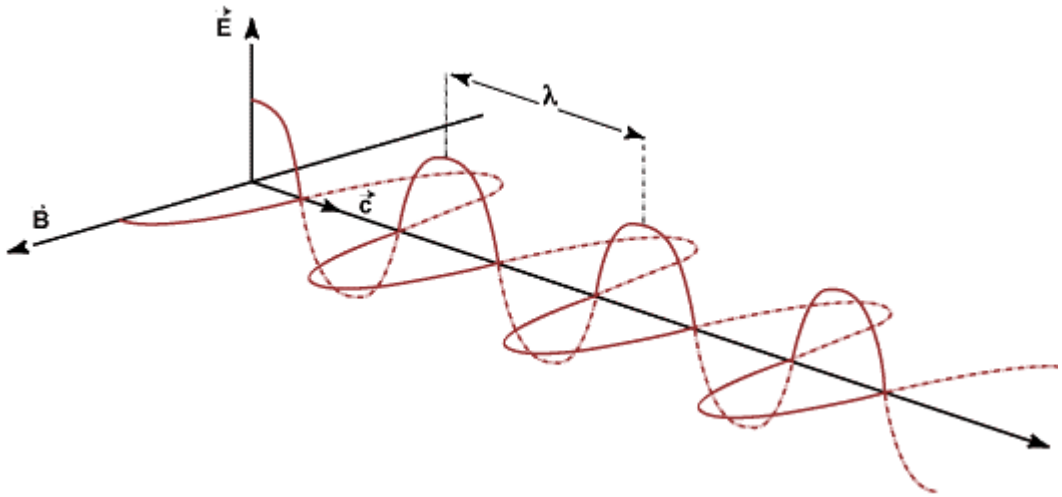
Cours MRIM:

www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

Etude des supports de transmission

la fibre optique

1 - Généralités

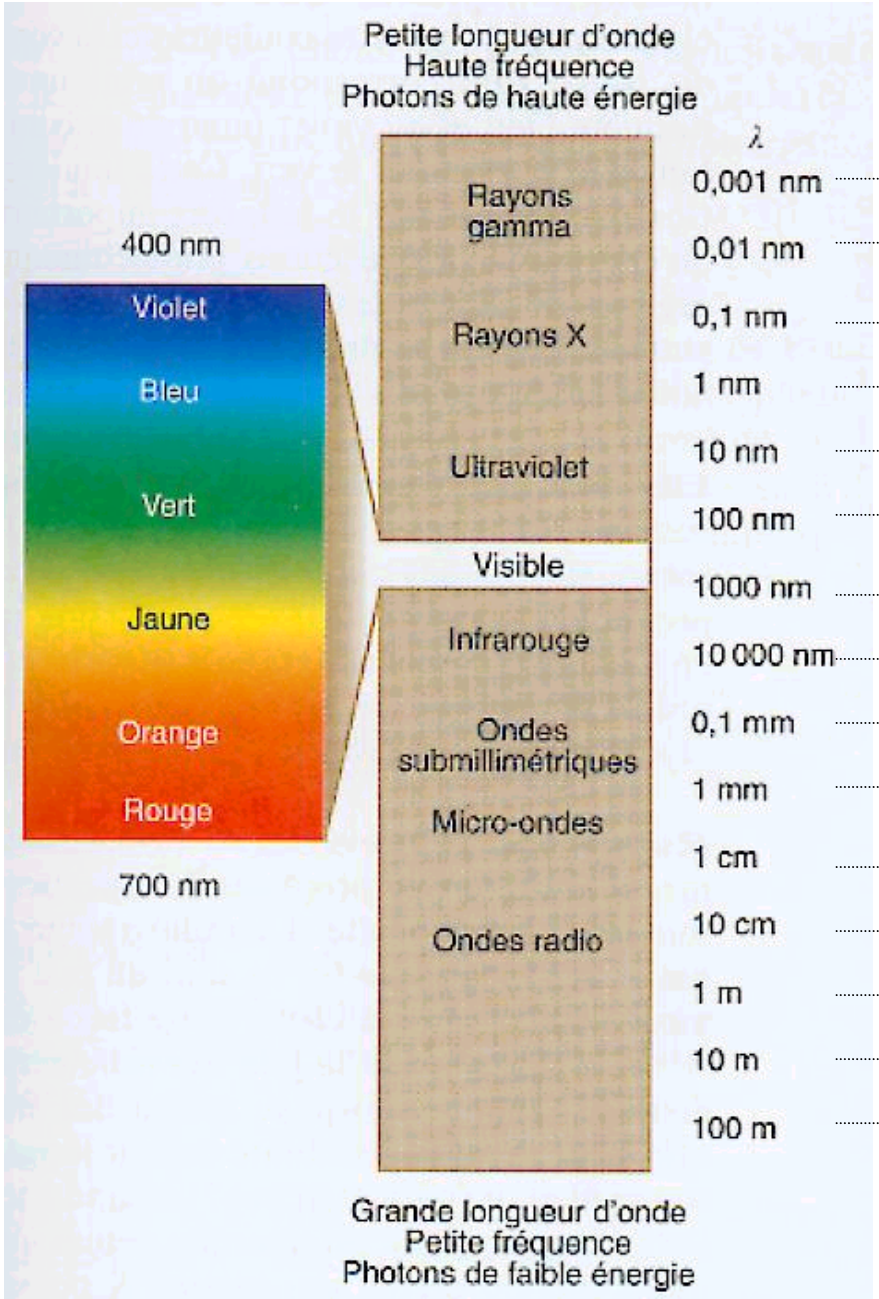


$\vec{E}$	champ électrique
$\vec{B}$	champ magnétique
c	célérité (m/s)
λ	longueur d'onde (m)
T	période = λ/c (s)
f	fréquence = 1 / T (Hz)

La lumière est une onde électromagnétique, de longueur d'onde λ, qui se propage dans un milieu transparent et isolant (diélectrique).

Avec : $\lambda = c \cdot T$ ou encore: $\lambda = c / f$

où *c* est la célérité et vaut approximativement 3.10^8 m/s dans le vide ou l'air; *f* est la fréquence en Hz.



Spectre de la lumière

- La lumière visible n'est qu'une petite partie de ce qu'on appelle le spectre électromagnétique.
- Dans le domaine des radiations visibles, le spectre s'étend du violet au rouge, ce qui correspond dans l'air ou dans le vide aux longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm.
- La communication par fibre optique utilise les longueurs d 'onde comprises entre 800 et 1600 nm, dans le domaine de l 'infrarouge.

Indice optique d'un milieu isolant et transparent: l 'indice de réfraction

L'indice optique "*n*", ou indice de réfraction d'une substance, est donné par le rapport de la célérité de la lumière dans le vide à la célérité de la lumière dans le milieu considéré :

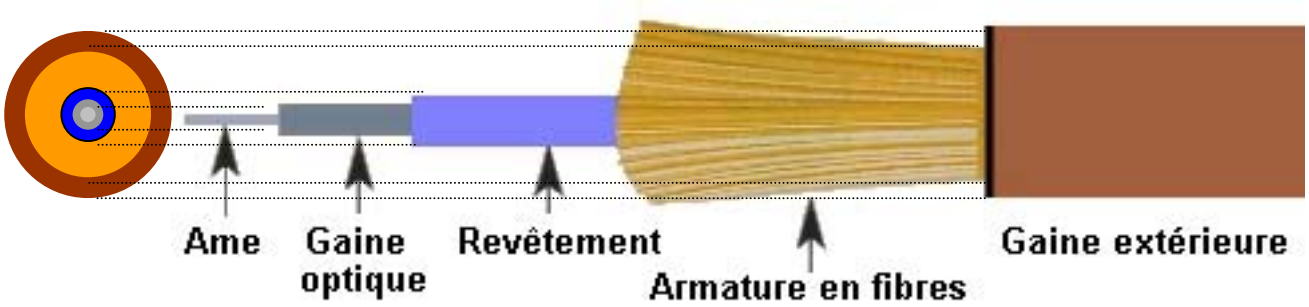
$$n = \frac{c}{v}$$

Indice de réfraction de quelques milieux matériels

Air	Eau	Huile	Verre Crown	Verre Flint	Carbone
Oxyde	de titane				
1,0002	1,333	1,5	1,517	1,655	2,417
2,76					

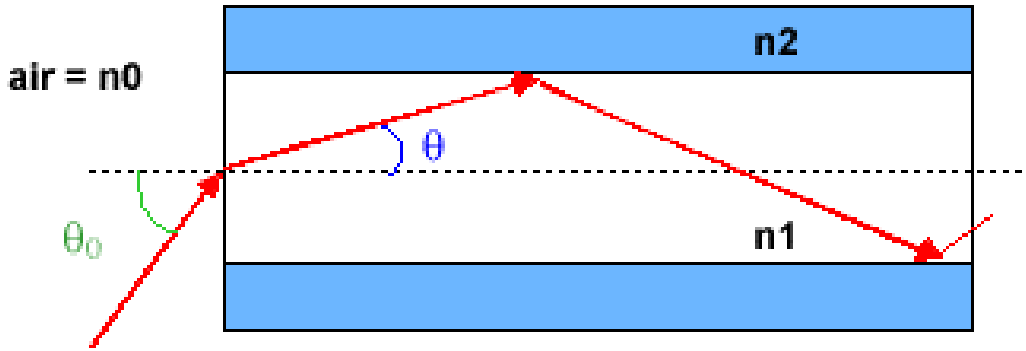
www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

2 - Caractéristiques d'une fibre optique



- L ’âme ou le cœur est la région de la fibre dans laquelle se propage la lumière. Dans ce milieu, l ’indice de réfraction n_1 y est le plus élevé.
- La gaine optique est un milieu d ’indice n_2 légèrement plus faible, qui se comporte ainsi comme un « miroir réfléchissant » pour la lumière à l ’interface cœur-gaine.
- Le revêtement est une couche de plastique qui entoure la fibre optique pour la renforcer, elle aide à absorber les chocs et permet une protection complémentaire contre des courbures excessives.
- 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, certains types présentent des couleurs noire ou jaune.

Ouverture numérique d'une fibre optique

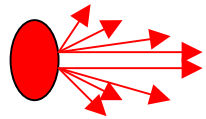


- L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum θ_0 que peut faire le faisceau pour assurer sa propagation dans la fibre optique.

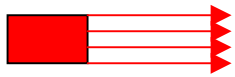
$$O.N = \sin(\theta_0) = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0}}$$

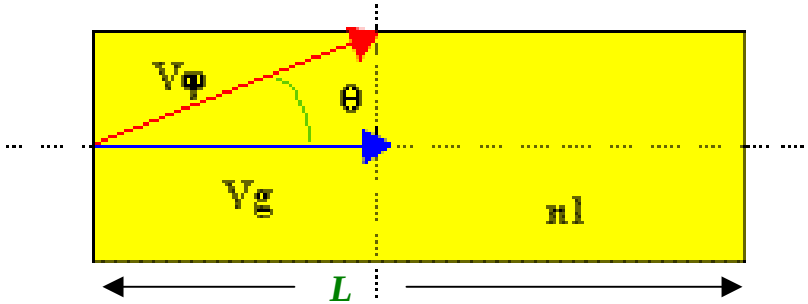
Au delà de cette limite, les rayons sont déviés dans la gaine et finissent par disparaître.

- Une grande O.N permet d 'injecter une grande quantité de lumière issue d'une source assez divergente (diode DEL).



- Une petite O.N n 'autorise que l 'injection d 'un faisceau lumineux issue d 'une source très directive (LASER)





$$V_{g\max i} = \frac{c}{n_1} \qquad t_{\min} = \frac{L}{V_{g\max i}} = \frac{L.n_1}{c}$$

$$V_{g\min i} = c.\frac{n_2}{n_1^2} \qquad t_{\max} = \frac{L}{V_{g\min i}} = \frac{L.n_1^2}{c.n_2}$$

- **Vitesse de groupe de l'onde**

  C'est la rapidité avec laquelle l'énergie lumineuse se propage d'une extrémité à l'autre du guide d'onde.

- **Différence relative des indices de réfraction Δ (donnée fabricant)**

$$\Delta \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$, pour $n_1 \cong n_2$

- Remarque: Δ s'exprime en %, soit : $\Delta\% \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1}.100$, en général: Δ% < 1%

- **Paramètre de dispersion intermodale**

  Un mode de propagation correspond à un rayon lumineux possédant une inclinaison donnée. Δt représente l'écart de temps entre le mode le plus rapide et le plus lent.

$$\Delta t = \frac{L.n_1.(n_1 - n_2)}{c.n_2} \qquad \text{soit} \qquad \Delta t = \frac{L.n_1.\Delta}{c}$$

Produit Bande Passante*Longueur

– On montre que la bande passante d'une fibre s'écrit : $B.P = \frac{1}{2.\Delta t}$

– Soit: $B.P = \frac{c}{2.L.n_1.\left(\frac{n_1}{n_2}-1\right)} \rightarrow B.P \times L = \frac{c}{2.n_1.\left(\frac{n_1}{n_2}-1\right)} = \text{constante}$

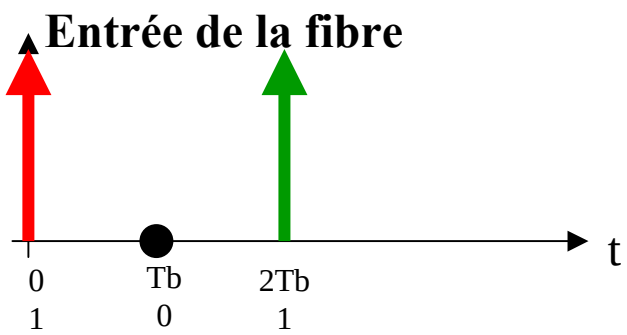
Ce produit étant constant, l'usage veut qu'on exprime la bande passante en MHz × km.

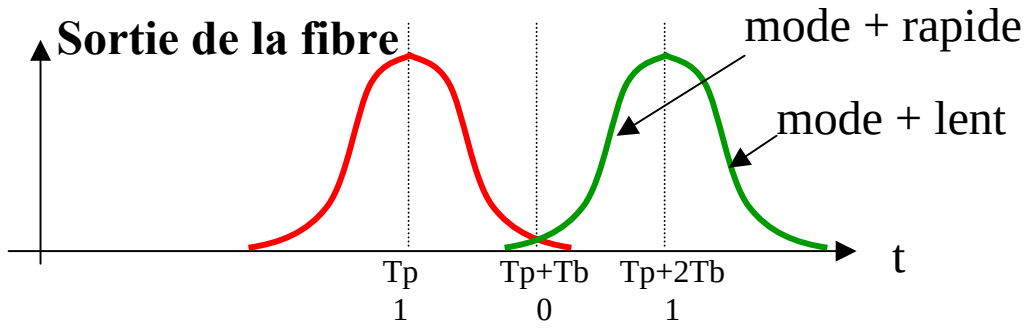
Dispersion intermodale

– A l'entrée de la fibre optique, on envoie une impulsion lumineuse infiniment étroite (Dirac). Cette impulsion excite tous les modes de propagation de la fibre.

– A la sortie de la fibre, on constate que l'impulsion s'est élargie dans le domaine temporel:

→ C'est le phénomène de dispersion intermodale.





Si la durée Tb séparant 2 impulsions est trop brève, les signaux se recouvrent en sortie rendant le décodage impossible. (Interférence Inter Symbole ou I.I.S.)

– Il faut diminuer la fréquence du signal numérique.

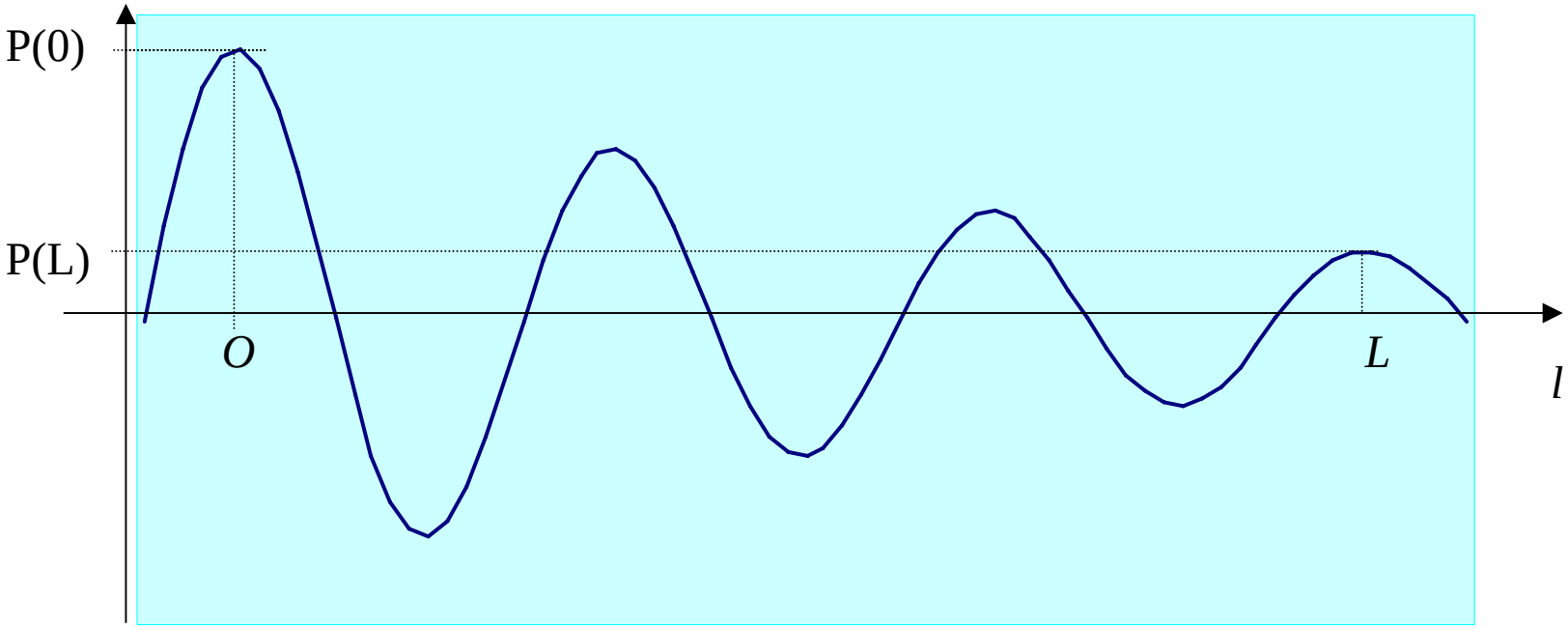
– Le phénomène de dispersion modale se traduit par une limitation de la bande passante du guide d'onde.

Atténuation linéique

Lorsqu'on injecte, à l'entrée d'une fibre optique, une puissance Pe = P(0) sous forme d'une onde électromagnétique, cette puissance décroît avec la longueur L de la fibre optique en fonction de l'atténuation linéique $\alpha_{dB/km}$, et à la sortie, on récupère la puissance Ps = P(L).

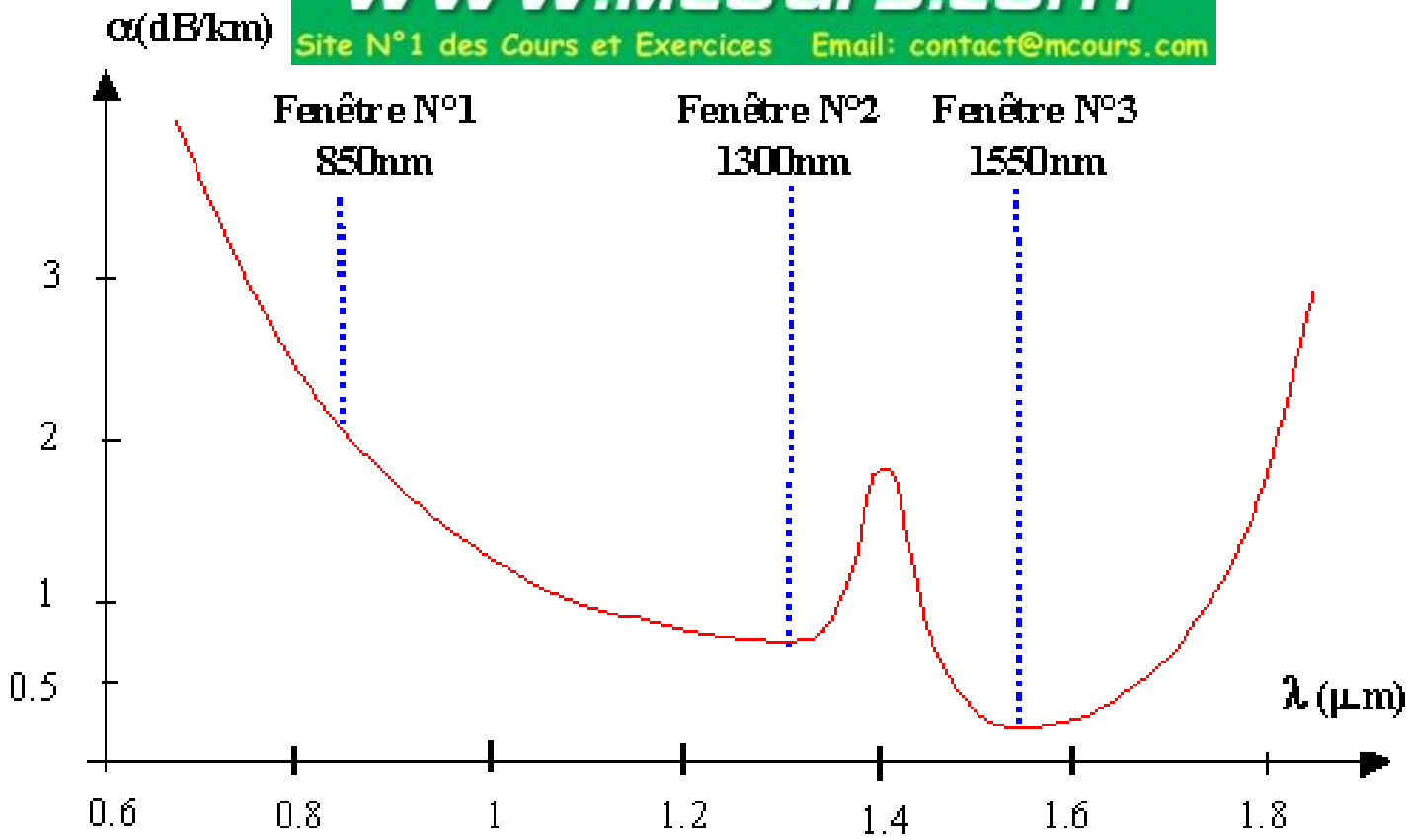
Soit : $\mathbf{P(L) = P(0).10^{-\alpha.L/10}}$

'α' dépend du matériau (plastique, silice,...) et de la longueur d'onde λ.



On montre expérimentalement que les fibres présentent une atténuation minimale pour une longueur d'onde optique de 1550nm.
(cela correspond à un minimum d'absorption d'énergie par le matériau de la fibre).

www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com



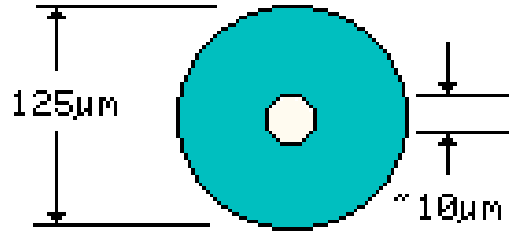
- En transmission optique on définit 3 fenêtres de transmission :
  - Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis technico-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisés en fonction des applications.
  - La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants optoélectroniques très performants, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances.

3 - Différents types de fibres optiques

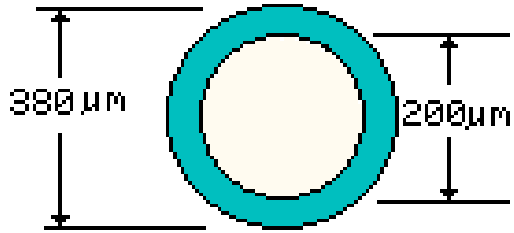
Suivant les dimensions du cœur et les valeurs des indices n_1 et n_2, on peut classer les fibres en deux catégories :

Soit : $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}.\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ où λ représente la longueur d'onde de la lumière utilisée.

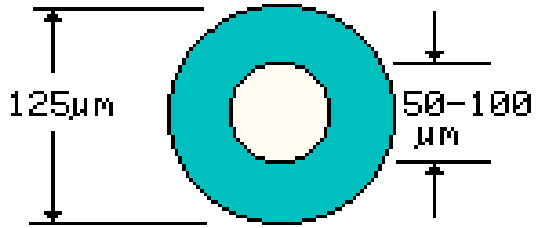
- Pour $\alpha < 2{,}4 \rightarrow$ La fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée **fibre monomode**.



- Pour $\alpha >> 2{,}4 \rightarrow$ La fibre est appelée multimode et se divise en deux sous-catégories :
  - **Fibre multimode à saut d'indice**



  - **Fibre multimode à gradient d'indice**

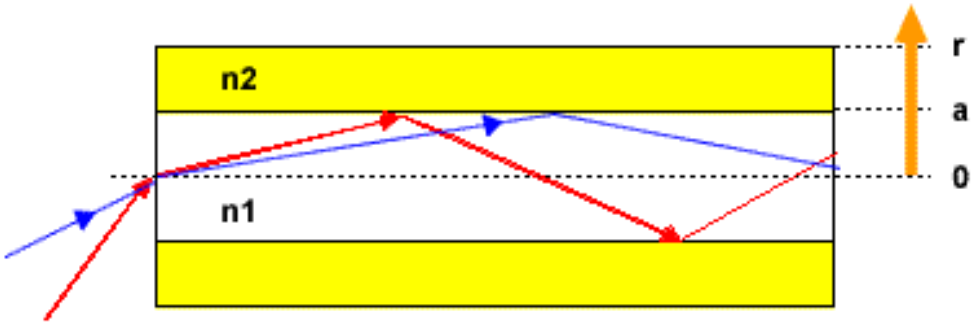


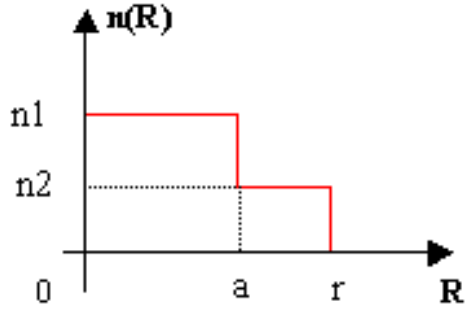
Fibre optique multimode à saut d'indice

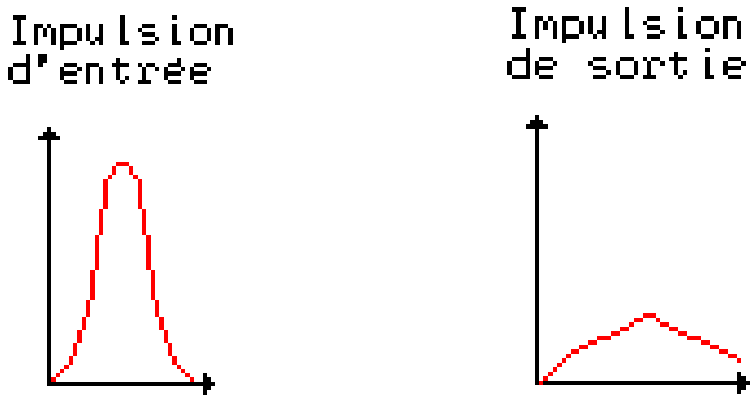
C'est un guide d'onde dont le diamètre du cœur (quelques centaines de µm) est grand devant la longueur d'onde.

L'indice de réfraction constant varie brusquement (saut) quand on passe du cœur à la gaine.

Le guidage de la lumière se fait suivant des lignes brisées.



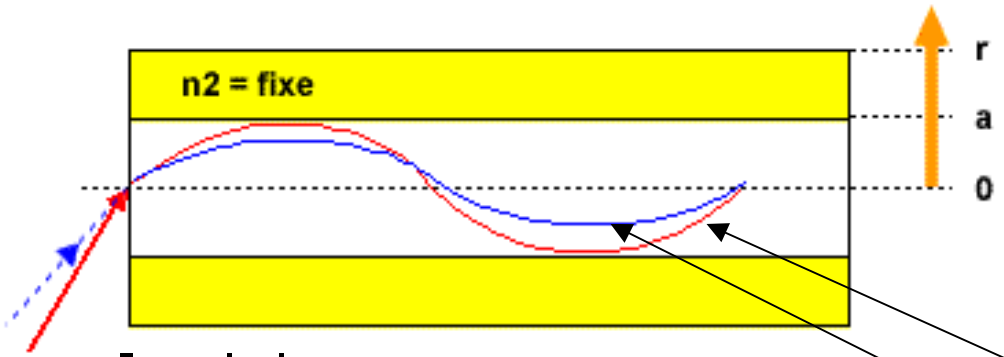


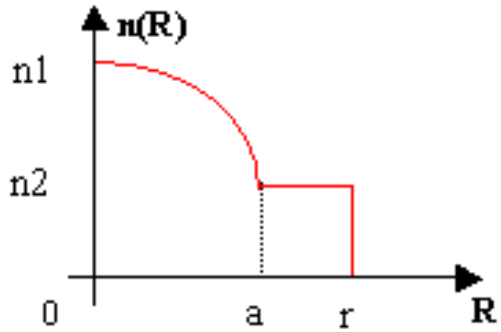


Fibre optique multimode à gradient d'indice

Le cœur possède un indice de réfraction qui décroît progressivement du centre à la périphérie suivant un profil parabolique. Le faisceau lumineux suit une trajectoire d'allure curviligne.

Le faisceau lumineux change de direction moins brusquement lors du rebond ce qui diminue les pertes.





Impulsion d'entrée

Impulsion de sortie

Trajet plus long mais plus rapide

Trajet plus court mais plus lent

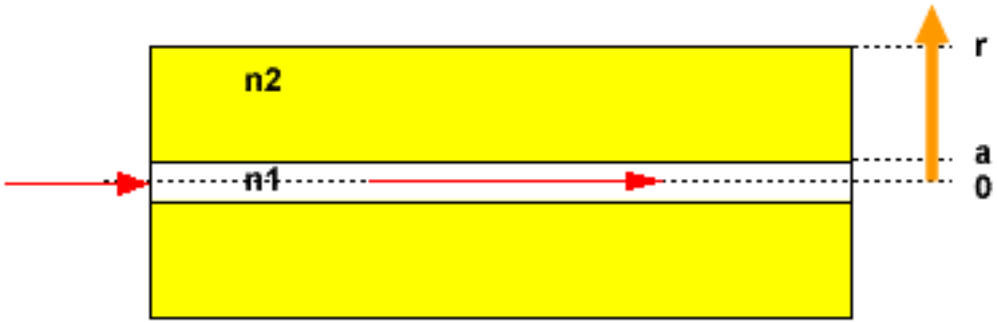
Résultat: ex aequo à l 'arrivée

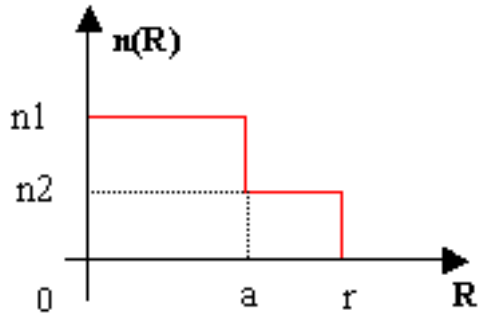
De plus, les différents modes ont des temps de propagation très proches. Le phénomène de dispersion modale est de ce fait considérablement réduit.

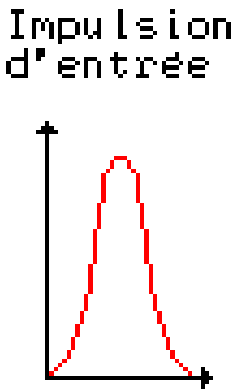
Fibre optique monomode

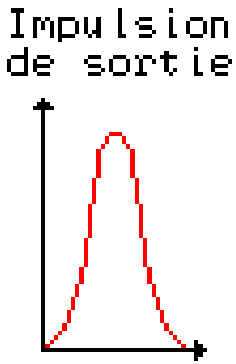
Le diamètre du cœur est inférieur à 10 µm de telle sorte que le parcours de la lumière devient presque longitudinal.

Le diamètre de la gaine est compris entre 50 µm et 125 µm.
Ce type de fibre nécessite une source de lumière quasiment monochromatique. (diode Laser)







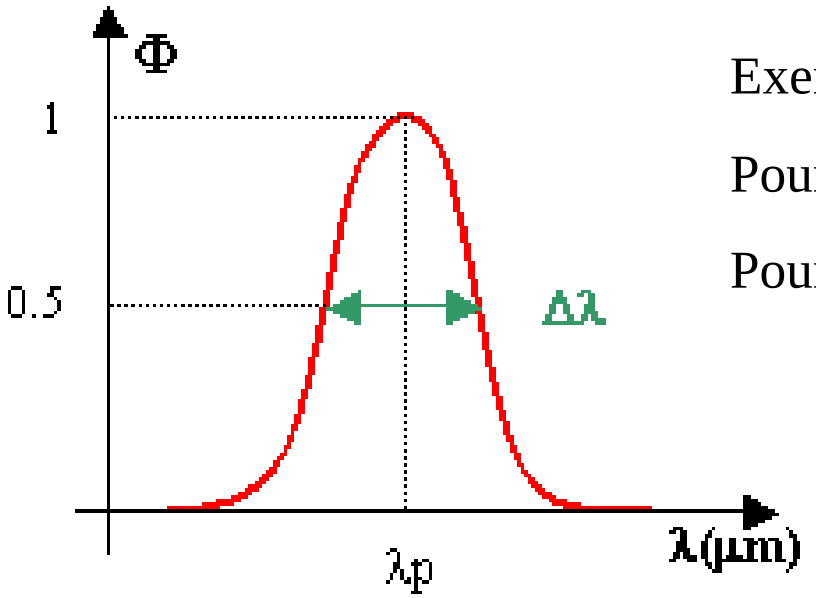


Ne laissant passer que le mode longitudinal,la dispersion modale est nulle.

4 - Autres caractéristiques

Spectre d'émission de la source de lumière

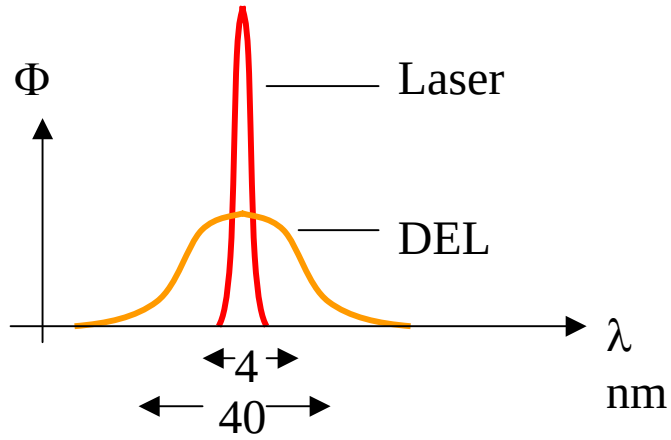
Le spectre ci-dessous représente la puissance énergétique relative à la puissance énergétique maximum ($\Phi = \Phi(\lambda)/\Phi_{max}$) située à la fréquence centrale d'émission = λ p.



Exemple:

Pour une diode Laser ==> $\Delta\lambda \cong 4$nm

Pour une diode DEL ==> $\Delta\lambda \cong 40$nm

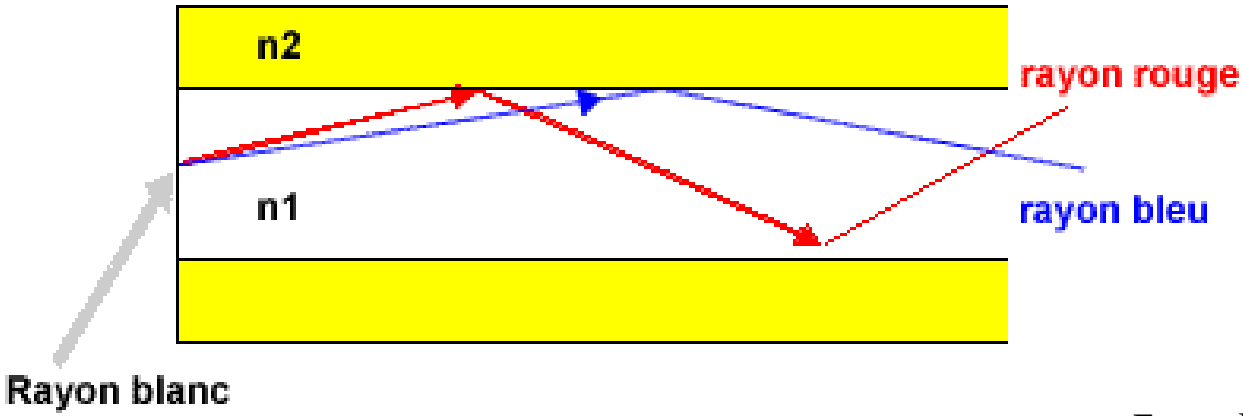


Dispersion chromatique

Si on injecte en entrée d'une fibre optique une impulsion lumineuse de couleur blanche, son spectre contient toutes les lumières allant de l'infrarouge à l'ultraviolet.

Hypothèse : On suppose que le milieu n'est pas linéaire et que son indice optique n_1 varie en fonction de la longueur d'onde (n_1 augmente quand λ diminue).

→ Rouge (650nm) = grande longueur d'onde devant bleu (470nm), soit : n_1 = petit



En sortie, on constate que l'impulsion s'étale, c'est le phénomène de **dispersion chromatique**

Paramètre de dispersion chromatique

$$\Delta t = K_{mat} . \Delta \lambda . L \quad \text{où :}$$

- Δt s'exprime en picosecondes (Ps)
- Kmat = coefficient dépendant du matériau, unité = $Ps.nm^{-1}.km^{-1}$
- $\Delta \lambda$ = largeur spectrale équivalente de la source en nm
- L = longueur de la fibre en km

Exemple d'une fibre optique monomode : $1285 < \lambda < 1330$nm et $\Delta t \leq 3.5$ ps/nm.km.

Remarque : En pratique pour les fibres multimodes, on néglige la dispersion chromatique devant la dispersion modale. La dispersion chromatique a pour effet de réduire la bande passante.

5 - Raccordement des fibres optiques

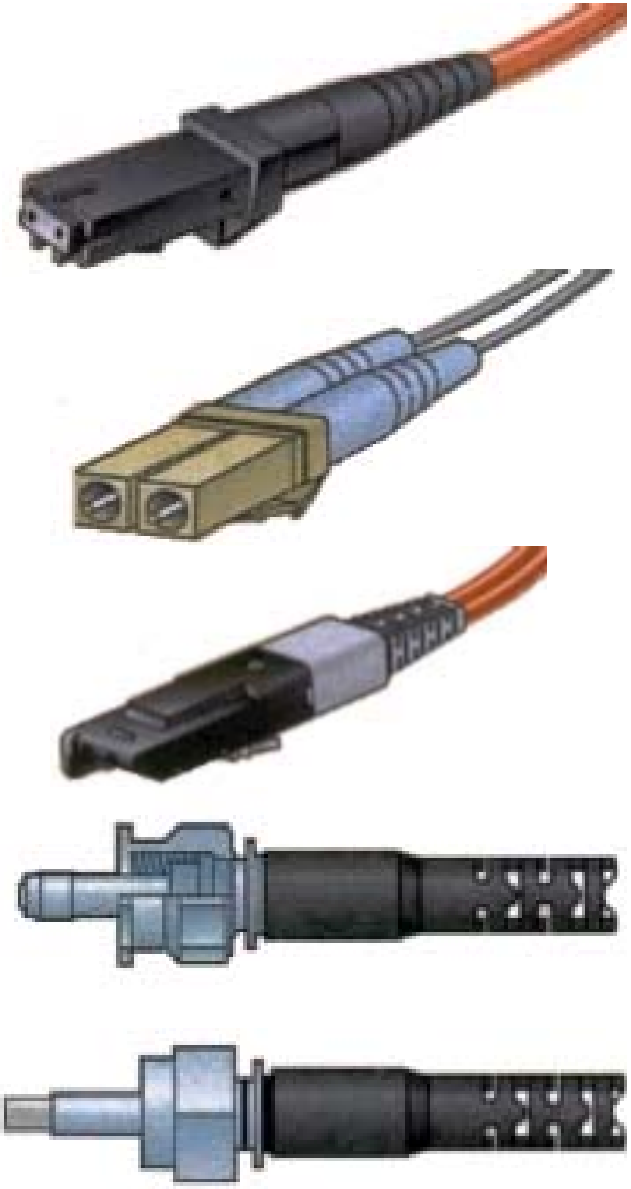
- Dans l'établissement d'une liaison par fibre optique on est contraint de relier :
  - La source émettrice à la fibre optique (fibre amorce).
  - Les fibres optiques entre-elles.
  - La fibre optique au récepteur optique.
- On distingue 3 méthodes de raccordement des fibres optiques :
  - Jointage
    Consiste à souder deux fibres entre-elles, bout à bout, par fusion des matériaux constituants en utilisant une fusionneuse automatique (affaiblissement 0,15dB maxi).
  - Epissurage
    Consiste, comme précédemment à assembler bout à bout deux fibres, et de coller le tout par l'apport d'une colle spéciale de même indice optique que les fibres à raccorder (affaiblissement 0,3dB maxi) .
  - Connexion amovible
    Consiste à utiliser deux pièces mécaniques qui s'emboîtent ou se vissent pour amener les deux fibres en vis-à-vis.

6 - Types de connecteurs

Les connecteurs les plus utilisés sont :

- Le connecteur à baïonnette ST ou ST2 : il utilise un système de verrouillage à baïonnette. C'est le connecteur le plus courant. Sa férule en céramique garantit de hautes performances.
- Le connecteur à encliquetage de type 'push-pull' SC. Il possède un corps surmoulé et un système de verrouillage à pousser et tirer. Il est parfait pour les applications de bureau, la télévision par câble et la téléphonie.
- Le connecteur FDDI. Il présente une férule flottante en céramique de 2,5mm et une jupe fixe afin de réduire les pertes lumineuses. Un capot fixe entoure la férule pour la protéger.

- Le connecteur MT-RJ. Il présente un verrouillage RJ similaire aux cordons souples Catégorie 5 et téléphoniques ; il possède un corps moulé et s'installe par simple encliquetage.
- Le connecteur LC. Au facteur de forme réduit, il comporte une férule céramique et ressemble à un mini-connecteur SC.
- Le connecteur VF-45. C'est un autre connecteur miniaturisé utilisant une technologie de cannelure en " V ".
- Le connecteur SMA905. Il utilise une bague filetée. Il suffit de le visser en place. Au bout de sept tours complets environ, il est verrouillé.
- Le connecteur SMA906. Il utilise également une bague filetée. Notez que la forme de la baïonnette s'adapte aux équipements pourvus de prises SMA905.



Chaque connecteur contribue à l'affaiblissement de la liaison, en général 0,15 à 0,3dB.

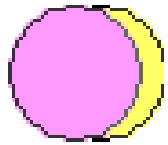
www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

7 - Pertes

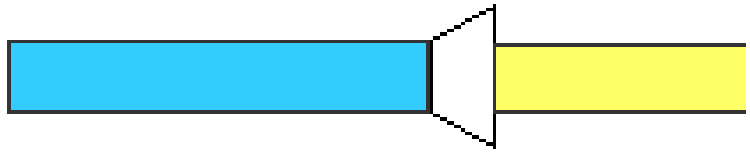
Pertes liées au défauts de positionnement

Lorsqu'on raccorde deux fibres, ces pertes sont liées à :

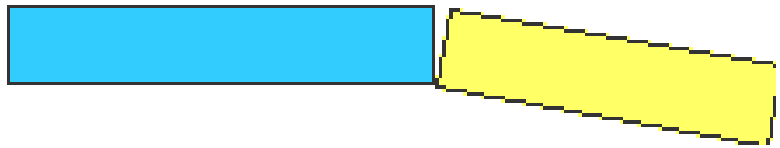
- Ecart radial entre les deux fibres



- Ecart axial entre deux fibres

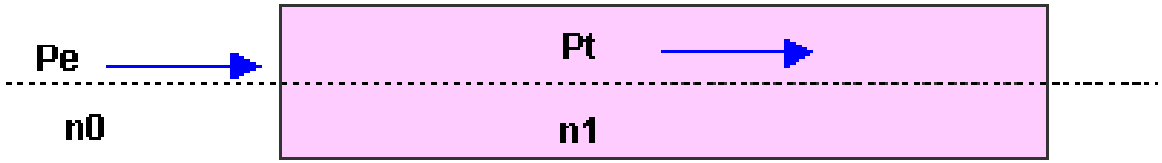


- Ecart angulaire entre deux fibres



Pertes de Fresnel

Elles sont liées à la différence d'indice optique du milieu qui baigne la face d'entrée de la fibre optique et le cœur de la fibre optique.

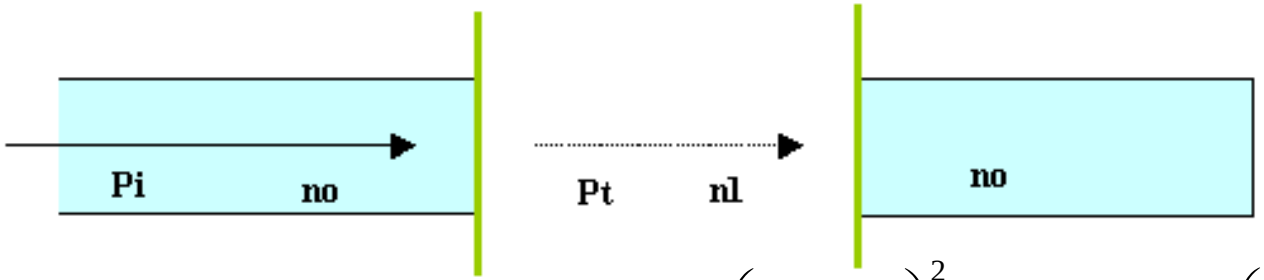


Pe = puissance émise
Pt = puissance transmise

- Soit n_o l'indice optique du milieu où est plongée la face d'entrée de la fibre et n_1 l'indice du cœur.
- Les pertes sont données par la relation suivante : $PF_{(dB)} = 10.Log\left(\frac{4.n_0.n_1}{(n_0+n_1)^2}\right)$

Pertes par réflexion

Elles sont liées aux pertes de Fresnel.
Supposons une onde lumineuse qui se propage dans un milieu où se produit une discontinuité d'indice optique. (coupure locale de la fibre, défaut de raccordement entre deux fibres...



La puissance réfléchie Pr est donnée par :

Pr = Pi - Pt

Les lois de Fresnel donnent : $\frac{Pr}{P_i} = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}\right)^2$ soit : $\frac{Pt}{P_i} = 1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}\right)^2$

Coefficient de couplage - Pertes par injection

- La fibre optique accepte les rayons compris dans le cône d'entrée limité par son ouverture numérique et par conséquent les rayons, émis par la source lumineuse, non inclus dans ce cône, seront perdus.
- Le rapport entre la puissance lumineuse reçue par la fibre Pr et la puissance lumineuse Pe émise par la source de lumière (diode DEL, diode Laser) s'appelle coefficient de couplage et se note ηc: $\eta_c = \frac{P_r}{P_e}$
- En pratique ce coefficient est donné en %, soit: $\eta_c(\%) = \frac{P_r}{P_e}.100$
- Les pertes par injection sont définies par : $Pi_{(dB)} = 10.\mathrm{Log}\ (\eta c)$

8 - Le Budget optique - portée d ’une fibre

- La différence entre la puissance de sortie et la sensibilité du récepteur s'appelle le budget optique.
  Il se calcule ainsi :

Budget optique = Puissance de sortie - Sensibilité du récepteur

(dB) *(dBm)* *(dBm)*

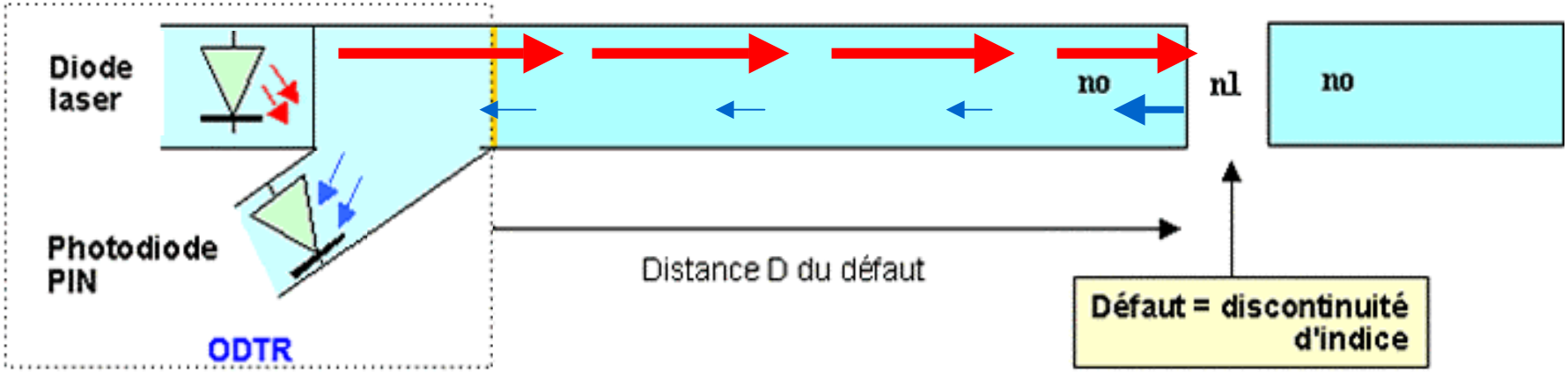
Calcul de la portée d'une fibre optique

- La portée permise tient compte des pertes dues aux connecteurs :

$$\textit{Portée max.(km)} = \frac{\textit{Budget optique - Pertes connecteurs - Pertes épissures - 3 dB}}{\textit{Atténuation du câble (dB/km)}}$$

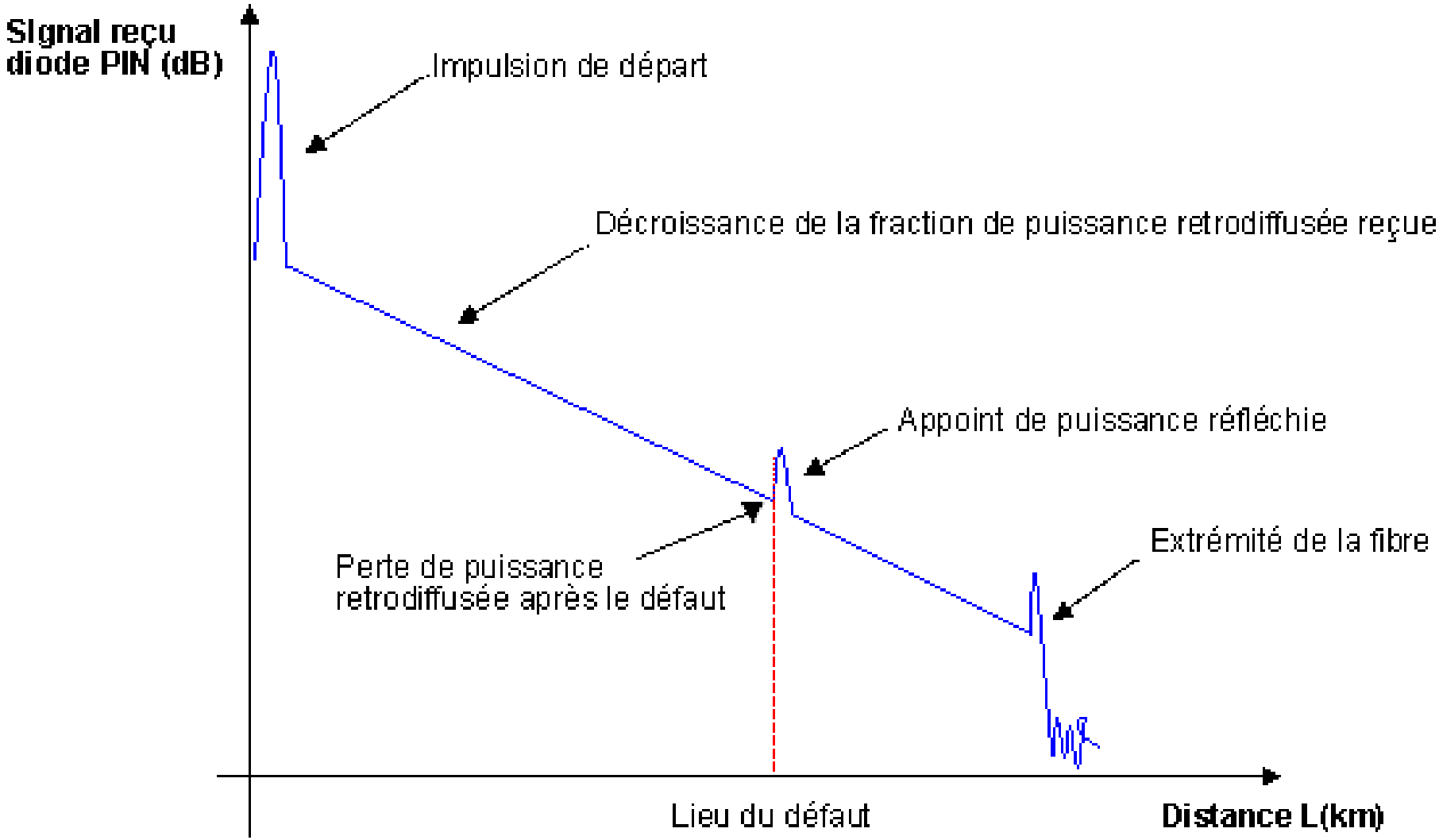
9 - Principe du réflectomètre ODTR

- Remarque : une fraction de la puissance optique incidente excite localement la matière qui rayonne la même puissance dans toutes les directions. (Diffusion de Rayleigh).
- Ainsi une partie (faible) de la puissance émise par la source de lumière est rétrodiffusée vers la source.
- Cette puissance a pour expression : $Prd = K.Po.e^{-2.\alpha.L}$
  - Prd : représente la puissance reçue à l'origine de la fibre.
  - K : est une constante qui dépend de l'ouverture numérique de la fibre et de l'indice optique.
  - Po : représente la puissance de la source de lumière.
  - α : représente l'atténuation linéique de la fibre.
  - L : représente la distance du lieu d'origine.
- (Le facteur 2 permet de tenir compte du trajet aller-retour de l'onde lumineuse)



- A l'entrée d'une fibre en défaut, on injecte une impulsion lumineuse à l'aide d'une diode Laser.
- Une photodiode PIN permet de récupérer la fraction de la puissance rétrodiffusée Prd due à la diffusion de Rayleigh.
- Dès que l'impulsion traversera le milieu d'indice n_1 (lieu du défaut) s'ajoutera à cette puissance rétrodiffusée la puissance réfléchie Pr.
- Le réflectomètre est muni d'un écran qui affiche la courbe correspondant à la puissance reçue par la diode PIN en fonction de la distance à l'origine.
- Le niveau reçu par la diode PIN décroît de façon exponentielle en fonction de la distance, un défaut se traduira par pic de puissance et en fonction du temps de propagation, on peut en déduire la distance qui sépare l'origine du lieu de défaut.

Diagramme observé :



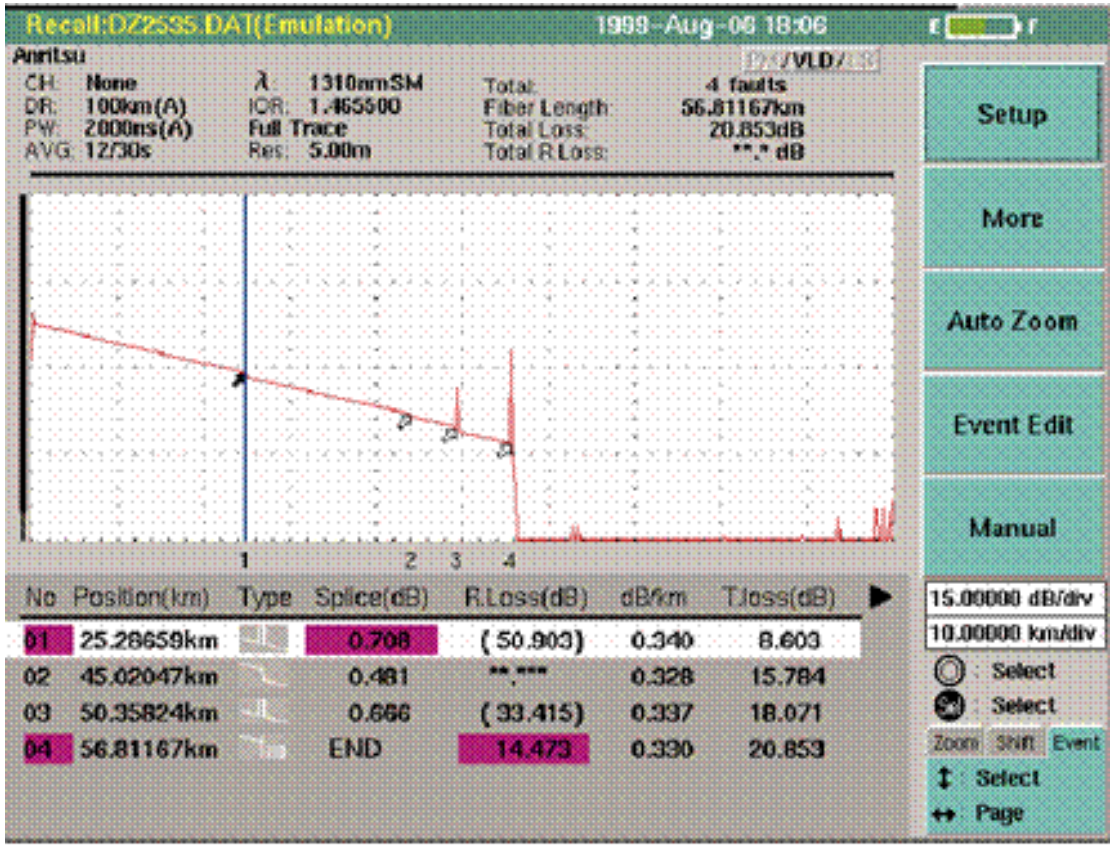
Paramètres de réglage du réflectomètre

- Largeur d'impulsion
  - Une grande largeur d'impulsion offre une grande dynamique (longueur mesurable élevée) mais une faible résolution, elle permet la détection de défauts lointains.
  - Une faible largeur d'impulsion permet une grande résolution mais avec une faible dynamique, elle est plus adaptée à la mesure de pertes.
  - Valeurs typiques : de 5ns à 10µs
- Indice de réfraction
  - Le réflectomètre calcule toutes les distances par rapport au temps écoulé depuis le départ de l'impulsion, comme L = c.t/n toute variation sur l'indice entraîne une variation inversement proportionnelle à la distance calculée.

Mise en service d'une liaison – maintenance

- Le réflectomètre permet de mesurer l'atténuation de la liaison, de repérer les différents défauts présents lors de la mise en service (mauvaise jonction, contrainte,...).
- Il est courant de mémoriser la réflexion comme la "signature de liaison" lors de la recette de l'installation.
- La courbe peut être imprimée ou stockée sur un ordinateur pour ensuite être utilisée pour vérifier la performance de liaison par fibre soit périodiquement, soit en continu (en utilisant un système d'alarme).

Exemple de reflectomètre : Anritsu MW9076

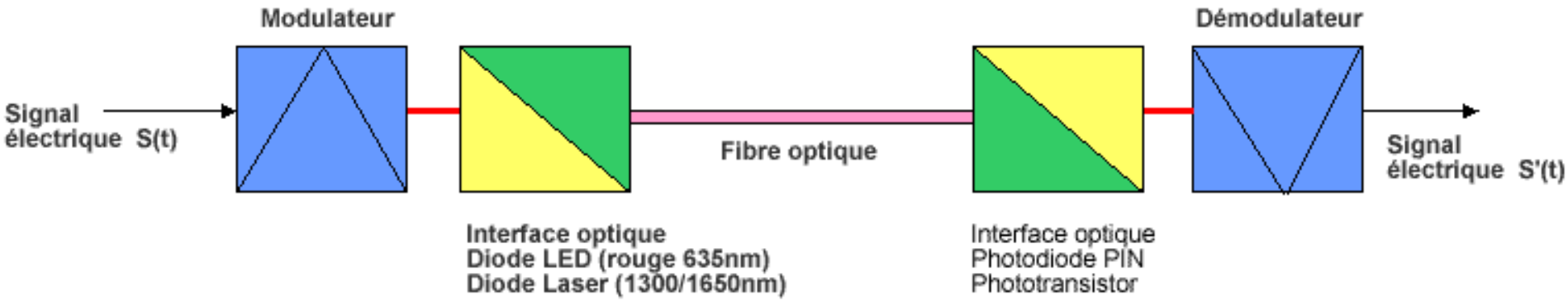


Caractéristiques principales :

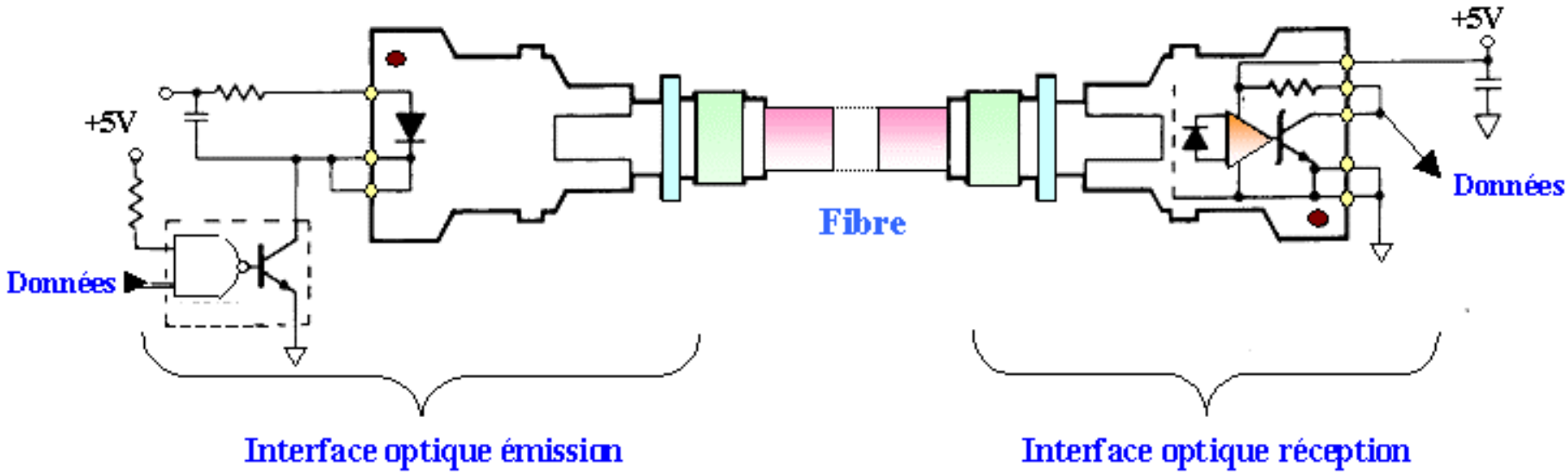
- Dynamique du signal : 45dB, permet de mesurer des défauts situés à une distance de 190km.
- Temps de réponse rapide, 10 s pour une distance de 190km.
- Longueurs d'onde: 1310, 1450, 1550, 1625nm.
- Mesure des pertes de Fresnel.
- Mesure des caractéristiques de dispersion chromatique.
- Emission à 635nm (rouge visible) pour vérifier visuellement la continuité d'une fibre de courte

longueur.

10 - Synoptique d'une liaison par fibre optique



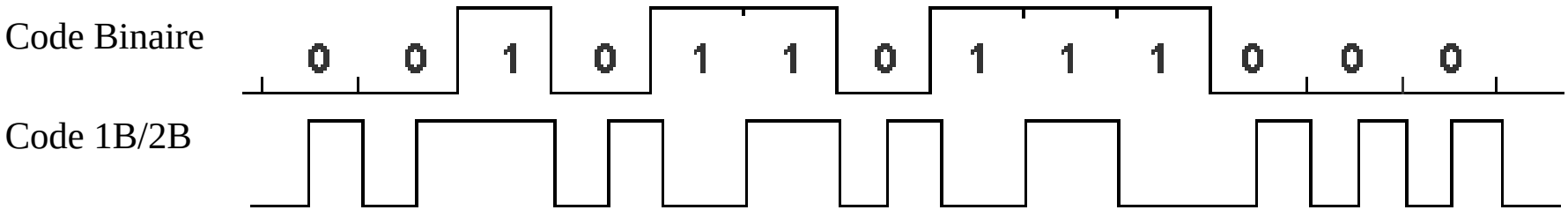
- L'interface optique d'émission permet de convertir le signal électrique en un signal optique en utilisant une diode émettrice à semi-conducteur.
- L'interface optique de réception permet de convertir le signal optique en un signal électrique en utilisant une photodiode ou un phototransistor.



11 - Codage

- Modulation optique : Tout ou Rien (modulation optique d'intensité)
- En communication optique, le codage par bloc de type nBmB est le plus utilisé.
- Principe : On divise la séquence binaire à transmettre en blocs de 'n' bits que l'on code par bloc de 'm' bits avec m > n.
- Ces codes permettent d'éviter de transmettre de longues suites de '0' afin de permettre une récupération aisée du rythme de l'horloge.
- Exemple : Code 1B/2B

Code binaire	0	1
Code 1B/2B	01	Alternativement 11 et 00



12 - Caractéristiques comparées des fibres optiques

Matériaux	Plastique (POF)	Silice (cœur) Silicone (gaine)	Toute silice			
Type	Saut d'indice	Saut d'indice	Saut d'indice	Gradient d'indice	Gradient d'indice	Monomode
Diamètre cœur/gaine (µm)	980/1000 (ou plus)	200/380 (ou plus)	100/140	50/125	62.5/125	8.3/125
Atténuation (dB/km)	200	5 à 10	1 à 5 à 850nm	3 à 850nm 1 à 1300nm	1.2 à 1300nm	0.5 à 1560nm
Longueurs d'onde d'utilisation	450/700nm	700/1000nm	800/1300nm	800/1300nm	1300nm	1100/1560nm
Ouverture numérique	0.5	0.4	0.28	0.20	0.27	0.1
BP (GHz.km)	10	20	50	500	300	>10000
Résistance mécanique	Souple mais déformable	Limitée	Bonne (avec protection)			
Coût	Faible	Moyen	Assez élevé	Assez faible		Assez élevé
Débit	38 Kbits/s	10Mbits/s	100Mbits/s	300Mbits/s	100Mbits/s	2 à 5Gbits/s
Applications	Eclairage, transmission locale	Réseaux locaux	Transmission courte distance	Télécoms moyenne distance	Réseaux locaux	Télécoms longue distance

Caractéristiques comparées des émetteurs

Composants	D.E.L	Diode Laser
Puissance optique	< 1 mW	Quelques mW
Couplage dans une fibre optique ηc(%)	Quelques % (fibre multimode)	> 50%
Temps de montée	10ns	< 0.2ns
Bruit	Très faible	Faible
Coût	Faible	Elevé (lié à la fibre)
Applications	Transmission à faible distance	Transmission à longue distance sur fibres monomodes

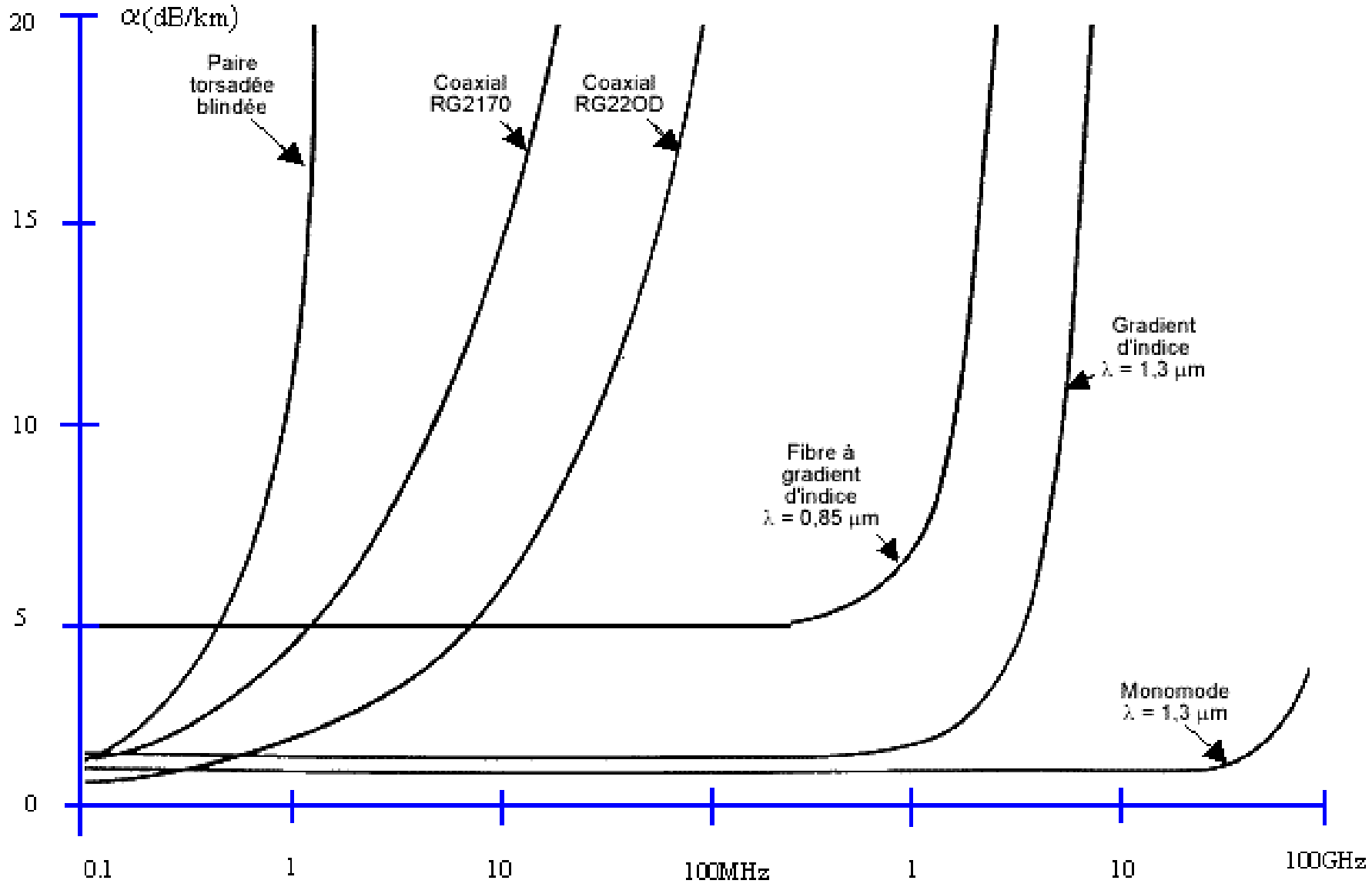
13 - Câbles à fibres optiques

- Les fibres optiques sont placées dans des câbles qui assurent la protection mécanique et chimique.

La taille et le poids réduit des câbles à fibres optiques permettent des poses d'un seul tenant pouvant dépasser 4800 m contre seulement 300 m avec un câble coaxial en cuivre.

Les principales structures de câble à fibres optiques sont :

- Le câble à structure libre tubée ('n' fibres dans m tubes de protection libre en hélice autour d'un porteur central). La capacité type est de 2 à 432 fibres.
- Le câble à tube central ('n' fibres libres dans un tube central, la rigidité étant assurée par des mini-porteurs placés dans la gaine).
- Le câble ruban à tubes libres ('n' fibres les unes à côté des autres dans m rubans dans 'p' tubes libres en hélice autour d'un porteur central).
- Le câble ruban à tube central ('n' fibres les unes à côté des autres dans 'm' rubans dans un tube central). La capacité type est de 12 fibres par 18 rubans, soit 216 fibres.
- Le câble ruban à tubes libres ('n' fibres les unes à côté des autres dans m rubans dans 'p' tubes libres en hélice autour d'un porteur central).

www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

14 - Caractéristiques comparées des différents supports