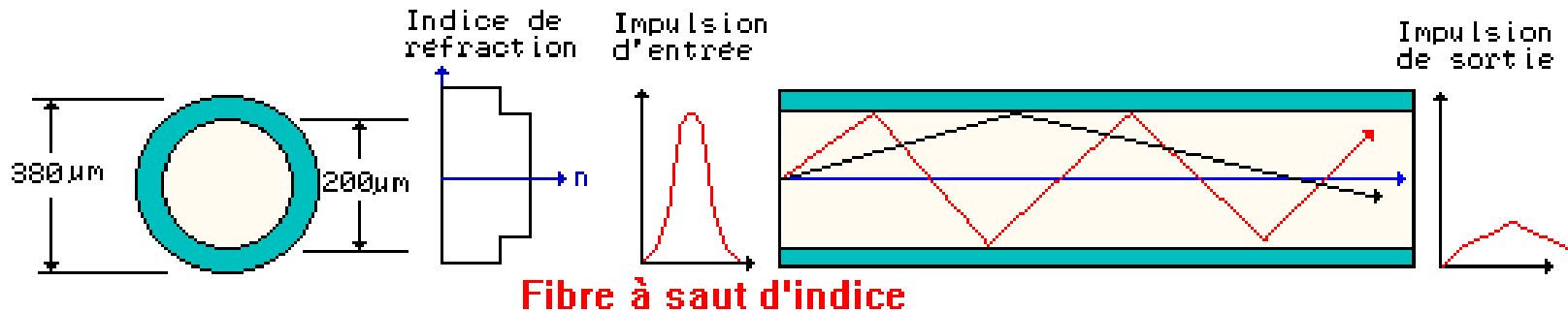
La dimension du cœur joue un rôle très important:

- S'il est de l'ordre de plusieurs dizaines de microns on parlera de fibre multimodale dans laquelle la propagation de la lumière sera assez complexe avec des phénomènes de dispersion plus importants.
- S'il est de quelques microns la lumière va s'y propager selon un seul mode, on parle alors de fibre unimodale.

Pour mettre en équation le processus de guidage on utilise

1. la théorie de la **propagation géométrique** valable pour des cœurs de grande dimension (vis à vis de la longueur d'onde de la lumière considérée)
2. la théorie **ondulatoire et les équations de Maxwell** plus appropriée pour les faibles diamètres de cœur.

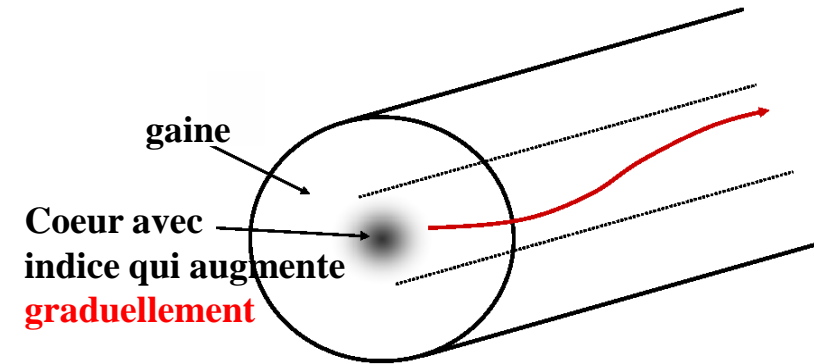
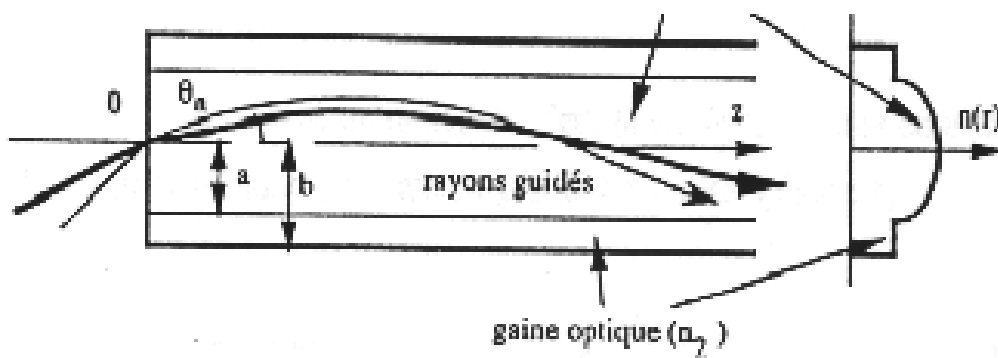
Fibres multimodes à gradient d'indice



Ici, deux améliorations sont apportées qui diminuent notablement l'atténuation:

- Le diamètre du cœur est de deux à quatre fois plus petit.
- Le cœur est constitué de couches successives, à indice de réfraction de plus en plus grand. Ainsi, un rayon lumineux qui ne suit pas l'axe central de la fibre est ramené "en douceur" dans le droit chemin.

Fibres à gradient d'indice



Les fibres à gradient d'indice ont été spécialement conçues pour les télécommunications.

Leur cœur n'est plus homogène, l'indice de réfraction décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface suivant la loi:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha}$$

avec

r = distance à l'axe,

$\Delta = n_1 - n_2 \ll n_1$,

α = exposant de profil d'indice voisin de 2



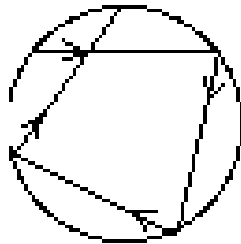
Applet

Propagation de la lumière dans une fibre optique

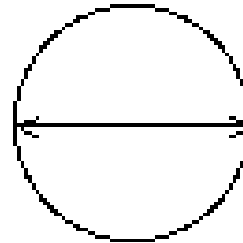
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.html

Transmission: trajets des rayons

Si l'on examine les rayons lumineux en fonction de leur direction d'entrée dans la fibre on va constater que certains vont avoir une trajectoire "hélicoïdale" c'est à dire ne coupant jamais l'axe de la fibre, tandis que d'autres au contraire seront de type "méridionaux" ce qu'illustre la figure ci-dessous représentant une projection en coupe des trajectoires dans le cœur de la fibre.

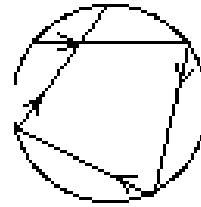


rayon "hélicoïdal"

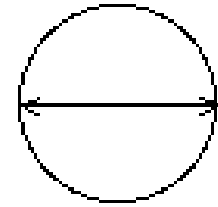


rayon "méridional"

Modes et vitesse de phase



rayon "hélicoïdal"



rayon "méridional"

- Dans une fibre multimodale, la plupart des rayons sont hélicoïdaux.
- A chaque inclinaison θ correspond un groupe de rayons auquel on peut associer un mode.
- Chaque mode est caractérisé par sa vitesse de phase V_p liée à l'angle θ par

$$V_p = \frac{c}{n_{co} \cos(\theta)}$$

- Il y aurait donc, dans cette approche purement géométrique, autant d'inclinaisons que de modes.

Modes guidés

En fait le nombre de modes n'est pas illimité, parce que les ondes planes associées aux rayons totalement réfléchis **interfèrent**.

Parmi tous les angles d'inclinaison θ , **certains** correspondent à une condition de phase qui construit une interférence identique tout le long de l'axe z: ce sont les **modes guidés**.

Le nombre de modes (guidés) dans une fibre à saut d'indice peut être calculé par l'expression expérimentale suivante:

$$N_m \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot D \cdot \text{O.N.}}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot D \cdot \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}}{\lambda} \right)^2$$

Exercice – no. de modes

On a une fibre de 50 μm de diamètre et indices:

$$n_{\text{co}} = 1,5$$

$$n_{\text{go}} = 1,482$$

Déterminer le nombre de modes pour les longueurs d'onde suivantes:

- 850 nm
- 1300 nm
- 1550 nm

Paramètre du guide ou fréquence normalisée

$$V = k r_{co} \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2} \cong k r_{co} \sqrt{2\bar{n} \cdot \Delta n}$$

V est le paramètre du guide ou fréquence normalisée.

k = nombre d'onde = $2\pi / \lambda$

r_{co} = rayon du cœur de la fibre

La valeur de V détermine le régime d'opération et, en particulier, la transition entre un fonctionnement unimodale et multimodale.

- Si $V < 2,4$ un seul mode peut de propager: c'est ce qu'on appelle le mode fondamental. On opère dans le régime unimodale de la fibre. On dit aussi que la fibre est **unimodale**.
- Si $V > 2,4$ plusieurs modes peuvent de propager. La fibre est **multimodale**.

Paramètre du guide ou fréquence normalisée

Il est à noter que le paramètre V dépend non seulement des données de la fibre

$$O.N. = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}$$

r_{co} = rayon du cœur,

mais aussi de $k = 2\pi/\lambda$ et donc de la longueur d'onde d'opération λ .

- Une fibre unimodale pour une certaine longueur d'onde devient multimodale si elle est utilisée à une **longueur d'onde inférieure** à une longueur d'onde λ_c qu'on appelle longueur d'onde de coupure (du deuxième mode).
- Les fibre standard des télécommunications ont une longueur d'onde de coupure $\lambda_c \approx 1100$ nm.

Exercice – paramètre du guide

On a une fibre d'indices:

$$n_{co} = 1,483 \text{ (silice dopée)}$$

$$n_{go} = 1,478 \text{ (silice pure)}$$

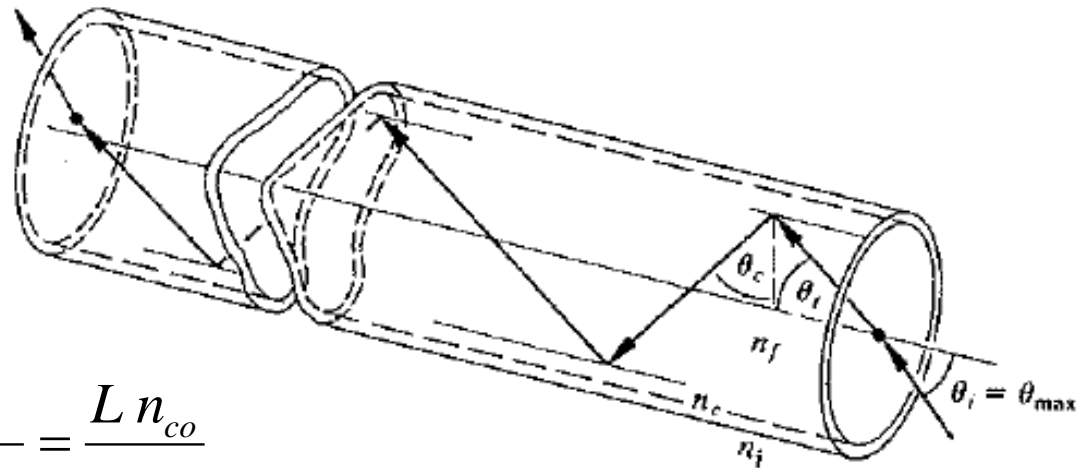
Déterminer pour quel diamètre du cœur le régime est unimodale ($V < 2,4$) dans le cas des longueurs d'onde suivantes:

- 850 nm
- 1300 nm
- 1550 nm

Chemin optique et nombre de réflexions

Si la fibre a longueur L et diamètre du cœur D , le chemin optique d'un rayon méridional (coplanaire à l'axe optique) est:

$$\ell = \frac{L}{\cos \theta_t} = \frac{L}{\sin \theta_c} = \frac{L}{n_{go} / n_{co}} = \frac{L n_{co}}{n_{go}}$$



Le nombre de réflexions est donné par:

$$N = \frac{\ell \cdot \sin \theta_t}{D} \pm 1$$

Exercice

Déterminer pour une fibre avec

$$n_{\text{co}} = 1,62$$

$$n_{\text{go}} = 1,52$$

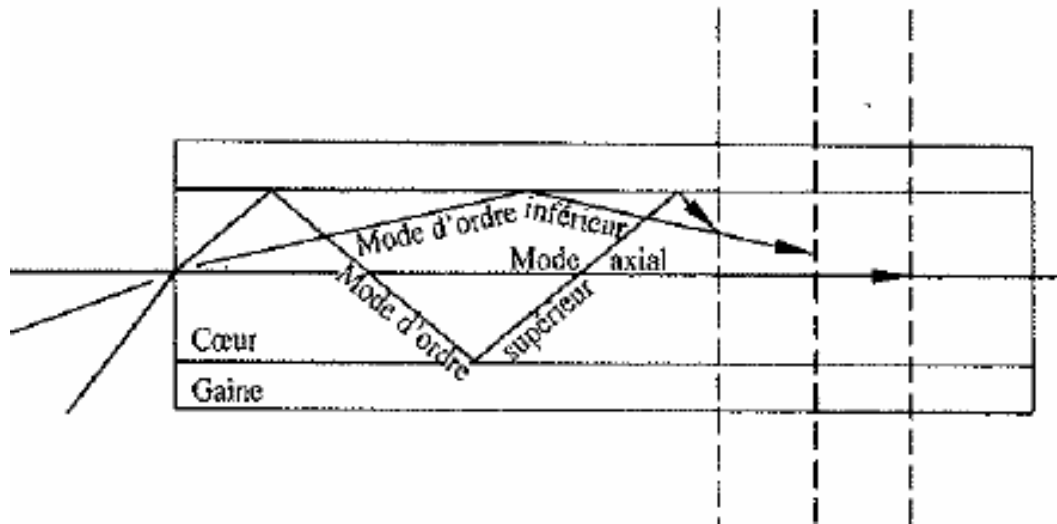
- L'ouverture numérique
- L'angle maximum d'acceptance dans l'air
- Le chemin optique maximum ℓ sur 1 km

Transmission dans les fibres multimodes

Selon l'angle d'incidence à l'entrée de la fibre, on peut y injecter des centaines, voire des milliers de rayons différents.

Ceux-ci vont suivre des chemins optiques (ou modes) différents.

Une telle fibre constitue ce qu'on appelle une fibre multimode.



A chaque mode correspond à un temps de parcours légèrement différent.

Les rayons possédant à l'entrée l'angle le plus ouvert voyagent plus longtemps du fait de leurs multiples réflexions entre le cœur et la gaine.

Ils mettent donc plus de temps à atteindre la sortie de la fibre que les rayons proches de l'axe.

Dispersion intermodale dans les fibres multimodes

Cela entraîne logiquement ce que l'on appelle une **dispersion intermodale** (ou plus simplement « *dispersion modale* »), bien que cela n'ait aucun rapport avec la dispersion des fréquences due à l'indice de réfraction du matériau. Cela peut être très gênant dans la propagation d'information. En effet, celle-ci est codée sous forme de millions d'impulsions (ou bits) lumineuses par seconde avant d'être envoyée dans la fibre. Comme chacune d'entre elles a un temps de parcours différent, un signal d'entrée parfaitement rectangulaire se déforme rapidement au bout de quelques kilomètres.

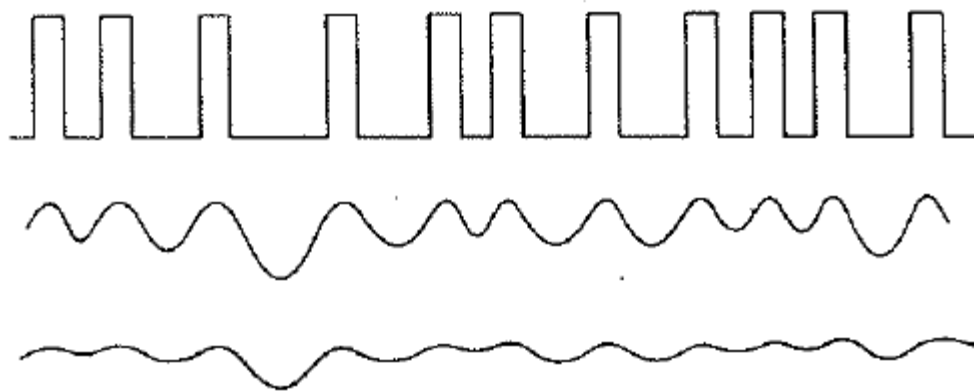
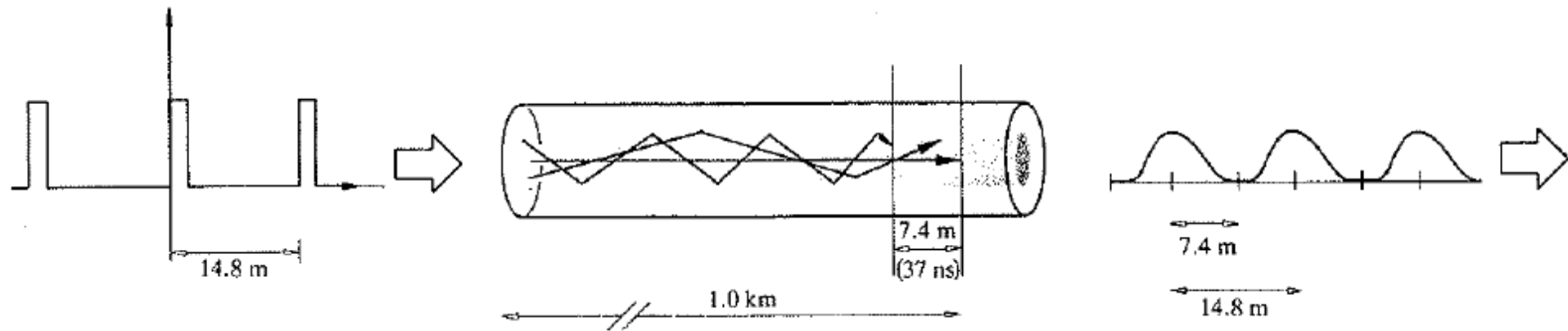


Figure 5.74 Impulsions rectangulaires déformées par une dispersion croissante : notez comment deux impulsions rapprochées se dégradent plus rapidement.

Etalement d'un signal à cause de la dispersion intermodale



Retard intermodal

Posons

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min},$$

le temps de retard à l'arrivée entre le rayon le plus rapide (axial) et le rayon le plus lent (le plus incliné).

Le calcul de t_{\min} revient simplement à diviser la longueur de la fibre L par la vitesse de la lumière dans le matériau.

On a alors:

$$t_{\min} = \frac{L}{v_{co}} = \frac{L}{c / n_{co}} = \frac{L n_{co}}{c}$$

La longueur du chemin ℓ non axial est maximal quand le rayon est orienté suivant l'angle critique.

Rappelons qu'on avait pour ℓ :

$$\ell = \frac{L n_{co}}{n_{go}}$$

Et donc:

$$t_{\max} = \frac{\ell}{v_{co}} = \frac{L n_{co} / n_{go}}{c / n_{co}} = \frac{L n_{co}^2}{c n_{go}}$$

$$\Delta t_{im} = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L n_{co}^2}{c n_{go}} - \frac{L n_{co}}{c} = \frac{L n_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{go}} - 1 \right)$$

Bande passante

Comme la lumière voyage à la vitesse:

$$v_{co} = \frac{c}{n_{co}}$$

La déformation spatiale d'un signal sera:

$$v_{co} \Delta t_{im} = \frac{c}{n_{co}} \Delta t_{im}$$

Pour décoder un signal il faut une séparation d'au moins deux fois l'étalement d'un pic.
Donc les impulsion doivent être séparés d'au moins $2\Delta t_{im}$.

La fréquence maximale [Hz] possible (bande passante) sera:

$$BP = \frac{1}{2\Delta t_{im}} = \frac{1}{\frac{2L n_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{go}} - 1 \right)}$$

Ce qui de fait limite l'utilisation des fibres multimode à des courtes distances.

Exercice

Déterminer pour une fibre multimode avec

$$n_{co} = 1,500$$

$$n_{go} = 1,489$$

- L'angle critique θ_c
- L'angle maximum d'acceptance θ_i dans l'air
- Le chemin optique maximum ℓ sur 1 km
- La dispersion intermodale
- La fréquence maximale (bande passante) du signal d'entrée sur des longueurs de 10, 100 et 1000 m.

Dispersion Chromatique

Fibres monomode: PAS de dispersion modale

MAIS: dispersion chromatique

$$\delta'_c = \frac{\partial \tau'}{\partial \lambda} \quad \text{et} \quad \tau' = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}$$

Elargissement de l'impulsion due aux variation de l'indice de réfraction n_c en fonction de la longueur d'onde λ .

$$\beta = n_c \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{C} n_c \quad \rightarrow \quad \tau' = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{n_c}{C} + \frac{\omega}{C} \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega}$$

$$\tau' = \frac{1}{C} \left(n_c - \lambda \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} \right) \quad \rightarrow \quad \delta'_c = \frac{\partial \tau'}{\partial \lambda} = -\frac{\lambda}{C} \frac{\partial^2 n_c}{\partial \lambda^2}$$

Dispersion Chromatique

Elargissement de l'impulsion: $\Delta t_c = D_c = \partial'_c \cdot \Delta\lambda \cdot L$

@ 1550 nm: $\approx 20 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$

@ 1300 nm: $\approx 0 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$

Bande passante:
$$BP = \frac{1}{2\Delta t_c} = \frac{1}{2 \cdot \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{C} \frac{\partial^2 n_c}{\partial \lambda^2}}$$

Cause principale de la limitation de la bande passante dans les fibres monomode!

Exercice

Déterminer la dispersion chromatique sur une fibre monomode de longueur égale à 1km, œuvrant à 1550 nm, pour les sources suivantes:

- Une LED ($\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$)
- Un laser à semi-conducteur ($\Delta\lambda = 1 \text{ pm}$)

Atténuation

Les causes des pertes dans les fibres sont multiples.

Il y a, entre autres:

- l'absorption par les impuretés,
- la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface cœur-gaine et la diffusion de Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (verre ou silice),
- les courbures et les micro-courbures de la fibre,
- la diffusion et la réflexion aux épissures (jonctions).

Ces effets combinés contribuent à détériorer la transmission de la fibre.

L'atténuation minimum d'une fibre unimodale standard des télécommunications se situe à 1550 nm; elle est de l'ordre de **0,2 dB/km**.

En règle générale, on considère que le signal doit être réamplifié lorsque son intensité a diminué d'un facteur 10. L'atténuation dépend bien sûr de la nature du matériau. Pour du verre optique commercial, celle-ci est d'environ 1 000 dB/km. Cela signifie donc qu'au bout d'un kilomètre, l'intensité de la lumière transmise par une fibre réalisée avec ce verre a donc chuté d'un facteur 10^{-100} . Dans ce cas, il faudrait avoir un répéteur tous les 50 mètres (ce qui est à peine meilleur que le « téléphone » d'enfant réalisé avec deux timbales et une ficelle). Au début des années 1970, la meilleure atténuation était de 20 dB/km, obtenue avec de la silice fondue (quartz, SiO_2) et elle fut réduite à environ 0,16 dB/km en 1982. Ces progrès spectaculaires furent obtenus principalement en éliminant les impuretés du matériau (particulièrement les ions fer, nickel et cuivre) et en réduisant la contamination des groupements OH (obtenus principalement en éliminant scrupuleusement toute trace d'eau présente dans le verre – p. 78). De nos jours, les fibres optiques les plus pures peuvent transmettre un signal jusqu'à 80 km sans réamplification.

Atténuation

Rappel: définition du décibel:

$$\text{dB} = -10 \log_{10} (P_o / P_i)$$

L'atténuation α d'une fibre optique est usuellement exprimée en décibels par kilomètre (dB/km)

$$\alpha = \frac{\text{dB}}{\text{km}} = \frac{-10 \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right)}{L}$$

$$\frac{P_o}{P_i} = 10^{-\frac{\alpha L}{10}}$$

Exercice

- Déterminer pour une fibre avec une atténuation de $0,2 \text{ dB/km}$ la distance où l'intensité d'un signal est diminuée de la moitié.

Causes de l'atténuation du signal dans les fibres

Les **causes** des pertes dans les fibres sont multiples.

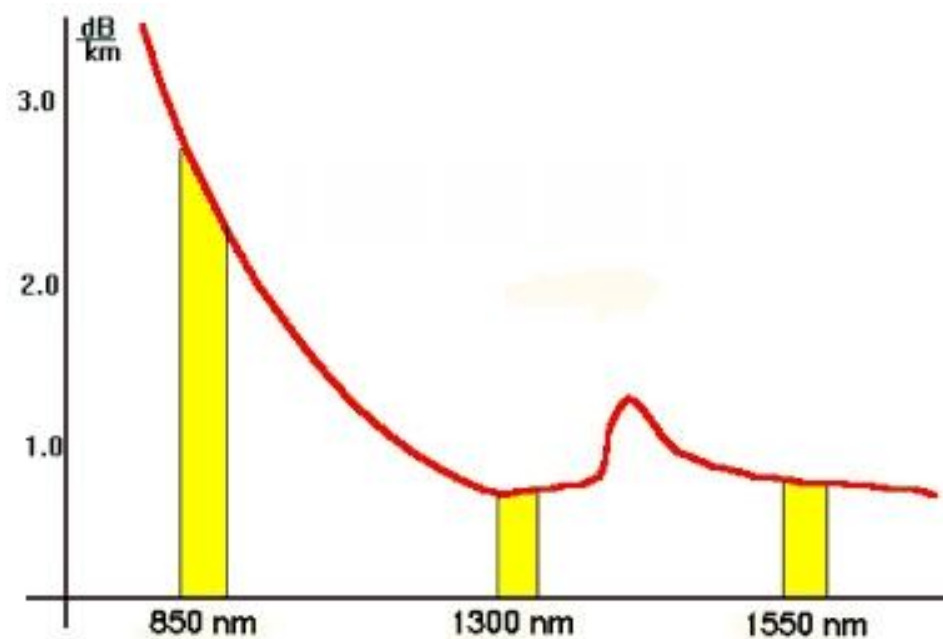
On distingue généralement :

1. l'absorption par les impuretés, en effet une fibre de silice quoique très purifiée n'est pas parfaite et les atomes d'impuretés vont avoir plusieurs effets perturbateurs dont l'absorption purement et simplement du photon par un électron de l'atome avec transformation finale de l'énergie lumineuse du photon en chaleur
2. la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface coeur-gaine et la diffusion Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (la silice), due à des variations locales de l'indice de réfraction créées par des changements de densité ou de composition apparus au moment de la solidification du matériau

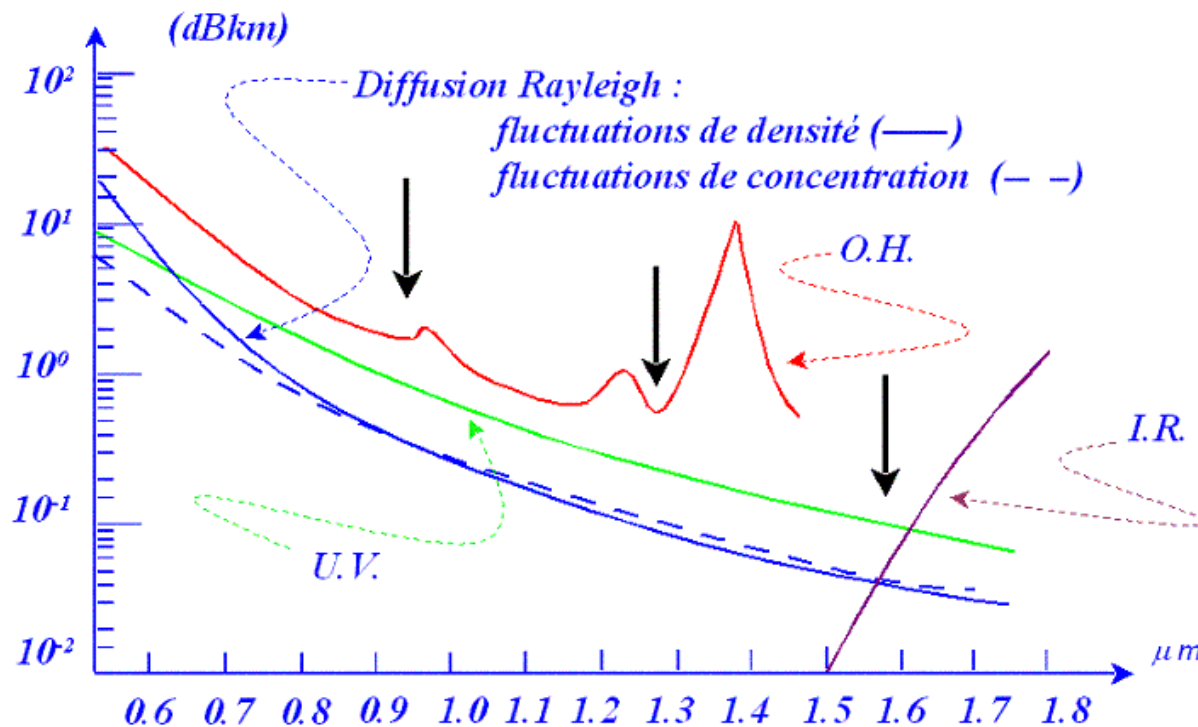
Pertes dans les fibres (suite)

3. la dispersion chromatique due aux vitesses différentes de signaux lumineux de longueurs d'onde différentes
4. la dispersion intermodale résultant des temps de propagation différents selon les modes
5. les courbures et les micro-courbures de la fibre, la fibre ne peut pas dans une application réelle être, sauf exception, exempte de courbures et dans ces zones le risque pour un rayon lumineux de ne plus satisfaire la condition de réflexion totale est inévitable ce qui se traduit par une perte dans la gaine par simple réfraction.
6. la diffusion et la réflexion aux épissures.

Exemple de courbe d'atténuation d'une fibre optique



Contributions à l'atténuation

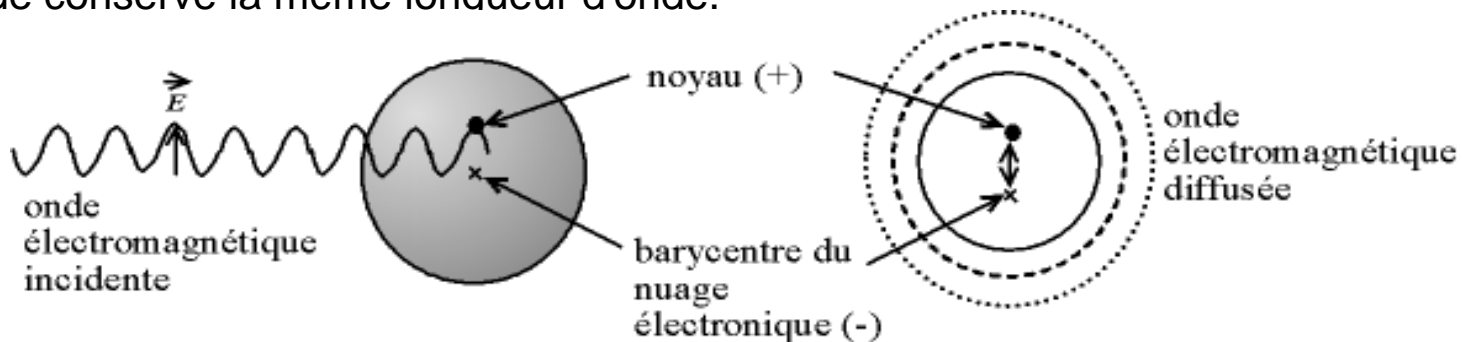


Toutefois le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible comparée à d'autres conducteurs d'énergie.

- L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde.
- La diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs l'onde (domaine du visible et du proche infrarouge).
- Un pic d'absorption, dû à la présence de radicaux -OH dans la silice, pourra également être observé autour de 1 385 nm. Les progrès les plus récents dans les techniques de fabrication permettent de réduire ce pic.

Diffusion (de) Rayleigh

- La diffusion Rayleigh est un mode de diffusion des ondes, par exemple électromagnétiques ou sonores, dont la longueur d'onde est très supérieure à la taille des particules diffusantes.
On parle de diffusion élastique, car cela se fait sans variation d'énergie, autrement dit, l'onde conserve la même longueur d'onde.



- L'onde électromagnétique peut être décrite comme un champ électrique oscillant couplé à un champ magnétique oscillant à la même fréquence.
Ce champ électrique **va déformer le nuage électronique des atomes**, le barycentre des charges négatives oscille ainsi par rapport au noyau (charge positive).
- **Le dipôle ainsi créé rayonne**, c'est ce **rayonnement induit** qui constitue la diffusion Rayleigh.
- Ce modèle physique est cohérent avec le principe de Huygens dans le cas de la propagation dans un milieu matériel : les atomes réémettent réellement les ondes qu'ils reçoivent.

Pertes par diffusion dans une fibre optique

- La diffusion de Rayleigh est d'autant plus grande que la longueur d'onde est courte avec une variation en $1/\lambda^4$.
- Ce qui explique que les communications optiques soient dans l'infrarouge.

Pertes par courbure

- **Du point de vue de l'optique géométrique**, il y a modification des conditions de réflexion : un rayon totalement réfléchi dans un guide droit, peut s'échapper par réfraction lorsque le guide est courbé.
- **Du point de vue ondulatoire**, la perturbation induit un couplage du mode guidé avec le continuum de rayonnement.
- Les fibres unimodales tolèrent un rayon de courbure de l'ordre de 10 cm sans perte notable mais les pertes **croissent exponentiellement** avec la courbure.

Pertes par absorption

- L'eau ou plus précisément l'ion OH, qui est le principal polluant des fibres de silice, occasionne un maximum d'atténuation vers 1430 nm.

Minimum d'atténuation

Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers **1550 nm**. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques.

De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que **0,2 dB/km** à 1 550 nm: après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection.

Si l'on désire transmettre l'information sur des **milliers de kilomètres**, il faudra avoir recours à une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité.

Il est à noter que le signal subira des **pertes supplémentaires à chaque connexion** entre fibres, que ce soit par des traverses ou bien par soudure, cette dernière technique réduisant très fortement ces pertes.

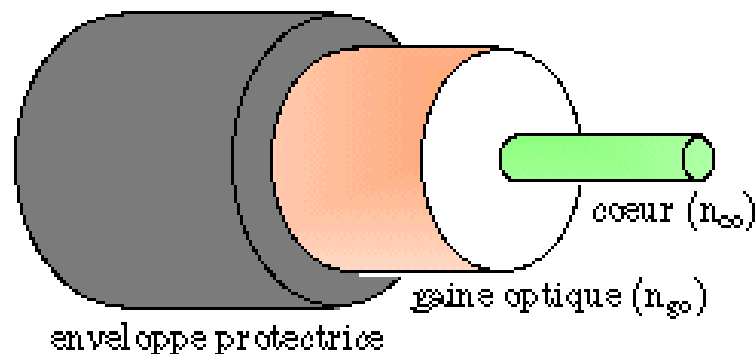
Matériaux des fibres optiques

Dans une fibre optique la lumière est confinée dans la zone centrale et guidée grâce à la gaine optique.

Le plus souvent le cœur est en **silice** ou en **verre spécial** tandis que la gaine de protection est plus généralement en **plastique**.

Pour obtenir des indices de réfraction différents entre les deux couches on procédera le plus souvent à un **dopage**.

Rappelons que ces indices diffèrent seulement de quelques millièmes.



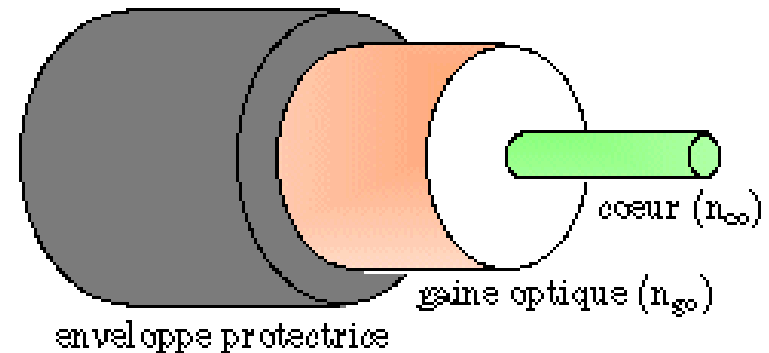
Eléments perturbateurs

Pour ne pas perturber le phénomène de réflexion totale, on comprend que les fibres optiques doivent rester propres (humidité, poussière, huile, etc.).

Pour les mêmes raisons, il s'agit de prendre des précautions particulières lorsqu'un grand nombre de fibres sont rassemblées en faisceau, très proches l'une de l'autre, comme dans la plupart des câbles à fibres optiques.

En effet, de la lumière provenant d'une fibre peut s'introduire dans une autre (phénomène parasite connu sous le nom de *crosstalk*) et provoquer des interférences de signal.

Pour cette raison, chaque fibre est généralement recouverte d'une deuxième gaine de matériau transparent d'indice moins élevé (*cladding*).



Fabrication

Nous présentons ci-dessous quelques procédés classiques de fabrication.

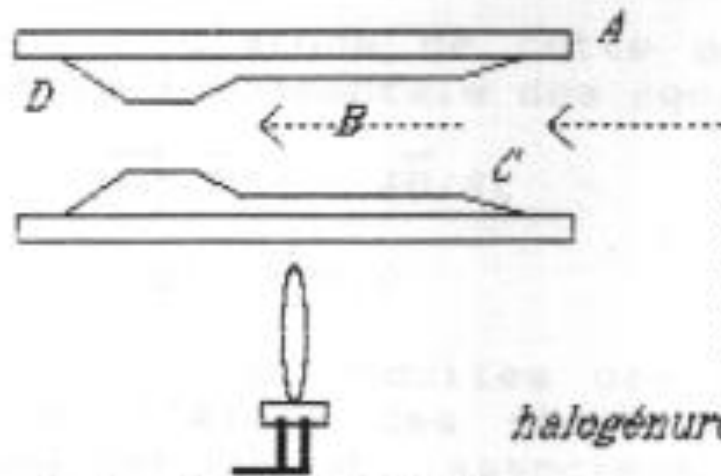
On peut les classer en deux groupes:

1. Les méthodes dites internes qui consistent à déposer à l'intérieur d'un tube de silice un matériau vitreux et à rétreindre cette structure pour obtenir un barreau.
 - MCVD *modified chemical vapor deposition*
 - PMCVD *plasma MCVD*
 - SPCVD *surface plasma CVD*

2. Les méthodes externes (*outside vapor deposition*) où le matériau est déposé sur un mandrin en rotation par un procédé d'hydrolyse à la flamme. Le rétreint est effectué après retrait du mandrin en même temps que la vitrification du matériau.
 - HALF *hydrolyse à la flamme*
 - VAD *vapor axial deposition*
 - ALPD *axial lateral plasma deposition*

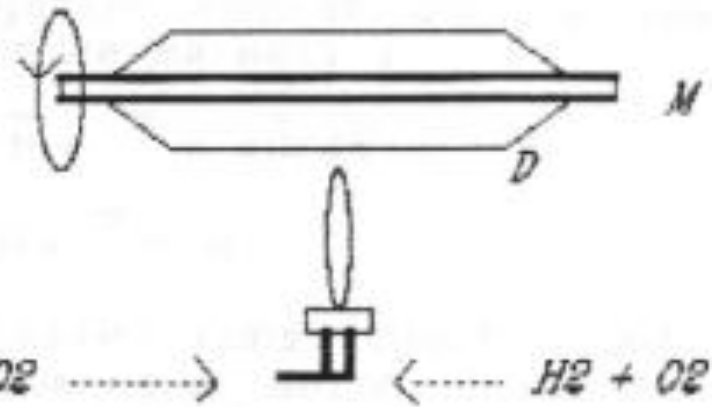
Fabrication

Méthode *interne*



principe du dépôt MCVD

Méthode *externe*



hydrolyse à la flamme OVD

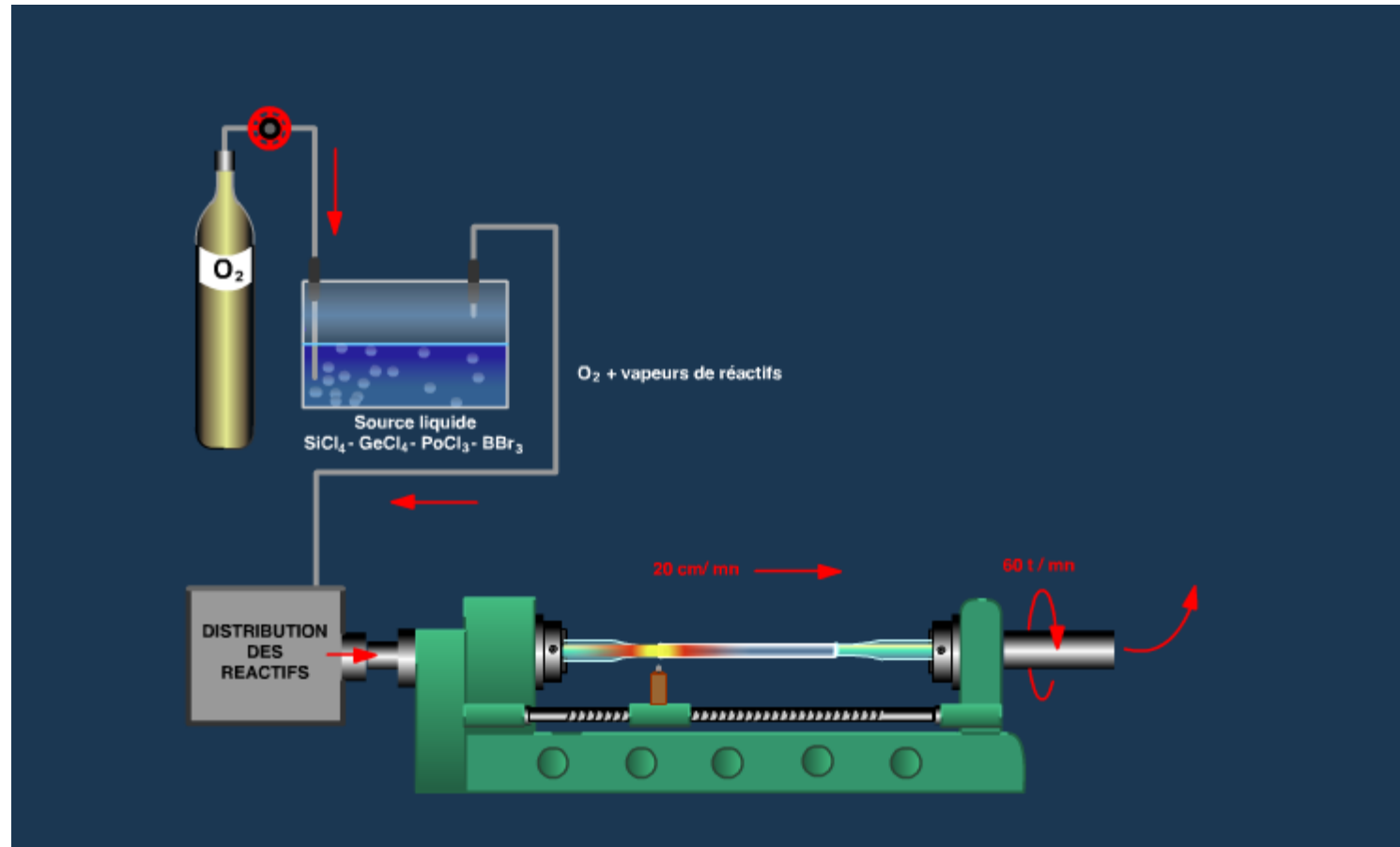
A tube de silice B formation de suies D dépôt de suies

C couche vitrifiée de verre de coeur M mandrin amovible

Fabrication - méthode *externe*

1. La préforme

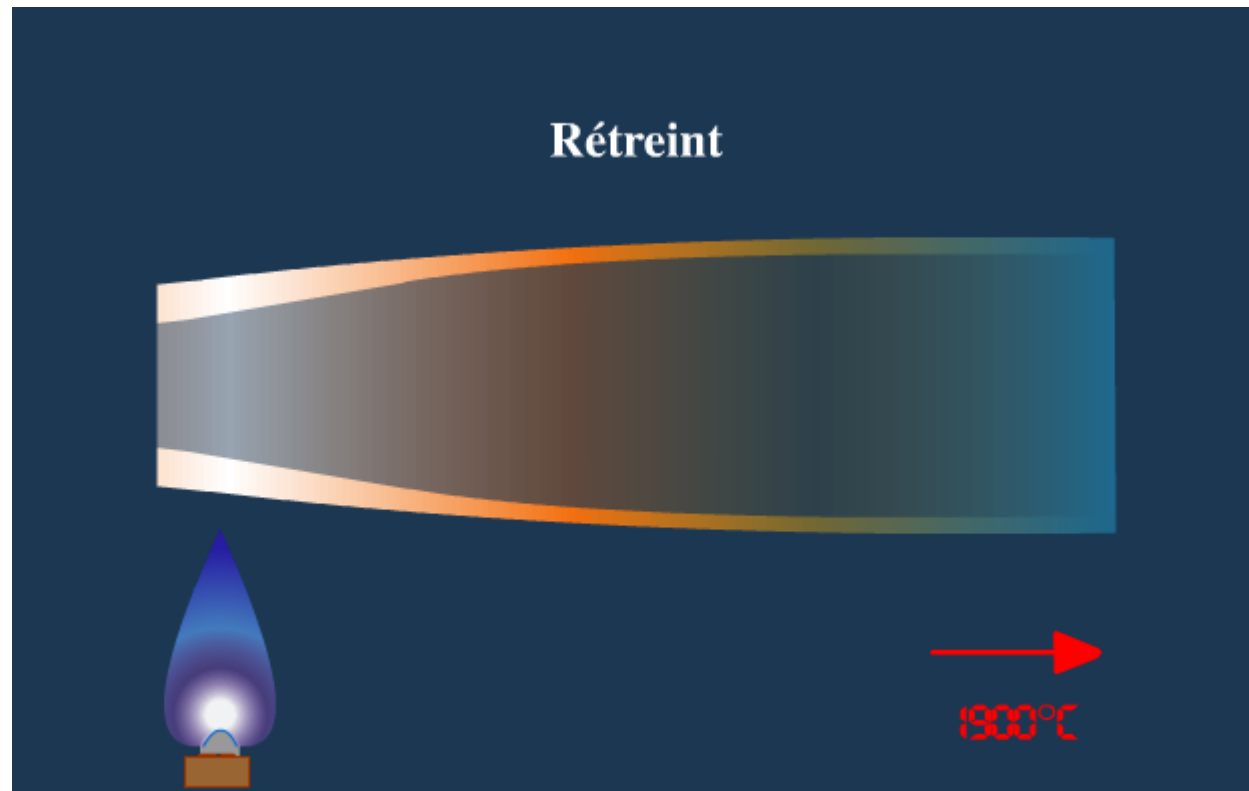
Dans cette étape, on augmente l'indice de réfraction du cœur de la fibre en la dopant avec des matériaux appropriés. La préforme est constituée d'un barreau creux de silice pure dans lequel on fait passer des dopants à l'état gazeux. On chauffe le tube de façon à déposer le dopant en couches successives.



Fabrication - méthode *externe*

2. Le retreint

On fait ensuite fondre la silice en la chauffant pour refermer le barreau de silicone.

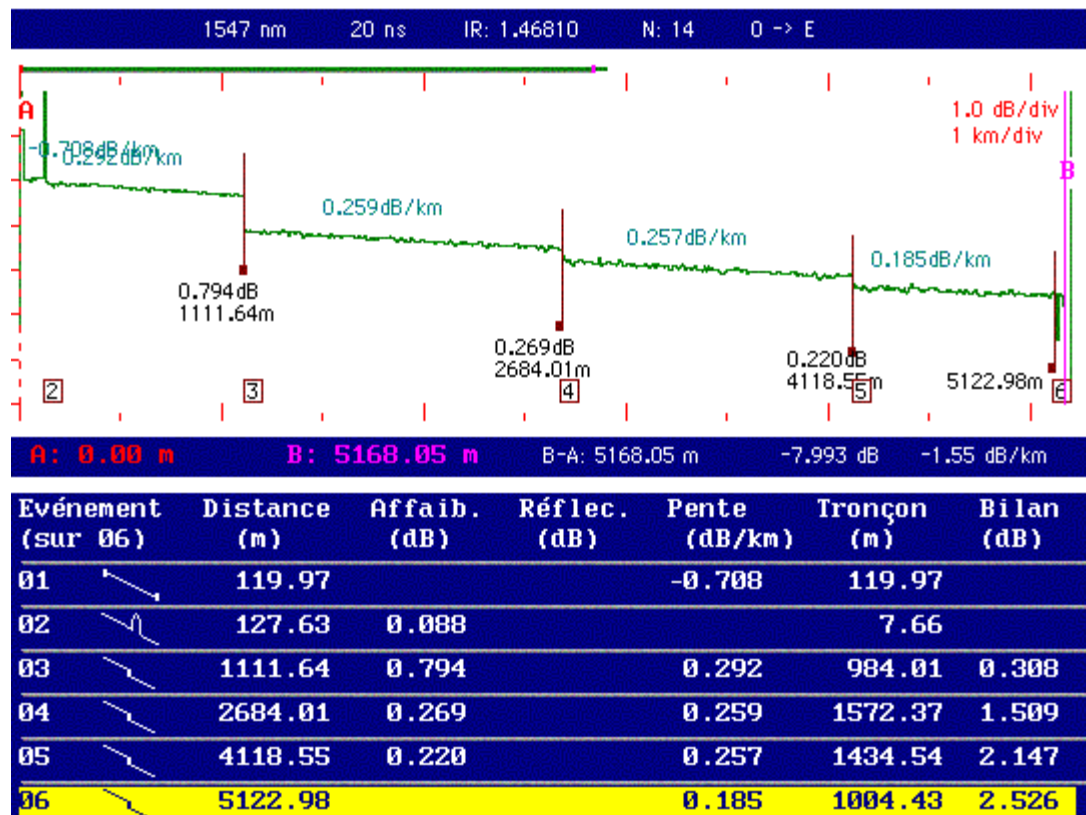


3. Le tirage :

Le tirage de la fibre est réalisé en plaçant la préforme dans un four qui fond la silice.

Connection des fibres optiques

- On réalise bien qu'en montant un réseau de fibres optiques, il faut à un moment ou à un autre connecter des fibres entre elles.
- Autant en électronique, il est facile de connecter deux fils de cuivre par soudure ou épissure, autant joindre parfaitement deux fibres est une tâche contraignante et minutieuse.
- Il est essentiel de minimiser les pertes car c'est aux connexions que le signal perd l'essentiel de sa puissance.



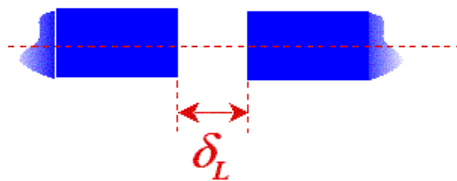
Pertes aux connexions sur une ligne optique

Jonctions de fibres

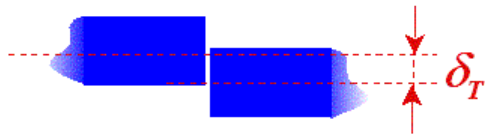
Il faut réunir de nombreuses conditions afin de réaliser une connexion qui minimisera les pertes:

- aplanir la face de contact, ou la rendre parfaitement sphérique par polissage, en veillant à ce qu'elle soit perpendiculaire à l'axe optique,
- aligner les deux fibres (voir la figure suivante),
- traiter les faces avec un revêtement antiréflexion,
- vérifier la soudure si soudure il y a et l'entourer d'une gaine de protection.

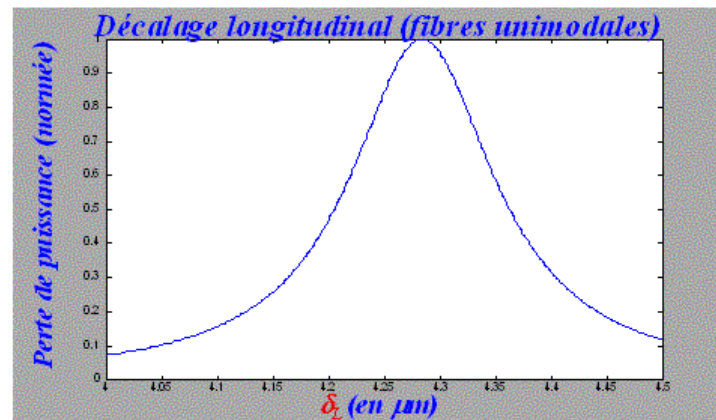
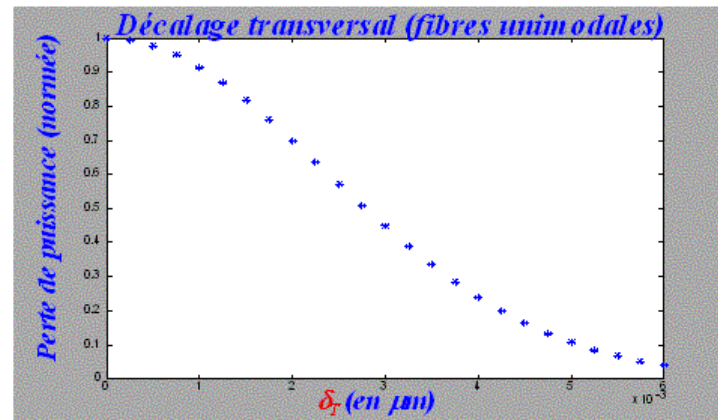
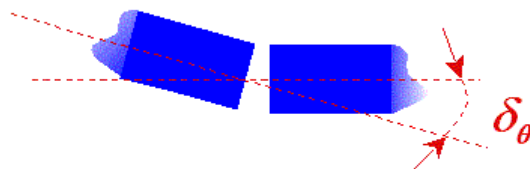
Décalage longitudinal



Décalage transversal

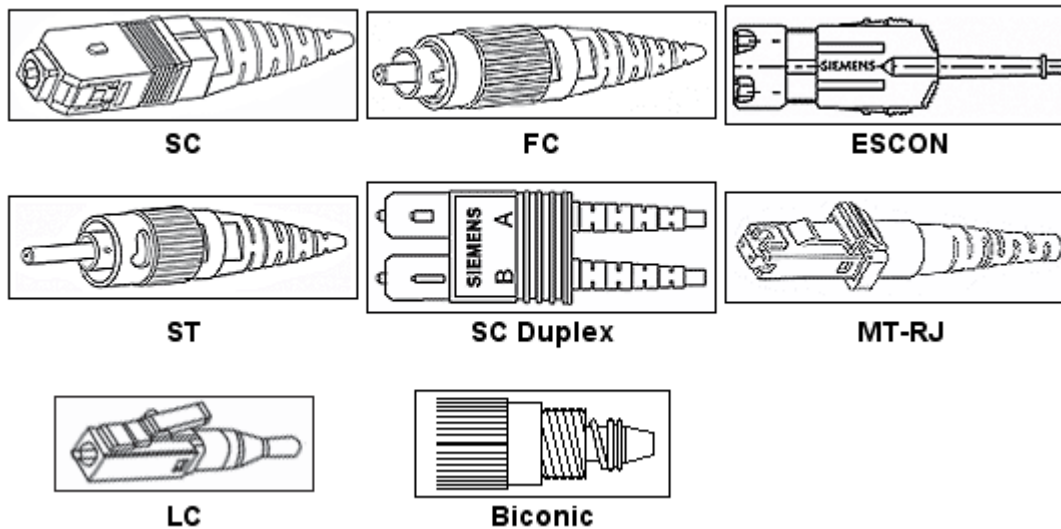


Décalage angulaire



Connecteurs

- Il existe un grand nombre de connecteurs pour la fibre optique, en voici quelques uns des plus utilisés:
- Les plus répandus sont les connecteurs ST, SC, FC, SMA .



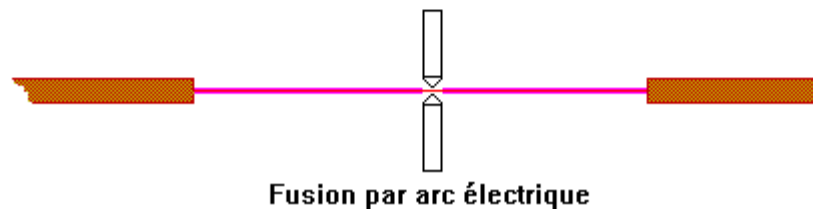
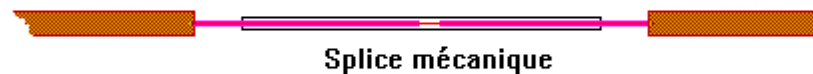
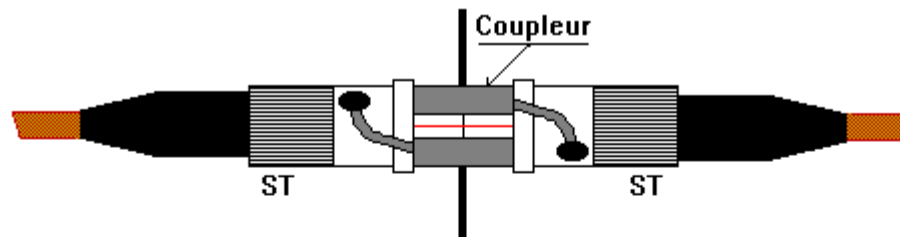
Un tutoriel sur les principaux connecteurs se trouve ici

<http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/fiber-optic-connectors.php>

Couplage de fibres

Il y a plusieurs manières pour coupler de la fibre optique:

- Le couplage mécanique de deux connecteurs mis bout à bout au moyen d'une pièce de précision. Par exemple deux connecteurs ST
- Le raccordement par *Splice* mécanique qui est utilisé pour les réparations à la suite de rupture ou pour raccorder une fibre et un connecteur déjà équipé de quelques centimètres de fibre que l'on peut acquérir dans le commerce

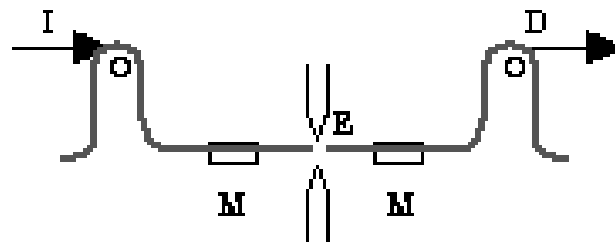


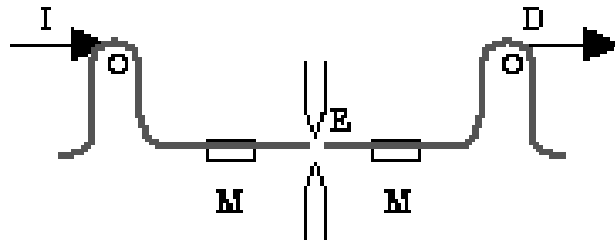
Fusion de fibres

L'appareil qui sert à épisser, c'est-à-dire faire une épissure ou une fusion bout-à-bout entre deux fibres, est une épisseuse ou fusionneuse.

Dans le cas d'une fusionneuse, elle comprend (typiquement) les éléments qui sont schématisés sur la figure:

- un arc électrique **E** assurant la fusion des deux fibres,
- des micromanipulateurs **M** assurant l'ajustement,
- un dispositif d'insertion locale de lumière **I**, idéalement à la longueur d'onde où la fibre est unimodale,
- un dispositif de détection locale de lumière **D**.





Les fibres en **I** et **D** sont fortement courbées pour permettre d'injecter localement de la lumière dans le cœur de la fibre ou d'en prélever.

Ces dispositifs permettent en principe d'évaluer la perte après fusion "in situ", c'est-à-dire sans être obligé de faire une mesure de bout en bout où l'injection aurait lieu à l'entrée de la ligne et la détection à la sortie.

Les fusionneuses actuelles permettent de réaliser des épissures avec des pertes typiques de 0,05 dB sur les fibres standard des télécommunications.

Travail personnel – à lire et retenir

Chapitre « **Fibres optiques** » du polycopié *Technologies optiques*.

Travail personnel - approfondissements

<http://www.httr.ups-tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/welcome.htm>
(en particulier la page sur la connectique)

http://opt-fibres.phys.polymtl.ca/fibres_html/fibres.html
(un cours complet sur les fibres optiques)