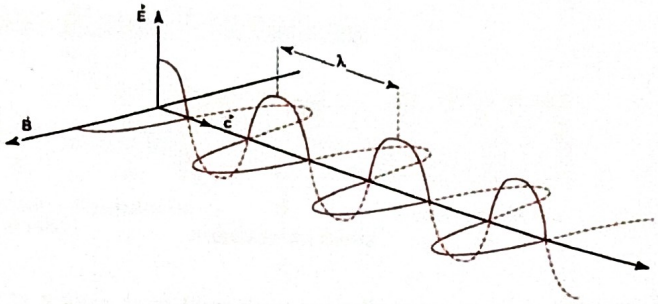
promos 2026

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.

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 :

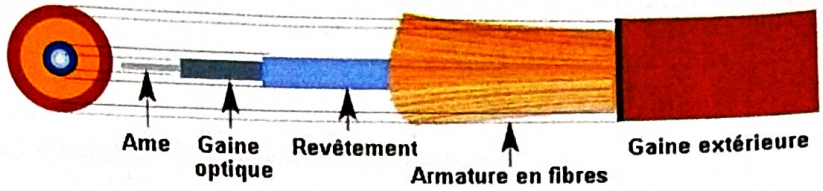
$$n = \frac{c}{v}$$

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					

Scanned with ACE Scanner

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.

Lois de Snell-Descartes

Les lois de Snell-Descartes décrivent le comportement de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre. Elles s'appliquent dans des phénomènes tels que la réflexion et la réfraction.

1. Loi de la réflexion

Lorsque la lumière frappe une surface entre deux milieux, elle peut être **réfléchie.** La loi de la réflexion stipule que :

- **Angle d'incidence = Angle de réflexion**

$\theta i = \theta r$

2. Loi de la réfraction (loi de Snell)

Lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre (par exemple, de l'air à l'eau), elle est **réfractée** (déviée). La loi de la réfraction s'écrit :

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

Scanned with ACE Scanner

Refléxion totale .

La **réflexion totale** se produit lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu **plus dense optiquement** (indice de réfraction élevé, n1) à un milieu **moins dense optiquement** (indice de réfraction faible n2), sous certaines conditions : **si**

- **n1>n2**
- **Angle d'incidence** θi **supérieur à l'angle critique** θ_c

2. **Angle d'incidence supérieur à l'angle critique** :

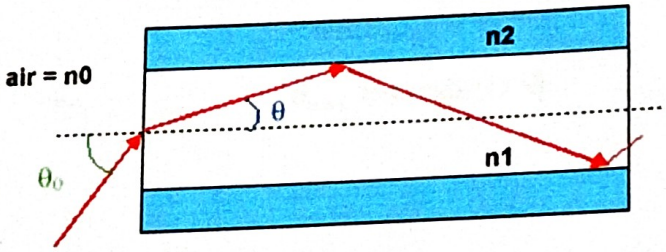
L'angle critique (θ_c) est l'angle d'incidence à partir duquel la lumière n'est plus réfractée mais entièrement réfléchie. Il est donné par la formule :

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}, \quad (\text{si } n_1 > n_2).$$

Si $\theta_i > \theta_c$, alors la lumière est **entièrement réfléchie**.

Ouverture numérique

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.

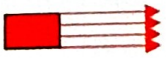
$$O.N = \sin(\theta_0) = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0}}$$

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).



Scanned with ACE Scanner

Ouverture numérique pour une fibre optique

Dans le cas spécifique d'une fibre optique, l'ouverture numérique (ON) dépend des indices de réfraction du cœur (n_1) et de la gaine (n_2). Elle est donnée par la formule :

$$\mathrm{ON} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Interprétation des termes :

- n_1 : indice de réfraction du cœur de la fibre (plus élevé).
- n_2 : indice de réfraction de la gaine optique (plus faible).
- ON détermine l'**angle d'acceptance** ($\theta_{\text{acceptance}}$) de la fibre, c'est-à-dire le cône d'angles sous lequel la lumière peut entrer dans la fibre et être guidée efficacement.

Lien avec l'angle d'acceptance :

L'angle d'acceptance maximal ($\theta_{\max}$) est lié à l'ouverture numérique par :

$$\sin(\theta_{\max}) = \mathrm{ON}$$

$$\theta_{\max} = \arcsin(\mathrm{ON})$$

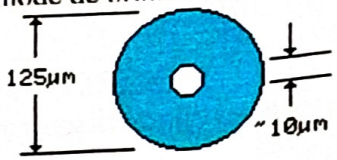
Scanned with ACE Scanner

3 - Différents types de fibres optiques

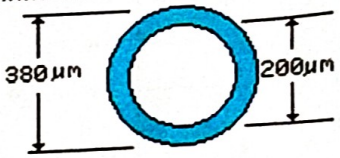
Suivant les dimensions du cœur et les valeurs des indices n_1 et n_2, on peut classer les fibres en deux catégories :

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

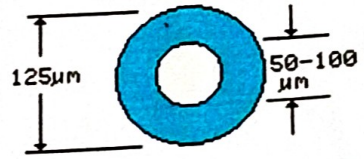
- Pour $\alpha < 2{,}4 \rightarrow$ La fibre ne comporte qu'un mode de propagation. elle est appelée **fibre monomode**.



- 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 monomode et fibre multimode

Les fibres optiques se divisent principalement en **fibre monomode** et **fibre multimode**, en fonction de la manière dont elles transmettent la lumière. Ces deux types ont des caractéristiques et des applications spécifiques.

1. Fibre monomode

- **Description :**
  - La fibre monomode est conçue pour transmettre **un seul mode** de propagation de la lumière (un seul chemin lumineux).
  - Le diamètre de son cœur est très **petit** (environ **8 à 10 µm**).
  - Fonctionne généralement avec des lasers comme source lumineuse.
- **Caractéristiques :**
  - **Distance :** idéale pour les longues distances (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres sans besoin de répéteur).
  - **Débit :** supporte des débits très élevés (Gbps à Tbps).
  - **Perte de signal :** très faible atténuation.
  - **Dispersion modale :** absente, car un seul mode est transmis.
- **Inconvénients :**
  - Plus coûteuse à fabriquer et installer.

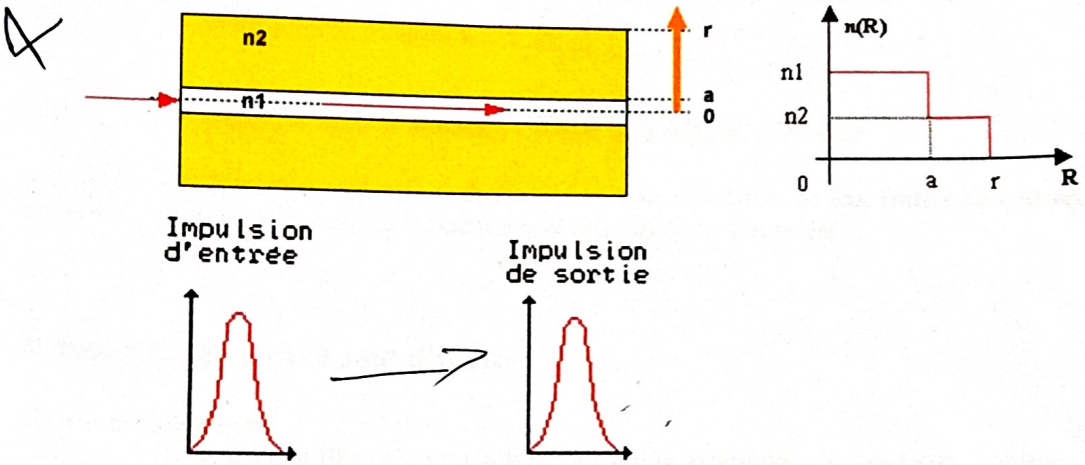
Scanned with ACE Scanner

- Nécessite des sources lumineuses et équipements de précision.
- **Applications :**
  - Télécommunications longue distance.
  - Réseaux backbone (infrastructures principales d'Internet).
  - Réseaux FTTH (Fiber To The Home).

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.

2. Fibre multimode

- **Description :**
  - La fibre multimode peut transmettre **plusieurs modes** de propagation (plusieurs chemins lumineux simultanés).
  - Le diamètre de son cœur est plus **grand** (environ **50 à 62,5 µm**).
  - Fonctionne souvent avec des LED comme source lumineuse.
- **Caractéristiques :**
  - **Distance :** adaptée aux courtes distances (quelques centaines de mètres).
  - **Débit :** suffisant pour des réseaux locaux (jusqu'à 10 Gbps sur de courtes distances).
  - **Dispersion modale :** présente, car les différents modes peuvent arriver à des moments différents, causant une perte de qualité sur de longues distances.
- **Inconvénients :**
  - Moins performant sur de longues distances à cause de la dispersion modale.
  - Atténuation plus élevée que la fibre monomode.
- **Applications :**
  - Réseaux locaux (LAN, data centers).

Scanned with ACE Scanner

- Connectivité au sein des bâtiments.
- Applications nécessitant des câblages à bas coût.

Différences principales

Caractéristique	Fibre Monomode	Fibre Multimode
Diamètre du cœur	Petit (8-10 µm)	Grand (50-62,5 µm)
Nombre de modes	Un seul	Plusieurs
Source lumineuse	Laser	LED
Distance	Longues distances	Courtes distances
Débit	Très élevé	Élevé mais limité
Coût	Plus élevé	Moins élevé

Fibre muti-mode à saut d'indice et fibre à gradient d'indice

Ces deux types de fibres optiques se distinguent par la répartition de leur **indice de réfraction** entre le cœur et la gaine, ce qui influence la propagation de la lumière.

1. Fibre muti-mode à saut d'indice

- **Description :**
  - Dans une fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction change **brusquement** entre le cœur (n1n_1n1) et la gaine (n2n_2n2).
  - Le cœur a un **indice de réfraction constant** n1n_1n1, plus élevé que celui de la gaine (n2n_2n2).
  - La lumière subit des réflexions totales à l'interface cœur-gaine.
- **Propagation de la lumière :**
  - La lumière se déplace en lignes **brisées** en raison des réflexions totales successives.
  - Cela entraîne une **dispersion modale** : les rayons lumineux suivent des chemins de différentes longueurs, ce qui peut causer un étalement du signal.
- **Caractéristiques :**
  - Fabrication plus simple et moins coûteuse.
  - Limité à des distances plus courtes à cause de la dispersion modale.
- **Applications :**
  - Utilisée principalement pour des fibres multimodes dans des réseaux locaux où la distance est limitée.

Scanned with ACE Scanner

- Connectivité au sein des bâtiments.
- Applications nécessitant des câblages à bas coût.

Différences principales

Caractéristique	Fibre Monomode	Fibre Multimode
Diamètre du cœur	Petit (8-10 µm)	Grand (50-62,5 µm)
Nombre de modes	Un seul	Plusieurs
Source lumineuse	Laser	LED
Distance	Longues distances	Courtes distances
Débit	Très élevé	Élevé mais limité
Coût	Plus élevé	Moins élevé

Fibre muti-mode à saut d'indice et fibre à gradient d'indice

Ces deux types de fibres optiques se distinguent par la répartition de leur **indice de réfraction** entre le cœur et la gaine, ce qui influence la propagation de la lumière.

1. Fibre muti-mode à saut d'indice

- **Description :**
  - Dans une fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction change **brusquement** entre le cœur (n1n_1n1) et la gaine (n2n_2n2).
  - Le cœur a un **indice de réfraction constant** n1n_1n1, plus élevé que celui de la gaine (n2n_2n2).
  - La lumière subit des réflexions totales à l'interface cœur-gaine.
- **Propagation de la lumière :**
  - La lumière se déplace en lignes **brisées** en raison des réflexions totales successives.
  - Cela entraîne une **dispersion modale** : les rayons lumineux suivent des chemins de différentes longueurs, ce qui peut causer un étalement du signal.
- **Caractéristiques :**
  - Fabrication plus simple et moins coûteuse.
  - Limité à des distances plus courtes à cause de la dispersion modale.
- **Applications :**
  - Utilisée principalement pour des fibres multimodes dans des réseaux locaux où la distance est limitée.

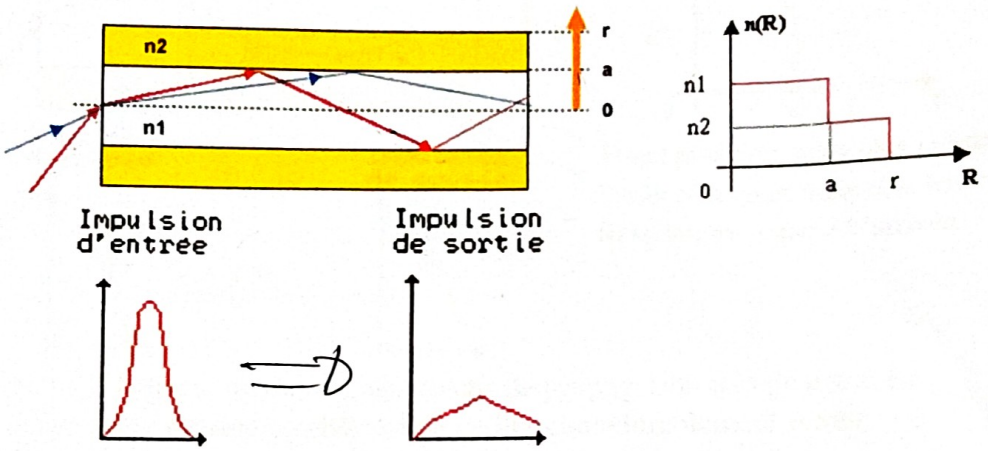
Scanned with ACE Scanner

Fibre optique multimode à saut d'indice

C'est un guide d'onde dont le diamètre du cœur (quelques centaines de µm) es 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.



2. Fibre muti-mode à gradient d'indice

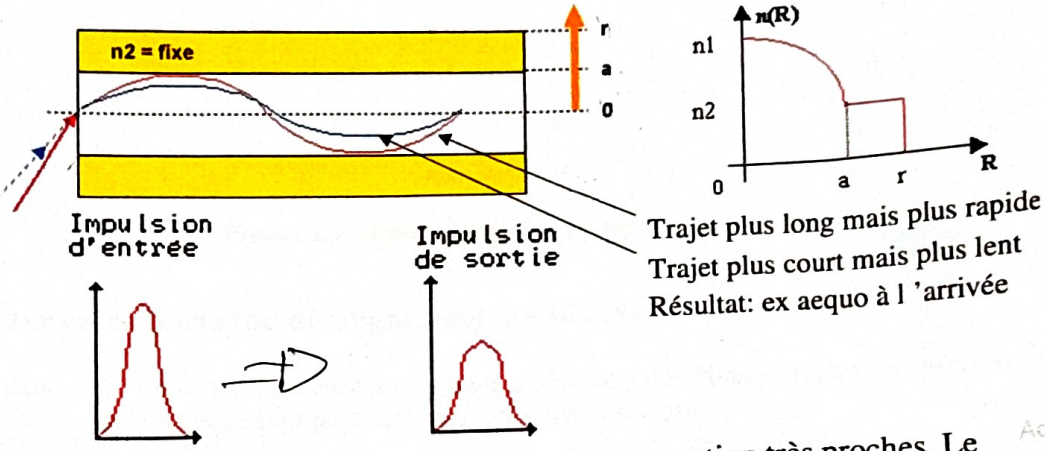
- **Description :**
  - Dans une fibre à gradient d'indice, l'indice de réfraction diminue **progressivement** du centre du cœur (n1n_1n1) vers la gaine (n2n_2n2).
  - L'indice suit une fonction quadratique ou exponentielle.
- **Propagation de la lumière :**
  - Les rayons lumineux sont courbés plutôt que réfléchis en lignes droites. Cette courbure est due au changement progressif de l'indice de réfraction, qui ralentit ou accélère les rayons en fonction de leur trajectoire.
  - La dispersion modale est réduite, car les rayons suivent des trajets plus uniformes.
- **Caractéristiques :**
  - Meilleure performance que la fibre à saut d'indice.
  - Permet une transmission plus rapide et sur des distances plus longues dans des configurations multimodes.

Scanned with ACE Scanner

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.



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

-Fibre à gradient d'indice:

$$n_c(r) = n_c(0)\sqrt{1 - 2.\Delta.\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}} \qquad \Delta = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2}$$

α : **Coefficient de profil d'indice**

Atténuation (ou perte de signal) :

L'atténuation désigne la diminution de l'intensité lumineuse qui se propage le long de la fibre optique. Elle est due à des phénomènes comme l'absorption, la diffusion et les pertes par défaut de mode. Elle est exprimée en décibels par kilomètre (dB/km).

- Formule de l'atténuation :

L'atténuation α\alphaα est donnée par la relation :

Scanned with ACE Scanner

$$\text{Atténuation (dB)} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}}\right)$$

Ici, $P_{\text{entrée}}$ représente la puissance de la lumière à l'entrée de la fibre optique, et P_{sortie} est la puissance mesurée à la sortie. Cette formule permet de calculer le niveau d'atténuation subi par le signal sur une distance donnée.

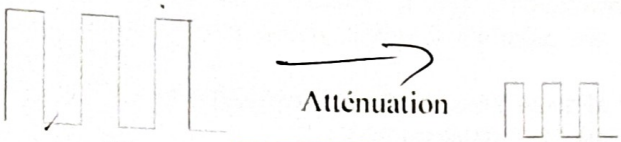


Figure I.9. Atténuation d'un signal

Décalage entre fibres (ou désalignement des fibres) :

Le décalage entre fibres fait référence à l'alignement des axes des fibres optiques lorsqu'elles sont couplées. Ce désalignement peut entraîner des pertes de signal.

- Formule pour le décalage entre fibres :

Le décalage entre fibres, en termes de perte de puissance ΔP, peut être approximé par :

$$\Delta P = \frac{P_0}{1 + (\Delta x / d)^2}$$

où :

- P_0 : puissance du signal avant le couplage,
- Δx : distance de désalignement entre les fibres,
- d : diamètre du cœur de la fibre.

Un grand désalignement entre les fibres peut entraîner une perte significative de signal.

4. Dispersion intermodale (IMD) :

La dispersion intermodale se produit dans les fibres multimodes, où différentes modalités (chemins de propagation de la lumière) arrivent à la sortie à des moments différents en raison de leurs différentes vitesses de propagation. Cela entraîne une distorsion du signal.

- Formule de la dispersion intermodale :

Scanned with ACE Scanner

- **Dispersion intermodale**: F.SI $\quad \Delta t_{im} = \frac{L}{2c}\cdot\frac{ON^2}{n_1} = \frac{L.n_1\Delta}{c}$

F.GI $\quad \Delta t_{im\,Optimale} = \frac{L\,n_1}{8c}.\Delta^2 : \quad n_1 = n_1(o)$

C'est du à l'effet d'un mode sur l'autre

Une des causes de l'élargissement d'une impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes.

Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$v_m = \frac{c}{n_1}\sin\theta_m$ **v_m : composante suivant l'axe de propagation de la vitesse**

mode le plus lent : $\theta = \theta_{lim}$, alors $v_{min} = c/n_1.\sin\theta_{lim}$
mode le plus rapide : $\theta = \pi/2$ alors $v_{max} = c/n_1$

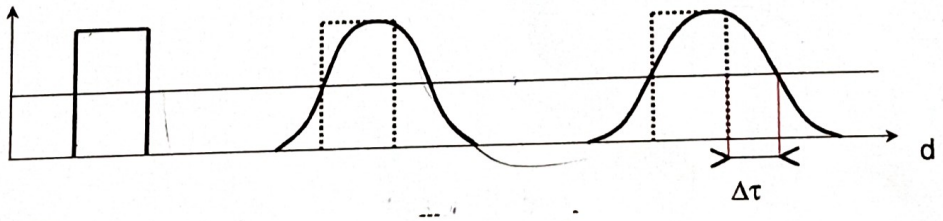
après un trajet d'une distance L, le déçalage est : $\Delta\tau = \frac{L}{c}\frac{n_1(n_1-n_2)}{n_2}$
pour une fibre à saut d'indice.

5. Dispersion chromatique :

La dispersion chromatique résulte de la variation de la vitesse de propagation de la lumière en fonction de sa longueur d'onde. Les différentes longueurs d'onde de la lumière (comme le rouge, le vert et le bleu) se propagent à des vitesses légèrement différentes dans la fibre, ce qui cause un étalement du signal et peut entraîner une dégradation du signal.

La dispersion chromatique est un phénomène de propagation temporelle du signal résultant des différentes vitesses des rayons lumineux. La dispersion chromatique est la combinaison des effets de dispersion du matériau et du guide d'ondes.

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation.



Scanned with ACE Scanner

- **Dispersion chromatique:** $\Delta t_{chro} = D(\lambda).\Delta\lambda.L$

  Δλ : largeur spectrale

  L: longueur de la fibre

  D(λ) : coefficient de dispersion chromatique en $ps.nm^{-1}.km^{-1}$

  C'est du à : $n = n(\lambda) \Rightarrow v = \frac{c}{n} = v(\lambda)$

Exercice : Questions de cours supplémentaires :

1. **Qu'est-ce que l'ouverture numérique (NA) d'une fibre optique et pourquoi est-elle importante ?**
   - L'ouverture numérique (NA) est un paramètre qui caractérise la capacité de la fibre à capter la lumière. Plus la NA est élevée, plus la fibre peut capter des rayons lumineux sous un grand angle. Cela détermine aussi le nombre de modes que la fibre peut supporter et affecte directement la performance du système de communication.
2. **Expliquez la différence entre la dispersion intermodale et la dispersion chromatique.**
   - La **dispersion intermodale** se produit dans les fibres multimodes, où différentes modalités arrivent à des moments différents en raison de leurs vitesses de propagation différentes. Cela provoque un étalement du signal et peut dégrader la qualité du signal.
   - La **dispersion chromatique** se produit lorsque différentes longueurs d'onde de la lumière se propagent à des vitesses différentes dans la fibre, entraînant également une distorsion du signal. Cette dispersion est particulièrement problématique dans les fibres monomodes à longues distances.
3. **Quel est l'impact de l'atténuation sur le signal et comment peut-on la compenser ?**
   - L'atténuation réduit l'intensité du signal au fur et à mesure qu'il se propage dans la fibre. Cela peut être compensé par l'utilisation d'amplificateurs optiques ou d'autres techniques de renforcement du signal.

Scanned with ACE Scanner

Bande passante des fibres

Fibres monomodes

$$B = \frac{0,35}{M(\lambda).\Delta\lambda.L}$$

Fibres multimodes à saut d'indice

$$B = \frac{B_0}{L^{\gamma}}$$

Fibres multimodes à gradient d'indice

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{L^{2\gamma}}{B_0^2} + \frac{M^2(\lambda).\Delta\lambda^2.L^2}{0,35^2}}}$$

Bande passante des **Fibres Monomodes (SMF)** :

- **Bande passante** : Très élevée, souvent plusieurs dizaines de terahertz (THz).
- Utilisées pour les communications longue distance, telles que les transmissions intercontinentales.
- Elles réduisent la dispersion intermodale, ce qui permet de transmettre des signaux à grande vitesse sur de longues distances.

Bande passante des **Fibres Multimodes (MMF)** :

- **Bande passante** : Inférieure aux fibres monomodes, généralement de quelques centaines de mégahertz à quelques gigahertz.
- Utilisées pour les communications à courte distance, comme dans les réseaux locaux (LANs).
- La dispersion intermodale est plus prononcée, ce qui limite la bande passante sur des distances plus longues.

Scanned with ACE Scanner