

Cours

OPTOELECTRONIQUE

Domaine : **Sciences et Technologie**

Niveau : **Licence 3 – Semestre 2**

Filière : **Télécommunications**

Année Universitaire : **2020/2021**

Responsable de la Matière : **Pr. Farid BOUTTOUT**

Email : **f.bouttout@univ-bba.dz**

Contenu de la matière

Chapitre 1. Les fibres optiques

(3 Semaines)

Notions de guidage et d'optique géométrique
Les Fibres optiques multi modes et monomodes
Atténuation et dispersion dans les fibres optiques
Fenêtres de transmission
Fabrication des fibres optiques

Chapitre 2. Les câbles optiques et leurs applications

(2 Semaines)

Différents types de câbles optiques, Câbles sous-marins
Raccordement des fibres optiques
Défauts de connexion dans les fibres optiques.

Chapitre 3. Les Émetteurs et les récepteurs de lumière

(3 Semaines)

La Diode Electroluminescente (LED)
Le Laser
La photodiode PIN et la photodiode à avalanche (APD)

Chapitre 4. Chaine de transmission par fibre optique

(4 Semaines)

Structure d'un système de transmission par fibre optique
Le bloc d'émission et de réception
Les amplificateurs optiques (Erbium Doped Fibre Amplifier ; EDFA)
Le bilan de liaison

Chapitre 5. Méthodes de mesure de liaisons optiques

(3 Semaines)

Réflectomètre optique dans le domaine temporel (OTDR)
Mesure du taux d'erreur (BER) et diagramme de l'œil (eye diagram/pattern)

Mode d'évaluation

Examen: 100%

Références bibliographiques

- [1] N. Blaunstein, S. Engelberg, E. Krouk, and M. Sergeev, “Fiber Optic and Atmospheric Optical Communication,” John Wiley & Sons, USA, 2020.
- [2] Abdul Al-Azzaoui, “Advanced Manufacturing for Optical Fibers and Integrated Photonic Devices,” CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2016.
- [3] Le N. Binh, “Optical Fiber Communication Systems with Matlab® and Simulink® Models,” Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2015.
- [4] R. Hui and M. O’Sullivan, “Fiber Optic Measurement Techniques,” Elsevier Academic Press, Burlington, 2009.
- [5] S. Kumar and M. J. Deen, “Fiber Optic Communications. Fundamentals and Applications,” John Wiley & Sons, UK, 2014.
- [6] F. Mitschke, “Fiber Optics. Physics and Technology,” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- [7] J. M. Senior, “Optical Fiber Communications. Principles and Practice,” Third Edition, Pearson Education Limited, England, 2009.
- [8] D. Bailey and E. Wright, “Practical Fiber Optics,” Newnes, Elsevier, Oxford, UK, 2003.
- [9] J.-P. Goure and I. Verrier, “Optical Fibre Devices,” Institute of Physics Publishing, London, 2002.
- [10] Cours B11 - Transmission des Télécommunications - Partie 2 - Chapitre 5

Chapitre I

LES FIBRES OPTIQUES

Contenu

Notions de guidage et d'optique géométrique

Les Fibres optiques multi modes et monomodes

Atténuation et dispersion dans les fibres optiques

Fenêtres de transmission

Fabrication des fibres optiques.

I.1 Introduction

Dans un système de communication optique, les informations sont délivrées par des supports optiques. Le signal peut être codé en intensité optique, fréquence et phase pour la transmission et être détecté au niveau du récepteur. Le système optique a une source optique, un détecteur et divers composants optiques entre eux, tels qu'un coupleur optique et une fibre optique.

Au cours des 15 dernières années, le développement et le déploiement de réseaux optiques à débit en bauds sont passés à 25 Go puis à 28 ou 32 Go. L'utilisation cohérente la réception et le traitement numérique du signal (DSP) ont permis les transmission d'atteindre 100, 400 Gb/s et Tb/s par canal de longueur d'onde en utilisant des formats de modulation avancés et des techniques de multiplexage de polarisation. La distance de transmission peut atteindre plus de 3000 km en utilisant des portées de fibre sans compensation de dispersion (DC) et amplification optique.

Voici un aperçu historique sur l'évolution de la fibre optique :

- **1840** : Le physicien suisse Colladon découvre qu'il peut faire briller la lumière le long d'une conduite d'eau. L'eau transportait la lumière par réflexion interne.
- **1870** : Un physicien irlandais Tyndall fait une réflexion interne à la Royal Society de Londres. Il a brillé la lumière dans une cruche d'eau. Quand il a versé de l'eau de la cruche, la lumière s'est courbée en suivant le chemin de l'eau.
- **Années 1930** : Lamm et Walter Gerlach, deux étudiants allemands, ont essayé d'utiliser des tubes de lumière pour fabriquer un gastroscopie - un instrument pour regarder à l'intérieur de l'estomac de quelqu'un.
- **Années 50** : À Londres, les physiciens Kapany et Hopkins ont réussi à envoyer une image dans un conduit de lumière composé de milliers de fibres de verre.
- **1957** : Trois scientifiques américains de l'Université du Michigan, Lawrence Curtiss, Basil Hirschowitz et Wilbur Peters, utilisent avec succès la technologie de la fibre optique pour fabriquer le premier gastroscopie au monde.
- **1966** : Charles Kao et George Hockham travaillant chez Standard Telecommunications au Royaume-Uni ont proposé qu'une fibre optique soit utilisée comme moyen de communication à condition que la perte de signal puisse être bien inférieure à 20 dB / km. Ils ont également montré que l'atténuation des fibres disponibles à ce moment était due à des impuretés qui pouvaient être éliminées.

- **1970** : Maurer, Keck et Schultz chez Corning Glass Works, ont travaillé avec de la silice fondue, un matériau qui peut être rendu extrêmement pur et ont développé une fibre monomode avec une atténuation inférieure à 20 dB / km.
- **Jusqu'au milieu des années 1970** : les systèmes de communication transmettaient des informations sur des câbles en cuivre ou sur de l'espace libre.
- **1977** : le premier système de télécommunication optique a été installé à environ 1,5 mile sous le centre-ville de Chicago et chaque fibre optique transportait l'équivalent de 672 canaux vocaux.
- **1979** : des fibres monomodes avec une perte de seulement 0,2 dB / km à 1550 nm ont été fabriquées. La disponibilité des fibres à faible perte combinée à l'avènement des lasers à semi-conducteurs a conduit à une nouvelle ère de communication par fibre optique.
- **1988** : Le premier câble téléphonique transatlantique à fibre optique, TAT8, est posé entre les États-Unis, la France et le Royaume-Uni.
- **2019** : Il existe actuellement environ 378 câbles sous-marins à fibres optiques (transportant des communications sous les océans du monde), qui s'étendent sur un total de 1.2 million de kilomètres et représente plus de 80% du trafic interurbain mondial.

I.2. Structure de la fibre

Une fibre optique se compose d'un noyau central dit cœur recouvert d'un matériau d'indice de réfraction légèrement inférieur, dit la gaine, comme le montre la **Figure 1**. Si l'indice de réfraction du cœur est constant, une telle fibre est appelée fibre à saut d'indice. La plupart des fibres sont en verre, c'est-à-dire en silice. L'indice de réfraction du cœur est augmenté en dopant la silice avec GeO_2 . La gaine est en silice pure. Une gaine en polymère est utilisée pour protéger la fibre de l'humidité et de l'abrasion.

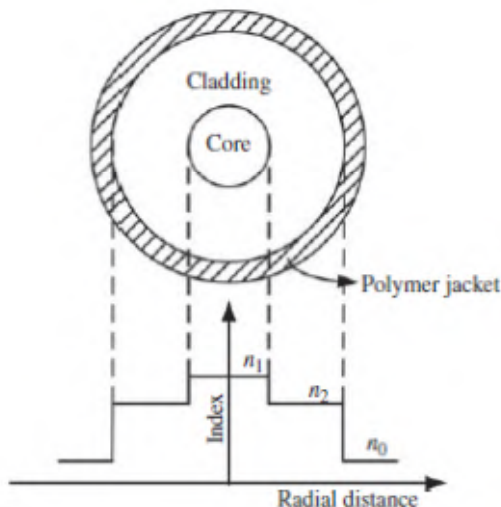


Figure 1. Coupe transversale et profil de l'indice de réfraction d'une fibre à saut d'indice.

I.3. Ouverture numérique-Angle d'acceptation

L'ouverture numérique est un paramètre qui est souvent utilisé pour spécifier l'angle d'acceptation d'une fibre. La **Figure 2** montre une coupe transversale azimuthale d'une fibre à indice d'indice et d'un rayon lumineux qui est couplé dans la fibre à partir de la surface d'extrémité latérale gauche.

La gamme de longueurs d'onde pour la lumière visible est de 400 nanomètres (nm) à environ 700 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Dans la technologie des fibres optiques, les sources de rayonnement électromagnétique les plus utiles opèrent dans le visible ou dans le proche infrarouge à des longueurs d'onde de l'ordre de 800 et 1500 nm.

L'indice de réfraction est le rapport de la vitesse de la lumière c dans l'espace vide et de la vitesse de la lumière v dans le milieu.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

L'indice de réfraction est toujours supérieur à 1, car la vitesse de la lumière dans un milieu est toujours inférieure à celle de l'espace vide. Dans le verre, il varie d'environ 1.4 à environ 1.9, dans l'arséniure de gallium (GaAs) il varie de 3.5 à 3.7.

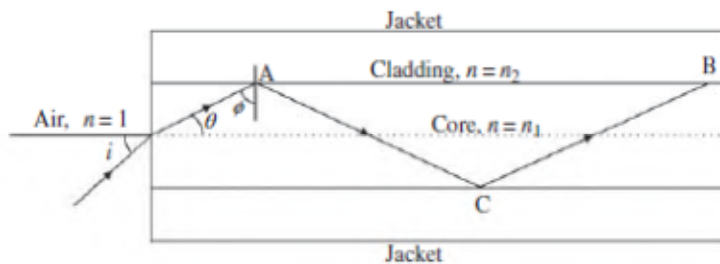


Figure 2. Ouverture numérique de la fibre. Si l'angle d'incidence i est inférieur à l'angle d'acceptation, il subit une réflexion interne totale.

En utilisant la loi de Snell, nous avons :

$$\sin i = n_1 \sin \theta = n_1 \cos \phi \quad (2)$$

Si ce rayon doit subir une réflexion interne totale à l'interface noyau-gaine, l'angle ϕ doit être supérieur à l'angle critique ϕ_c , pour laquelle

$$n_1 \sin \phi_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \quad \text{ou} \quad \sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Donc

$$\phi > \phi_c \Rightarrow \sin \phi > \sin \phi_c \Rightarrow \sin \phi > \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \sin \phi > n_2$$

$$\Rightarrow n_1^2 - n_1^2 \cos^2 \phi > n_2^2 \Rightarrow n_1^2 \cos^2 \phi < n_1^2 - n_2^2 \Rightarrow n_1 \cos \phi < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

ou

$$\sin i < (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

Par conséquent, l'ouverture numérique (NA) de la fibre est définie comme

$$\text{NA} = \sin i_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (4)$$

et i_{\max} est appelé l'angle d'acceptation. Définissons la différence d'indice relative comme

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (5)$$

Si la différence entre n_1 et n_2 est petite, $n_1 - n_2 \approx 2n_1 \Delta$ et l'équation (4) peut être approximée comme

$$\text{NA} \approx n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (6)$$

Si le rayon incident se trouve dans le cône ($i < i_{\max}$), il sera guidé à travers la fibre, comme illustré dans la **Figure 3(a)**. Sinon, il s'échappera vers la gaine puis vers la gaine extérieure, comme illustré à la **Figure 3 (b)**. D'un point de vue pratique, il est souhaitable que la plupart de la source d'alimentation soit lancée vers la fibre, ce qui nécessite une grande NA.

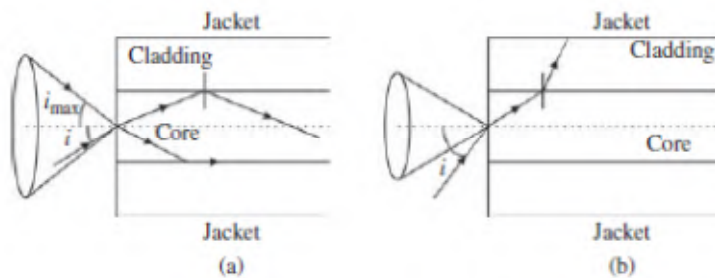


Figure 3. (a) Si ($i < i_{max}$), la lumière est guidée. (b) Si ($i > i_{max}$), la lumière s'échappe du cœur.

Exemple 1

Les indices de réfraction du cœur et de la gaine d'une fibre multimode sont respectivement de 1.47 et 1.45. Calculez

- (a) l'ouverture numérique,
- (b) l'angle d'acceptation et
- (c) la différence relative d'indice Δ .

Refaire les questions (a)-(c) pour une fibre monomode ayant les indices de réfraction du cœur et de la gaine 1.47 et 1.467, respectivement.

Solution

Pour la fibre multimode

- (a) $n_1 = 1.47$ et $n_2 = 1.45$, donc

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 0.2417$$

- (b) l'angle d'acceptation est

$$i_{max} = \sin^{-1}(NA) = 0.2440 \text{ rad} = 13.9846^\circ$$

- (c) la différence relative d'indice Δ

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0.01360$$

Pour la fibre monomode avec $n_1 = 1.47$ et $n_2 = 1.467$, on a :

$$NA = 0.09387, \quad i_{max} = 0.09400 \text{ rad} = 5.3861^\circ, \quad \Delta = 0.002041$$

II. Fibre optique multimode et monomode

Si la différence d'indice ($n_1 - n_2$) est grande ou que le rayon central a est beaucoup plus grand que la longueur d'onde de la lumière, une fibre optique prend en charge un très grand nombre de modes N guidés.

À mesure que la différence d'indice ($n_1 - n_2$) devient plus petite et/ou que le diamètre du cœur devient comparable à la longueur d'onde de la lumière, le nombre de modes guidés diminue. Dans la pratique, par la conception appropriée, une fibre ne pouvait supporter qu'un seul mode guidé, c'est-à-dire un rayon lumineux avec un angle spécifique i . Une telle fibre est appelée fibre monomode, ce qui est d'une importance significative pour la communication optique à haut débit.

II.1 Fibre à saut d'indice multimode (step-index)

Pour une fibre à saut d'indice avec un rayon du cœur a , son profil d'indice peut être exprimé comme suit :

$$n = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_2, & r > a \end{cases} \quad (7)$$

Les valeurs des indices de réfraction dans le cœur n_1 et dans la gaine n_2 sont constantes. Le profil est illustré dans la **Figure 4**.

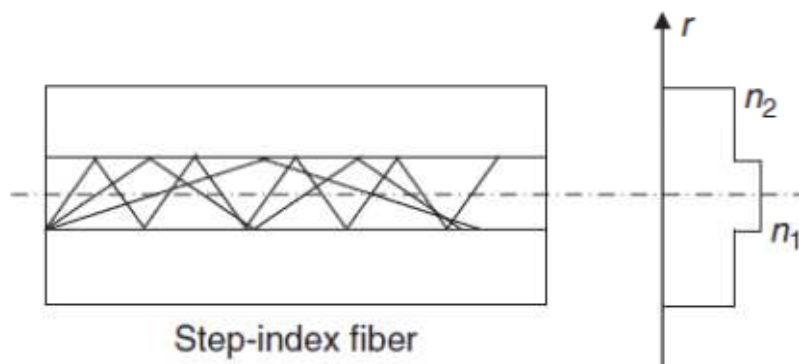


Figure 4. Illustration et profils d'indice des fibres à saut d'indice.

II.2 Fibre à gradient d'indice multimode (graded-index)

La diminution de l'indice fait que la lumière se propage plus vite, ce qui réduit la dispersion intermodale par rapport à celle dans les fibres à saut d'indice. Les fibres multimodes à gradient d'indice sont utilisées pour ce fin. Le profil d'indice de réfraction, dans ce cas, est donné par

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \Delta \right]^{1/2}, & r < a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad (8)$$

et est représenté dans la **Figure 5**.

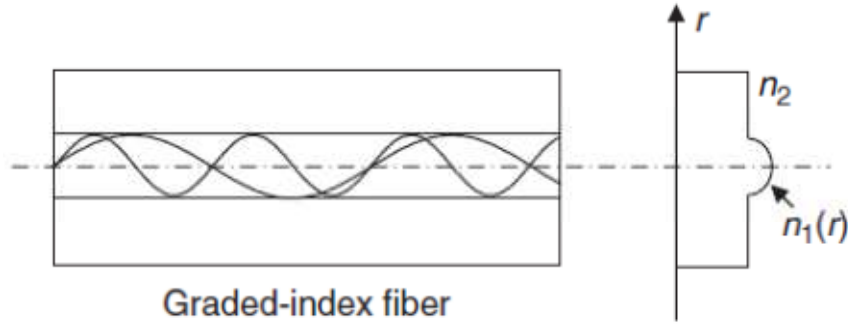


Figure 5. Illustration et profils d'indice des fibres à gradient d'indice.

L'indice du cœur diminue suivant une loi $(r/a)^\alpha$ depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine. Cette loi est dite constante pour $\alpha = 0$, triangulaire pour $\alpha = 1$ et parabolique pour $\alpha = 2$.

II.3 Nombre de modes propageant dans une fibre multimode

On définit le paramètre V (fréquence normalisée) :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (9)$$

avec a : rayon du cœur

λ_0 la longueur d'onde de la lumière. $V < 2.405$ si la fibre est monomode.

Le nombre de modes M est donné par : (approximation vraie pour un grand nombre de modes)

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad \text{pour une fibre multimode à saut d'indice} \quad (10)$$

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad \text{fibre multimode à gradient d'indice de profil parabolique} \quad (11)$$

II.4 La fibre monomode

Les fibres monomodes populaires sont fabriquées avec des profils de saut d'indice. La fibre monomode est la solution universelle des systèmes de télécommunications vu sa bande passante qui puisse être aussi large que des centaines de térahertz. Cependant, elle requiert des composants chers et des tolérances faibles. Aussi, la capacité de transmission est limitée par la vitesse de modulation de l'émetteur et la bande passante électrique du récepteur.

II.5 Longueur d'onde de coupure

Un autre paramètre important de la fibre est la longueur d'onde de coupure λ_c . Elle est définie de telle sorte que le deuxième mode le plus bas cesse d'exister lorsque la longueur d'onde du signal est plus longue que λ_c , et donc

lorsque $\lambda > \lambda_c$, la fibre est monomode.

lorsque $\lambda < \lambda_c$, une fibre monomode deviendra multimode. La longueur d'onde de coupure est

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \text{NA} \quad (12)$$

Par exemple, pour une fibre monomode standard avec $n_1 = 1.47$, $n_2 = 1.467$ et $a = 4.5 \mu\text{m}$, la longueur d'onde de coupure est

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 1.1035 \mu\text{m}$$

III Atténuation et dispersion dans les fibres optiques

Deux effets limitent la capacité de transmission : l'atténuation et la dispersion chromatique.

III.1 Atténuation

Une partie du signal, sous forme de lumière, est perdue. La perte optique dans les fibres optiques réduit la puissance optique moyenne atteignant le récepteur, **Figure 6**. Elle est la somme de trois composantes principales : la perte intrinsèque, la perte de flexion et la perte d'épissage.

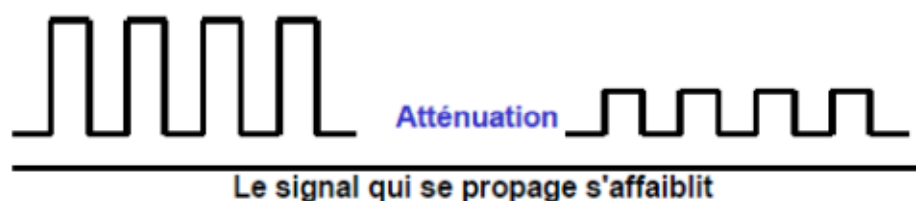


Figure 6. Illustration de l'atténuation du signal dans la fibre optique.

III.1.1 Atténuation intrinsèque ou matériau

La perte intrinsèque se compose principalement de la perte d'absorption due aux impuretés OH et de la perte de diffusion de Rayleigh. La perte intrinsèque est fonction de λ^{-6} . Plus la longueur d'onde de fonctionnement est longue, plus la perte est faible. Cependant, cela dépend également de la transparence du matériau optique utilisé pour former les fibres optiques. Pour la fibre de silice, la perte de matériau optique est faible sur la plage de longueurs d'onde 0.8–1.8 μm .

III.1.2 Absorption

La perte d'absorption dans le verre de silice se compose principalement d'absorption ultraviolets (UV) et infrarouges (IR) de silice pure. De fortes pertes d'environ 10^{10} dB/km se produisent dans la fenêtre du 8–13 μm . Cette perte est illustrée dans la courbe IR de la **Figure 10**.

III.1.3 Diffusion Rayleigh

La perte de diffusion de Rayleigh, LR, qui est due à des inhomogénéités microscopiques du matériau, montre une dépendance λ^{-6} et est donnée par

$$L_R = (0.75 + 4.5\Delta)\lambda^{-6} \text{ dB/km} \quad (13)$$

où

Δ est la différence relative de l'indice de réfraction. λ est la longueur d'onde en μm . Ainsi, pour minimiser la perte, Δ doit être aussi faible que possible.

III.1.4 Perte de flexion

Lorsqu'une fibre est courbée, les fronts d'onde plans associés au mode guidé pivotent au centre de courbure et leur vitesse longitudinale le long de l'axe des fibres augmente avec la distance du centre de courbure. Comme la fibre est courbée d'avantage au-delà d'une courbe critique, la vitesse de phase dépasse celle de l'onde plane dans la gaine et le rayonnement se produit.

La perte de courbure L_B pour un rayon de courbure R est donnée par

$$L_B = -10 \log_{10} \left(1 - 890 \frac{r_0^6}{\lambda^4 R^2} \right) \text{ pour la silice} \quad (14)$$

$$\frac{r_0}{a} = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad (15)$$

V donné par l'équation (9).

III.1.5 Perte de micro-flexion

La perte de micro-flexion résulte du couplage de puissance du mode fondamental guidé de la fibre aux modes de rayonnement. Ce couplage a lieu lorsque l'axe des fibres est plié de façon aléatoire à une fréquence spatiale élevée. Une telle flexion peut se produire lors du tassement de la fibre pendant le processus de câblage, comme illustré à la **Figure 7**.

La perte de flexion d'une fibre monomode est fonction de la taille du point de mode fondamental r_0 (spot). Les fibres avec une grande taille de tache sont extrêmement sensibles à la microcourbure. La perte de flexion peut s'exprimer par la relation

$$L_m = 2.15 \times 10^{-4} r_0^6 \lambda^{-4} L_{mm} \text{ dB/km} \quad (16)$$

où L_{mm} est la perte par flexion d'une fibre multimode à cœur de $50 \mu\text{m}$ ayant une NA de 0.2.



Figure 7. (a) Désalignement dans l'épissage de deux fibres optiques générant des pertes. (b) Fibres épissées alignées.

III.1.6 Perte articulaire ou d'épissure

Les fibres devront être épissées ensemble pour former la dernière liaison de transmission. Avec un câble à fibre optique qui se situe en moyenne entre 0.4 et 0.6 dB/km, une perte d'épissure supérieure à 0.2 dB/épissure réduit considérablement la distance non répétée qui peut être atteinte. Il est donc extrêmement important que la fibre soit conçue de manière à minimiser la perte d'épissage. La perte d'épissure est principalement due au résultat d'un désalignement axial du cœur de fibre, comme le montre la **Figure 7**.

Les techniques d'épissage, qui reposent sur l'alignement de la surface extérieure des fibres, nécessitent des tolérances extrêmement serrées sur la concentricité de l'âme à la surface extérieure. Des décalages de l'ordre de 1 µm peuvent entraîner une perte d'épissure importante. Cette perte est donnée par

$$L_s = \frac{10}{\ln 10} \left(\frac{d}{r_0} \right)^2 \text{ dB} \quad (17)$$

où d est le désalignement axial des noyaux de fibres. Il est évident que minimiser la perte optique implique de faire des compromis entre les différentes sources de perte. Il est avantageux d'avoir une grande taille de spot pour minimiser à la fois les pertes de Rayleigh et d'épissage alors que la minimisation des pertes de flexion et de microcourbure nécessite une petite taille de spot.

III.1.7 Coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation de la puissance optique P peut être exprimé comme

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \quad (18)$$

où α est le coefficient d'atténuation. Ce coefficient d'atténuation comprend tous les effets de la perte de puissance lorsque des signaux sont transmis à travers les fibres optiques.

Si nous considérons des signaux optiques de puissance optique moyenne, P_{in} , entrant à l'entrée d'une fibre de longueur L et si P_{out} est la puissance optique de sortie, alors P_{in} et P_{out} sont liées au coefficient d'atténuation α par

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \quad (19)$$

Il est courant d'exprimer α en dB/km en utilisant la relation

$$\alpha(\text{dB/km}) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = 4.34294 \times 10^{-3} \alpha(m^{-1}) \quad (20)$$

III.2 Dispersion chromatique

Le signal reçu est déformé par rapport au signal émis (dégradation), **Figure 8**

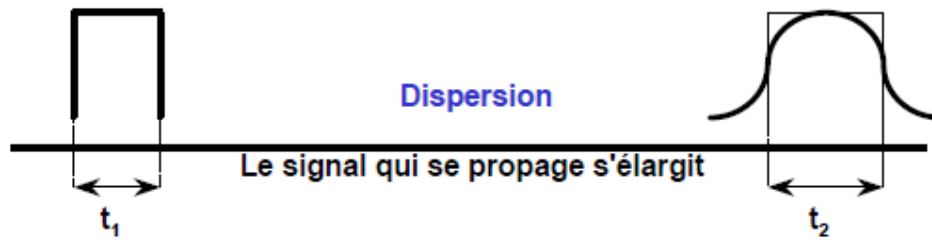


Figure 8. Illustration de la dispersion du signal dans la fibre optique.

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 :

$$v_m = \frac{C}{n_1} \sin \theta_m \quad (21)$$

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 décalage est :

$$\Delta\tau = \frac{L}{C} \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_2} \quad (22)$$

La dispersion intermodale totale de la fibre en fonction de la longueur d'onde du signal transmis est également représentée dans la **Figure 9**.

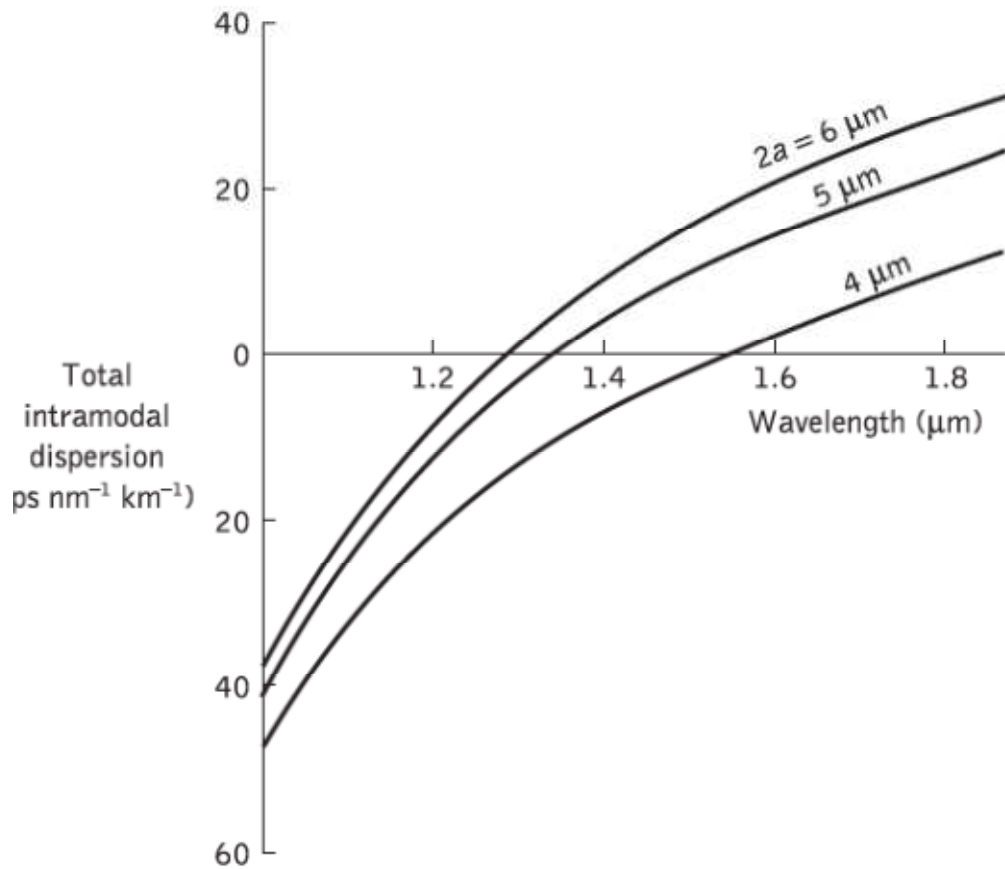


Figure 9. La dispersion intermodale totale du premier ordre en fonction de la longueur d'onde pour les fibres monomodes avec des diamètres du cœur de 4, 5 et 6 μm .

IV Fenêtres de transmission

La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde. Les résultats de mesure d'une fibre standard typique sont reportés dans la **Figure 10**.

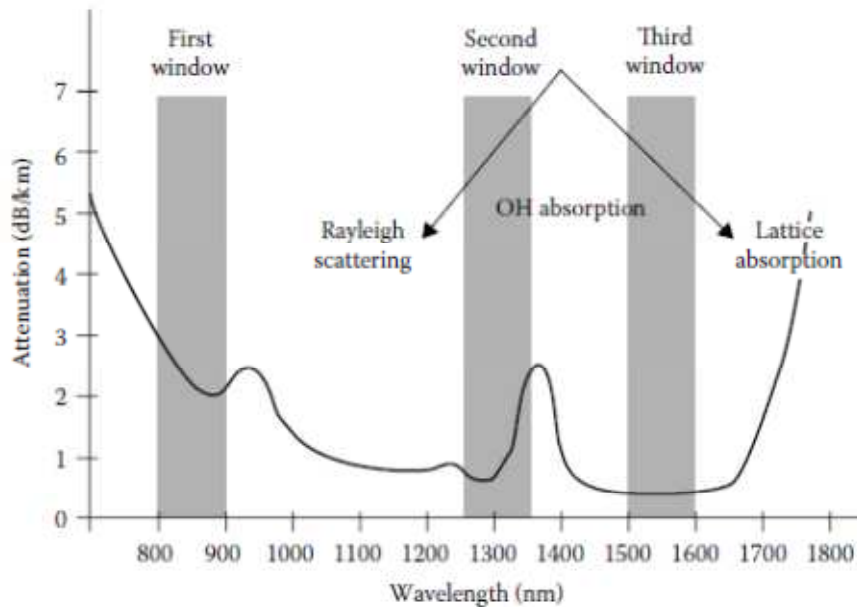


Figure 10. Atténuation de la silice en fonction de la longueur d'onde : fenêtres d'atténuation minimale et mécanisme de perte correspondant aux coefficients d'atténuation.

Il y a trois creux dans la courbe d'atténuation à 0.85 μm , 1.3 μm et 1.55 μm . Celles-ci sont appelées fenêtres de transmission. Ce sont ces bandes de longueurs d'onde qui peuvent fournir des communications fiables sur des distances relativement longues en raison de la faible atténuation.

- La première fenêtre 850 nm (0.8-0.9 μm) :
 - La première à être utilisée pour les communications par fibre optique
 - Les sources de transmission et les détecteurs de réception faciles à fabriquer et très efficaces.
 - Longueur d'onde de fonctionnement préférée pour les systèmes fonctionnant sur de courtes distances.
 - Atténuations typiques de 2 à 3.2 dB/km.
- La deuxième fenêtre 1300 nm (1.28-1.33 μm) :
 - Fenêtre de choix pour la majorité des systèmes à fibres optiques, car les pertes globales sont bien inférieures à la fenêtre de 850 nm.
 - Valeurs typiques d'atténuation sont de 0.3 à 0.9 dB/km.

- Sources lumineuses disponibles mais sont coûteuses et difficiles à fabriquer.
- Utilisée pour les transmissions des données à haute vitesse et sur les longues distances.
- La troisième fenêtre 1550 nm (1.525-1.625 μm) :
 - Moins de pertes que la deuxième fenêtre ; valeurs typiques de 0.15 à 0.6 dB/km.
 - Lasers et amplificateurs performants (mais assez chers)
 - Existence de systèmes très performants (DWDM)
 - C'est la fenêtre de choix pour quasiment toutes les applications modernes.

V. Techniques de fabrication de câbles à fibres

Il existe une variété de techniques de fabrication utilisées pour produire des câbles à fibres optiques. Deux méthodes courantes utilisées pour fabriquer des câbles en fibre de verre optique sont présentées dans ce qui suit. La première méthode consiste à tirer directement la fibre de deux préformes en verre fondu, qui sont placées dans deux creusets concentriques; c'est ce qu'on appelle la méthode du double creuset (double crucible method). La deuxième méthode consiste à former une tige de verre appelée préforme. La deuxième méthode a plusieurs procédés pour produire des préformes à utiliser dans la méthode d'étirage des fibres. La fabrication de câbles en fibre nécessite des techniques sophistiquées et très précises. Le plus grand défi auquel est confrontée la fabrication de fibres est la purification des matériaux utilisés dans la construction du noyau et du revêtement. La valeur de l'indice de réfraction doit être très précise. Plus de précision est nécessaire, en particulier lors de la fabrication de fibres à gradient d'indice. Au cours du processus de fabrication du câble en fibre de verre, des impuretés sont intentionnellement ajoutées au verre pur pour obtenir les indices de réfraction souhaités nécessaires pour guider la lumière. Du germanium ou du phosphore est ajouté pour augmenter l'indice de réfraction. Du bore ou du fluor est ajouté pour diminuer l'indice de réfraction. Malheureusement, l'ajout de ces impuretés résiduelles peut augmenter l'atténuation en diffusant ou en absorbant la lumière. Les méthodes de fabrication doivent être extrêmement précises dans les dimensions et les tolérances des fibres. Le diamètre du cœur doit être contrôlé avec une grande précision, et le cœur doit être situé au centre de la gaine. Ces mêmes problèmes sont également présents lors de l'application de la gaine sur le cœur. Dans la dernière étape, la gaine est recouverte d'une couche de revêtement en polymère pour la protection mécanique et environnementale.

V.1 Méthode à double creuset (double crucible method)

La méthode du double creuset est illustrée à la **Figure 11**. Une paire de creusets en platine repose l'un dans l'autre. Le verre à cœur fondu est placé dans le creuset intérieur et le verre de revêtement fondu est introduit dans le creuset extérieur. Les creusets sont maintenus à haute température, typiquement entre 1850 et 2000 °C. À l'aide d'un mécanisme d'alimentation de précision, les deux verres se rejoignent à la base du creuset extérieur, formant une fibre de revêtement central. La fibre est extraite des creusets. Ensuite, la fibre passe à travers un équipement de mesure et de contrôle de diamètre de haute précision et est surveillée par imagerie ou rayons X. L'équipement de contrôle détecte toute non-homogénéité et bulles dans la fibre étirée. La fibre est ensuite recouverte

d'une couche colorée de gaine. Encore une fois, la couche de gaine passe par un équipement de contrôle et de surveillance du diamètre. L'extrémité du câble en fibre est attachée à une bobine rotative, qui tourne régulièrement. La fibre est ensuite testée pour l'atténuation (dB par kilomètre), la dispersion et toute autre exigence spécifiée par le client ou l'industrie. La longueur des câbles à fibres optiques peut atteindre quelques centaines de kilomètres, généralement requise par l'industrie. Les câbles à fibres sont disponibles en différents types et longueurs d'onde de travail.

Le tube de tige est l'une des méthodes les plus simples de fabrication des fibres. Dans la procédure de tube de tige, une tige de verre de base est placée à l'intérieur d'un tube de verre de revêtement. Cette disposition forme une préforme requise pour le processus d'étirage de la fibre. Une préforme est illustrée à la **Figure 12**.

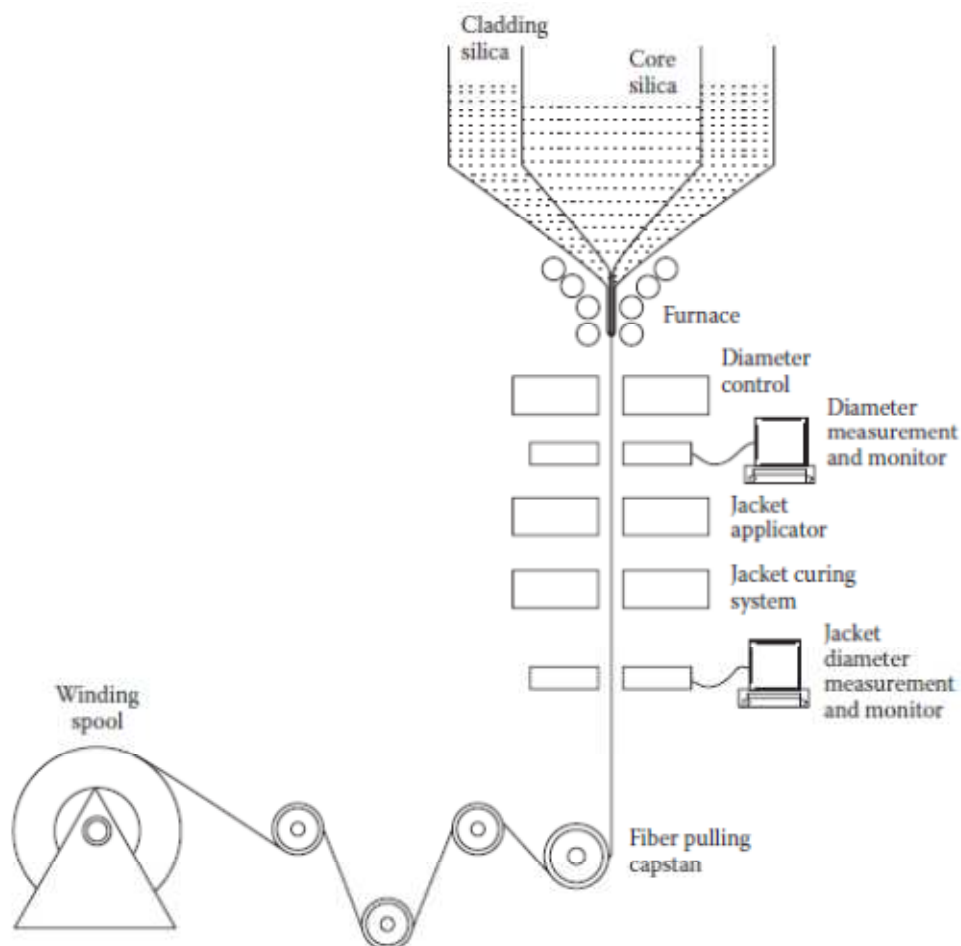


Figure 11. Méthode de fabrication du double creuset.

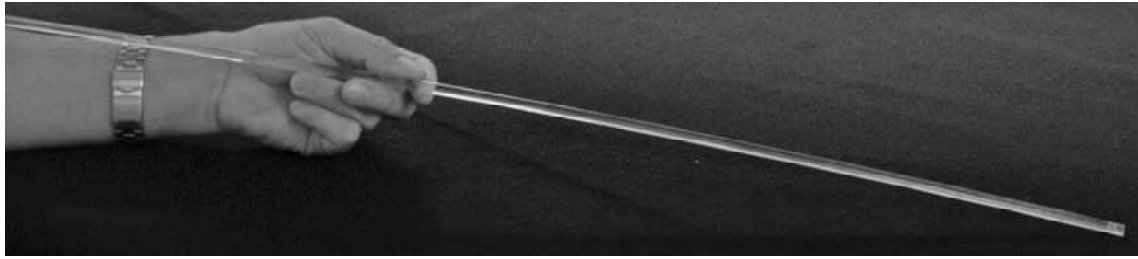
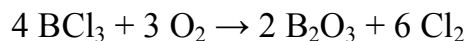
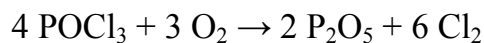
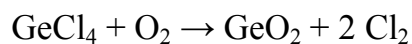
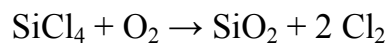


Figure 12. Une préforme.

V.2 Procédés de dépôt chimique de vapeur (Chemical Vapor Deposition ; CVD)

Les préformes utilisées dans le procédé d'étirage des fibres sont fabriquées à l'aide de procédés de dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Les étapes de fabrication de la méthode CVD sont similaires à celles expliquées dans la méthode du double creuset. Une préforme est nécessaire pour le processus d'étirage des fibres. La méthode de préparation d'une préforme est appelée procédure du tube de tige ; une tige de verre de base est placée à l'intérieur d'un tube de verre de la gaine.

Tous ces processus sont basés sur des réactions thermiques chimiques de vapeur qui forment des oxydes. Ces oxydes sont déposés sous forme de couches de particules de verre appelées suie, qui sont déposées sur la tige rotative extérieure ou à l'intérieur du tube de verre pour produire les préformes. Les matières de départ sont des solutions d'O₂ mélangées à SiCl₄, GeCl₄, 4 POCl₃ ou BCl₃ gazeux. Ces liquides de départ sont évaporés dans un flux d'oxygène à haute température pour produire du dioxyde de silicium (SiO₂) et d'autres oxydes. Ces oxydes sont appelés dopants. Les réactions chimiques se déroulent comme suit :



Le dioxyde de silicium (SiO₂), ou la silice pure, est généralement obtenu sous forme de petites particules (submicroniques) appelées suie. Cette suie se dépose sur la tige ou le tube cible.

Le dépôt de suie de silice, couche après couche, forme un matériau transparent homogène. Le fabricant peut contrôler la quantité exacte de dopant ajoutée à chaque couche, contrôlant ainsi le profil d'indice de réfraction. Par exemple, le dioxyde de germanium (GeO_2) et le pentoxyde de phosphore (P_2O_5) augmentent l'indice de réfraction du verre, tandis que l'oxyde de bore (B_2O_3) le diminue. La modification de la composition du mélange au cours du processus influe sur le profil d'indice de réfraction de la préforme. Pour modifier la valeur de l'indice de réfraction de la gaine, certains dopants sont utilisés. Par exemple, le fluor (F) est utilisé pour diminuer l'indice de réfraction de la gaine dans un matériau de gaine déprimé.

Le processus de vapeur produit un matériau extrêmement pur dont les caractéristiques sont sous le contrôle absolu du fabricant. Les préformes préparées dans les processus de dépôt en phase vapeur sont expliquées dans les sections suivantes.

V.3 Dépôt de vapeur à l'extérieur (Outside Vapor Deposition ; OVD)

Ce fut le premier processus de fabrication en masse réussi à produire des préformes utilisées par la méthode d'étirage des fibres. Le processus de dépôt en phase vapeur extérieure (OVD), également appelé processus de suie, a été développé par Corning Company en 1972. Ce processus se compose de quatre phases : pose, consolidation, étirage et mesure.

Pendant la phase de pose, les matériaux qui composent le cœur et la gaine sont déposés sous forme de vapeur autour de la tige cible rotative. Le résultat de ce processus est une préforme de suie. Le profil d'indice de réfraction et la géométrie des fibres sont formés au cours de cette phase, comme le montre la **Figure 13**.

En phase de consolidation, la tige cible est retirée et la préforme de suie est placée à l'intérieur d'un four de consolidation. Ici, la préforme de suie est consolidée en une préforme de verre clair et solide et le trou central est fermé. Pendant la consolidation, un gaz de séchage s'écoule à travers la préforme pour éliminer l'humidité résiduelle.

Dans la phase de dessin, la préforme est attachée à un mécanisme d'alimentation de précision qui l'introduit dans un four à une vitesse commandée. La méthode d'étirage produit une fibre au diamètre requis. Plus tard, une couche de revêtement de couleur sera appliquée. Les équipements de mesure et de commande du diamètre vérifient également en permanence le cœur, la gaine et le revêtement pour les tailles et la qualité du diamètre.

Enfin, dans la phase de mesure, chaque bobine de fibre est testée pour vérifier la conformité aux caractéristiques des fibres données dans les fiches techniques. Plus précisément, la fibre est testée pour la résistance, l'atténuation et les caractéristiques dimensionnelles. Les fibres sont également testées pour la bande passante, l'ouverture numérique (NA), la dispersion et la longueur d'onde de coupure.

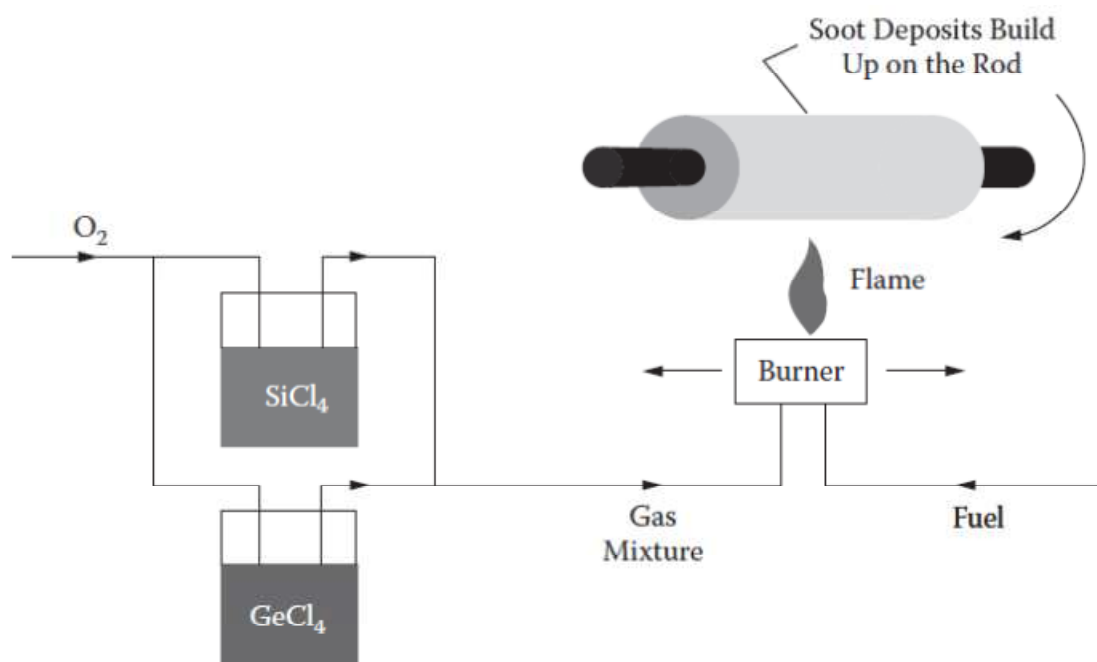


Figure 13. Dépôt de vapeur extérieur.

V.4 Dépôt axial de vapeur (Vapor Axial Deposition ; VAD)

Le dépôt axial de vapeur (VAD) est une autre forme de dépôt extérieur. Cette méthode a été développée en 1977 par des scientifiques japonais. La **Figure 14** illustre le processus VAD. Le dépôt des particules de silice, qui ont été obtenues à partir d'une réaction entre les gaz dans une zone chauffée, se produit à l'extrémité inférieure d'une cible, ou tige de semence, qui tourne et se déplace vers le haut. Ce dépôt forme une préforme poreuse dont l'extrémité supérieure est chauffée dans un four à anneau pour produire une préforme en silice. Les étapes de dessin et de mesure sont similaires à celles des autres processus de dépôt. Le processus VAD n'implique pas de trou central. Le profil de l'indice de réfraction est formé en utilisant de nombreux brûleurs, une technique qui permet au fabricant de changer la direction de l'écoulement d'un mélange gazeux

spécifique. Le processus VAD produit à la fois des profils de fibre à saut d'indice et à gradient d'indice, résultant lorsque la densité des particules déposées varie en fonction des gradients de température produits dans le plan perpendiculaire à l'axe du cœur.

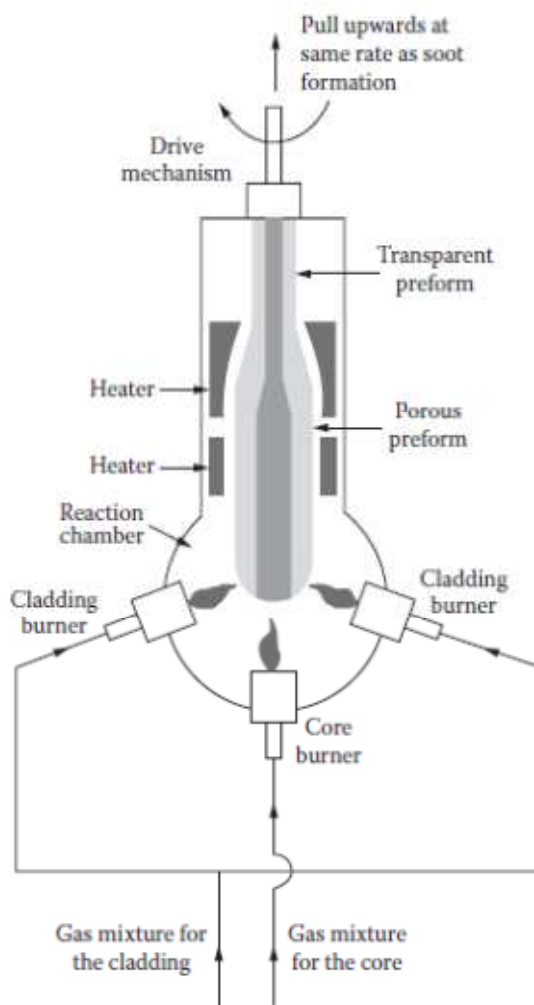


Figure 14. Dépôt axial de vapeur.

V.5 Dépôt chimique de vapeur modifié (Modified Chemical Vapor Deposition ; MCVD)

Ce procédé a été développé par Bell Laboratories en 1974 et a été largement accepté pour la production de fibres à gradient indice. Au début, il y avait un processus appelé dépôt interne de vapeur (Inside Vapor Deposition ; IVD). Ce processus a été considérablement amélioré et renommé dépôt chimique vapeur modifié (Modified Chemical Vapor Deposition ; MCVD). Il s'agit du principal

procédé utilisé dans la production de fibres dans le monde. Il est illustré à la **Figure 15**.

Un mélange gazeux du SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , O_2 et H_2 s'écoule à l'intérieur du tube, tandis qu'une source de chaleur entoure l'extérieur du tube. La source de chaleur convertit les gaz en suie de silice de surface élevée semblable à la neige à l'intérieur du tube, comme le montre la **Figure 15**. La suie se dépose sur le tube en aval de la flamme. Le brûleur traverse le long de l'extérieur du tube, créant les fines particules de suie et frittant la suie en une fine couche de verre dopé à l'intérieur du tube de quartz. Après le dépôt de la couche, le mélange de gaz réactifs est changé et le brûleur est ramené à la position de départ. L'étape ci-dessus est répétée et une couche ultérieure est déposée. Ce processus est poursuivi, couche par couche, pour construire la structure complexe du cœur dans la fibre optique. Faire varier la concentration de dopants d'une couche à l'autre modifie l'indice de réfraction, créant un profil de gradient d'indice. Une fois le verre déposé, le tube est fondu en une tige solide appelée préforme. La préforme fabriquée sur le tour MCVD est chauffée et étirée au diamètre standard de 125 microns. Chaque préforme génère plusieurs kilomètres de fibre. Cette opération est réalisée sur une tour de traçage. La tour a un four en haut pour faire fondre la préforme de silice. Les jauges sont utilisées pour mesurer et commander le diamètre de la fibre de verre au submicrons lorsque la fibre est retirée de la préforme. Un contrôle très fin du profil peut être obtenu par cette technique. Ces couches MCVD sont conçues pour être beaucoup plus fines que la longueur d'onde de la lumière se propageant dans la fibre. Un revêtement d'acrylate est appliqué pendant le processus d'étirement, ce qui protège la fibre de silice vierge de l'environnement.

Après la fabrication de la fibre, chaque bobine de fibre est testée pour valider le produit afin de répondre aux spécifications strictes de l'industrie et internes. Ces tests comprennent la mesure de la résistance mécanique, des propriétés géométriques et des propriétés optiques. Un test clé pour les fibres multimodes optimisées au laser est le retard de mode différentiel haute résolution (High Resolution Differential Mode Delay ; HRDMD).

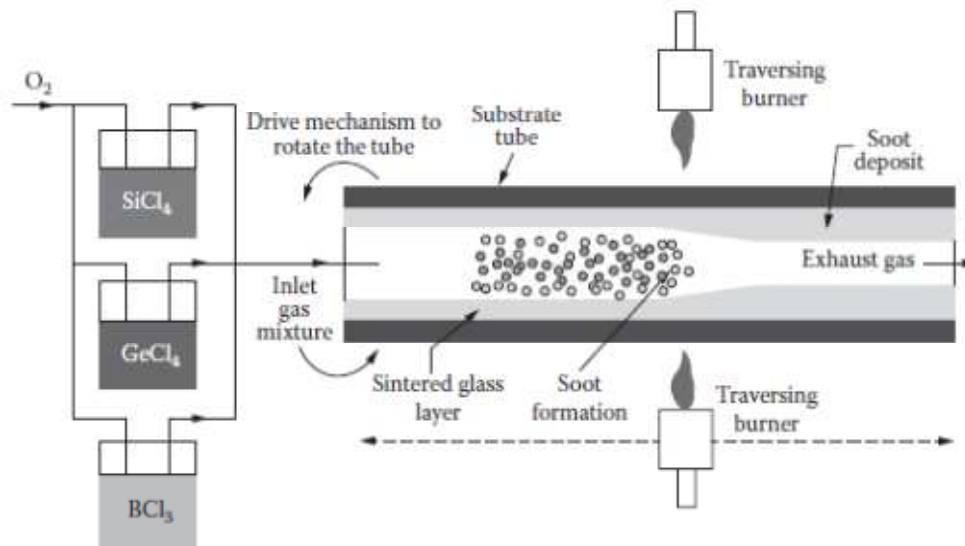


Figure 15. Dépôt chimique de vapeur modifié.

V.6 Dépôt de vapeur de plasma chimique (Plasma Chemical Vapor Deposition ; PCVD)

Le procédé de dépôt chimique de vapeur activé par plasma (Plasma Chemical Vapor Deposition ; PCVD) a été développé en 1975 par Phillips Research Laboratories, une société néerlandaise d'électronique grand public et de télécommunications. Le processus PCVD est très similaire au processus MCVD. Au lieu de chauffer l'extérieur du tube de silice, la source d'énergie est fournie par un micro-ondes haute puissance pour former du gaz-plasma ionisé à l'intérieur du tube de silice. La **Figure 16** illustre le processus PCVD. Un plasma non isotherme dans la gamme de fréquences micro-ondes est utilisé à la place d'une torche ou d'une flamme. Le plasma fait avancer la réaction entre 1000 et 1200 °C environ. Il en résulte des couches très fines déposées à l'intérieur du tube. Bien que cette méthode permette la croissance de couches à des températures relativement basses, la vitesse de dépôt est plutôt lente par rapport à d'autres méthodes. Ce procédé peut produire de grandes préformes capables de produire quelques centaines de kilomètres de fibre.

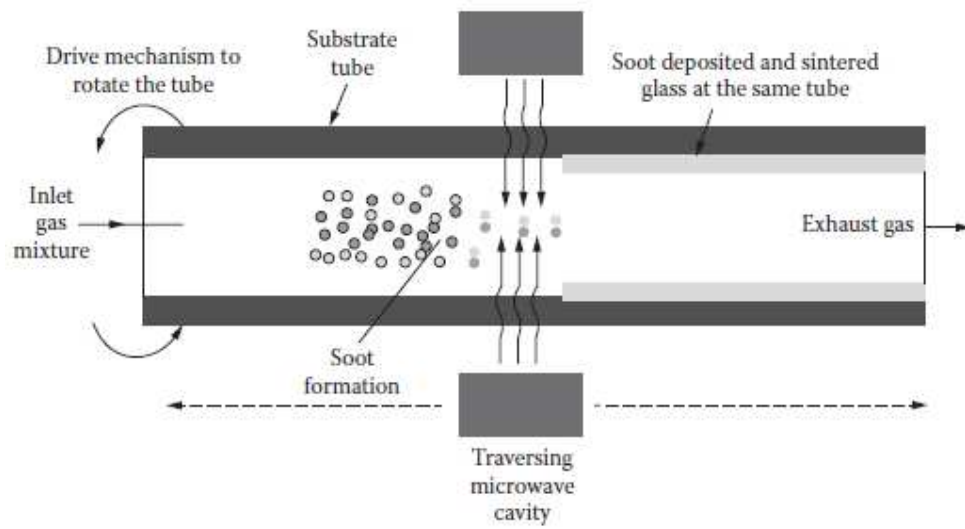


Figure 16. Dépôt de vapeur chimique activé par plasma (PCVD).

Chapitre II

LES CABLES OPTIQUES ET LEURS APPLICATIONS

Contenu

Différents types de câbles optiques, Câbles sous-marins

Raccordement des fibres optiques

Défauts de connexion dans les fibres optiques.

I. Différents types des câbles des fibres optiques

Il existe quatre grands domaines d'application dans lesquels les câbles à fibres optiques peuvent être classés: câble aérien, câble souterrain, câble subaquatique et câble intérieur. Les propriétés spéciales requises pour chacune de ces applications seront maintenant prises en compte. Notez que la liste n'est pas exhaustive et que certains câbles spécialisés doivent combiner les caractéristiques de plusieurs de ces catégories.

I.1 Câble aérien

Les câbles aériens sont littéralement exposés aux éléments plus que toute autre application, et comme tels, sont exposés à de nombreuses forces et dangers externes. Les câbles aériens sont installés entre les pôles avec le poids du câble soutenu en permanence par généralement un acier fil porteur auquel le câble peut être directement attaché, ou par les éléments de résistance intégré à la construction du câble. Les effets des charges combinées de vent et de glace peuvent produire des forces de traction considérablement accrues. D'autres considérations sont les grandes variations température à laquelle le câble peut être soumis, affectant les propriétés physiques du les fibres et l'atténuation des fibres. Le profil de câble longitudinal est important pour réduire les charges de vent et de glace de ces câbles. Les barrières anti-humidité sont essentielles, configurations de câbles à fibres lâches tamponnées et gélifiées prédominantes. Toute congélation d'eau à l'intérieur des logements de fibres se dilaterait et pourrait produire une flexion excessive des fibres.

Le matériau de la gaine du câble doit résister aux températures extrêmes et aux exposition intense à la lumière ultraviolette résultant d'une exposition continue au soleil. Stabilisé aux UV le polyéthylène est fréquemment utilisé à cet effet.

La longueur de travée installée et les exigences d'affaissement sont des paramètres de conception importants affectant la tension maximale du câble. Ils dictent également le type de construction être utilisé. Les câbles à courte portée ont des exigences de tension moins strictes, qui peuvent être satisfaites par l'utilisation de couches intégrales de Kevlar, tandis que les câbles à longue portée peuvent avoir besoin d'utiliser plusieurs tiges de PRF toronnées pour répondre aux tensions maximales requises.

I.1.1 Câble autoportant

Ces câbles ont un fil messenger séparé, généralement en acier, qui peut être fixé aux structures de support sur les poteaux, pour porter les forces de traction sur le câble. La construction du câble est illustrée à la **Figure 17**. Le fil messenger séparé facilite l'installation.

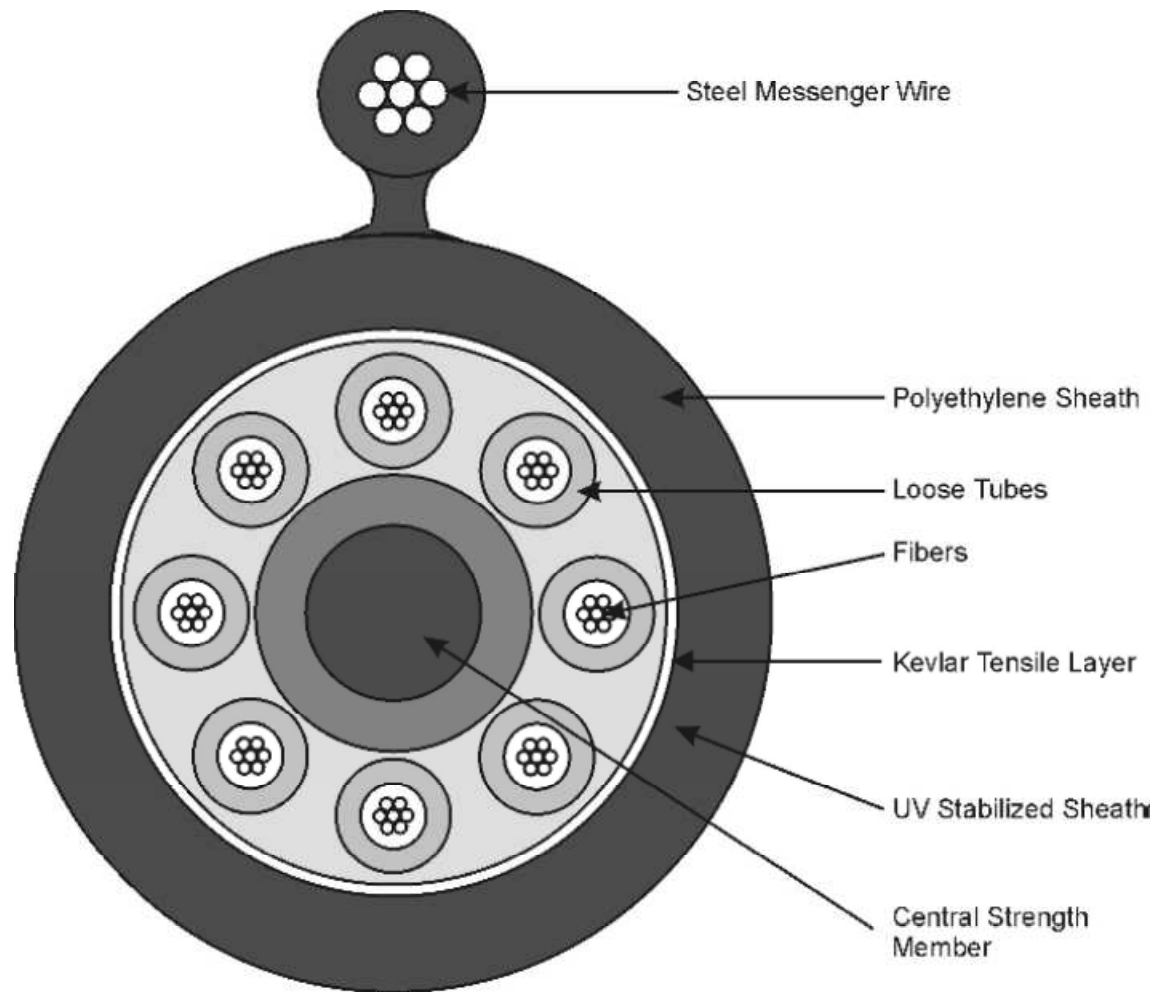


Figure 17. Câble autoportant.

I.1.2 Câble diélectrique à courte portée

Ces câbles utilisent des éléments de résistance non métalliques. Ils ont des couches périphériques de Kevlar et un noyau fendu qui utilise des éléments de résistance en FRP. Ces câbles permettent des portées jusqu'à 150 m avec des tensions maximales admissibles d'environ 300 kg. La construction de ce type de câble est illustrée à la **Figure 18**.

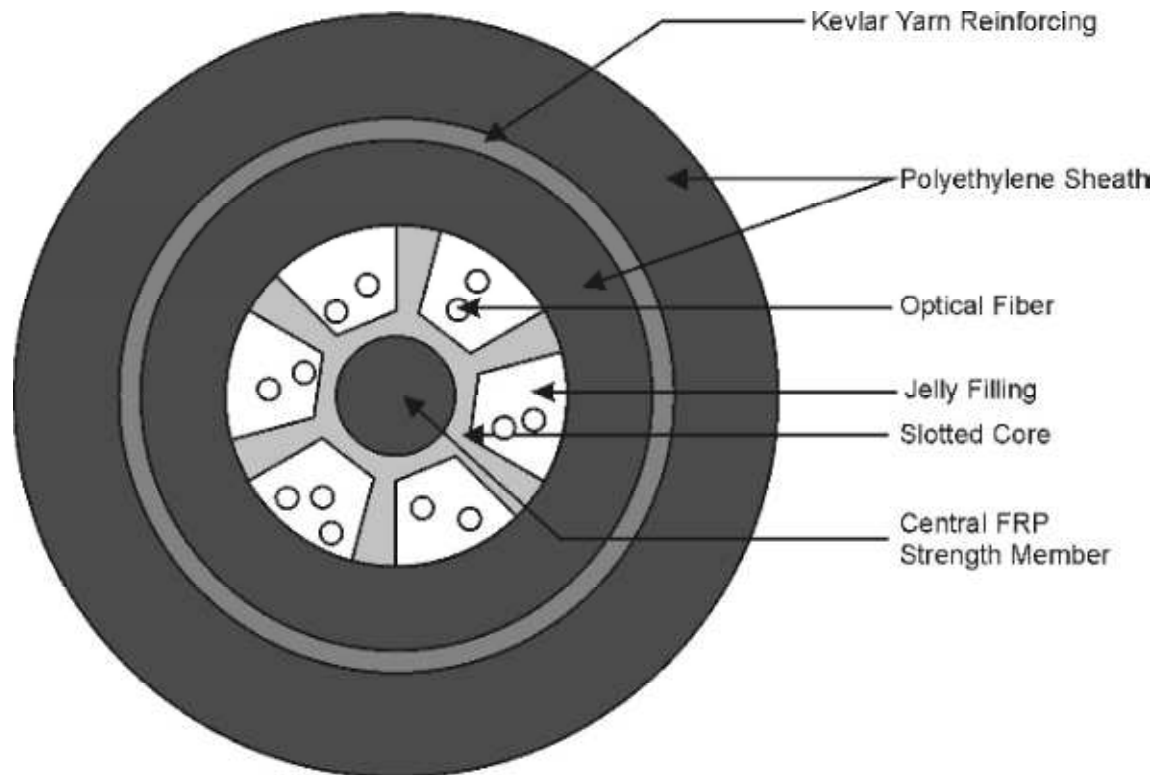


Figure 18. Câble diélectrique à courte portée.

I.1.3 Câble diélectrique à longue portée

Ces câbles utilisent également des éléments de résistance non métalliques. Ils se composent d'une couche périphérique de tiges de PRF toronnées et d'un noyau fendu avec des éléments de résistance en FRP. Ces câbles permettent des portées jusqu'à 1000 m avec des tensions maximales admissibles d'environ 1200 kg. La construction de ce type de câble est illustrée à la **Figure 19**.

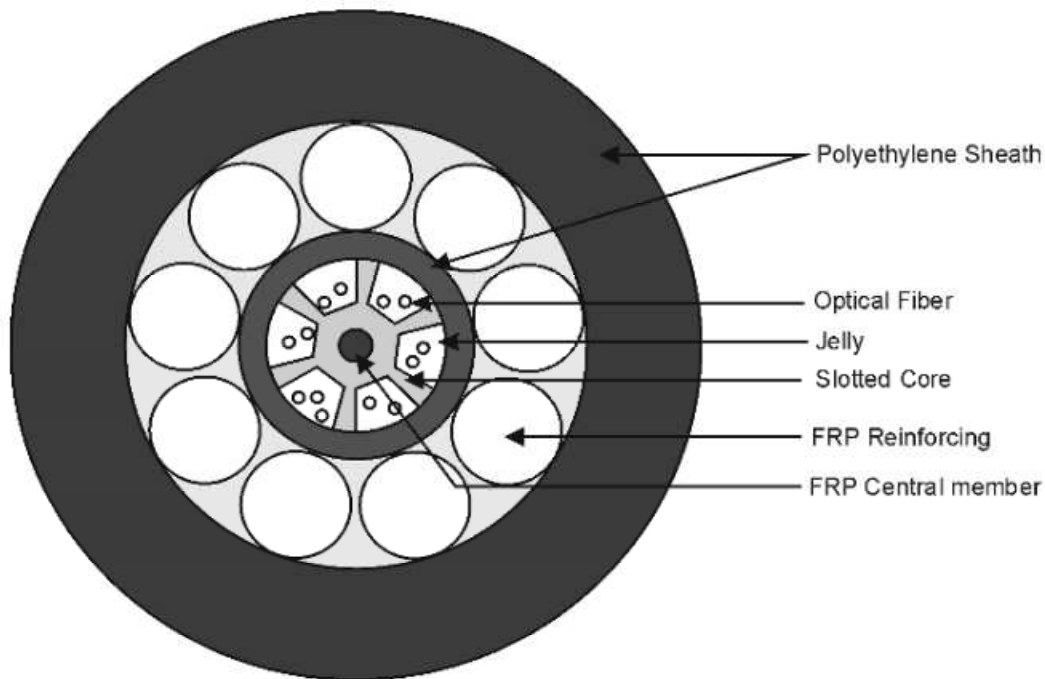


Figure 19. Câble diélectrique à longue portée.

Avantages du câble aérien

- Utile dans les zones où il peut être très difficile ou trop cher d'enterrer le câble ou l'installer dans des conduits.
- Également utile lorsque des installations temporaires sont nécessaires.

Inconvénients

- La disponibilité du système n'est pas aussi élevée que pour les câbles souterrains. Les tempêtes peuvent perturber ces supports de communication, avec des câbles endommagés par la chute des arbres, les dommages causés par les tempêtes et les débris soufflés. Les poteaux routiers peuvent être heurtés par des véhicules et les tireurs frustrés semblent incapables de rater les câbles aériens!.

I.2 Câble souterrain

Les câbles souterrains subissent moins d'extrêmes environnementaux que les câbles aériens. Les câbles souterrains sont généralement tirés dans des conduits ou enterrés directement dans le sol, le câble étant placé dans une tranchée étroite et profonde, qui est remblayée avec de la saleté ou bien labourée directement dans le sol.

I.2.1 Câble Barrière métallique contre l'humidité

Cela comprend un stratifié d'aluminium enduit de polymère appliqué longitudinalement, qui est lié à l'intérieur de la gaine en polyéthylène. Le ruban est étroitement formé autour de l'âme du câble et le chevauchement est soudé en faisant fondre le polymère avec de l'air chaud. Cela scelle hermétiquement le noyau contre l'entrée d'eau à travers la gaine, voir **Figure 20**.

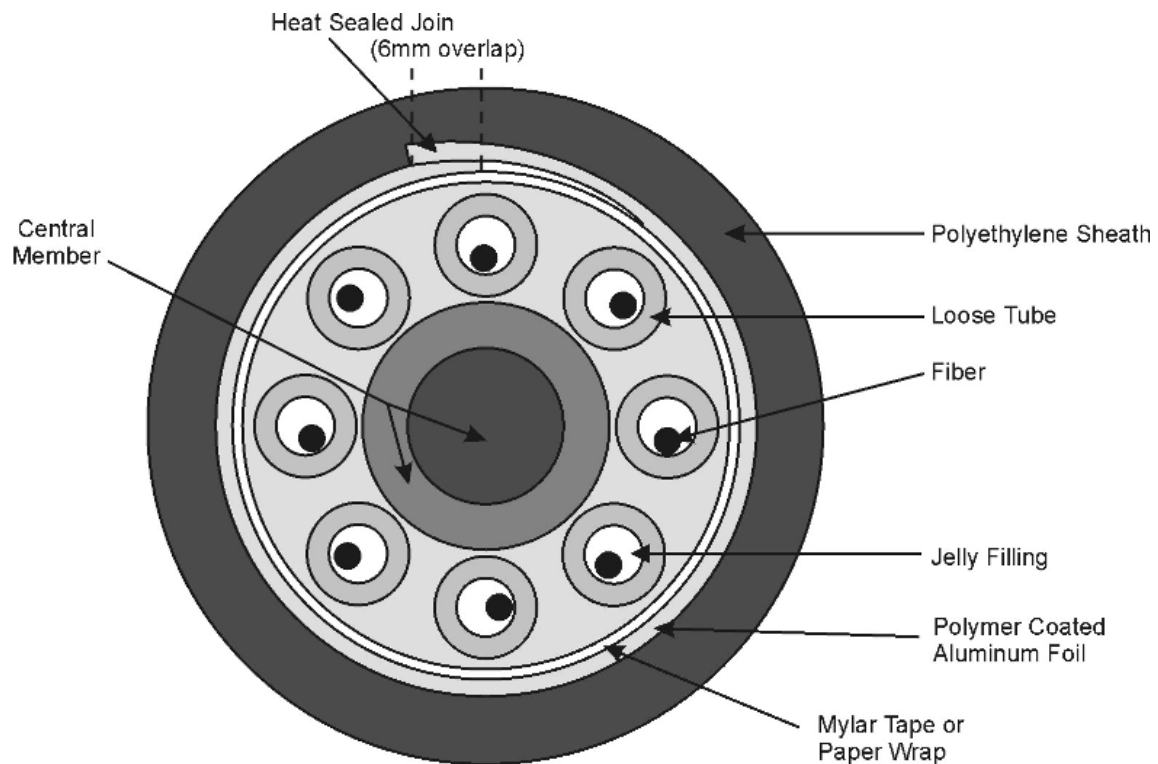


Figure 20. Câble Barrière métallique contre l'humidité.

Avantages

- Habituellement, la méthode la plus rentable d'installer des câbles à l'extérieur.
- Meilleure protection de l'environnement par rapport au câble aérien.
- Habituellement, plus sûr qu'un câble aérien.

Inconvénients

- Peut être perturbé par les travaux de terrassement, l'agriculture, les inondations, etc.
- Les rongeurs mordant les câbles peuvent être un problème dans certaines régions. Ce problème est surmonté avec l'utilisation d'une armure en ruban d'acier ou d'une tresse en acier, ou l'utilisation d'un conduit en plastique de plus de 38 mm de diamètre extérieur pour toutes les installations de câbles diélectriques. De plus, l'utilisation de revêtements en téflon sur la gaine rend le câble trop glissant pour qu'un rongeur puisse le saisir entre ses dents.

I.3 Câble sous-marin (subaquatique)

Les câbles sous-aqueux sont des câbles d'extérieur conçus pour une immersion continue dans l'eau. Alors que les câbles les plus sophistiqués sont utilisés pour les communications océaniques profondes par les opérateurs de télécommunications internationaux, il existe des applications pratiques pour les câbles sous-marins pour les petits utilisateurs. Ceux-ci incluent le câblage le long ou à travers les rivières, les lacs, les cours d'eau ou les canaux où les alternatives ne sont pas rentables. Le câble sous-aqueux est une option privilégiée pour le câblage directement enterré dans les zones soumises à des inondations ou avec une nappe phréatique élevée, où par exemple, si le câble était enterré à une profondeur d'environ 1 mètre, il serait immergé en permanence dans l'eau.

Les éléments de base d'un câble sous-aqueux sont illustrés à la **Figure 21**. Il s'agit essentiellement de constructions de câbles d'extérieur incorporant une unité hermétiquement scellée, utilisant une couche métallique soudée enveloppant le noyau de fibre.

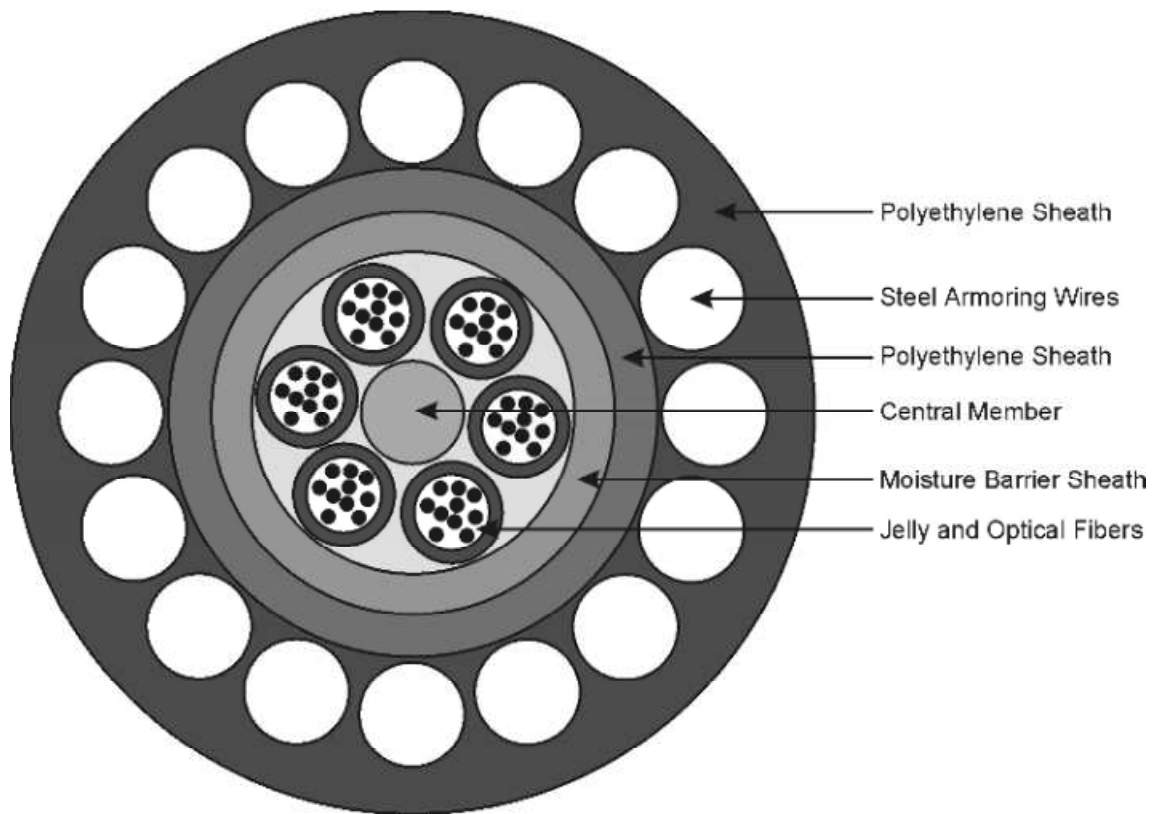


Figure 21. Câble sous-marin (subaquatique).

Avantages

- Installation moins chère dans certaines circonstances.

Inconvénients

- Le coût unitaire du câble est plus élevé.

I.4 Câble (intérieur) indoor

Les câbles intérieurs sont utilisés à l'intérieur des bâtiments et ont des propriétés dictées par les codes d'incendie. Ces câbles doivent minimiser la propagation des incendies et doivent être conformes à vos codes d'incendie locaux, tels que ceux décrits dans les codes électriques nationaux (NEC) aux États-Unis. Les câbles extérieurs contiennent généralement des composés bloquant l'humidité à base d'huile comme la vaseline. Celles-ci soutiennent la combustion et ainsi, leur utilisation à l'intérieur des bâtiments est strictement contrôlée dans certains pays. Les câbles extérieurs sont parfois épissés en câbles intérieurs appropriés à proximité des points d'entrée du bâtiment. Cela éviterait les frais liés à l'enrobage de longs câbles extérieurs à l'intérieur d'un conduit métallique, comme cela est requis dans certains pays.

Les fibres des câbles intérieurs et le câble intérieur lui-même sont (généralement) étroitement tamponnés. Le tampon étanche offre une résistance à l'eau adéquate pour les applications intérieures, mais ces câbles ne doivent pas être utilisés pour de longues longueurs de câbles en extérieur. Les fibres tamponnées peuvent avoir une résistance suffisante pour leur permettre d'être directement connectées à l'équipement à partir de la structure des fibres sans trancher les cordons de brassage.

I.4.1 Cordons de brassage

Conçus pour une manipulation répétée au niveau des panneaux de brassage, ceux-ci utilisent des couches internes de fibres d'aramide pour fournir une résistance à la traction tout en permettant une flexibilité considérable. Les câbles extérieurs et les câbles à tube lâche qui contiennent des fibres qui ne sont pas à tampon serré doivent être épissés à des câbles internes à tampon serré ou à des cordons de brassage pour la connexion à l'équipement, voir **Figure 22**.

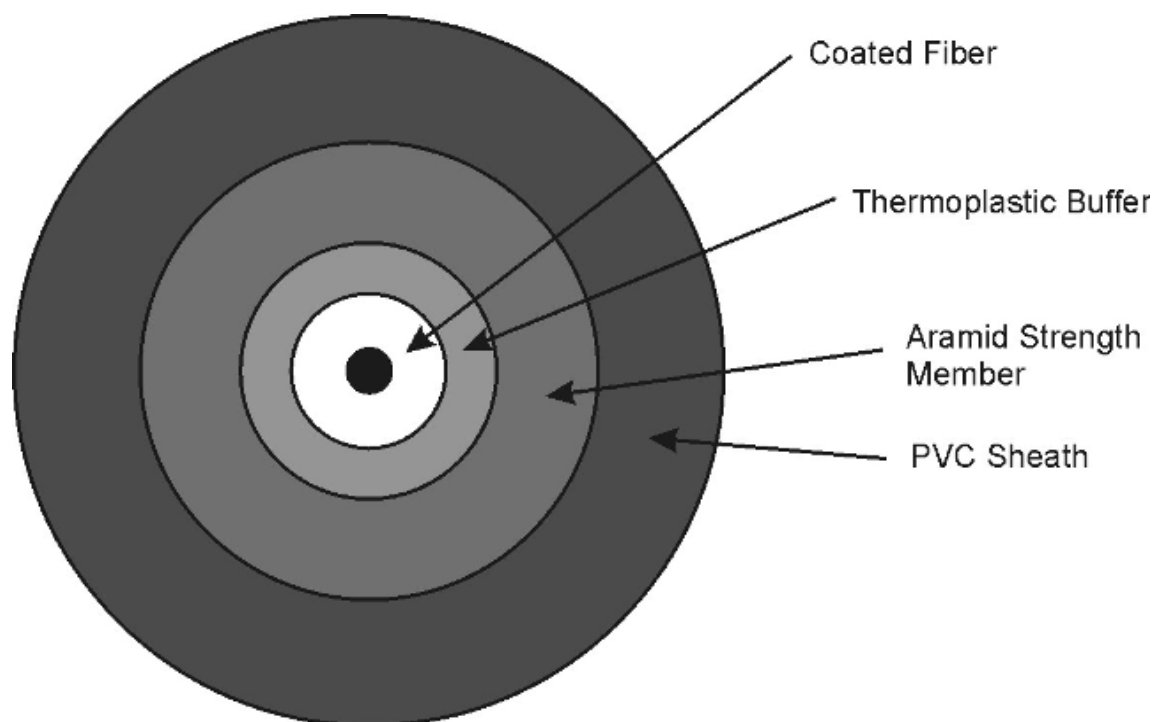


Figure 22. Cordon de brassage.

I.4.2 Câbles de distribution (breakout)

Ceux-ci ont des fibres étroitement tamponnées dans des sous-unités, qui ont une protection suffisante pour leur permettre de se détacher de la structure du câble et de passer directement à l'équipement, **Figure 23**.

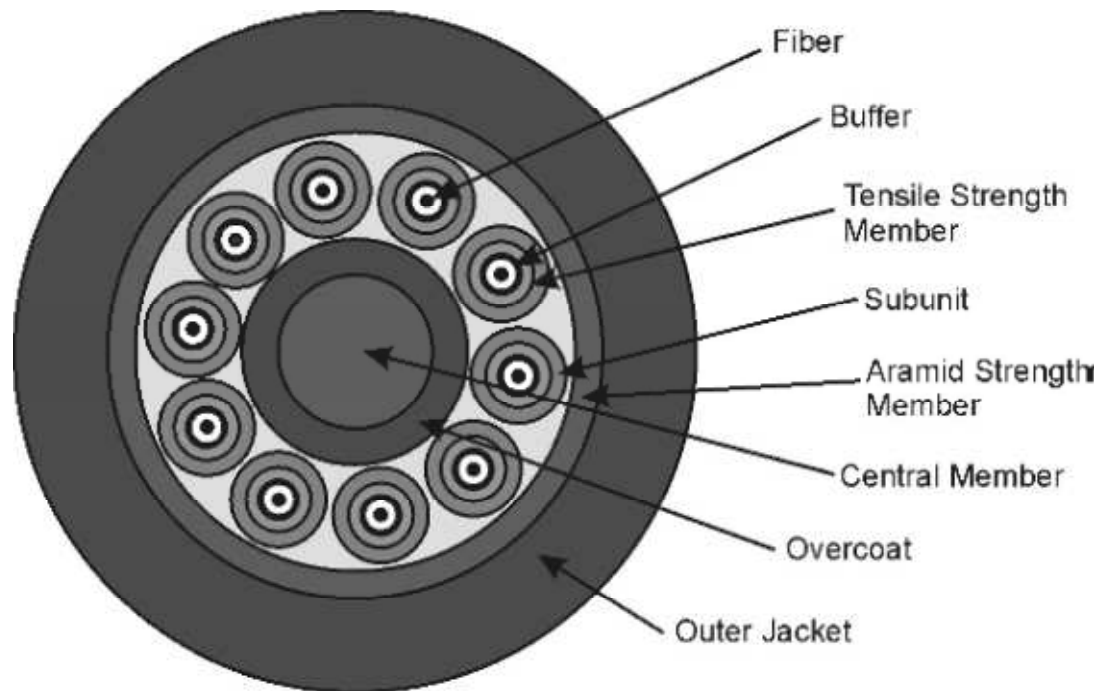


Figure 23. Câbles de distribution ou de dérivation (sous-unités à tampon serré).

I.4.3 Câbles élévateur

Ceux-ci ont de multiples fibres étroitement tamponnées dans une structure conçue pour résister à de longues courses verticales sans support, voir **Figure 24**.

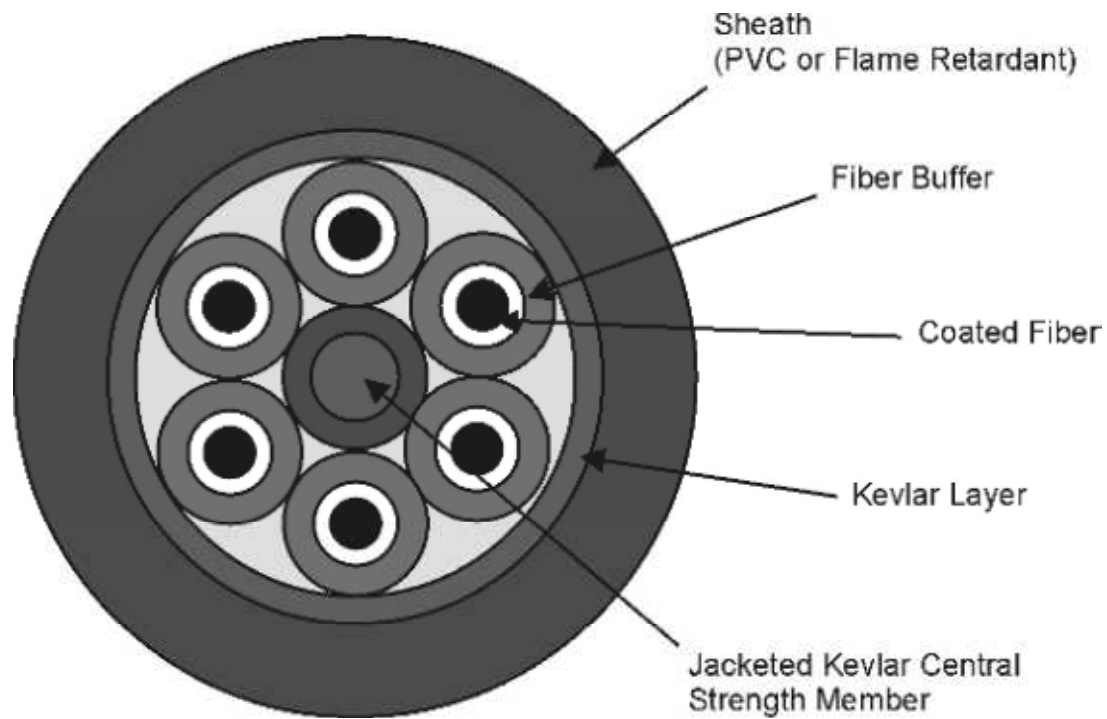


Figure 24. Câbles élévateur.

I.4.4 Câbles de plénum

Les câbles de plénum sont requis par les codes de sécurité incendie utilisés dans certains pays, dans les zones où les câbles sont installés directement dans le chemin de retour d'air d'un système de climatisation. Cela peut souvent inclure des installations de câbles au-dessus de plafonds suspendus. Dans certains cas, ces câbles peuvent devoir être installés dans des conduits ou avoir des matériaux de gaine conformes à la norme UL 910 qui, sauf sous une chaleur très intense, ne supportent pas la propagation des incendies. À moins que les câbles ne brûlent réellement, ils n'émettront pas de gaz toxiques et auront une faible émission de fumée. Ils émettent des gaz très toxiques s'ils finissent par brûler. Ces matériaux comprennent MEGOLON, qui est une polyoléfine chargée, un copolymère d'éthylène-acétate de vinyle rempli d'oxyde d'aluminium hydraté. Celui-ci n'a pas de teneur significative en halogène et ne peut donc émettre aucun acide halogéné lorsqu'il est brûlé, voir **Figure 25**.

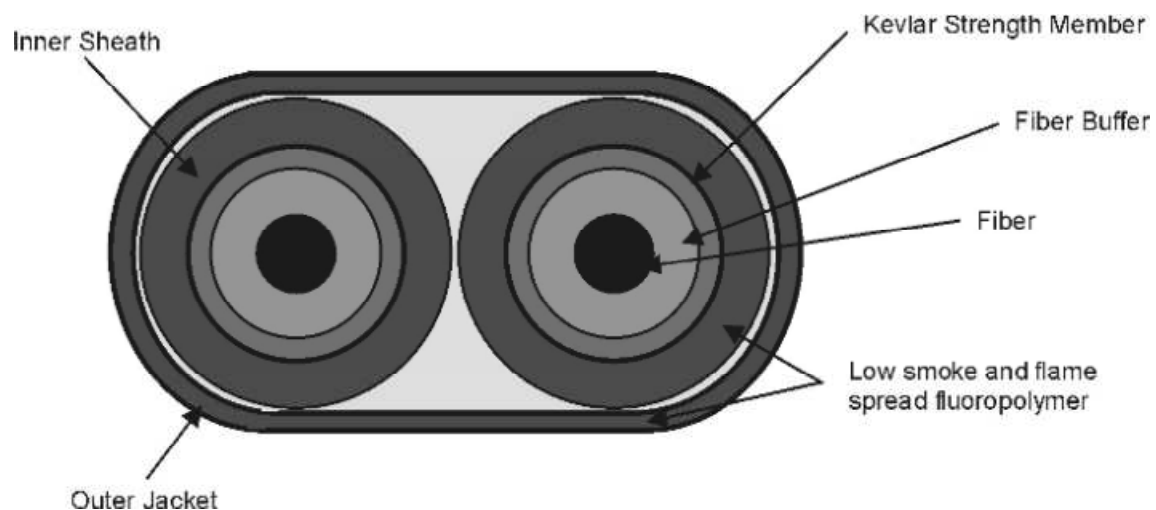


Figure 25. Câbles de plénum duplex.

I.4.5 Câbles à cordon zippé

Ce sont des cordes de petit diamètre ayant un renfort interne en Kevlar, ce qui les rend faciles à manipuler avec de bonnes propriétés de tension, de compression et de flexion. Ils sont utilisés avec des liaisons de données informatiques, des liaisons de terminaux et des connexions d'instrumentation à distance. Ils sont également utilisés pour les cordons de brassage, car les connecteurs peuvent être fixés fermement à la structure du cordon, voir **Figure 26**.

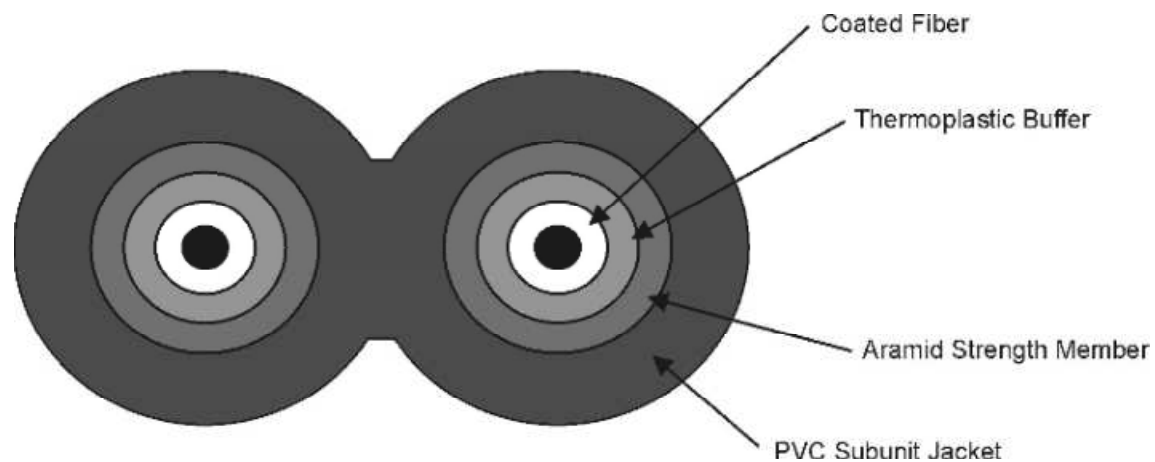


Figure 26. Câble à cordon zippé.

Avantages des câbles intérieurs

- Capacité de connecter des fibres tamponnées serrées directement à l'équipement sans panneaux de brassage.
- Conformité aux codes d'incendie.

Inconvénients des câbles intérieurs

- Ne convient pas aux longs trajets externes.
- Atténuation plus élevée que les fibres tampons lâches.
- Ne convient pas aux variations extrêmes de température.

II. Raccordement des fibres optiques

Ce paragraphe identifiera les principaux problèmes liés à la connexion des fibres entre elles et aux dispositifs optiques, tels que les sources et les détecteurs. Cela peut être fait à l'aide d'épissures ou de connecteurs. Une épissure est une connexion permanente et un connecteur est utilisé lorsque la connexion doit être connectée et déconnectée à plusieurs reprises. Un appareil utilisé pour connecter trois fibres ou appareils ou plus est appelé un coupleur. Ce paragraphe examinera les domaines suivants :

- Différentes techniques d'épissage
- Procédures de jonction des fibres étape par étape
- Types de connecteurs pratiques
- Procédures pas à pas pour fixer les connecteurs aux fibres
- Le fonctionnement des coupleurs optiques

Le principal paramètre préoccupant lors de la connexion de deux dispositifs optiques ensemble est l'atténuation ; c'est-à-dire la fraction de la puissance optique perdue dans le processus de connexion. Cette atténuation est la somme des pertes causées par un certain nombre de facteurs, les principaux étant :

- Désalignement latéral des noyaux de fibres
- Différences de diamètres de noyau
- Désalignement des axes des fibres
- Différences numériques d'ouverture des fibres
- Réflexion aux extrémités des fibres
- Espacement des extrémités des fibres
- Finition et propreté des fibres

L'analyse théorique des pertes causées par ces facteurs est compliquée par le fait que la distribution de la puissance à travers la face de la fibre est généralement inconnue et varie en fonction du type et de la longueur des fibres, de la méthode d'excitation, etc. les connexions illustreront la sensibilité de l'atténuation à divers mécanismes de perte.

II.1 Désalignement latéral des cœurs des fibres

Ici, on suppose que les fibres de même diamètre sont déplacées d'une distance d , et sont par ailleurs parfaitement alignées comme le montre la **Figure 27**. Pour une analyse simple dans le pire des cas, il est supposé que la puissance est uniformément répartie entre les noyaux de fibres.

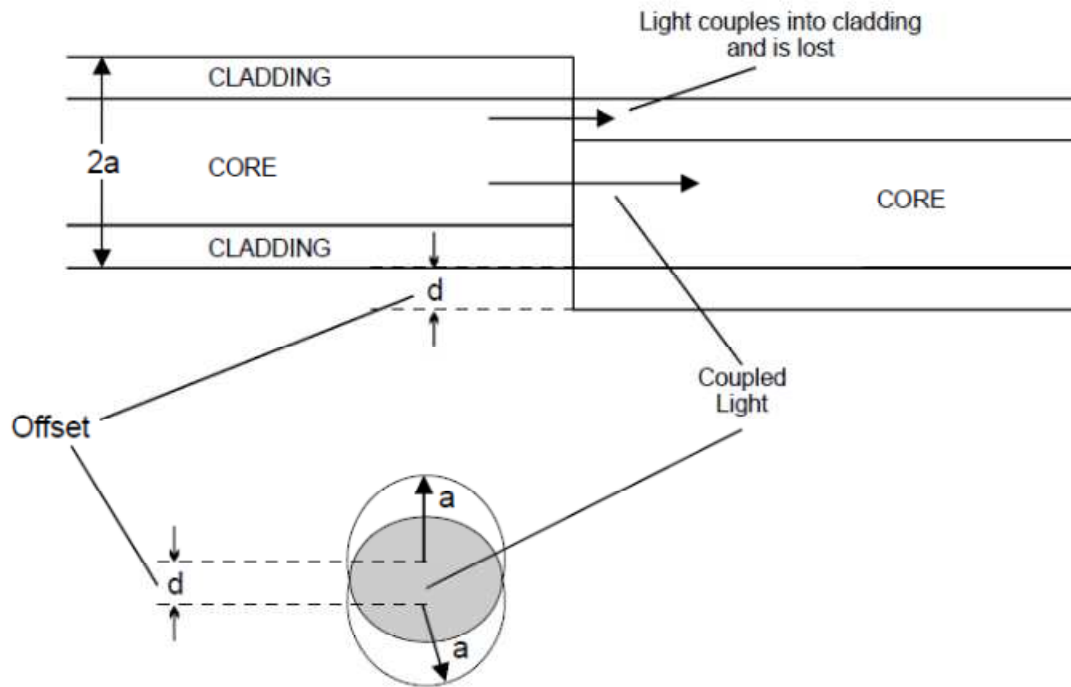


Figure 27. Désalignement latéral des cœurs des fibres.

L'efficacité de couplage η est calculée à partir du rapport de la zone de chevauchement à la zone centrale. Pour les petits déplacements où d est inférieur à 20% du rayon du noyau, η peut être approximé comme :

$$\eta = 1 - \frac{2d}{\pi a} \quad (23)$$

$$\text{Atténuation} = 10 \log_{10} \eta \quad \text{dB} \quad (24)$$

Cette équation est tracée sur la **Figure 28** pour une fibre multimode à indice de pas, et montre l'importance de l'alignement latéral des fibres dans le processus de connexion. Pour une fibre multimode à index progressif, l'hypothèse d'une distribution uniforme de la puissance sur la fibre n'est pas déraisonnable, mais il surestime la perte pour les fibres à indice gradué où la distribution est moins uniforme et plus concentrée sur l'axe.

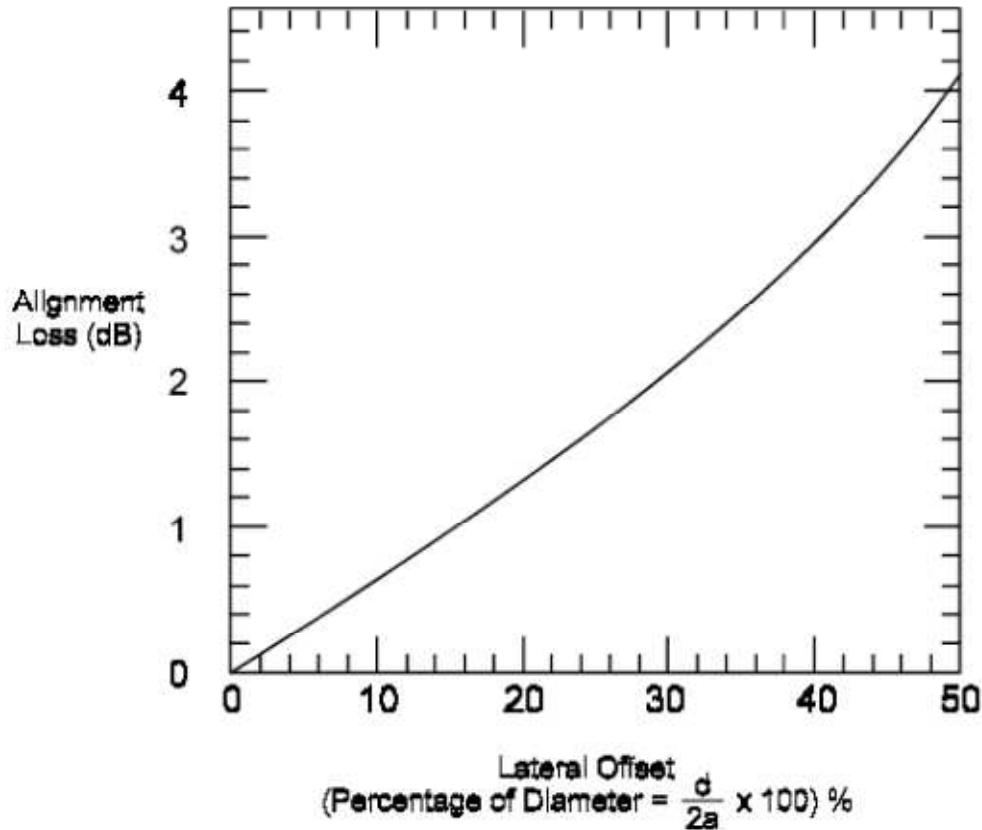


Figure 28. Perte d'alignement latéral typique.

II.2 Différences de diamètres des cœurs

Des asymétries similaires des zones d'émission et de collecte de l'interface peuvent se produire si les fibres sont parfaitement alignées mais ont des diamètres de noyau différents. Pour les fibres de diamètre émetteur d_1 et de diamètre collecteur d_2 , la perte est donnée par la formule :

$$\text{Perte} = 10 \log_{10} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \quad \text{dB} \quad (25)$$

Prenons l'exemple d'une fibre nominale de 50 μm avec une tolérance de fabrication typique de $\pm 3 \mu\text{m}$. Il est possible d'avoir le pire cas de non-concordance d'une fibre avec un noyau de 53 μm joint à l'un de 47 μm . En supposant une distribution uniforme de la lumière sur le diamètre de la fibre, cela entraîne une perte de 21% de la lumière et équivaut à une perte d'environ 1 dB. Il s'agit d'une estimation prudente du pire des cas, car la lumière n'est généralement pas uniformément distribuée.

Cet effet est grave si différents types de fibres sont connectés, comme une fibre multimode de 62.5 μm connectée à une fibre de 50 μm où une perte de plus de 1.9 dB peut être attendue.

Notez qu'il n'y a aucune perte significative encourue en passant d'une petite fibre à une grande, qui peut collecter la totalité de la lumière incidente.

II.3 Désalignement angulaire des fibres

Lorsque les axes des fibres ne sont pas alignés, la lumière pénètre dans la seconde fibre à des angles plus importants et selon l'ouverture numérique NA, certains rayons ne peuvent pas être confinés au cœur. Ceci est illustré à la **Figure 29**.

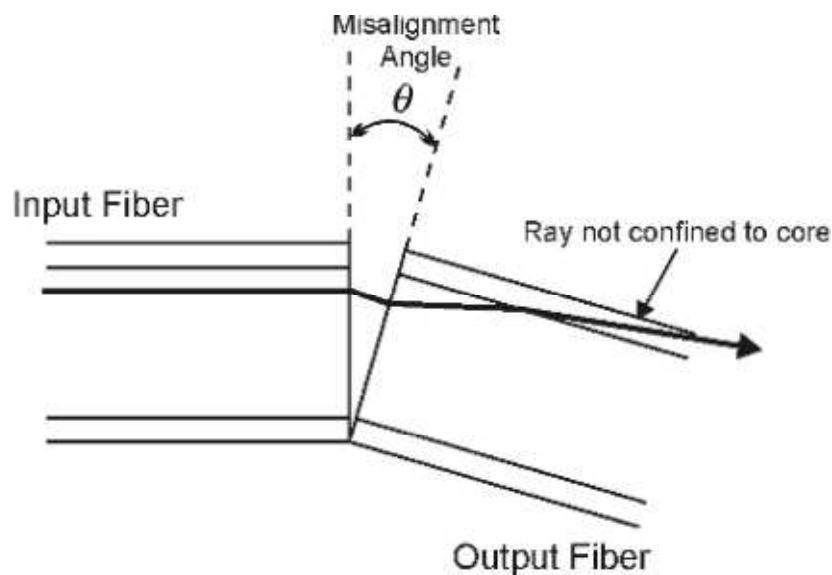


Figure 29. Désalignement angulaire des fibres.

L'efficacité de couplage η pour les petits désalignements angulaires de θ radians est donnée par :

$$\eta = 1 - \frac{N_0 \theta}{\theta_{NA}} \quad (26)$$

La perte est calculée comme :

$$\text{Perte} = 10 \log_{10} \eta \quad \text{dB} \quad (27)$$

Cette équation de perte est tracée sur la **Figure 30** pour certaines fibres à indice de pas multimode. On peut voir que la perte diminue avec les ouvertures numériques plus grandes, attribuables au fait qu'à une grande NA, le rayonnement est distribué sur de grands angles, donc de petites erreurs

angulaires affectent moins la puissance totale. L'effet de l'indice d'un liquide d'adaptation d'indice de réfraction $N_o = 1.5$ sur une fibre de verre est également illustré à la **Figure 30**. Cela montre que la perte de désalignement angulaire augmente par rapport à l'absence d'appariement d'indice ($N_o = 1$).

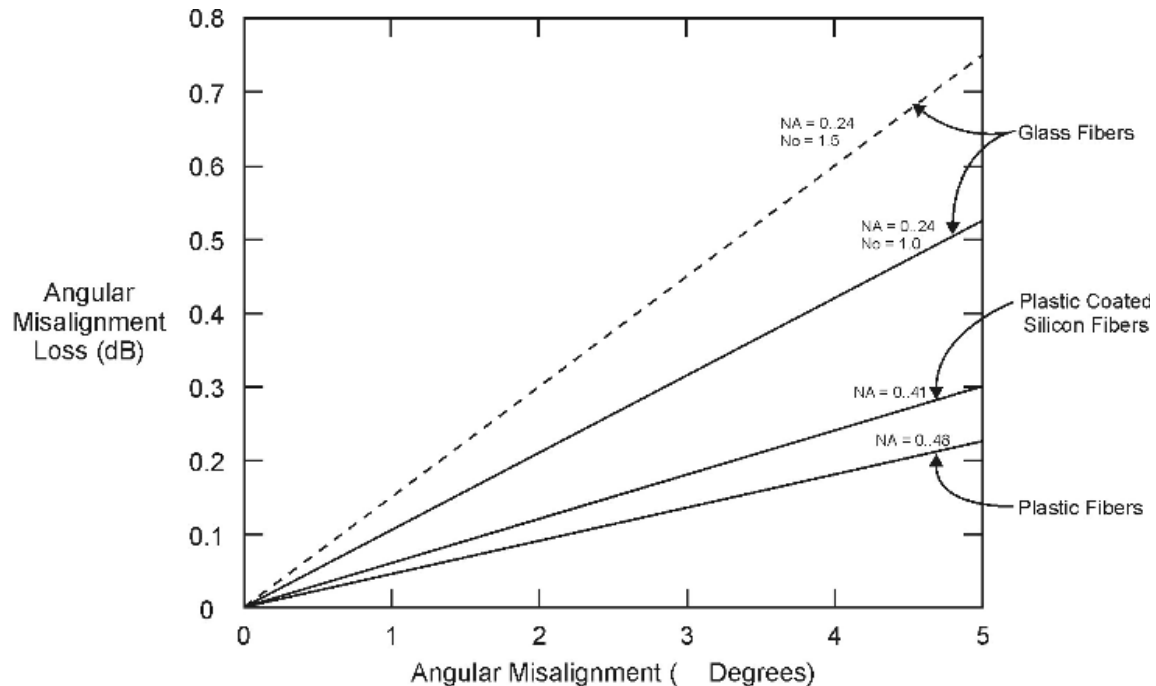


Figure 30. Pertes typiques de désalignement angulaire.

II.4 Différences des ouvertures numériques

Des différences dans l'ouverture numérique (NA) des fibres peuvent également contribuer à la perte d'interface. Si la fibre réceptrice a un NA plus petit que la fibre source, la lumière entrera dans la fibre en dehors de l'angle d'acceptation, comme illustré à la **Figure 31**. Ensuite, cette lumière ne sera pas confinée au cœur et, par la suite, s'échappera.

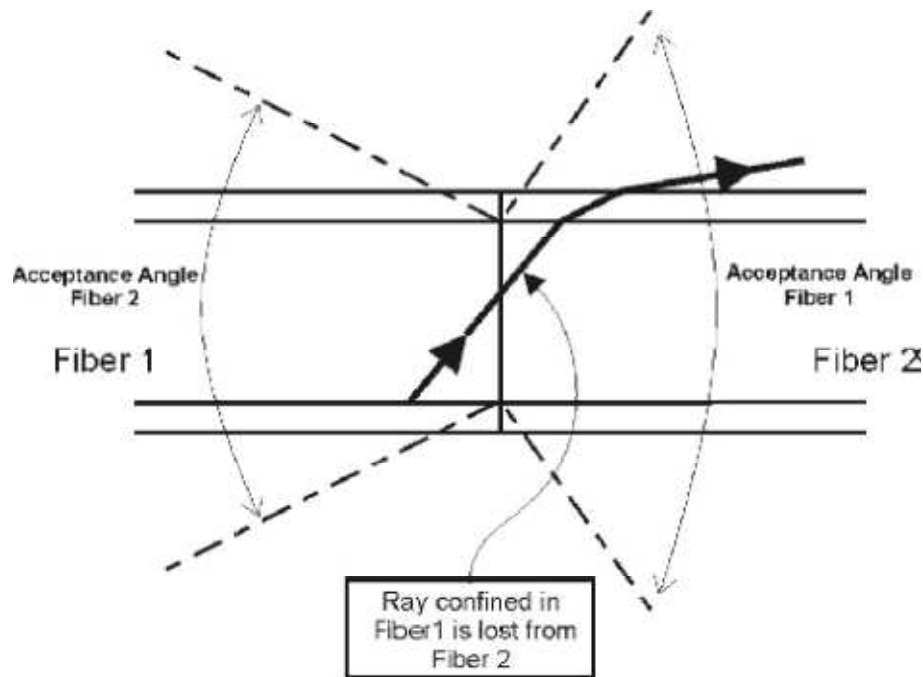


Figure 31. Différences des ouvertures numériques.

La perte peut être quantifiée par la formule suivante :

$$\text{Perte} = 10 \log_{10} \left(\frac{NA_1}{NA_2} \right)^2 \quad \text{pour} \quad NA_1 > NA_2 \quad (28)$$

Cette équation est représentée à la **Figure 32** et elle suppose une distribution modale uniforme. Cela vaut également pour les fibres à pas multimode et à indice progressif. Il n'y a pas de perte si la fibre réceptrice a un NA supérieur à la fibre source.

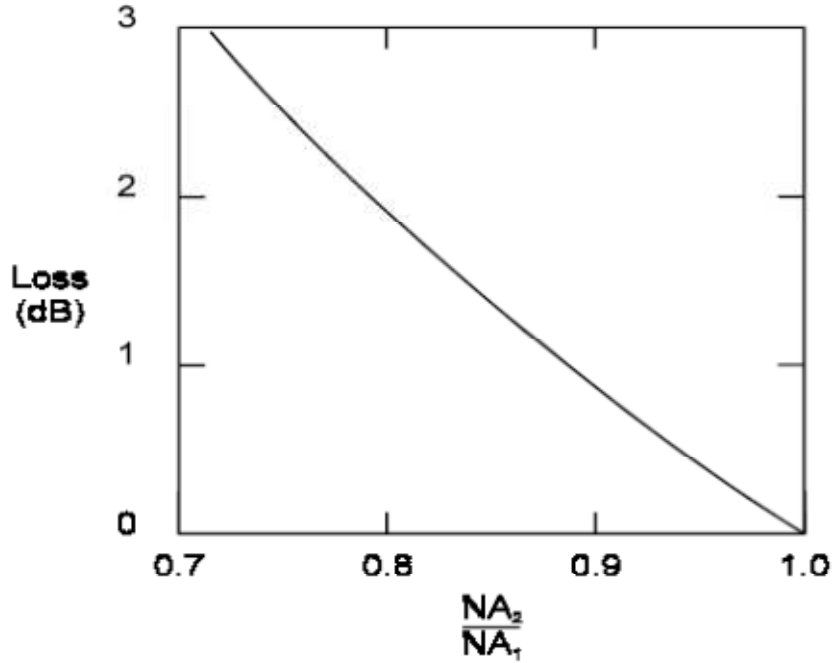


Figure 32. Effet des différentes NA.

II.5 Réflexion au bout des fibres

Lorsqu'il y a un espace entre les fibres, la réflexion de Fresnel a lieu à chacune des limites air-fibre. Si l'on suppose par souci de simplicité que toute la lumière est alignée pour passer directement entre les milieux d'indices de réfraction N_1 et N_2 , alors la perte est donnée par la formule :

$$\text{Perte} = 10 \log_{10}(1 - \eta) \text{ dB} \quad (29)$$

où η est le coefficient de réflexion et est égal à :

$$\eta = \left(\frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right)^2 \quad (30)$$

Pour une interface air-verre (N_1 est du verre à 1.5 et N_2 est de l'air à 1.0), cela donne une réflectance de 4% (0.177 dB); ainsi, les deux surfaces réfléchissantes ajoutent 0.35 dB. Cela peut être réduit en utilisant un gel correspondant à l'indice, avec un indice de réfraction plus proche de celui du verre, mais pas nécessairement une correspondance précise. Pour un gel d'indice de réfraction 1.4, avec un verre d'indice de réfraction 1.5, la formule ci-dessus montre que la perte de Fresnel est de 0.005 dB par surface ou de 0.01 dB au total.

Comme le montre la **Figure 30** de désalignement angulaire, une telle correspondance d'indice augmente la sensibilité au désalignement angulaire. De nombreuses épissures et connecteurs mécaniques pratiques intègrent des gels d'indexation. Il peut s'agir de liquides épais et visqueux comme la glycérine ou la graisse de silicone pour les joints non collés ou les colles époxy transparentes.

La réflexion de l'extrémité des fibres est également appelée réflexion arrière. La perte de retour optique (OPL) est donnée par le rapport de la réflexion arrière à la puissance d'entrée :

$$\text{OPL(dB)} = -10 \log(\text{puissance réfléchie} / \text{puissance d'entrée}) \quad (31)$$

La réflexion à partir des extrémités des fibres peut être un facteur majeur d'erreurs sur les systèmes monomodes à haut débit. Cela se produit lorsque la lumière réfléchie interfère avec la diode laser, provoquant un saut de mode. Cela peut être réduit par l'utilisation de clivages non perpendiculaires, sur des épissures mécaniques, pour garantir que les réflecteurs arrière sont absorbés dans le revêtement en fibre. Au niveau des connecteurs, une technique similaire est utilisée pour éviter que les réflexions provoquent des interférences. L'extrémité des fibres est normalement polie sur une surface légèrement convexe par l'action d'une rondelle de polissage.

II.6 Séparation des extrémités (bout) des fibres

Lorsque les fibres sont séparées, des pertes se produisent en raison de la diffusion de la lumière à partir des fibres, comme illustré à la **Figure 33**. La lumière sort de la fibre source dans un faisceau conique avec l'angle d'étalement dépendant du NA. Avec un espace séparant les fibres, une partie de la lumière transmise n'est pas interceptée par la fibre réceptrice. Les fibres avec une grande NA ont des pertes de séparation plus importantes car leurs faisceaux divergent plus rapidement. L'index correspondant liquide placé dans l'écart réduit la quantité de propagation, et donc la perte.

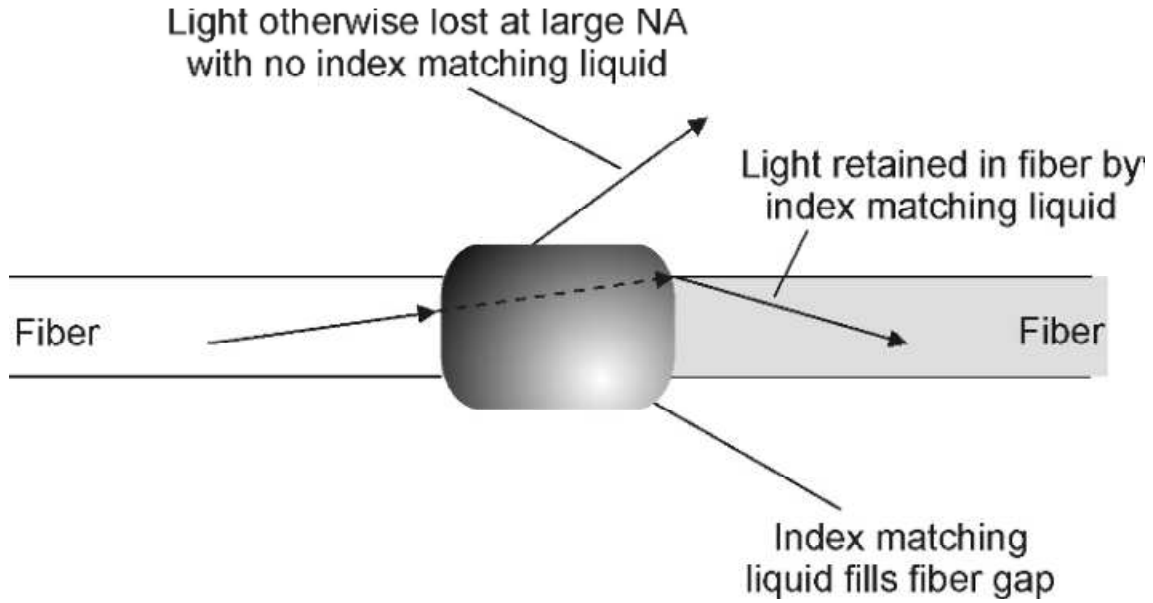


Figure 33. L'indice du gel d'adaptation réduit les effets de séparation des extrémités.

La perte pour les petites séparations est donnée par la formule :

$$\text{Perte} = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{sNA}{4aN_0} \right\} \quad \text{dB} \quad (32)$$

Où N_0 est l'indice de réfraction du gel d'adaptation d'indice et a est le rayon central de la fibre. Une distribution de puissance uniforme est supposée. Cette équation est représentée sur la **Figure 34** pour différents types de fibres, et l'effet bénéfique du gel d'adaptation d'indice ($N_0 = 1.5$) peut être vu.

Pour les fibres monomodes, une analyse similaire montre que l'intervalle d'extrémité de fibre est encore moins critique, avec un intervalle de 10 fois le rayon du noyau produisant une perte inférieure à 0.4 dB.

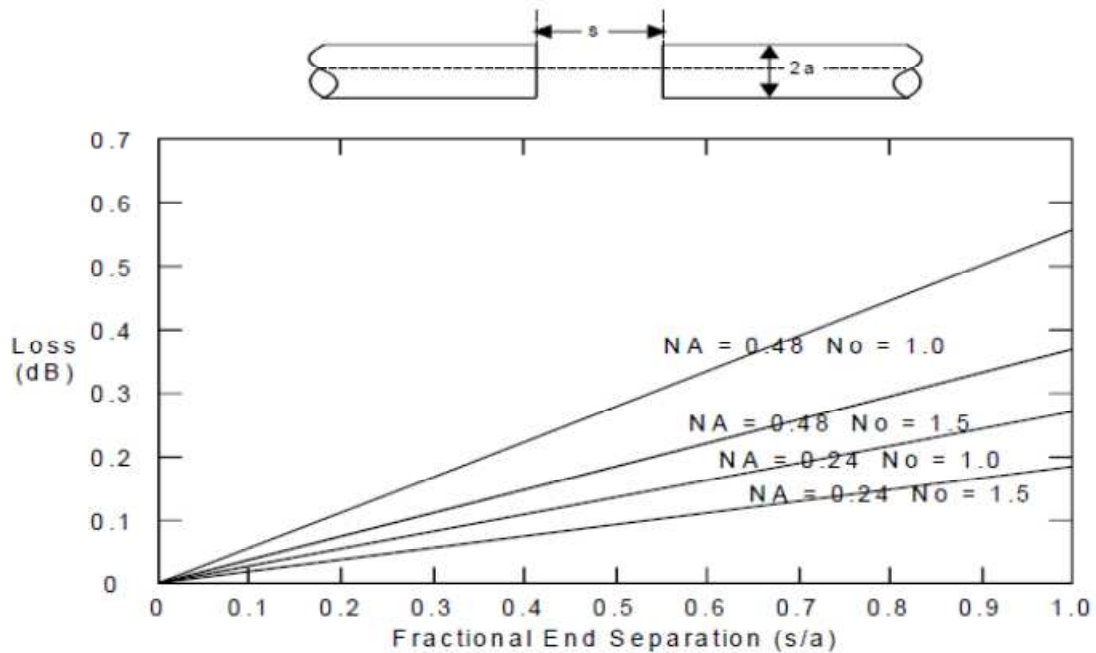


Figure 34. Pertes typiques des séparation des extrémités (bout).

II.7 Finition et propreté des fibres

L'extrémité de la fibre a besoin d'une finition lisse sur son noyau pour éviter que la lumière ne soit diffusée sur la surface rugueuse. Ceci est réalisé en nettoyant les extrémités des fibres de verre ou en polissant la fibre.

Les fibres doivent être propres car les particules de saleté peuvent disperser ou absorber la lumière. La préparation des joints implique toujours de nettoyer les fibres, normalement avec un chiffon non pelucheux et de l'alcool isopropylique.

II.8 Résumé des pertes de connexion (raccordement)

Nous avons vu dans la discussion ci-dessus des divers mécanismes de perte impliqués dans la connexion des fibres multimodes que le plus important est le désalignement axial des fibres.

Avec les connecteurs, la perte minimale à travers l'interface verre/air entre eux sera toujours d'environ 0.35 dB, sauf si un gel d'indexation est utilisé.

Chapitre III

LES EMETTEURS ET LES RECEPTEURS DE LUMIERE

Contenu

La Diode Electroluminescente (LED)

Le Laser

La photodiode PIN et la photodiode à avalanche (APD).

I. Sources optiques

Les sources optiques efficaces pour la transmission par fibre optique doivent avoir plusieurs propriétés importantes :

- Être capables de coupler efficacement le petit cœur de la fibre, aussi petit que 8.5 micromètres pour les fibres monomodes.
- Facilement modulées par des signaux électriques pour transmettre des données, avec une bonne linéarité pour éviter les harmoniques et la distorsion d'intermodulation.
- Fournir une puissance de sortie optique élevée.
- Ont une grande fiabilité.
- Petite taille et poids.
- À bas prix.

Les diodes électroluminescentes à jonction (Light Emitting Diode ; LED) et les diodes laser (Laser Diode ; LD) remplissent bon nombre de ces exigences et nous allons maintenant examiner leurs propriétés en détail.

I.1. Diodes électroluminescentes (LED)

Une simple diode électroluminescente est réalisée comme une jonction de deux régions semi-conductrices, chacune étant dopée avec des impuretés pour donner des caractéristiques électriques appropriées. La région de type «p» contient des impuretés qui ont moins d'électrons que d'atomes dans le réseau cristallin et créent ainsi des atomes avec une charge positive nette. Ceux-ci sont connus sous le nom de «trous» car ils créent de la place pour que les électrons se déplacent dans le réseau cristallin. De même, les régions de type «n» utilisent des impuretés, qui fournissent plus d'électrons que d'atomes et donnent effectivement des électrons afin que les électrons flottent dans le réseau cristallin. Les semi-conducteurs optiques les plus importants sont constitués d'éléments des groupes IIIa et Va du tableau périodique énumérés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. Matériaux semiconducteurs optiques.

Group IIIa	Group Va
Aluminum (Al)	Nitrogen (N)
Gallium (Ga)	Phosphorus (P)
Indium (In)	Arsenic (As)
	Antimony (Sb)

I.2 Principes de fonctionnement de base des LED

Lorsqu'une tension positive est appliquée à la région p et une tension négative appliquée à la région, les électrons et les trous s'écoulent vers la jonction des deux régions où ils se combinent. Lorsqu'un électron se combine avec un trou, l'atome revient à son état neutre et l'énergie est libérée, après avoir été convertie en énergie optique sous forme de photons. Dans sa forme la plus simple, l'énergie rayonnée par la LED est causée par la recombinaison des

électrons et des trous, qui sont injectés dans la jonction par la tension de polarisation directe. La **Figure 35** illustre ce processus.

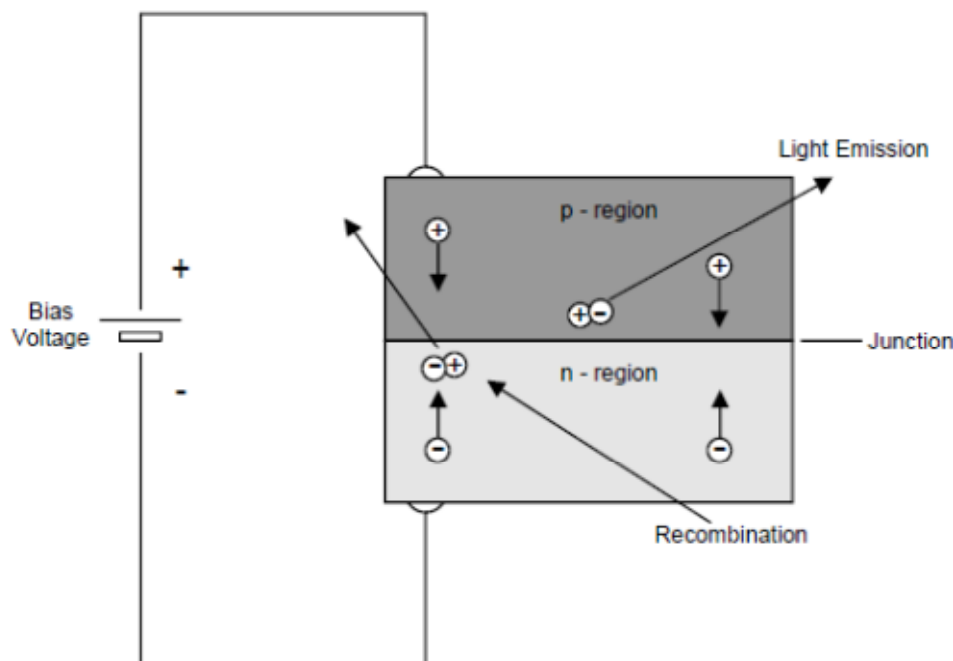


Figure 35. Fonctionnement LED de base.

La théorie des bandes fournit une explication simple des émissions de semi-conducteurs. Il existe deux bandes d'énergie autorisées, séparées par une région interdite appelée bande interdite, comme le montre la **Figure 36**. Au niveau supérieur dans la région n, connue sous le nom de bande de conduction, les électrons non liés sont libres de se déplacer, tandis qu'au niveau inférieur dans la région p, connue sous le nom de bande de valence, les trous non liés sont libres de se déplacer.

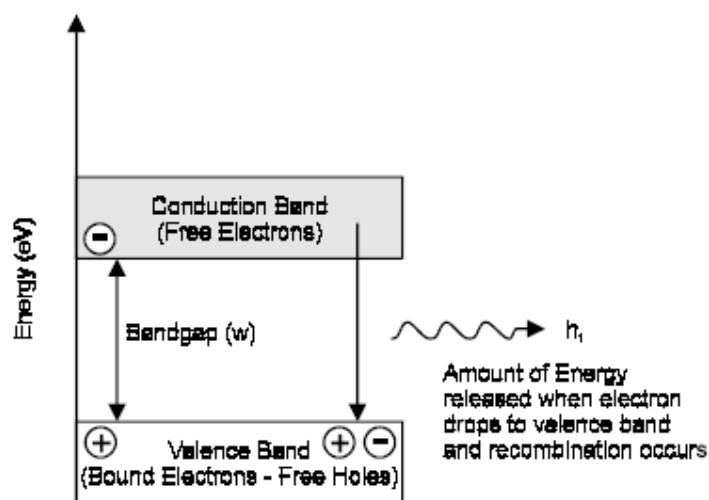


Figure 36. Bandgap détermine l'émission d'énergie.

La taille de la bande interdite détermine l'énergie du photon émis. Différents matériaux semi-conducteurs ont différentes énergies de bande interdite et l'énergie d'intervalle (W) en électrons volts (eV) peut être liée à la longueur d'onde (λ) par l'équation :

$$\lambda = 1240/W \text{ nanomètres} \quad (33)$$

Les LED habituelles appliquées dans les systèmes à fibres optiques utilisent de l'arséniure de gallium aluminium (GaAlAs) pour des longueurs d'onde de 800 à 900 nm et de l'arséniure de gallium (GaAs) pour 930 nm. Les LED à utiliser avec des fibres plastiques doivent fonctionner à environ 660 nm et sont produites avec des composés de phosphore d'arséniure de gallium (GaAsP). Divers composés de phosphore d'arséniure d'indium et de gallium (InGaAsP) sont utilisés pour des longueurs d'onde plus longues de 1300 et 1550 nm. Les types de semi-conducteurs, leurs énergies respectives de bande interdite et leurs longueurs d'onde sont indiqués dans le **Tableau 2**.

Tableau 2. Énergies et longueurs d'onde des bandes interdites des semi-conducteurs.

Semiconductor	Bandgap Energy (eV)	Wavelength (nm)
GaAsP	1.88	660
GaAlAs	1.55–1.38	800–900
GaAs	1.33	930
InGaAsP	0.95–0.80	1300–1550

I.3 Géométrie de la LED

Un ingrédient essentiel des sources optiques est la capacité de coupler la lumière dans le petit noyau de fibre. Les LED de base décrites ci-dessus émettent de la lumière dans toutes les directions. Il est donc difficile de coupler la lumière à la fibre. Diverses structures internes peuvent être utilisées pour concentrer la lumière en un faisceau étroit. Deux structures couramment utilisées sont la diode Burrus et les diodes émettrices.

La structure de diode Burrus ou puits gravé utilise un trou gravé dans le substrat couplé à des structures internes pour confiner les émissions lumineuses. Une fibre peut être directement insérée dans le trou en haut de l'appareil pour collecter le flux lumineux.

Les diodes électroluminescentes (ELED) génèrent la lumière dans une couche de jonction active mince et étroite, comme illustré à la **Figure 37**. La zone

d'émission peut être aussi petite que quelques micromètres d'épaisseur et dix micromètres de largeur. La structure intègre des fonctionnalités conçues pour confiner le flux lumineux et le guider vers une extrémité de l'appareil. Ces dispositifs produisent généralement un flux lumineux inférieur à celui des LED de surface en raison de la plus petite section transversale de la zone d'émission active, mais le faisceau est couplé plus efficacement à la fibre. Les faisceaux plus brillants et plus étroitement collimatés nécessitent une construction plus complexe, associée à des structures plus coûteuses et ont une plus grande génération de chaleur.

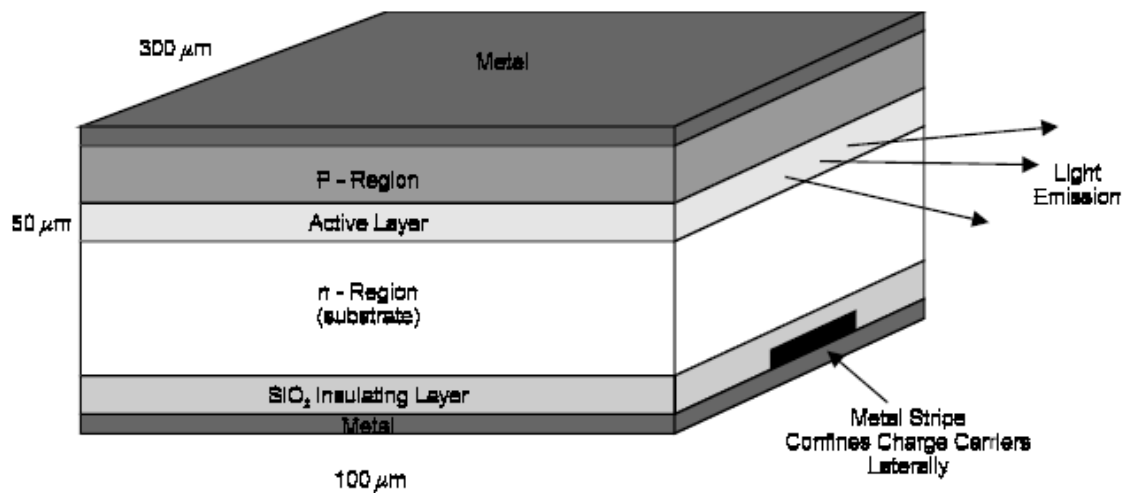


Figure 37. LED émettrice.

I.4 Caractéristiques de fonctionnement

I.4.1 Puissance de sortie et consommation de puissance

La puissance de sortie n'est généralement pas supérieure à 1 mW mais peut être aussi faible que plusieurs microwatts. La puissance de sortie d'une LED est liée linéairement au courant d'attaque direct. Les LED à fibre optique fonctionnent généralement à des courants de 20 à 100 mA et nécessitent des tensions de polarisation directe de 1,2 à 1,8 volts. Avec une dissipation de puissance allant jusqu'à 180 mW à partir du petit appareil, une conception de dissipateur de chaleur appropriée est nécessaire pour éviter des augmentations de température excessives et par conséquent une fiabilité et une durée de vie de l'appareil réduites. À mesure que les LED vieillissent, leur puissance de sortie diminue.

I.4.2 Largeurs spectrales

La puissance totale émise par l'émetteur est répartie sur une plage de longueurs d'onde réparties autour de la longueur d'onde centrale. Elle est quantifiée comme la largeur spectrale, h_λ , qui est la largeur de puissance optique de 3 dB, généralement mesurée en nm. Une LED typique fonctionnant à 850 nm aura une largeur spectrale d'environ 40 nm et une LED fonctionnant à 1300 nm, une largeur d'environ 80 nm. De larges largeurs spectrales provoquent une dispersion chromatique accrue des impulsions lumineuses, car elles se propagent à travers la fibre.

I.4.3 Durée de vie d'exploitation

La durée de vie d'une LED est le temps nécessaire à la sortie de lumière pour réduire de moitié sa valeur initiale (c'est-à-dire une baisse de 3 dB à sa longueur d'onde de fonctionnement centrale). Les bonnes LED devraient avoir une durée de vie d'environ 105 heures (11 ans).

I.4.4 Modulation

La modulation numérique de la sortie LED est simplement obtenue en utilisant une source de courant allumant ou éteignant la LED.

La modulation analogique nécessite que la LED ait une polarisation CC appliquée pour garantir que la LED est polarisée en direct à tout moment.

I.4.5 Effets de la température

Des plages de températures de fonctionnement de -65° à 125° C sont possibles. La puissance de sortie diminue à mesure que la température de jonction augmente, généralement au taux de 0,012 dB / $^\circ$ C.

I.4.6 Dispositifs LED pratiques

Les puces LED doivent être montées sur des boîtiers appropriés pour dissiper efficacement la chaleur et permettre à la fibre d'être couplée à la source lumineuse. De nombreuses approches différentes sont utilisées par les fabricants, notamment des fenêtres ou des lentilles transparentes dans des capuchons métalliques, des trous dans des emballages pour l'insertion et le collage des fibres, la fixation des queues de cochon directement sur la puce ou la fourniture de micro-lentilles sur les puces pour collimater le faisceau. Deux d'entre eux sont illustrés à la **Figure 38**. L'utilisation d'une grande lentille comme couvercle de l'appareil est illustrée à la **Figure 38 (a)**. Cela produit un grand faisceau en raison de la distance séparant la lentille et la LED et, en tant

que tel, ne convient qu'aux fibres de grand diamètre. La **Figure 38 (b)** montre l'utilisation d'une micro-lentille montée directement sur la LED. Dans ce cas, le faisceau ne s'élargit pas avant d'être collimaté par la lentille et peut donc être efficacement couplé à des diamètres de noyau de fibre de 50 μm .

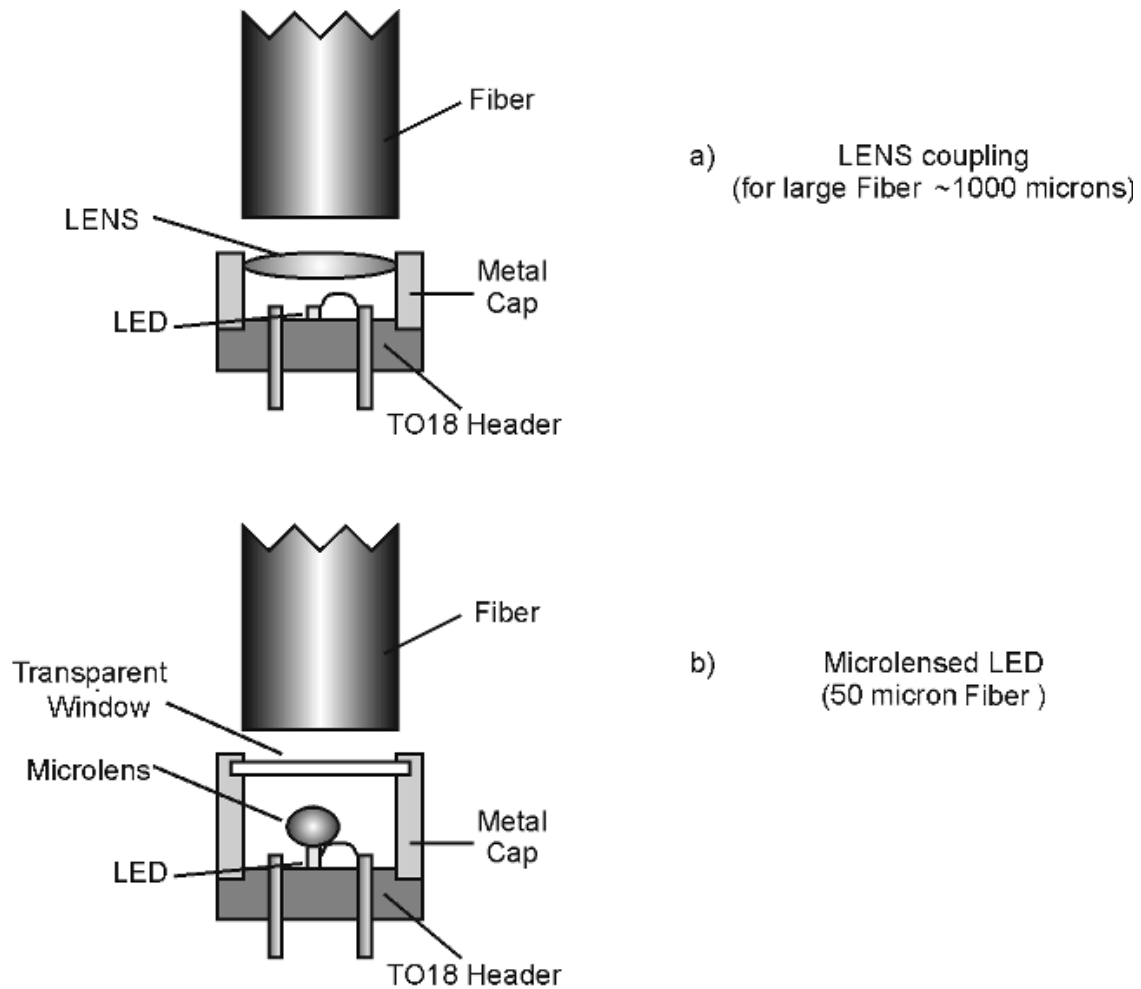


Figure 38. Packs LED pratiques.

II. Diodes Laser

II.1. Principes de base du fonctionnement du laser

LASER signifie amplification de la lumière par l'émission stimulée de rayonnement. Les LED et les lasers utilisent des principes de fonctionnement très similaires. Dans le paragraphe I.2, nous avons vu que la lumière est émise par une LED lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie élevé à un niveau inférieur. Lorsque cela se produit sans influence extérieure, il s'agit de l'émission spontanée. Cela se produit dans certaines matières radioactives. Avec la LED discutée dans la section précédente, une tension de polarisation directe a été utilisée pour stimuler l'émission. Un électron assis au niveau d'énergie supérieur peut également être stimulé à descendre au niveau inférieur par un photon avec la bonne quantité d'énergie. De cette façon, le photon externe peut stimuler l'émission d'un second photon à la même longueur d'onde.

L'action du laser se fait par résonance optique. La structure du laser est très similaire à une LED de bord, ayant une région active mince et étroite avec l'ajout de facettes d'extrémité réfléchissantes et de côtés réfléchissants comme indiqué sur la **Figure 39**. Dans ce résonateur, la lumière est confinée et réfléchi vers l'arrière et vers l'avant à travers le milieu excité. Le laser est polarisé pour commencer l'émission de photons. Les photons se réfléchissent en arrière et en avant et stimulent davantage l'émission de photons à partir d'électrons en attente de recombinaison. La lumière se déplaçant d'avant en arrière le long de l'axe du résonateur continue cette action et s'accumule jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment forte pour traverser l'extrémité réfléchissante et ainsi, un faisceau laser est formé.

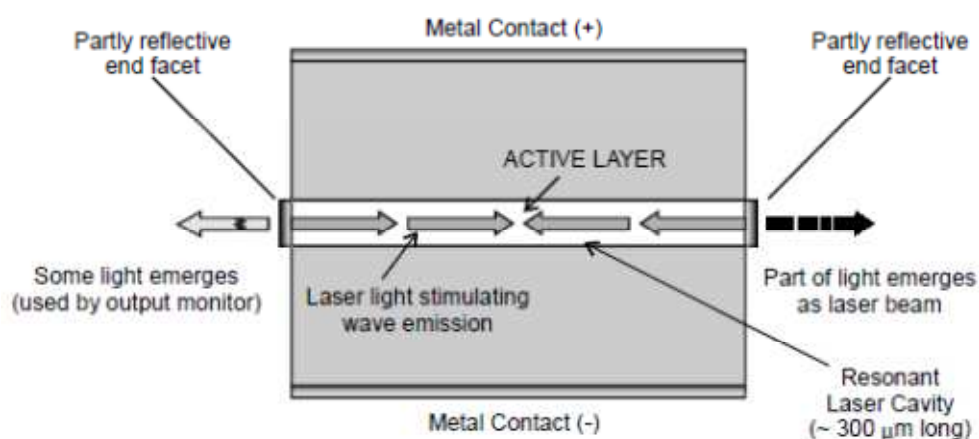


Figure 39. Fonctionnement de base des diodes laser.

II.2. Caractéristiques de fonctionnement

Les lasers doivent fonctionner à des courants d'attaque plus élevés que les LED afin de générer une densité d'électrons suffisamment élevée prête à se recombiner à un niveau d'énergie élevé.

Puissance de sortie et consommation de puissance

La puissance de sortie optique d'une diode laser montre deux pentes distinctes comme le montre la **Figure 40**. En dessous du courant de seuil, l'appareil fonctionne comme une LED avec une sortie faible ou nulle. L'action du laser se produit uniquement au-dessus du seuil. Les courants de seuil sont généralement de l'ordre de 30 à 250 mA, avec des tensions directes de 1,2 à 2 volts. Les appareils pratiques fonctionnent généralement entre 20 et 40 mA au-dessus du courant de seuil et peuvent générer des sorties optiques de 1 à 10 mW en continu, encore plus s'ils sont pulsés avec de faibles cycles de service. Certains lasers fonctionnent jusqu'à plusieurs centaines de milliwatts de sortie optique.

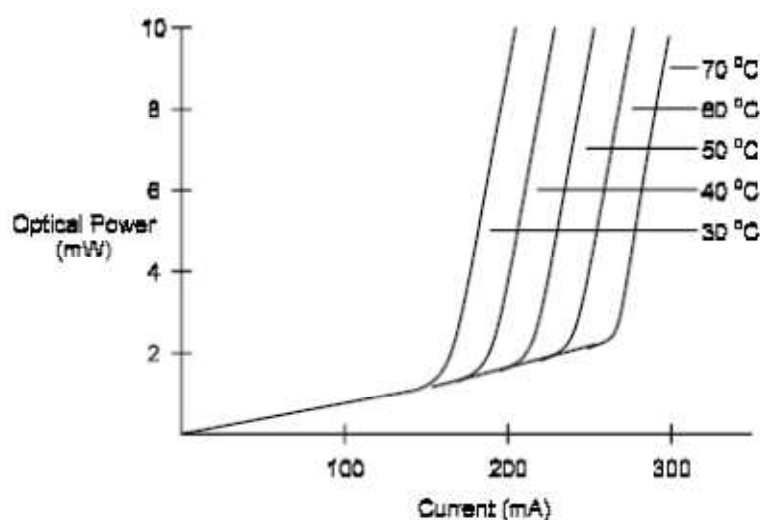


Figure 40. Courbes puissance-courant-température de la diode laser.

Largeur spectrale

Les diodes laser ont des largeurs de ligne typiques de 1 nm à 850 nm et 3 nm à 1300 nm et 1550 nm, ce qui est considérablement inférieur à celui des LED. Par conséquent, ils souffrent beaucoup moins de problèmes de dispersion chromatique.

Durée de vie d'exploitation

Les diodes laser fonctionnant en continu peuvent avoir une durée de vie typique de 105 heures à température ambiante, mais elles se dégradent plus rapidement à des températures plus élevées. Les diodes laser commerciales dépassent généralement 104 heures à 70 ° C.

Modulation

La modulation numérique des lasers utilise le courant de seuil. Le laser est polarisé juste en dessous du courant de seuil pour couper le faisceau pour la logique «0» et il est rapidement allumé en augmentant le courant au-dessus du seuil pour la logique «1». La modulation analogique utilise un courant de polarisation supérieur au seuil de sorte que le fonctionnement reste dans la région linéaire de la courbe puissance-courant ($P - I$), illustrée à la **Figure 40**.

Effets de la température

Les diodes laser sont beaucoup plus sensibles à la température que les LED, comme l'illustre la **Figure 40**. Le courant de seuil augmente à environ 1,5% par ° C, ce qui montre qu'il faut plus de courant pour démarrer l'action du laser à des températures plus élevées. À courant constant, la puissance de sortie diminue à mesure que la température augmente. De plus, comme le courant de seuil change avec la température, cela affecte la tension de polarisation requise pour la modulation. La stabilisation de la température est donc nécessaire pour les émetteurs pratiques.

II.3 Dispositifs laser pratiques

Des exigences d'emballage similaires s'appliquent, comme cela a été discuté pour les LED, notamment le scellement hermétique de tous les fils, permettant un alignement précis de la fibre et de la puce laser, offrant un dissipateur thermique approprié ou un montage de la puce sur un refroidisseur thermoélectrique. Pour contrôle actif de rétroaction du courant de polarisation, une photodiode (détecteur optique) peut être montée à l'intérieur du boîtier pour surveiller la puissance émise par la facette arrière du laser. Des queues de cochon en fibre peuvent être installées par le fabricant pour maximiser l'efficacité du couplage. Une configuration de package est illustrée à la **Figure 41**. Ici, une queue de cochon en fibre est montée dans un bloc rainuré en alignement précis avec la diode laser. L'utilisateur peut installer un connecteur sur la natte ou le raccorder directement à la fibre entrante.

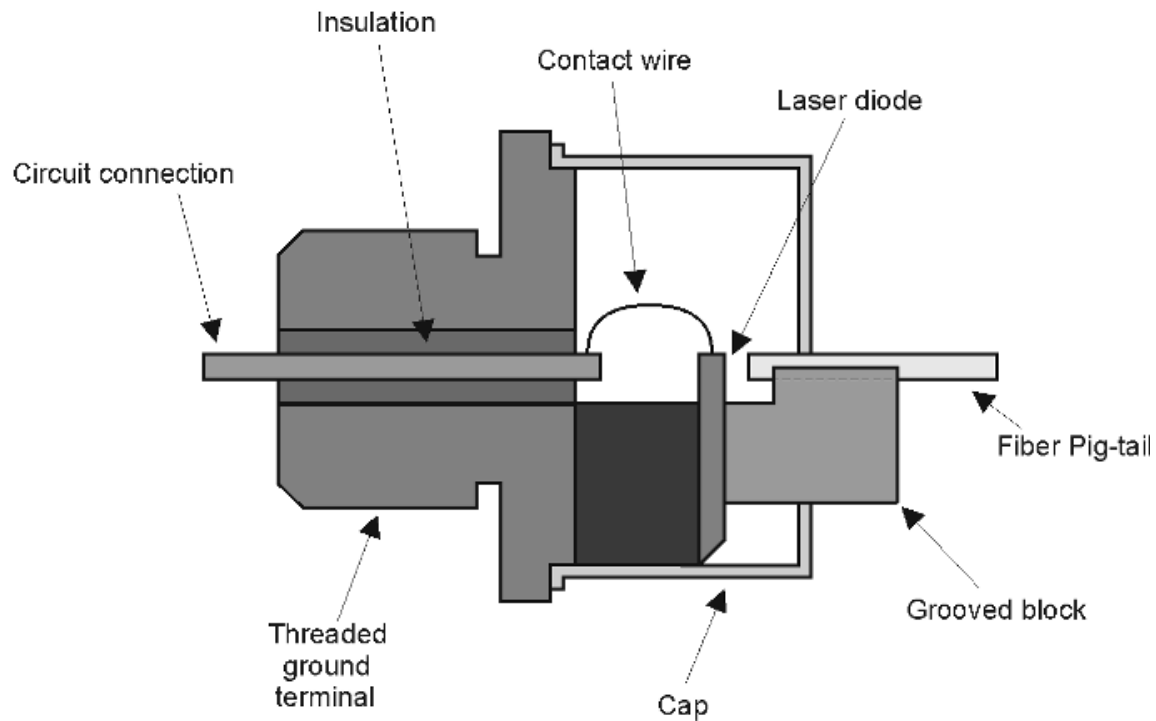


Figure 41. Boîtier de diodes laser avec natte (pig-tail) intégrale.

Les progrès de la technologie laser

Les lasers de type «plus anciens», plus courants, sont appelés diodes à émission de bord et émettent une lumière infrarouge cohérente parallèle aux frontières entre les couches semi-conductrices. Ceci est illustré dans le paragraphe II.1 ci-dessus.

La dernière technologie est la diode électroluminescente à cavité verticale (VCSEL; prononcé «vixel»). Il s'agit d'une diode laser spécialisée qui promet de révolutionner les communications par fibre optique en améliorant l'efficacité et en augmentant la vitesse des données.

La recherche sur les VCSEL a commencé en 1993, mais les premiers appareils commerciaux n'ont été commercialisés qu'en 2000. Les premiers appareils fonctionnaient dans la gamme des 850 nm. En 2002, les premiers VCSEL à 10 Gbit / s ont été lancés, qui fonctionnaient dans la plage de 850 nm et 1300 nm.

Le VCSEL émet sa lumière cohérente perpendiculairement aux frontières entre les couches de semi-conducteurs. Jusqu'à très récemment, les VCSEL ne

fonctionnaient que dans la gamme 850 nm mais les versions récentes fonctionnaient dans la gamme 1300 nm.

Le VCSEL présente plusieurs avantages par rapport aux diodes émettrices. Le VCSEL est moins cher à fabriquer en quantité, plus facile à tester, plus efficace et il nécessite moins de courant électrique pour produire une sortie d'énergie cohérente donnée.

Le VCSEL émet un faisceau étroit et plus circulaire que les diodes électroluminescentes. Cela facilite le couplage à une fibre optique. Le prochain défi est de produire un VCSEL rentable et fiable qui fonctionne dans la gamme de 1550 nm où il y a la plus faible atténuation de fibre.

II.4 Modules émetteurs optiques

Les modules émetteurs pratiques peuvent incorporer un dispositif à effet Peltier qui est un type de refroidisseur thermoélectrique. La puce laser est montée sur le refroidisseur avec une thermistance de surveillance de la température pour contrôler le processus de refroidissement. L'autre approche de la stabilisation utilise une photodiode pour surveiller la puissance de sortie rayonnée à la facette arrière du laser. Ceci est utilisé pour contrôler le courant de polarisation DC et stabiliser la sortie.

La diode laser de la **Figure 42** intègre un moniteur de puissance à photodiode mesurant la puissance émise par la facette arrière de l'appareil. De tels dispositifs peuvent être montés dans un emballage standard à plusieurs broches, tel que le double boîtier en ligne (DIP). Des broches individuelles peuvent ensuite être fournies pour le laser, le photodétecteur, le refroidisseur thermoélectrique et le capteur de température.

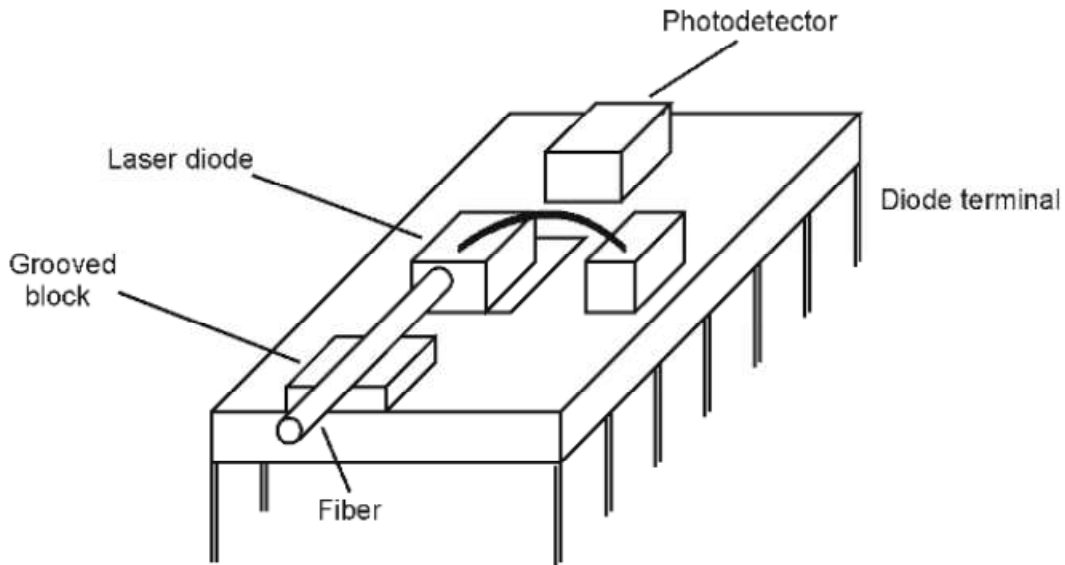


Figure 42. Module émetteur à diode laser.

II.5 Considérations sur la sécurité des lasers

La luminosité de certains faisceaux laser et leur degré élevé de collimation en font un danger potentiel pour l'œil humain, et des précautions de sécurité appropriées doivent être prises lorsque vous travaillez avec eux. Les systèmes fonctionnant à 1300 et 1550 nm utilisent des lasers haute puissance pour les communications à longue distance. Ces longueurs d'onde sont invisibles à l'œil humain mais peuvent causer des dommages permanents à la rétine de l'œil. Des codes de pratique de sécurité stricts ont été élaborés régissant l'utilisation de tous les appareils laser. Aucune source optique ou fibre lumineuse ne doit jamais être vue au microscope ou à l'œil nu.

III. Détecteurs optiques

Le détecteur optique a pour fonction de convertir efficacement la petite quantité d'énergie lumineuse reçue de la fibre, sous forme de photons, en signaux électriques. Le détecteur doit être un dispositif à faible bruit inhérent, incorporant une amplification appropriée pour générer des signaux de sortie utiles à partir d'entrées de bas niveau. Deux types principaux d'appareils sont utilisés pour les détecteurs pratiques; Diodes PIN et photodiodes à avalanche.

III.1 Photodiodes Pin

III.1.1 Principes de fonctionnement

Les photodiodes convertissent les signaux optiques directement en signaux électriques, en utilisant l'inverse du processus physique dans la LED. La photodiode PIN a une large couche semi-conductrice intrinsèque séparant les régions p et n, comme le montre la **Figure 43**. La diode est polarisée en inverse (5–20 volts), ce qui aide à éloigner les porteurs de courant de la région intrinsèque.

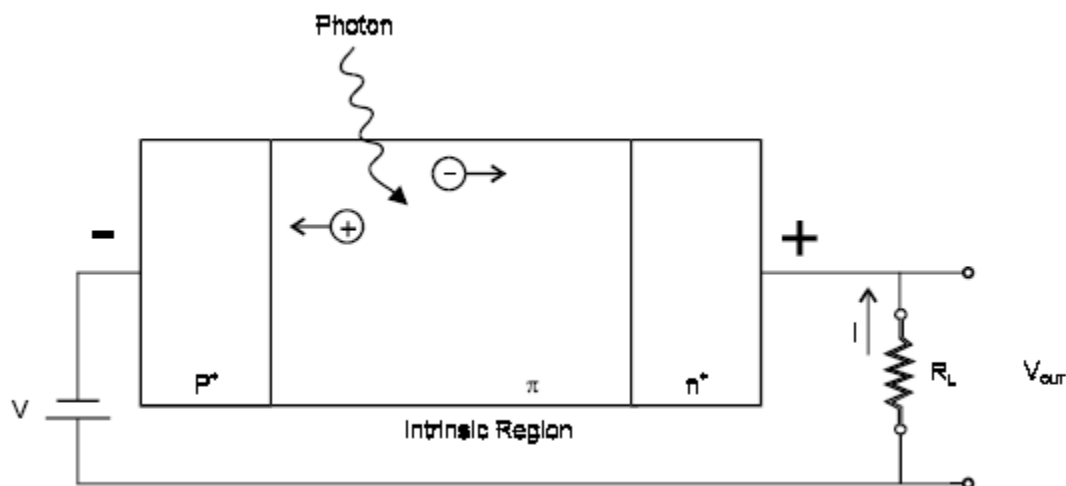


Figure 43. Photodiode PIN

La largeur de la couche intrinsèque garantit qu'il y a une forte probabilité que les photons entrants y soient absorbés plutôt que dans les régions p ou n. La couche intrinsèque a une haute résistance car elle n'a pas de charges libres. Il en résulte que la plupart de la tension de diode apparaît à travers elle, et le champ électrique résultant augmente la vitesse de réponse et réduit le bruit. Lorsque la lumière d'une énergie appropriée frappe la couche intrinsèque, elle crée des paires électron-trou en soulevant un électron de la bande de valence à la bande de conduction et en laissant le trou derrière dans le processus. La tension de polarisation fait que ces porteurs de courant (électrons dans la bande de conduction) s'éloignent rapidement de la région de jonction, produisant un courant proportionnel à la lumière incidente, comme le montre la **Figure 43**.

III.1.2 Caractéristiques de fonctionnement

Longueur d'onde de coupure

Le photon entrant doit avoir suffisamment d'énergie pour soulever un électron sur la bande interdite pour créer une paire électron-trou. Différents matériaux semi-conducteurs ont des énergies de bande interdite différentes et l'énergie d'intervalle (W) en électrons volts (eV) peut être liée à la longueur d'onde (λ) par exactement la même équation que pour les LED:

$$\lambda = 1240/W \text{ nanomètres} \quad (34)$$

Pour un détecteur particulier, la bande interdite W est fixe de sorte que l'équation ci-dessus donne la plus longue longueur d'onde qui peut être détectée, c'est-à-dire la longueur d'onde de coupure.

La réactivité

La réactivité ρ est le rapport entre le courant de sortie (i) du détecteur et sa puissance d'entrée optique (P).

$$\rho = i/P \text{ ampères par Watt}$$

À 800 nm, le silicium a une réactivité d'environ 0,5 A / W et InGaAs a une réactivité de crête d'environ 1,1 A / W à 1700 nm, réduisant à 0,77 A / W à 1300 nm.

Réponse spectrale

La réponse spectrale est représentée comme la variation de la réactivité avec la longueur d'onde. Les courbes de réponse spectrale typiques pour les diodes PIN silicium et InGaAs sont illustrées à la **Figure 44**.

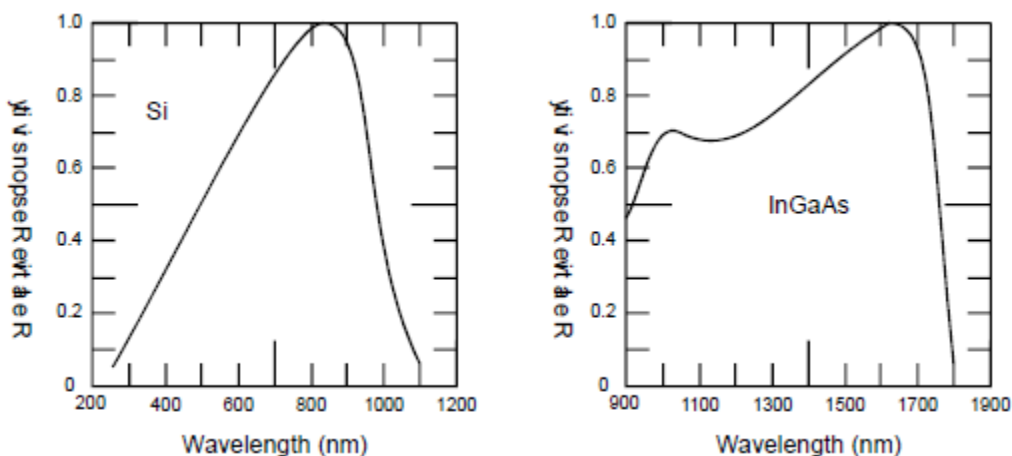


Figure 44. Réponses spectrales de la diode PIN.

Efficacité quantique

L'efficacité quantique η de l'émetteur est définie comme le rapport du nombre d'électrons émis au nombre de photons incidents. Le silicium et l'InGaAs ont des rendements quantiques de pointe d'environ 80%.

La vitesse de réponse du détecteur est limitée par le temps de transit, qui est le temps nécessaire aux charges libres pour traverser la largeur de la couche intrinsèque. Ceci est fonction de la tension inverse et de la largeur physique. Pour les diodes PIN rapides, cela varie de 0,5 à 10 ns. La capacité affecte également la réponse du dispositif, la capacité de jonction étant formée par la couche intrinsèque isolante entre les électrodes formées par les régions p et n. Les photodiodes à grande vitesse peuvent avoir des réponses aussi rapides que 10 picosecondes, nécessitant des capacités de quelques picofarads, avec de très petites surfaces.

Caractéristique courant-tension

Les courbes courant-tension ($I - V$) typiques pour une photodiode PIN en silicium sont illustrées dans la **Figure 45**. On peut voir que même lorsqu'il n'y a pas de puissance optique, un petit courant inverse circule appelé courant d'obscurité. Cela est dû à la génération thermique de porteurs de charge gratuits, qui double généralement à chaque augmentation de température de 10 ° C après 25 ° C.

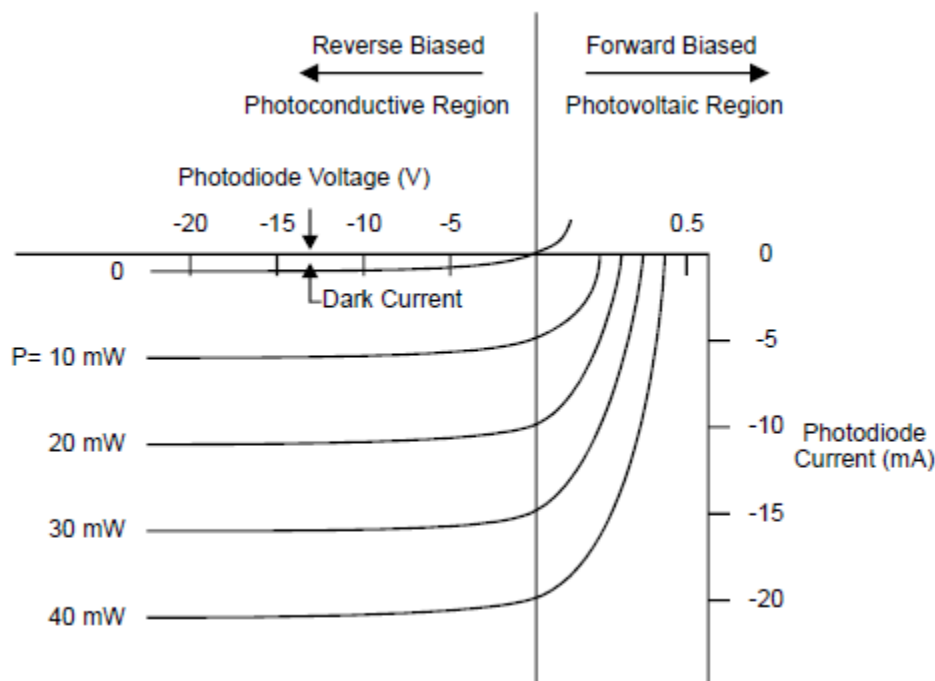


Figure 45. Caractéristiques $I - V$ de la photodiode PIN silicium

Plage dynamique

La relation linéaire entre la tension et la puissance optique illustrée à la **Figure 45** est généralement maintenue pendant six décennies, ce qui donne une plage dynamique d'environ 50 dB.

III.1.3 Emballage photodiode PIN

L'emballage de la photodiode PIN est similaire à ceux utilisés pour les LED et les lasers, mais les exigences optiques sont moins critiques. La zone active des détecteurs est généralement beaucoup plus grande que le cœur de la fibre, donc le désalignement latéral pose moins de problème.

III.2 Photodiode à avalanche (Avalanche Photodiode ; APD)

III.2.1 Principes de fonctionnement

Les photodiodes à avalanche utilisent des détecteurs de jonction à semi-conducteur avec gain interne par multiplication du courant d'avalanche. Une tension de polarisation inverse très élevée (50–300 volts) est appliquée à une jonction p – n. Un photon est absorbé dans la région d'appauvrissement, créant un électron libre et un trou libre. Ces charges s'accélèrent dans le fort champ électrique. Lorsqu'ils entrent en collision avec des atomes neutres dans le réseau cristallin, leur énergie cinétique est suffisante pour élever des électrons à travers la bande interdite et créer des paires électron-trou supplémentaires. Ces charges secondaires accélèrent également la création de plus de paires électron-trou. De cette façon, le courant produit par un photon est multiplié.

III.2.2 Structure de la photodiode à avalanche

Une forme de diode à avalanche est la diode de portée, comme illustré à la **Figure 46**. Les couches p^+ et n^+ sont des régions fortement dopées avec de très faibles chutes de tension. La région d'appauvrissement est légèrement dopée, presque intrinsèque. La plupart des photons sont absorbés dans cette zone, formant des paires électron-trou. Les électrons se déplacent vers la région p qui a été épuisée par la grande tension inverse. La région d'appauvrissement à la jonction $p-n^+$ atteint efficacement à travers la couche p. Les forts champs électriques à travers la couche p provoquent une multiplication par avalanche des électrons. Les trous produits dérivent à travers la couche π vers l'électrode p^+ mais ne provoquent pas de multiplication supplémentaire. Parce que cette structure limite la multiplication des porteurs de charge aux électrons uniquement, elle a de meilleures performances de bruit.

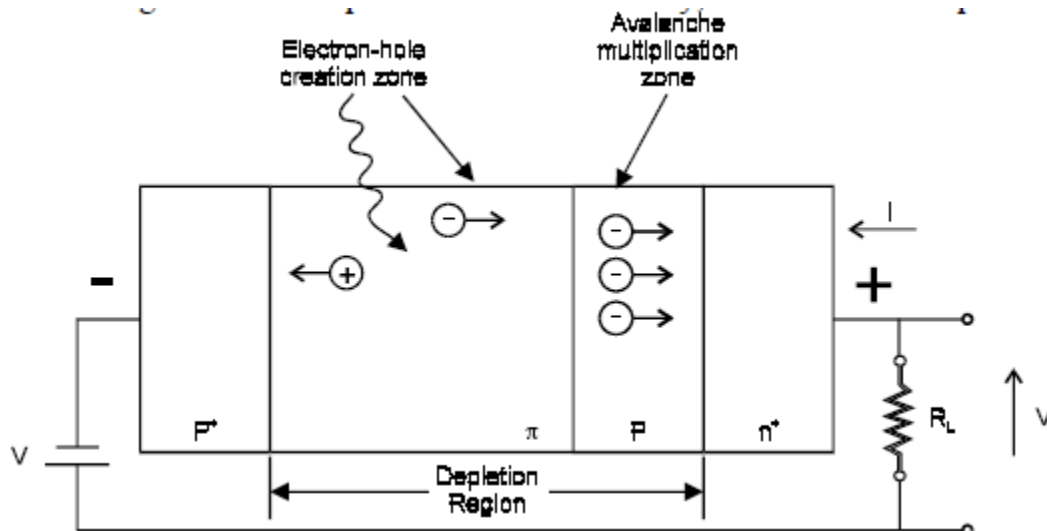


Figure 46. Photodiode à avalanche (APD)

III.2.3 Caractéristiques de fonctionnement

Longueur d'onde de coupure

Les photodiodes à avalanche sont des variations des diodes PIN, de sorte que les matériaux, les gammes spectrales et les longueurs d'onde de coupure sont les mêmes que pour les diodes PIN.

Caractéristique courant-tension

Les courbes caractéristiques courant-tension ($I - V$) typiques pour une photodiode à avalanche sont représentées sur la **Figure 47**.

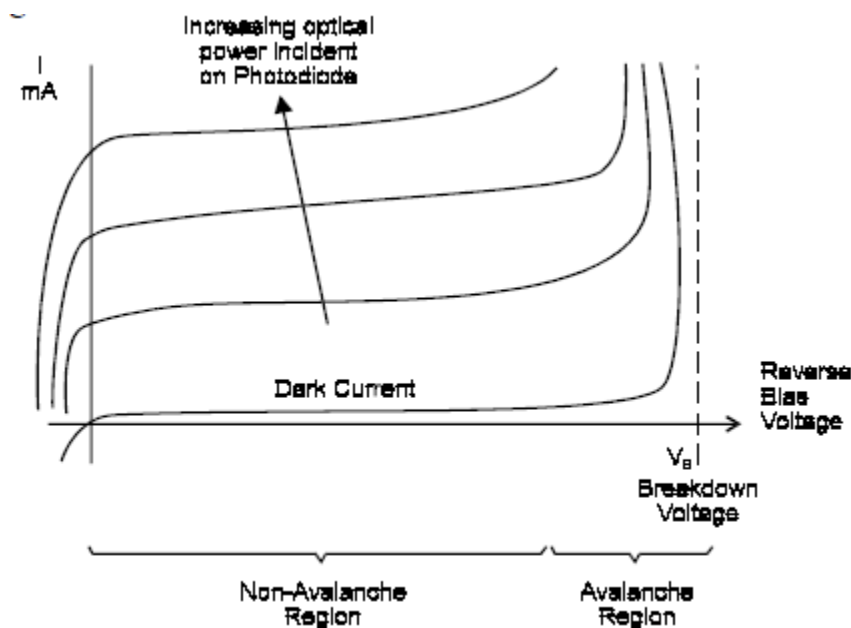


Figure 47. Courbes caractéristiques des photodiodes d'avalanche.

Vitesse de réponse

La vitesse de réponse est limitée par le temps de transit du porteur de charge et la constante de temps RC comme pour les diodes PIN. Des diodes à avalanche à temps de transit limité sont produites avec des temps de montée de l'ordre de quelques dixièmes de nanoseconde. Des temps de montée inférieurs à 100 picosecondes sont réalisables.

Gamme dynamique

Les diodes à avalanche sont similaires aux diodes PIN en ayant une excellente linéarité, sur une large plage de puissance dynamique, généralement de fractions de nanowatt à plusieurs microwatts.

Gain

Le gain d'une photodiode à avalanche dépend de la température et diminue généralement à mesure que la température augmente. Une stabilisation de la température peut être nécessaire pour les appareils fonctionnant sur des plages de température étendues. Des gains de 20 à 150 sont typiques.

III.2.4 Applications des photodiodes à avalanche

La photodiode à avalanche nécessite une alimentation haute tension stable et un circuit de polarisation plus complexe. Cela augmente les coûts et diminue la fiabilité. Les diodes à avalanche sont généralement moins fiables que les diodes PIN standard. Il s'ensuit que les diodes PIN sont généralement les dispositifs préférés pour les applications normales. Les diodes à avalanche offrent une sensibilité accrue de 5 à 10 dB et la moitié du temps de montée des diodes PIN standard. De telles diodes à avalanche sont nécessaires lorsque le système présente des pertes élevées et doit fonctionner à de faibles rapports signal / bruit, comme sur des liaisons de communication à longue distance. Sur de tels systèmes, les économies réalisées en augmentant l'espacement des répéteurs l'emportent sur les inconvénients.

Chapitre IV

CHAINE DE TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE

Contenu

Structure d'un système de transmission par fibre optique

Le bloc d'émission et de réception

Les amplificateurs optiques (Erbium Doped Fibre Amplifier ; EDFA)

Le bilan de liaison

I. Présentation de la liaison de communication optique

Ci-dessous, nous donnerons une définition de la liaison optique à la fois pour la liaison fibre optique, comme liaison de communication «filaire», et pour la liaison atmosphérique, une liaison de communication «sans fil». Les communications optiques via la fibre optique peuvent être considérées comme un système de communication optique de finition, comme le montre la **Figure 48**. Le message passant par un tel lien est supposé être disponible sous forme électronique, généralement sous forme de courant. L'émetteur est une source de lumière modulée pour que le faisceau optique porte le message.

Par exemple, pour un signal numérique, le faisceau lumineux est allumé électroniquement (pour les binaires) et désactivé (pour les zéros binaires). Ici, le faisceau optique est porteur du message numérique. Les liaisons par fibre optique prennent généralement la diode électroluminescente et la diode laser comme source. Plusieurs caractéristiques de la source lumineuse déterminent le comportement des ondes optiques se propageant. Le faisceau lumineux modulé correspondant (c'est-à-dire le message avec la porteuse) est couplé dans la fibre de transmission.

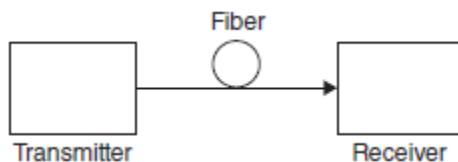


Figure 48. Schéma de liaison de communication optique connectée par fibre optique.

De manière générale, chaque système de communication optique sans fil, filaire ou sans fil, comprend trois blocs principaux: (i) l'émetteur, (ii) le canal, et (iii) le récepteur (**Figure 49**). L'entrée de l'émetteur est un signal électronique, qui transporte les informations, et la sortie de l'émetteur est un signal optique provenant d'une source lumineuse telle qu'une diode électroluminescente (LED) ou un laser.



Figure 49. Schéma de système optique filaire ou sans fil.

Le signal optique transporte les informations présentées sous forme numérique comme le montre la **Figure 50**. Nous allons maintenant décrire brièvement les éléments de base du canal de communication optique, y compris l'émetteur, comme source de lumière, et le récepteur, comme détecteur de lumière.

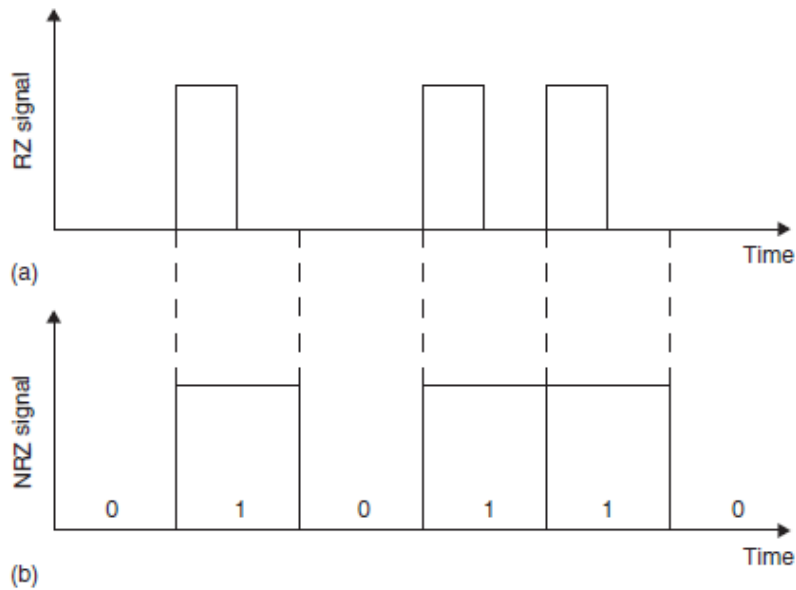


Figure 50. Présentation des informations numériques sous la forme (a) d’impulsions de retour à zéro (RZ) et (b) d’impulsions de non retour à zéro (NRZ).

L’entrée du canal est le signal optique de l’émetteur et la sortie du canal est l’entrée du récepteur. Le récepteur reçoit le signal optique de la sortie du canal, amplifie le signal, le convertit en un signal électronique et extrait les informations. Au niveau du récepteur, le signal est collecté par un photodétecteur, qui reconvertit les informations sous forme électrique. Les photodétecteurs n’affectent pas les propriétés de propagation de l’onde optique mais doivent certainement être compatibles avec le reste du système.

L’émetteur comprend un modulateur, un pilote, une source de lumière et des optiques (**Figure 51**). Le modulateur convertit les bits d’information en un signal analogique qui représente un flux de symboles. Le pilote fournit le courant requis à la source de lumière en fonction du signal analogique de la sortie du modulateur. La source lumineuse est une LED ou un laser, qui est une source non cohérente ou cohérente, respectivement. La source convertit le signal électronique en un signal optique. L’optique concentre et dirige la lumière de la sortie de la source en direction du récepteur.

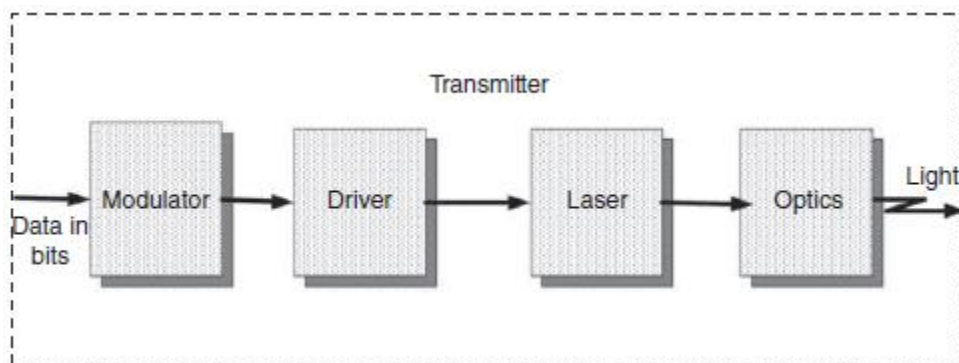


Figure 51. Le schéma de l’émetteur.

Le récepteur comprend une optique, un filtre, un polariseur, un détecteur, un amplificateur trans-impédance, une unité de récupération d'horloge et un dispositif de décision (voir **Figure 52**). L'optique concentre la puissance du signal reçu sur le filtre.

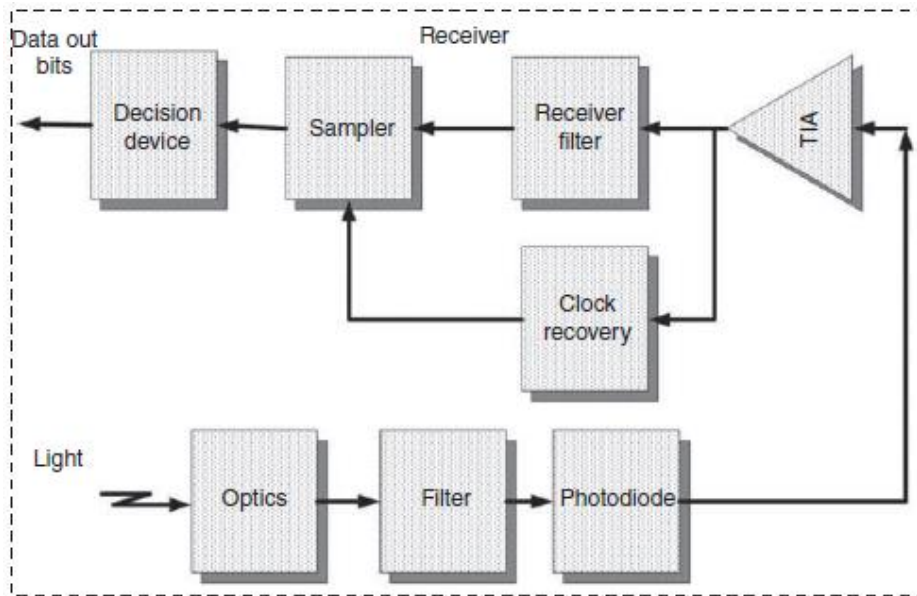


Figure 52. Le schéma du récepteur.

Seule la lumière à la longueur d'onde requise se propage à travers le filtre vers le polariseur. Le polariseur permet uniquement à la lumière à la polarisation requise de se propager jusqu'au détecteur. Le détecteur, dans la plupart des cas un dispositif semi-conducteur tel qu'une photodiode positive intrinsèque négative (PIN), convertit le signal optique en un signal électronique. L'amplificateur de trans-impédance amplifie le signal électronique provenant du détecteur. L'unité de récupération d'horloge fournit un signal de synchronisation au dispositif de décision en fonction du signal provenant de la sortie de l'amplificateur de trans-impédance. Le dispositif de décision estime les informations reçues sur la base du signal électronique provenant de l'amplificateur de trans-impédance et du signal de synchronisation.

Le canal atmosphérique (sans fil) atténue la puissance du signal optique et l'élargit et l'étend dans les domaines spatial, temporel, angulaire et de polarisation (voir **Figure 53**).

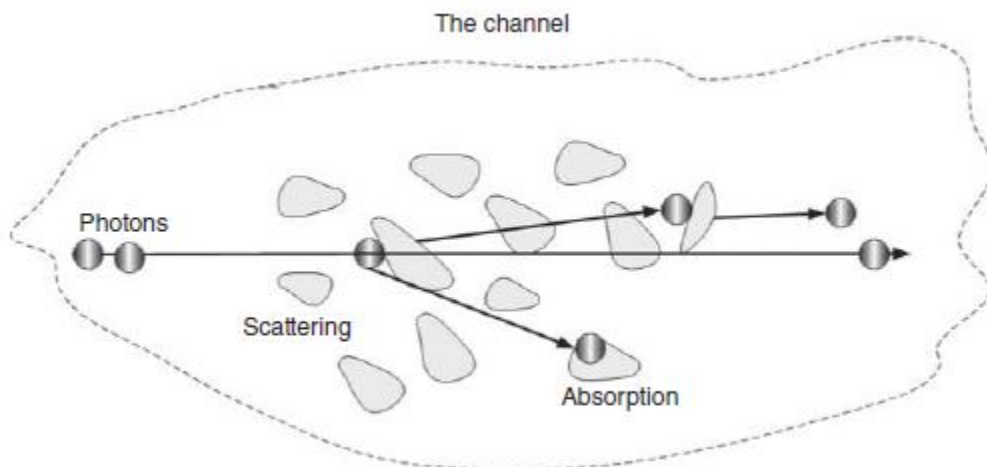


Figure 53. Canal atmosphérique optique.

Les modules émetteurs pratiques peuvent incorporer un dispositif à effet Peltier qui est un type de refroidisseur thermoélectrique. La puce laser est montée sur le refroidisseur avec une thermistance de surveillance de la température pour contrôler le processus de refroidissement. L'autre approche de la stabilisation utilise une photodiode pour surveiller la puissance de sortie rayonnée à la facette arrière du laser. Ceci est utilisé pour contrôler le courant de polarisation DC et stabiliser la sortie.

La diode laser de la **Figure 54** ci-dessous intègre un moniteur de puissance à photodiode mesurant la puissance émise par la facette arrière de l'appareil. De tels dispositifs peuvent être montés dans un emballage standard à plusieurs broches, tel que le double boîtier en ligne (DIP). Des broches individuelles peuvent ensuite être fournies pour le laser, le photodétecteur, le refroidisseur thermoélectrique et le capteur de température.

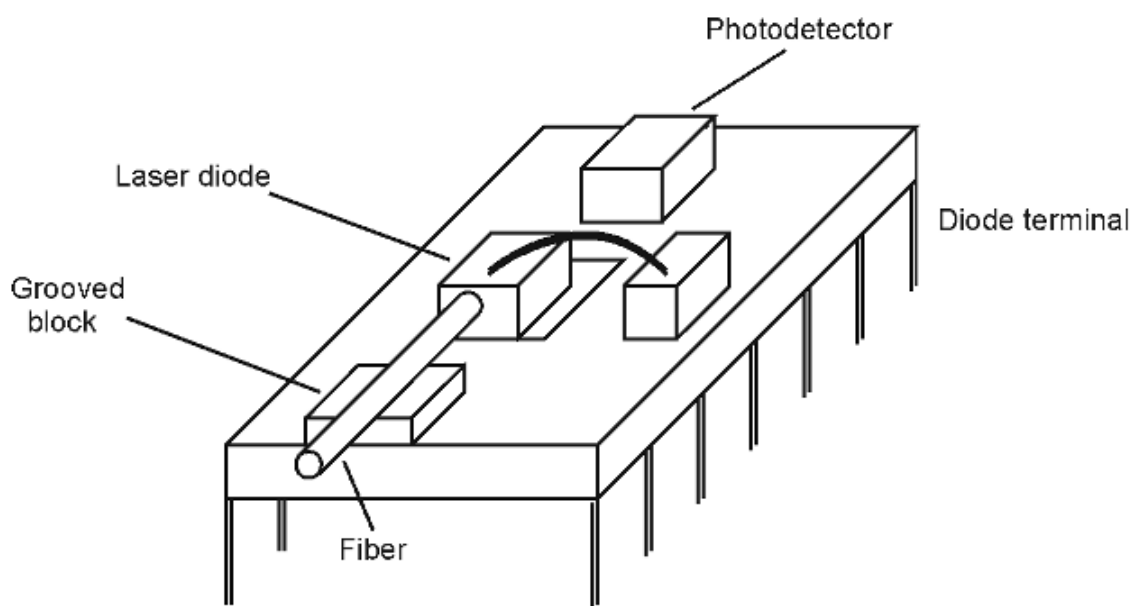


Figure 54. Module émetteur à diode laser.

II. Modules du récepteur optique

II.1. Éléments de base d'un récepteur pratique

Les éléments de base d'un récepteur pratique sont :

- (a) un détecteur pour convertir le signal optique reçu en un signal électrique
- (b) un amplificateur pour augmenter le signal électrique à un niveau où il peut être traité
- (c) un démodulateur ou des circuits de décision pour récupérer les données d'origine à partir du signal d'entrée.

Nous avons vu que les photodiodes à avalanche incorporent une amplification interne, ces appareils combinent donc les fonctions (a) et (b).

II.2 Amplificateurs

Les signaux optiques typiques atteignant un récepteur à fibre optique peuvent être aussi faibles qu'un microwatt. L'utilisation d'une diode PIN avec une sensibilité de 0.6 A / W pour détecter un tel signal produirait une sortie d'environ 600 nanoampères. Cette sortie doit être amplifiée et convertie en tension pour traitement ultérieur.

Les amplificateurs peuvent être divisés en quatre types selon le type de transistor d'entrée (FET ou bipolaire) et la configuration de l'amplificateur, indépendamment de la haute impédance ou de la transimpédance.

L'amplificateur à haute impédance donne un gain élevé, mais il peut saturer pour un signal d'entrée relativement faible. L'amplificateur à transimpédance utilise une rétroaction négative pour réduire le gain, comme le montre la **Figure 55**. Cela donne à l'amplificateur une plage dynamique accrue, une bande passante plus large, mais moins de sensibilité.

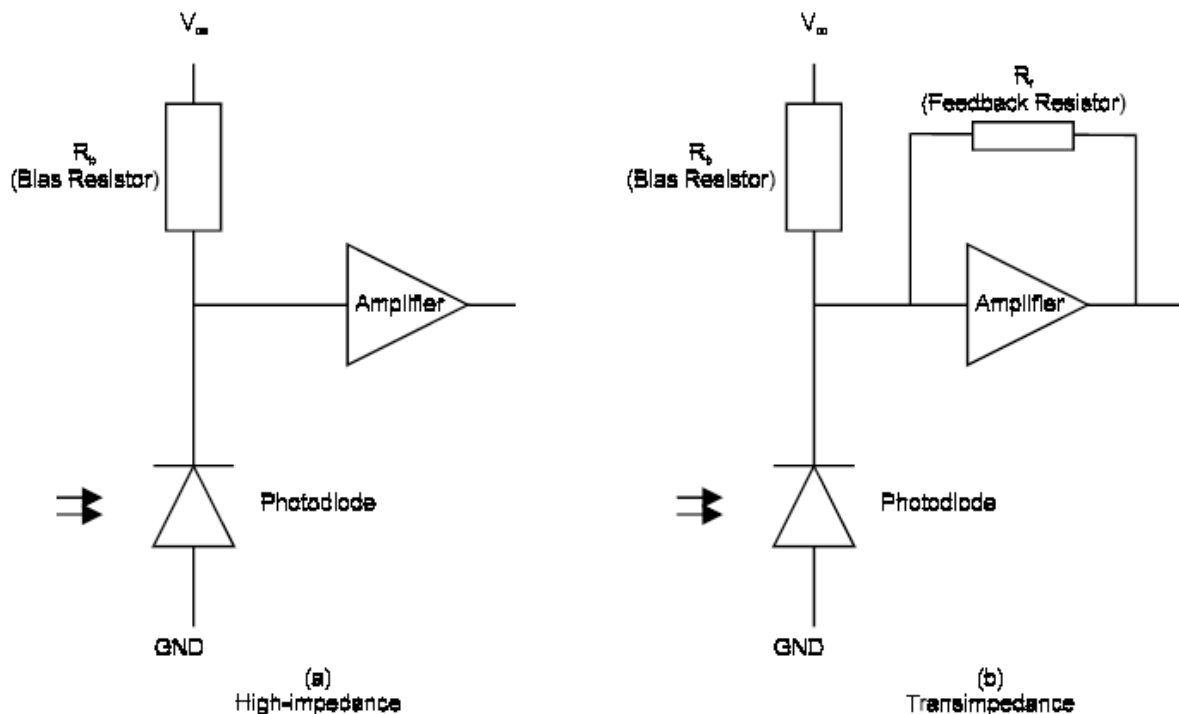


Figure 55 Configurations de l'amplificateur.

Les caractéristiques du préamplificateur à différents débits de données avec PIN et photodétecteurs à avalanche sont illustrées à la **Figure 56**. On peut voir que la diode à avalanche a une plus grande sensibilité à tous les débits de données. Un amplificateur FET offre une plus grande sensibilité à des débits de données inférieurs, tandis que les amplificateurs bipolaires ont des performances supérieures à des débits de données plus élevés. La limite quantique indiquée est la puissance minimale détectable causée par la nature statistique des mécanismes de détection de photons et de génération de paires de porteurs.

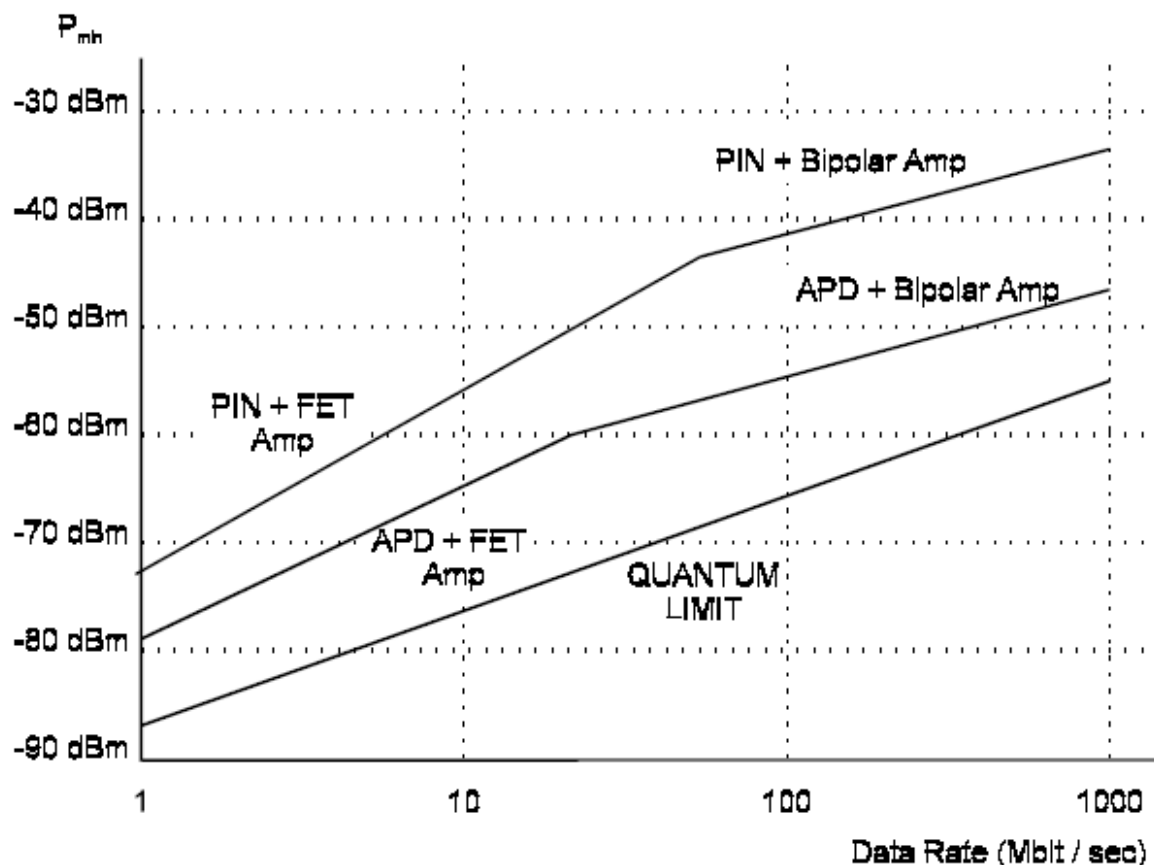


Figure 56. Caractéristiques du pré-amplificateur.

Certaines configurations d'amplificateurs utilisent un amplificateur monté sur la même puce que le photodétecteur. Cela augmente le niveau du signal sans abaisser le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit. Les amplificateurs externes, en revanche, ajoutent toujours du bruit et réduisent le rapport signal / bruit.

II.3. Boîtier du récepteur

L'emballage du récepteur doit résoudre les problèmes mécaniques, électroniques et optiques. La principale préoccupation mécanique est de savoir comment monter les fibres avec le module récepteur lui-même, en suivant un emballage standard typique de l'industrie, comme les boîtiers doubles en ligne (DIP). L'interfaçage électronique doit prendre en compte les tensions de polarisation requises par le photodétecteur, l'amplificateur et le circuit du détecteur, ainsi que les commandes de gain et les exigences de sortie. L'interfaçage optique est plus simple que les émetteurs car les zones du détecteur sont plus grandes que le cœur de la plupart des fibres et le fait de buter la fibre contre le détecteur recueille suffisamment de lumière. Certains modules utilisent des connecteurs de fibre sur le boîtier pour se connecter directement au détecteur, ou utilisent une grande fibre multimode pour collecter toute la lumière du petit noyau d'une fibre monomode.

III. Amplificateurs optiques

Les amplificateurs optiques augmentent la puissance du signal sans convertir le signal en forme électrique. Ils fonctionnent sur le principe de l'émission stimulée en tant que formes spécialisées de lasers, qui amplifient la lumière en un seul passage à travers l'amplificateur. Il existe actuellement deux types de base d'amplificateurs optiques; amplificateurs à fibre dopée et amplificateurs laser à semi-conducteur.

III.1. Fibres dopées

Les amplificateurs à fibres dopées en erbium (Erbium Doped Fiber Amplifiers ; EDFA) utilisent des fibres dont les noyaux sont dopés avec des éléments, qui peuvent amplifier la lumière à des longueurs d'onde particulières. Les fibres dopées à l'erbium des terres rares sont efficaces à des longueurs d'onde comprises entre 1520 et 1560 nm et les fibres dopées au praséodyme fonctionnent aux longueurs d'onde de 1300 nm. Les atomes dopants dans la fibre sont excités par un laser à pompe, fonctionnant à une longueur d'onde plus courte. La lumière à la longueur d'onde du signal peut stimuler ces atomes énergétiques pour émettre leur excès d'énergie, comme la lumière à la longueur d'onde du signal, en phase avec les impulsions du signal. Le principe de fonctionnement de ces appareils est illustré à la **Figure 57**.

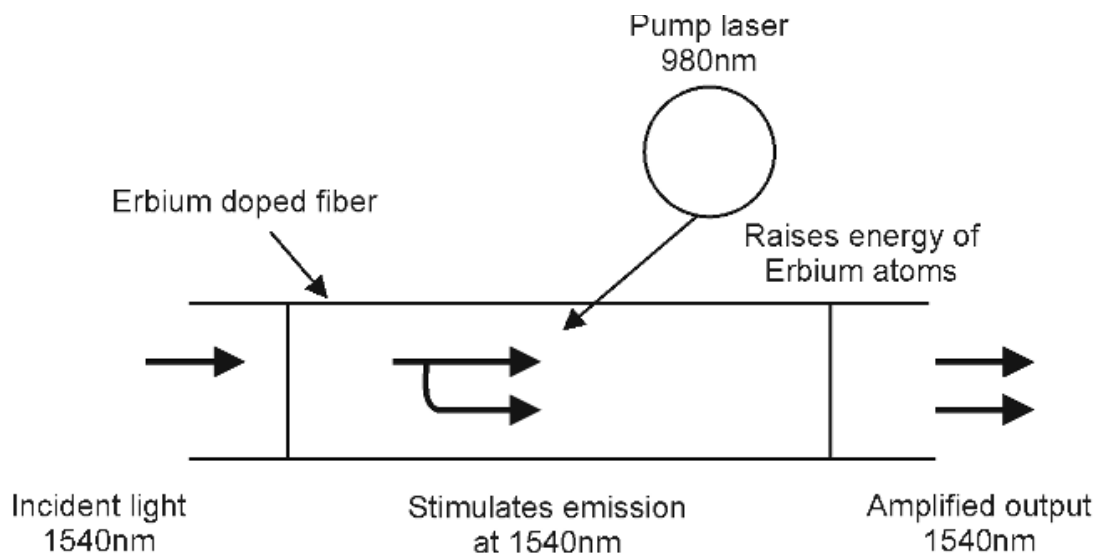


Figure 57. Amplificateurs à fibre dopée.

III.2. Amplificateurs laser à semi-conducteur

Les amplificateurs laser à semi-conducteur fonctionnent comme des lasers ordinaires sans les miroirs. La lumière de la source externe fait passer à travers la zone active et stimule d'autres émissions de photons. Une difficulté majeure avec ces dispositifs implique le couplage de la lumière dans le laser, comme le montre la **Figure 58**. Le laser à semi-conducteur a une zone active de plusieurs microns de large et inférieure à un micron d'épaisseur. La lumière sortant d'une fibre monomode produira un faisceau d'au moins 9 microns de diamètre. De toute évidence, la majeure partie de cette lumière provenant de la fibre manquera la couche d'entrée active du laser et sera perdue. Cette perte de transfert élevée des fibres compense la majeure partie du gain produit par l'amplificateur laser. Cependant, ces dispositifs peuvent être utilement intégrés sur des puces avec d'autres dispositifs optiques semi-conducteurs, tels que des sources laser, pour éviter de telles pertes de transfert.

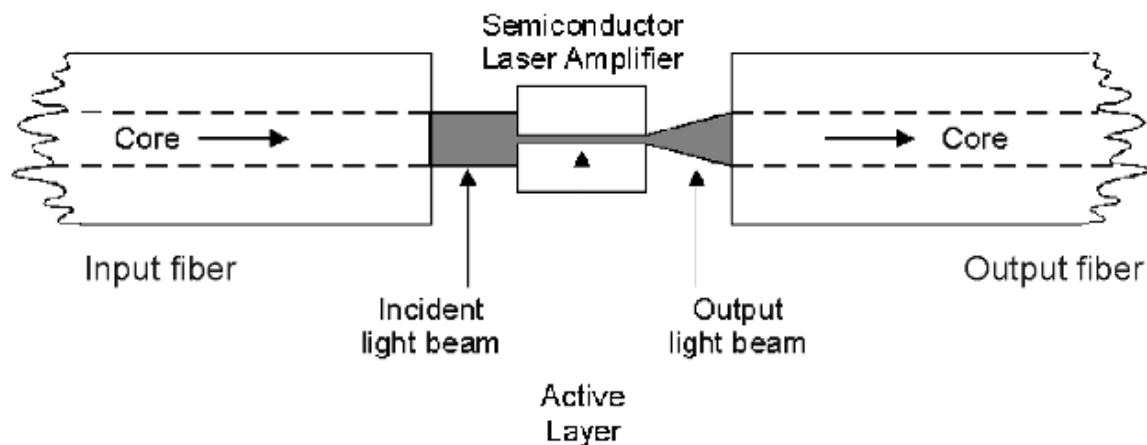


Figure 58. Amplificateurs laser à semi-conducteur.

IV. Conception de systèmes à fibres optiques

Cette partie traite des différents aspects impliqués dans la conception d'une liaison de système à fibre optique. Le processus de conception d'une liaison à fibre optique réussie peut être divisé en trois sections distinctes.

La première exigence est de déterminer tous les paramètres de conception fondamentaux de la liaison. Cela inclurait des paramètres tels que les services à fournir, les exigences de vitesse de transmission des données, les distances de liaison, les itinéraires des câbles, etc.

La prochaine exigence consiste à calculer les performances opérationnelles prévues de la liaison. Ceci est souvent appelé «bilan de liaison – link budgeting», «bilan de puissance – power budgeting» ou «bilan de perte – loss budgeting». Les différents paramètres de fonctionnement de la liaison, y compris les puissances de transmission, la sensibilité du récepteur, les pertes de liaison par fibre et les objectifs de performance sont utilisés pour déterminer les attentes théoriques de performance du système à fibre optique. Il est également nécessaire de calculer la bande passante de fonctionnement maximale du système à fibre optique, c'est-à-dire le débit de données maximal que le système prendra en charge. La deuxième section de cette partie explique comment calculer le bilan de perte et le bilan de bande passante pour une liaison à fibre optique.

La troisième exigence est de déterminer le coût du système qui a évolué à partir des étapes de conception discutées ci-dessus. Une fois le coût budgétaire calculé, une analyse coût / performance peut être effectuée. Il y aura toujours des compromis entre le coût du système et son niveau de performance préféré. Les principaux problèmes liés à la détermination de la conception de système la plus rentable et les compromis disponibles sont intégrés dans les discussions.

IV.1. Considérations de conception initiale

Un certain nombre de considérations de conception ont été discutées dans les chapitres précédents. Cette section passera brièvement en revue ces exigences et examinera de nouvelles considérations.

IV.1.1 Technologie de transmission de données

La conception du système de fibre optique sera développée et préparée autour de la proposition initiale de services de données et des exigences prévues. La technologie de système de transmission choisie dépendra de l'application de l'utilisateur, de la vitesse de transmission et des besoins en capacité. Il est essentiel que toutes les données nécessaires à l'organisation soient extraites du personnel concerné avant le début de la conception. Cela garantira que les systèmes installés répondront à toutes les exigences de l'organisation.

IV.1.2 Paramètres de transmission

Lors de la phase de conception, les considérations incluent les exigences de débit de données, les exigences de bande passante et les distances de transmission.

IV.1.3 Croissance future de la capacité de transmission de données

Lors de la conception d'un système à fibre optique, il est extrêmement important de déterminer la croissance future attendue du système de transmission de données sur un site. D'après l'expérience de l'auteur, s'il existe une capacité de communication disponible, quelle que soit sa taille, quelqu'un trouvera une raison de l'utiliser.

Il est beaucoup moins cher de répondre aux futures exigences en matière de câbles à fibres optiques dans la phase d'installation initiale que de mettre à niveau l'installation des câbles à une date ultérieure. Le coût par mètre de fibre dans un câble à fibre optique peut être inférieur au centième du coût du creusement de la tranchée pour l'enterrer. Par exemple, si cela coûte 20 cents par mètre pour une seule fibre dans un câble, cela pourrait coûter jusqu'à 20.00 \$ par mètre pour creuser une tranchée, enterrer un conduit et y faire passer un câble (bien que le câble lui-même puisse contenir 96 fibres et coûte 25.00 \$ par mètre). Par conséquent, le coût de l'ajout de fibres supplémentaires dans un câble est souvent presque insignifiant dans le coût total du projet. Pour cette raison, il est jugé prudent de sur-concevoir la capacité de transmission et la bande passante du système de fibre optique et d'éviter des éruptions de coûts énormes ultérieurement.

Pour des câbles de centaines ou de milliers de kilomètres, le coût du câble / fibre deviendra un pourcentage beaucoup plus élevé du coût total du système. C'est généralement le cas pour les systèmes installés par les grandes sociétés de télécommunications. Le coût proportionnel typique d'un câble dans un système est illustré à la **Figure 59**.

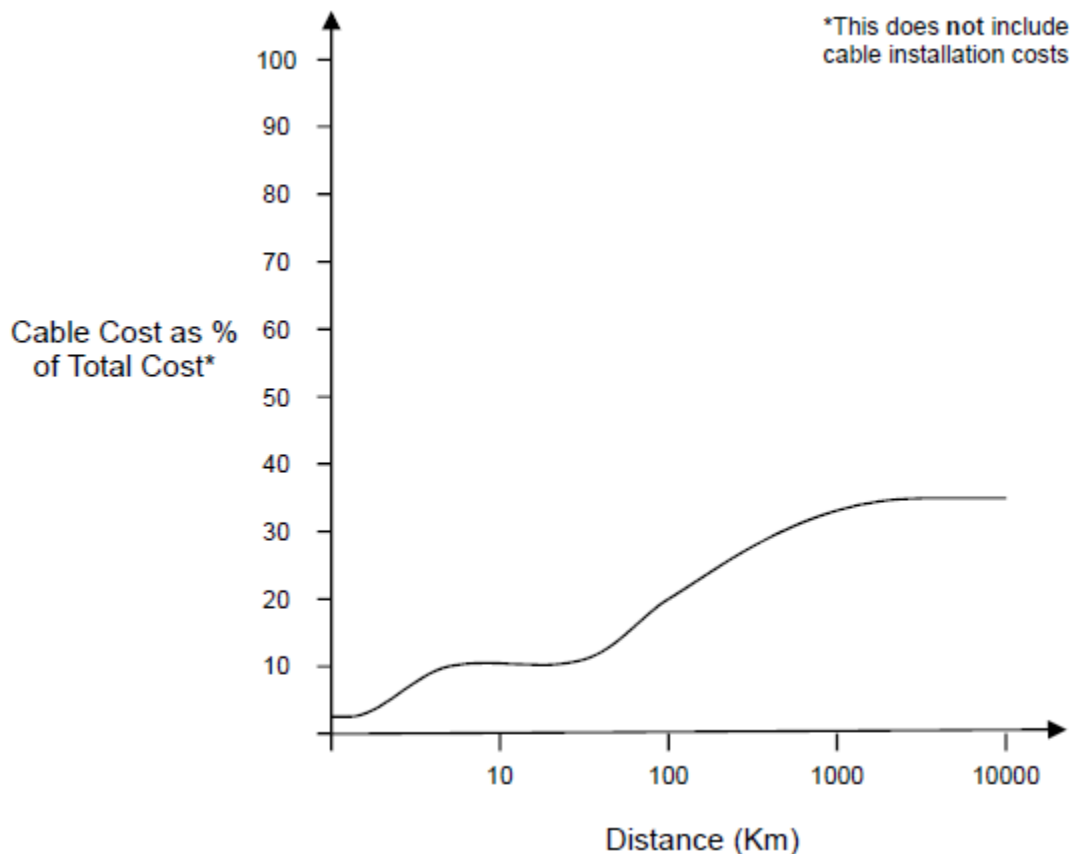


Figure 59. Une comparaison des coûts et de la distance des câbles.

IV.1.4. Fiabilité

L'une des considérations de conception les plus difficiles à prendre en compte est la fiabilité du système. La considération la plus fondamentale dans la fiabilité du système est la qualité de fabrication de l'équipement d'émission et de réception, du réseau de données / équipement de traitement et du câble à fibre optique. Il s'agit souvent d'un problème subjectif, surtout lorsque chaque fournisseur a tendance à affirmer qu'il possède le meilleur équipement de qualité! Demander conseil à des consultants indépendants, parler à un certain nombre d'autres utilisateurs et lire les magazines spécialisés appropriés fournira une bonne idée des mérites relatifs de chaque marque d'équipement.

La fiabilité dépendra également du niveau de la conception physique mise en œuvre. Par exemple, les deux extrêmes de l'installation de câbles seraient, tout d'abord, un système de très haute fiabilité où le câble est blindé en acier, enterré dans un conduit dans 0.5 m de béton à une profondeur de 5 m. Deuxièmement, une exigence de système de très faible fiabilité serait lorsqu'un câble sous gaine plastique standard est simplement posé sur le sol sans aucune protection. Les autres facteurs à considérer ici incluent la qualité des boîtiers de fosse, les boîtiers d'épissure, les armoires de terminaison et le degré de verrouillage et de protection de l'environnement qui est requis d'eux.

La conception excessive d'un système ajoutera un coût important à l'ensemble du projet. Par conséquent, il doit y avoir un compromis entre un niveau de fiabilité acceptable et un système rentable.

La majorité des défaillances du système sont causées par une erreur humaine. Les deux classiques de tous les temps sont quelqu'un qui déterre le câble avec une pelle ou une pelle rétro et deuxièmement, un technicien coupant le mauvais câble lors de la maintenance du système. Pour éviter ces problèmes, faites passer les câbles dans des zones où ils sont moins susceptibles d'être altérés, marquez clairement les câbles à tous les points de terminaison et assurez-vous que le système est entièrement documenté et que la documentation est à jour.

Dans le cadre de cette équation d'analyse des coûts, il est essentiel d'envisager d'autres types de technologies de transmission. Par exemple, il peut être plus rentable d'installer une liaison micro-ondes ou d'utiliser des installations de télécommunications publiques pour tout ou partie de l'itinéraire de communication. Dans ce cas, les débits de données et les frais de location doivent être pris en compte. Le **Tableau 3** suivant fournit un exemple de comparaison de technologies avec une illustration de certains des avantages et des inconvénients de l'utilisation de la radio micro-ondes ou du câble à fibre optique sur une route de 30 km.

Tableau 3. Quelques comparaisons entre les systèmes de câbles radio et à fibres optiques.

	Digital capacity	Cost of equipment for a 30 km route	Possible advantages	Possible disadvantages	Risks to system reliability
Radio	34 MB to 155 MB	\$150 K	High capacity Simple to install relatively easy to secure sites	Interruptions due to extreme rain	Lightning sabotage access to repeater sites
Fiber cable	34 MB to 622 MB	\$240 K cable \$120K equipment	Very high capacity secure against storm damage	High installation cost may require land permits etc	Termites roadworks farming sabotage floods

IV.1.5. Choix d'une longueur d'onde de fonctionnement

L'une des premières décisions à prendre avant que la conception détaillée du système ne puisse commencer sérieusement est la sélection de la longueur d'onde de fonctionnement du système. Généralement, la longueur d'onde de fibre utilisée est dictée par l'application qu'elle doit être utilisée sur le système. Par exemple, la norme d'interface de données distribuées sur fibre (FDDI) (voir le chapitre 10) nécessite une transmission à la longueur d'onde de 1300 nm.

Une fois la longueur d'onde choisie, il est recommandé de l'utiliser sur l'ensemble du réseau. Cela évitera des problèmes de compatibilité de l'émetteur et de l'équipement de réception, ainsi que d'avoir à doubler sur les pièces de rechange et l'équipement de test et de maintenance.

La longueur d'onde de 850 nm est souvent utilisée pour les liaisons à faible vitesse et à courte distance. Par exemple, des débits de données jusqu'à environ 20 Mbps et des distances jusqu'à environ 3 km sont possibles.

La longueur d'onde de 1300 et 1550 nm fournira les débits de données élevés et les distances de transmission plus longues discutées dans les chapitres précédents. Mais en conséquence, les coûts du système augmentent considérablement.

En règle générale, il est toujours préférable de choisir la durée de fonctionnement la plus courte possible qui fournira toujours des débits de données et des distances de transmission

satisfaisants pour l'application dans laquelle elle doit être utilisée simplement en raison des coûts moins chers.

IV.1.6. Sélection du type de câble et itinéraire d'installation

L'étape suivante du processus de conception consiste à sélectionner le type de câble adapté à l'application et à l'itinéraire que le câble suivra. Il convient de noter qu'en raison des économies d'échelle dans la production (il y a beaucoup plus de fibre monomode produite que multimode), couplée aux coûts supplémentaires des matériaux, la fibre multimode est généralement plus chère que la fibre monomode.

Les fibres à faible bande passante et à faible perte acceptent moins de lumière que les fibres à bande passante plus faible et à perte plus élevée. En effet, ces dernières fibres ont des NA plus grandes. Par conséquent, sur des distances relativement courtes, il est généralement plus rentable, et fournira moins d'atténuation du signal, d'utiliser la fibre multimode, qui a la perte intrinsèque la plus élevée. Le coût pourrait être légèrement plus élevé, mais la fibre multimode recueille la lumière beaucoup plus efficacement à partir des sources lumineuses LED à coût nettement inférieur.

La topologie d'un réseau de données (la disposition physique) est généralement déterminée par le type de réseau à installer. La topologie choisie (étoile, bus ou anneau comme illustré à la **Figure 60**) peut affecter de manière significative le coût global du projet. Différents types de réseaux utiliseront différentes longueurs de câble et différents types et nombres de dispositifs émetteurs et récepteurs. Cela doit être soigneusement évalué pendant la phase de conception.

Il est également conseillé de considérer les avantages relatifs de la duplication de route et / ou d'un routage alternatif. Ce sujet peut devenir très complexe et dépasse le cadre de ce livre. Il est conseillé de demander des conseils professionnels pour ce niveau de conception, car cela aura un effet significatif sur le coût global et la fiabilité du réseau.

Lors de la conception du système, n'oubliez pas d'ajouter les coûts supplémentaires des exigences de jeu des câbles, des boîtiers d'épissure, des armoires de terminaison et des panneaux de brassage.

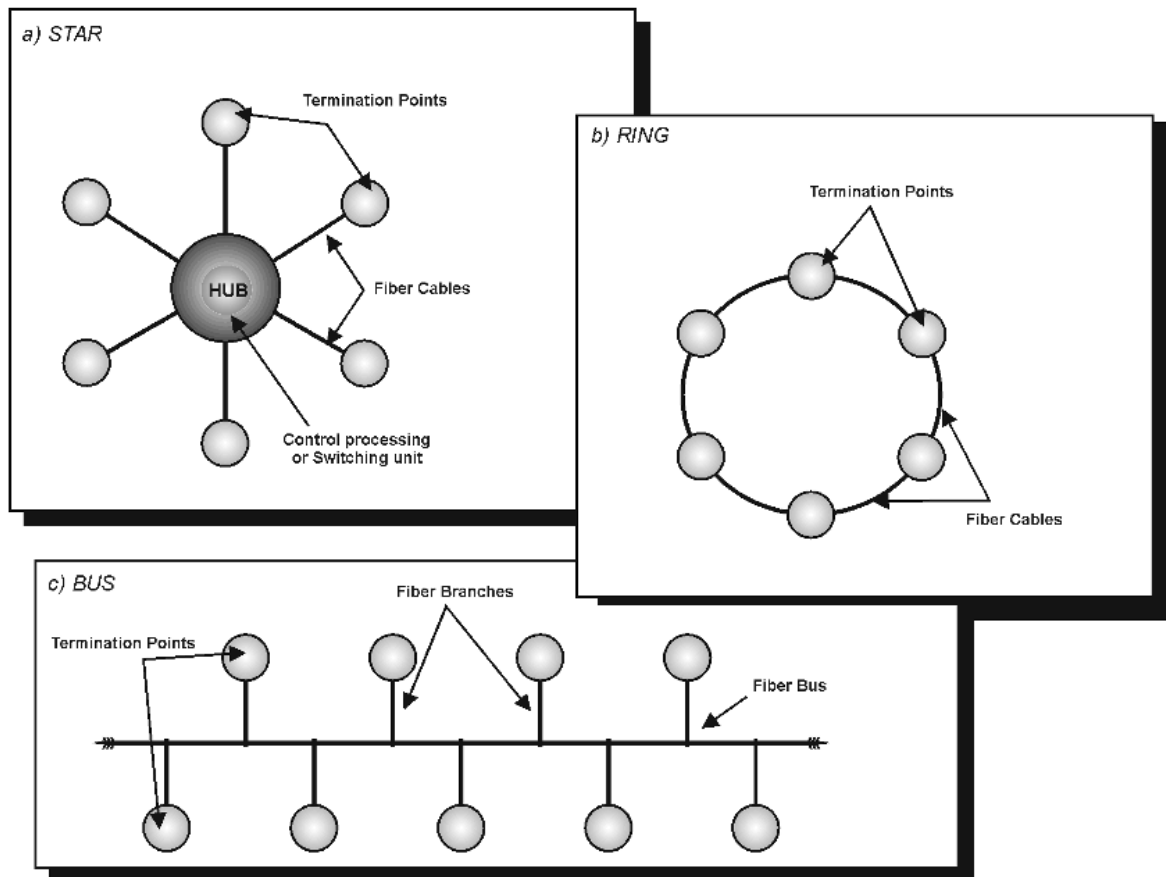


Figure 60. Illustration des topologies d'anneau en étoile et de bus.

IV.1.6. Répéteurs et amplificateurs

Pour les longs câbles où l'atténuation introduite par le câble, les connecteurs et les épissures font chuter le niveau du signal transmis en dessous du niveau minimum requis par le récepteur, un répéteur in situ ou un amplificateur est requis. L'amplificateur peut être placé directement entre l'émetteur et le câble ou entre le récepteur et le câble ou peut être placé à n'importe quelle distance le long du câble. L'amplificateur augmente simplement le niveau du signal entrant. Étant donné que l'amplificateur ne fait rien au signal entrant, sauf à l'amplifier, l'amplificateur ajoute intrinsèquement du bruit au signal sortant.

Le répéteur, d'autre part, est installé à un point éloigné le long du câble où le signal est tombé au niveau acceptable minimum proche. Il faut la faible impulsion lumineuse entrante, qui aura également souffert de la dispersion; il régénère cette impulsion dans une nouvelle impulsion carrée, puis l'amplifie et la transmet à la section de câble suivante. Cela supprimera intrinsèquement le bruit du signal.

Pour déterminer si des répéteurs et des amplificateurs sont nécessaires, les bilans de perte doivent être calculés. Cette procédure est discutée dans le paragraphe ultérieur.

Si possible, évitez les répéteurs car ils nécessitent une maintenance et sont généralement des éléments capitaux coûteux. Les amplificateurs optiques ne sont pas très efficaces et peuvent également être très chers. Il est important d'effectuer une analyse approfondie des coûts des

différentes alternatives à l'utilisation de répéteurs et d'amplificateurs. Par exemple, il peut être moins coûteux d'utiliser une seule longueur de câble longue de fibre monomode de haute qualité avec des sources laser que d'utiliser plusieurs sauts de câble fibre multimode avec des répéteurs et des sources LED. D'un autre côté, l'inverse de ce scénario peut être vrai.

IV.1.6. Sélection de l'équipement émetteur et récepteur

Une fois la conception terminée pour les paramètres discutés dans les sections précédentes, il est alors possible de sélectionner les émetteurs et récepteurs requis pour correspondre à ces paramètres de conception du système.

Si une norme particulière de transmission de données est installée, par exemple, Gigabit Ethernet, les modules émetteur et récepteur seront conçus pour fonctionner selon un ensemble de normes très rigoureuses auxquelles tous les fabricants doivent se conformer. Dans ce cas, il devrait être possible d'interfacer les équipements de différents fabricants et ils devraient communiquer avec succès.

Si le système à installer n'est pas conforme à une norme particulière, il est sage d'avoir des ensembles de modules émetteur et récepteur correspondants provenant d'une même source de fabricant pour chaque itinéraire. Malheureusement, bien que les modules de transmission et de réception de différents fabricants puissent prétendre adhérer à une seule norme physique, ils ne communiqueront pas souvent les uns avec les autres au niveau physique. Il est recommandé d'utiliser les mêmes types et modèles de modules émetteurs et récepteurs d'un même fabricant jusqu'à la fin de l'installation. Cela contribuera à simplifier les procédures de maintenance et réduira les besoins en pièces de rechange.

Les paramètres à prendre en compte avant de sélectionner un ensemble de modules émetteur et récepteur sont :

- La vitesse maximale de transmission de données requise
- La longueur d'onde de fonctionnement
- La distance de transmission maximale requise
- Les pertes introduites le long de chaque itinéraire
- La dispersion maximale attendue le long du lien
- Le temps de montée maximum autorisé pour chaque composant et pour le système dans son ensemble
- Si une LED ou une source laser est préférée
- L'AN et le diamètre de la fibre à utiliser et l'AN et le diamètre requis de la source et des détecteurs pour correspondre
- Adaptation des modules émetteur et récepteur à la fibre choisie
- Le codage de données requis à utiliser, s'il est effectué par les modules émetteur et récepteur (NRZ, Manchester, etc.)
- Que ce soit une application commerciale ou industrielle
- La fiabilité requise de l'équipement
- La disponibilité requise de chaque lien (y compris le TEB anticipé)

Dans la mesure du possible, il est préférable d'utiliser des LED plutôt que des lasers car ils sont nettement moins chers; ils nécessitent moins de protection de l'environnement et sont plus stables et moins sensibles aux contraintes physiques et aux vibrations.

À l'heure actuelle, les sources lumineuses à 1300 nm sont moins chères que les sources lumineuses à 1550 nm. Si des sources à 1550 nm doivent être utilisées, elles doivent avoir une largeur spectrale très étroite et doivent être utilisées avec des fibres à compensation de dispersion.

V. Calcul des pertes de conception

La prochaine étape de la conception d'un système à fibre optique consiste à déterminer si chaque section distincte de liaison de câble dans un système va fonctionner ou non, et quel niveau de performance elle va fournir. L'objectif principal ici est de déterminer s'il restera suffisamment de puissance dans le signal transmis pour qu'il active le récepteur lorsqu'il atteint l'extrémité du câble, et si le signal sera suffisamment exempt de bruit et de dispersion pour être interprété correctement. La section suivante fournit une description détaillée des procédures et des calculs nécessaires pour effectuer un bilan de perte et un bilan de bande passante. Tout d'abord, il examinera la définition et la dérivation des paramètres utilisés dans le calcul des bilans de pertes.

V.1. Définition des paramètres

- **Puissance de l'émetteur**

La méthode acceptée pour mesurer la puissance transmise hors d'une source de lumière optique est un arrangement de facto, où un morceau de fibre d'environ 2 m de longueur est attaché à la source de lumière et la puissance de sortie est mesurée à l'extrémité de la fibre. L'utilisation de cette méthode tient compte des décalages entre la fibre et la source de lumière tels que la taille du cœur de la fibre / source de lumière et les différences NA et de toute autre source de perte de puissance à l'interface source-fibre. Une spécification d'émetteur optique est donc généralement spécifiée avec une taille et un type de câble correspondant.

- **Puissance d'émission minimale**

Le fabricant indiquera généralement la puissance d'émission minimale qui peut être attendue de la source lumineuse au cours de sa durée de vie. Ce chiffre doit être utilisé dans les calculs pour garantir que le bilan de perte calculé se situe dans les limites acceptables.

La valeur de puissance de sortie spécifiée sera soit la puissance de crête soit la puissance moyenne et sera spécifiée en dBms. Le point important à retenir ici est d'utiliser le même type de mesure de puissance (crête ou moyenne) pour l'émetteur et le récepteur dans les calculs. Si les types de mesure sont différents, les chiffres du bilan de perte peuvent être incorrects de 3 dB ou plus.

- **Sensibilité du récepteur**

Pour un détecteur optique particulier, le fabricant indiquera le niveau minimal de puissance de signal requis à l'extrémité de réception de la fibre pour activer le récepteur. Ce niveau de signal de réception minimum autorisé est appelé sensibilité du récepteur. La sensibilité du récepteur indiquée sera le niveau de signal de réception minimum requis pour fournir une sortie de données du récepteur avec le pire taux d'erreur sur les bits (BER) de 10^{-9} ou 10^{-12} .

Il y a deux points importants à noter concernant la sensibilité du récepteur. À mesure que le débit de données augmente, un récepteur nécessitera une augmentation de la puissance d'entrée minimale (sensibilité du récepteur) pour conserver le même BER. Deuxièmement, si

le débit de données reste le même et que le niveau d'entrée de l'émetteur ne baisse que légèrement, le taux d'erreur sur les bits peut augmenter considérablement. Par exemple, si le niveau du signal reçu chute de 1 dB en dessous de la sensibilité du récepteur, le taux d'erreur sur les bits pourrait chuter à 10^{-6} .

- **Gain du système**

Le gain du système est un chiffre qui représente la puissance optique totale disponible entre la source optique et le détecteur optique. Par conséquent, le gain du système peut être représenté comme la différence numérique entre la puissance de sortie de l'émetteur et la sensibilité du récepteur.

- **Pertes de système**

Les pertes du signal optique (atténuation) sur une liaison à fibre optique sont causées par l'atténuation naturelle des fibres, les pertes d'épissage, les pertes de connecteur, les pertes de couplage, les pertes de dispersion, les pertes dues au vieillissement des composants et les variations dans le temps des pertes environnementales. (Par exemple, température, stress physique, fibres endommagées.)

- **Marge de sécurité**

Les pertes de composants dues au vieillissement et aux variations dans le temps des pertes environnementales ne sont pas directement calculables et sont prises en compte en laissant une marge de sécurité dans la conception. Cette marge permet également de tenir compte des petites erreurs de conception et des épissures supplémentaires qui pourraient être nécessaires à une date ultérieure si le câble est cassé. Les fabricants spécifient également parfois un chiffre appelé pénalité de puissance du récepteur. Il s'agit d'un chiffre de marge de sécurité d'alimentation qui doit compenser la gigue, les limitations de bande passante, la dispersion et les problèmes de récupération d'horloge qui peuvent être rencontrés par le récepteur et réduire sa sensibilité effective du récepteur. Cette marge de puissance doit également être couverte par la marge de sécurité du système. L'auteur recommande que la marge de sécurité conçue se situe entre 5 et 10 dB.

- **Gamme dynamique**

Le détecteur récepteur aura une limite maximale à la puissance du signal qu'il peut recevoir sans entrer en distorsion. La différence entre la puissance maximale qu'il peut recevoir et la sensibilité du récepteur est appelée plage dynamique.

Lors de la conception d'un système, il est important que la plage dynamique du récepteur ne soit pas dépassée. Une atténuation suffisante doit être disponible dans la voie des fibres pour garantir qu'elle ne se produise pas. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'insérer une atténuation supplémentaire dans la section de fibre.

- **Perte de couplage émetteur-fibre**

Le couplage des LED aux fibres entraîne une perte importante de la puissance de la LED car la LED a une très grande surface par rapport à la surface du noyau de fibre. Par exemple, une LED couplée à une fibre de 50 μm de diamètre perdra environ 15 dB de la puissance transmise à la

perte de couplage. Si la LED produit 0 dBm (1 mW) de puissance de sortie, alors seulement – 15 dBm (32 μ W) de puissance pénètre dans le cœur de la fibre pour la transmission. Les pertes d'une LED dans une fibre monomode sont nettement plus élevées (environ 35 dB) et ne sont donc presque jamais utilisées en combinaison.

Les lasers ont généralement une surface beaucoup plus petite que le cœur d'une fibre monomode et, par conséquent, les pertes de couplage sont relativement faibles. Plusieurs milliwatts de puissance peuvent être couplés dans une fibre monomode à partir d'un laser. Comme mentionné précédemment, le fabricant spécifie généralement la puissance de sortie d'une source optique comme la puissance disponible après plusieurs mètres de fibre et non la puissance directement de la source elle-même.

- **Pertes de couplage fibre-récepteur**

Pour les fibres monomodes et multimodes, les détecteurs ont une surface beaucoup plus grande que les noyaux de fibres optiques et, par conséquent, il n'y a qu'une très faible perte de couplage encourue (principalement en raison de la réflexion interne de Fresnel).

- **Bilan de pertes de liaison**

Si la marge de sécurité est soustraite du gain du système, le chiffre restant est le bilan de perte de liaison. Ce coefficient représente la quantité maximale de perte de signal disponible pendant le processus de conception pour l'atténuation du câble, les pertes d'épissage et les pertes de connecteur. Certains fabricants fourniront un bilan de perte de liaison avec leur équipement émetteur et récepteur qui tiendra compte de la marge de sécurité et du gain du système. Ce concept est illustré dans la **Figure 61**.

- **Marge de fondu**

Étant donné que la longueur du chemin de câble est connue, la perte totale connue peut être calculée (pour les connecteurs, les épissures, la longueur du câble). Si ce chiffre est soustrait du bilan de perte de liaison, alors il devrait y avoir une valeur positive. C'est ce qu'on appelle la marge de fondu et elle représente la quantité de gain système inutilisé.

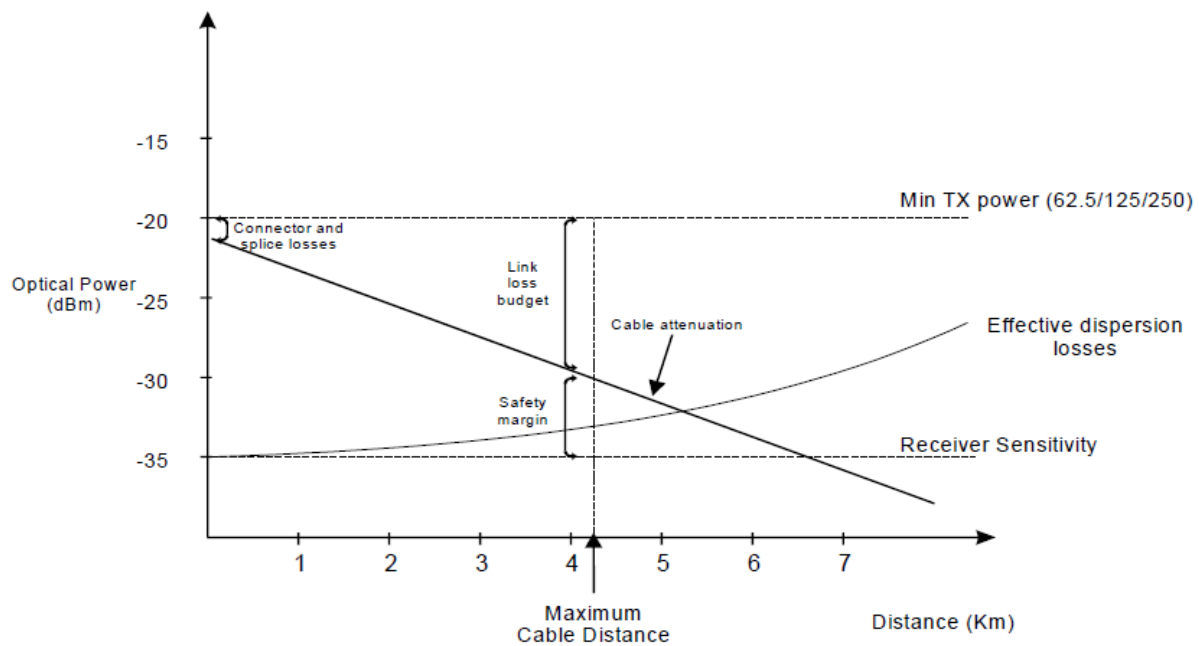


Figure 61. Illustration du bilan de perte de liaison et de la marge de sécurité.

V.2. Méthodologie pour les calculs de bilan de perte

Ce qui suit est une approche étape par étape de la conception du bilan de perte de puissance d'une liaison à fibre optique :

- **Puissance dans la fibre**

Généralement, la puissance d'émission donnée par le fabricant est la puissance dans la fibre. Sinon, la perte de couplage doit être déterminée.

Puissance dans la fibre (dB) = Puissance TX (dBm) – Perte de couplage (dB)

- **Calculer le gain du système**

Soustrayez la sensibilité du récepteur, pour un taux d'erreur binaire donné, de la puissance d'émission minimale. Les deux valeurs doivent être dans le même type d'unités (la plus courante étant dBm) et doivent être du même type de mesure (puissance moyenne ou puissance de crête). Le gain du système sera alors représenté en décibels.

Gain du système (dB) = Puissance TX (dBm) – Sensibilité RX (dBm) (35)

- **Déterminer la marge de sécurité**

Soit calculer la marge de sécurité ou autoriser un chiffre approprié. La marge de sécurité est représentée en décibels.

Marge de sécurité (dB)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Facteur environnemental (dB)} + \text{Facteur de vieillissement (dB)} \\
 &+ \text{Facteur de dispersion (dB)} + \text{Facteur de gigue (dB)} \\
 &+ \text{Facteur de maintenance (dB)} \\
 &+ \text{marge d'erreur de conception (dB)}
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

- **Calculer le bilan de perte de liaison**

Déterminez la perte maximale admissible pour la section de liaison de câble à fibres optiques de bout en bout en soustrayant la marge de sécurité du gain du système.

$$\text{Bilan de perte de liaison (dB)} = \text{Gain système (dB)} - \text{Marge de sécurité (dB)} \quad (37)$$

- **Calculer les pertes totales des connecteurs**

Calculez les pertes totales de connecteurs dans une section de liaison de fibre optique en multipliant le nombre de connecteurs dans cette section par la perte par connecteur (en dB).

$$\begin{aligned} \text{Pertes totales des connecteurs (dB)} \\ = \text{Pertes du connecteur (dBm)} \times \text{nombre de connecteurs} \end{aligned} \quad (38)$$

- **Calculer les pertes totales d'épissure**

Calculez les pertes d'épissure totales dans une section de liaison de fibre optique en multipliant le nombre d'épissures par la perte par épissure (en dB).

$$\text{Pertes totales des épissures (dB)} = \text{Perte par épissure (dB)} \times \text{nombre d'épissures} \quad (39)$$

- **Calculer d'autres pertes possibles**

Calculez les autres pertes du système en additionnant les pertes dues aux composants passifs dans la voie de la fibre optique. Par exemple : étoiles passives, combineurs, séparateurs, etc.

- **Calculer l'atténuation maximale autorisée du câble**

Chaque section de liaison par fibre doit être analysée pour déterminer l'atténuation maximale admissible du câble à fibre optique. Ceci est calculé en soustrayant les pertes de connecteur, les pertes d'épissure et d'autres pertes du bilan de perte de liaison.

$$\begin{aligned} \text{Atténuation autorisée du câble (dB)} \\ = \text{Bilan de perte de liaison (dB)} - \text{Pertes des connecteurs (dB)} \\ - \text{Pertes des épissures (dB)} - \text{Autres pertes (dB)} \end{aligned} \quad (40)$$

- **Calculez l'atténuation maximale normalisée du câble**

Pour chaque section de fibre optique, déterminez l'indice d'atténuation maximal autorisé en décibels par kilomètre (dB/km). Ce chiffre calculé est ensuite comparé aux chiffres d'atténuation du fabricant pour déterminer quels câbles conviennent à chaque section. Le chiffre est calculé en divisant l'atténuation de câble maximale autorisée par la longueur totale du câble.

$$\begin{aligned} \text{Attén. max. norm. du câble (dB/km)} \\ = \frac{\text{Atténuation maximale autorisée du câble (dB)}}{\text{longueur totale du câble (km)}} \end{aligned} \quad (41)$$

- **Choisir le grade de fibre requis**

Une fois que le facteur d'atténuation de câble normalisé maximal a été calculé, choisissez la catégorie de câble de fibre optique appropriée pour correspondre. La teneur en fibre (dB/km) doit être égale ou inférieure à celle calculée précédemment dans cette section.

- **Calculez la perte de fibre pour chaque section de câble**

Calculez l'atténuation attendue du signal de chaque section de fibre optique, en multipliant la longueur de câble d'une section par l'atténuation normalisée spécifiée du câble choisi.

$$\text{Perte dans la fibre (dB)} = \text{longueur de la fibre (km)} \times \text{Attén. norm. du câble} \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \quad (42)$$

- **Calculez le niveau du signal reçu**

Déterminez le niveau de puissance du signal à l'extrémité de la fibre qui entre dans le récepteur. Ceci est calculé en soustrayant toutes les pertes le long de la section du câble de la puissance d'émission dans la fibre.

$$\begin{aligned} \text{Niveau du signal reçu (dBm)} \\ &= \text{Puissance transmise (dBm)} - \text{Perte dans la fibre (dB)} \\ &\quad - \text{Pertes des connecteurs (dB)} - \text{Pertes des épissures (dB)} \\ &\quad - \text{Autres pertes (dB)} \end{aligned} \quad (43)$$

- **Vérifiez la plage dynamique**

Assurez-vous que le niveau du signal de réception à la fin de la section de fibre ne dépasse pas le niveau de signal maximal autorisé dans le récepteur. Ceci est calculé en ajoutant la plage dynamique à la sensibilité du récepteur et en s'assurant que le niveau du signal reçu est inférieur à ce résultat.

$$\begin{aligned} \text{Niveau du signal reçu (dBm)} \\ &< \text{Sensibilité du récepteur (dBm)} + \text{Gamme dynamique (dB)} \end{aligned} \quad (44)$$

V.3. Exemple de calcul

Les spécifications (cahier de charge) du système sont les suivantes :

light source	LED
fiber type	50/125/250 graded
operating wavelength	850 nm
minimum TX power into fiber (average)	-17 dBm
receiver sensitivity	-40 dBm
dispersion margin	0.5 dB
jitter factor	0.2 dB
dynamic range	14 dB
connector loss	0.8 dB
splice loss (mechanical)	0.5 dB
number of connectors	4
number of splices	3
section in length	3.48 km

Voici la procédure qui a été discutée dans le Paragraphe V.2 :

- (a) Puissance dans la fibre = -17 dBm
- (b) Gain du système = $(-17 \text{ dBm}) - (-40 \text{ dBm}) = 23 \text{ dB}$
- (c) Soit :
- Facteur d'environnement = 1 dB
- Facteur de vieillissement = 2 dB
- Facteur de maintenance = 1 dB
- Facteur d'erreur de conception = 2 dB
- Facteur de dispersion = 0.5 dB
- Facteur de gigue = 0.2 dB
- Alors :
- Marge de sécurité = $1 + 2 + 1 + 2 + 0.5 + 0.2 = 6.7 \text{ dB}$
- (d) Bilan de perte de liaison = $23 \text{ dB} - 6.7 \text{ dB} = 16.3 \text{ dB}$
- (e) Pertes totales des connecteurs = $4 \times 0.8 \text{ dB} = 3.2 \text{ dB}$
- (f) Pertes totales des épissures = $3 \times 0.5 \text{ dB} = 1.5 \text{ dB}$
- (g) No. Des autres pertes
- (h) Atténuation maximale autorisée du câble = $16.3 - 3.2 = 11.6 \text{ dB}$
- (i) Atténuation maximale normalisée du câble = $11.6 \text{ dB} / 3.48 \text{ km} = 3.33 \text{ dB/km}$
- (j) En utilisant le résultat de (i) comme référence, le câble choisi était un modèle Belden 227417, qui a une atténuation normalisée maximale de 3 dB/km et une bande passante de 600 MHz.km à 850 nm.
- (k) Perte de la fibre = $3.48 \text{ km} \times 3 \text{ dB/km} = 10.44 \text{ dB}$
- (l) Niveau di signal reçu = $-17 \text{ dBm} - 10.44 - 3.2 - 1.5 = -32.14 \text{ dBm}$
- (m) Vérification de la gamme dynamique : $-32.14 \text{ dBm} < (-40 \text{ dBm} + 14 \text{ dB}) = -26 \text{ dBm}$

VI. Calculs de la conception de la bande passante

La prochaine exigence dans la conception d'un système à fibre optique est de déterminer si le système de liaison a une bande passante suffisante pour prendre en charge l'exigence de vitesse de données du système. Étant donné que la plus grande majorité des liaisons par fibre optique sont utilisées pour la transmission numérique, cette discussion examinera les besoins en bande passante pour la transmission numérique standard.

VI.1. Temps de réponse

La méthode la plus simple pour évaluer les besoins en bande passante d'un système de liaison de transmission consiste à examiner et à comparer les réponses temporelles du signal et du système de transmission. Cela évite (certains mathématiciens diraient «incorrectement») la nécessité d'analyser le système et les signaux du point de vue de la fréquence, ce qui peut devenir assez complexe.

Le signal lumineux qui émane de l'émetteur sera sous la forme d'une onde carrée. S'il s'agit d'une forme d'onde de non retour à zéro (NRZ), alors elle aura une période de signal égale à une période de bit. Par conséquent, pour un taux de transmission de données de R et une durée d'impulsion de T :

$$T = \frac{1}{R} \quad (45)$$

Ceci est illustré dans la **Figure 62**.

Par exemple, si le signal a une période de $1 \mu\text{s}$ (1×10^{-6} secondes), le débit de transmission des données est de 1 Mbps pour un signal NRZ.

En théorie, le temps de réponse du système de liaison (le système de liaison comprend l'émetteur, le récepteur et le câble à fibres optiques) doit être plus rapide (période de réponse plus courte) que le temps de réponse du signal (temps de montée du signal) pour que le signal passe avec succès. La liaison à fibre optique peut être conçue comme un filtre passe-bas, dont la fréquence de coupure doit être supérieure à la composante de fréquence la plus élevée du signal qui tente de la traverser. Si la réponse temporelle du système de liaison de transmission est trop lente, alors les impulsions provenant de l'extrémité de réception du système de liaison verront leurs temps de montée ralentis par le temps de réponse du système et se chevaucheront.

L'effet de filtrage passe-bas du système de liaison sur l'impulsion d'entrée carrée produit une impulsion courbe à la sortie du récepteur, comme illustré sur la **Figure 62** (comme la charge et la décharge d'un filtre passe-bas ou d'un condensateur). Afin de définir une limite à la réponse temporelle du système de liaison, une règle empirique souvent utilisée consiste à supposer le pire des cas (temps de réponse le plus lent du système). Cela signifie que lorsque l'impulsion sortant du récepteur a augmenté ou est égale ou supérieure à 90% de l'amplitude d'impulsion d'entrée dans 70% de la période d'impulsion d'entrée. C'est-à-dire que le temps de montée du système de liaison ne doit pas dépasser 70% de la durée d'impulsion d'entrée.

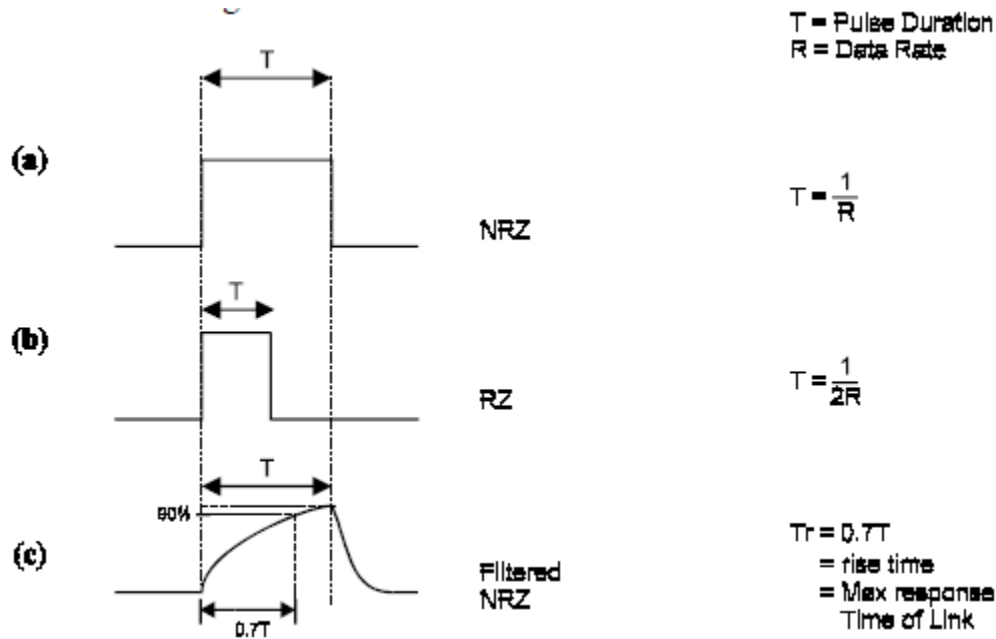


Figure 62. Illustration de la durée d'impulsion et de la réponse temporelle.

$$T_r = 0.7T = \frac{0.7}{R} \quad (46)$$

où :

T_r est le temps de montée du système

T est la période d'impulsion d'entrée

Le temps de montée autorisé devient alors la réponse temporelle maximale autorisée du système de liaison. Par exemple, si le système de liaison doit être capable de transmettre un débit de données de 1 Mbps, où la durée d'impulsion du signal d'entrée pour une impulsion NRZ est de 1 μs , la réponse temporelle maximale requise du système de liaison est :

$$0.7 \times 1\mu\text{s} = 0.7\mu\text{s}$$

La réponse temporelle de 0.7 μs représente une exigence de bande passante minimale du système de liaison fibre optique de $1 / (0.7 \mu\text{s}) = 1.43 \text{ MHz}$ pour transmettre avec succès le signal de 1 Mbps.

Si le signal est un signal de retour à zéro, alors la période d'impulsion est la moitié de celle du signal de non retour à zéro. Ceci est illustré dans la **Figure 62(b)**. La réponse de temps de liaison système requise est :

$$T_r = (0.7 \times T)/2 = 0.35T = 0.35/R$$

VI.2. Réponse globale du temps système

Pour calculer la réponse temporelle globale d'un système de liaison de transmission à fibre optique, prenez la racine carrée de la somme des carrés de la réponse temporelle de chaque composant individuel. Ceci est représenté comme :

$$T_s = \sqrt{\sum_i T_i^2} \quad (47)$$

où :

T_s = la réponse temporelle du système

T_i = réponse temporelle de chaque composant individuel

Les seules composantes qui affectent la réponse temporelle d'un système de degré quelconque sont l'émetteur, le récepteur et la longueur de la fibre optique. Les dispositifs passifs tels que les coupleurs, les étoiles, les connecteurs et les épissures n'entraînent aucun effet notable sur la réponse temporelle du système. Par conséquent, la réponse temporelle du système devient :

$$T_s = \sqrt{\sum_i (T_t^2 + T_r^2 + T_f^2)} \quad (48)$$

où :

T_t = la réponse temporelle de l'émetteur

T_r = réponse temporelle du récepteur

T_f = réponse temporelle de la fibre optique

VI.3. Réponse temporelle des fibres optiques

Le temps de montée de la fibre optique T_f est affecté par deux facteurs; dispersion modale et dispersion chromatique. L'effet total des deux dispersions est trouvé en utilisant la formule de la somme des carrés sur les réponses temporelles distinctes qui résultent de chaque dispersion.

La réponse temporelle provoquée par la dispersion modale est donnée par :

$$T_{fm} = D_m L \quad (49)$$

T_{fm} = réponse temporelle de la dispersion modale (ns)

D_m = dispersion modale (ns/km)

L = longueur de la fibre (km)

Pour déterminer une valeur de dispersion modale, nous pouvons supposer que la largeur de bande maximale d'une fibre est directement corrélée à la dispersion modale minimale qui peut être atteinte à partir de cette fibre.

Le fournisseur indiquera normalement la bande passante de 3 dB de la fibre. Dans ce cas, une formule empirique est utilisée pour calculer D_m :

$$D_m = \frac{350}{\text{Bande passante(3dB)}} \quad (50)$$

où la bande passante est en MHz/km.

Si le fournisseur fournit un chiffre pour la «bande passante modale», il s'agit simplement d'inverser cette valeur :

$$D_m = \frac{1}{\text{Bande passante(modale)}} \quad (51)$$

Une autre méthode consiste à calculer l'étalement des impulsions modales à l'aide de la formule suivante :

$$T_P = \frac{(NA)^2(L)}{2NC} \quad (52)$$

où :

NA = Ouverture numérique

L = Longueur

N = Indice de réfraction du cœur

C = 3×10^8

L'étalement des impulsions optiques peut être converti en temps de montée électrique grâce aux éléments suivants :

$$T_{fm} = 0.44T_{PS} \quad (53)$$

La première des deux méthodes est préférée car elle est calculée à partir d'un chiffre mesuré réel fourni par le fournisseur, sur une longueur complète de 1 km du câble. La deuxième méthode est basée sur de nombreuses hypothèses et tend à donner des résultats plutôt fallacieux.

La réponse temporelle provoquée par la dispersion chromatique est donnée par :

$$T_{fc} = D_c \times \Delta\lambda \times L \quad (54)$$

où :

T_{fc} = réponse temporelle de la dispersion chromatique (ps)

D_c = dispersion chromatique (ps/(nm×km))

$\Delta\lambda$ = étalement spectral (gamme des longueurs d'onde) de la source optique (nm)

L = longueur du câble de la fibre optique (km)

Le fabricant dans la spécification de fibre optique fournit le chiffre de dispersion chromatique. Par conséquent, la réponse temporelle T_f de la fibre est donnée par :

$$T_f = \sqrt{\sum_i (T_{fm}^2 + T_{fc}^2)} \quad (55)$$

Pour les fibres multimodes, notez que la dispersion modale est le problème important et la dispersion chromatique dans une moindre mesure mais pour les fibres monomodes, la dispersion modale devient négligeable et la dispersion chromatique devient le facteur majeur.

VI.4. Réponses temporelles de l'émetteur et du récepteur

Les réponses temporelles des émetteurs et récepteurs optiques sont fournies dans les fiches techniques des fabricants. Pour les systèmes de transmission à LED, qui sont généralement à courte distance, les réponses temporelles de la source et du détecteur sont lentes par rapport à la réponse temporelle de la fibre optique. Par exemple, une réponse temporelle typique pour un émetteur est d'environ 6 ns et pour un détecteur, environ 10 ns. Sur 1 km de fibre, la réponse temporelle peut n'être que de 2 ns.

Pour les émetteurs et récepteurs laser, les réponses temporelles sont généralement inférieures à 0.5 ns et pour une fibre monomode, la réponse temporelle serait généralement nettement inférieure à 0.01 ns sur une liaison de 1 km.

V.5. Exemple de calcul de la bande passante

Un système de transmission à fibre optique a les spécifications suivantes :

light source	LED
spectral spread of LED	45 nm
fiber type	50/125/250 graded
operating wavelength	850 nm
bandwidth (3 dB)	600 Mha-km
chromatic dispersion	110 ps/(nm-km)
NA	0.2
section length	3.48 km
transmitter rise time	6 ns
receiver rise time	9 ns
signal type	NRZ

Calculez le taux de transmission de données (débit) R pour des signaux NRZ et RZ.

Solution

- (a) La première étape consiste à calculer la dispersion modale de la fibre à l'aide de la première formule empirique

$$D_m = \frac{350}{\text{Bande passante(3dB)}} = \frac{350}{600} = 0.58 \text{ ns/km}$$

- (b) Calculez la réponse temporelle causée par la dispersion modale :

$$T_{fm} = D_m L = 0.58 \times 3.48 = 2.02 \text{ ns}$$

- (c) Calculez la réponse temporelle due à la dispersion chromatique de la fibre :

$$T_{fc} = D_c \times \Delta\lambda \times L = 110 \times 45 \times 3.48 = 17226 \text{ ps} = 17.226 \text{ ns}$$

- (d) Calculez la réponse temporelle globale de la fibre :

$$T_f = \sqrt{\sum_i (T_{fm}^2 + T_{fc}^2)} = \sqrt{2.02^2 + 17.226^2} = 17.34 \text{ ns}$$

- (e) Calculer la réponse temporelle globale du système de liaison.

$$T_s = \sqrt{\sum_i (T_t^2 + T_r^2 + T_f^2)} = \sqrt{6^2 + 9^2 + 17.34^2} = 20.44 \text{ ns}$$

- (f) Le chiffre calculé en (e) représente la réponse temporelle minimale d'un signal qui passerait avec succès le système de liaison. C'est-à-dire que le 20.44 ns est la réponse temporelle la plus rapide possible à partir du système de la liaison. Le signal doit avoir une réponse temporelle plus lente que le système pour le traverser avec succès. Par conséquent, pour calculer le débit de données maximal que le système de liaison peut prendre en charge, ce chiffre de réponse temporelle doit être d'au moins 0.7 de la durée d'impulsion du signal numérique.

$$T_s = 0.7T \text{ et } T = \frac{1}{R}$$

$$T = \frac{T_s}{0.7} = \frac{20.44 \times 10^{-9}}{0.7} = 29.2 \times 10^{-9} \text{ s}$$

$$R = \frac{1}{T} = \frac{1}{29.2 \times 10^{-9}} = 34.25 \text{ Mbps (NRZ)}$$

$$R = 17.12 \text{ Mbps (RZ)}$$

Avec la vitesse de données maximale calculée pour ce segment de liaison, il peut maintenant être déterminé si cela correspond aux exigences de la technologie proposée. Par exemple, ce lien conviendrait à un Ethernet FOIRL. Il convient également de noter d'après les chiffres utilisés en (d) et (e) que le principal facteur limitant est ici la dispersion chromatique. Ceci est plus important que la dispersion modale car une LED est utilisée à 850 nm, qui a une très large largeur spectrale et une dispersion chromatique élevée à la longueur d'onde de 850 µm, sur une distance relativement longue. Si une LED fonctionnant à 1300 nm (qui est plus proche de la longueur d'onde de dispersion nulle avec une dispersion chromatique d'environ 5 ps / nm / km), la dispersion modale deviendrait le principal facteur limitant. Il en serait ainsi si le laser devait être utilisé (qui a une largeur spectrale d'environ 3 nm) ou si la liaison fonctionnait sur une distance plus courte, (mais bien sûr, la dispersion modale sera également très faible en raison du très petit nombre des modes émis par un laser).

Chapitre V

METHODES DE MESURE DE LIAISONS OPTIQUES

Contenu

Réflectomètre optique dans le domaine temporel (OTDR)

Mesure du taux d'erreur (BER) et diagramme de l'œil (eye diagram/pattern)

I. Introduction

Une fois qu'un système de liaison à fibre optique a été installé, il est essentiel que la liaison soit soigneusement testée pour s'assurer qu'elle fonctionnera conformément aux spécifications de conception. Le test du système de fibre optique, à la fois pendant l'installation et ensuite pour la mise en service du système est une partie obligatoire du projet. Les tests de mise en service effectués détermineront si le câble à fibres optiques installé final est continu et stable, si des dommages ont été causés au câble pendant l'installation, si les pertes calculées pendant la phase de conception en raison des épissures, des connecteurs, de la longueur des fibres, etc. , sont corrects et si le système installé final fonctionne à un niveau de performance acceptable.

Si le système a été soigneusement conçu puis correctement installé, les résultats des tests commandés devraient généralement fournir de meilleures performances que les paramètres conçus (en supposant qu'une approche de conception conservatrice a été adoptée). En de rares occasions, le lien fonctionnera moins bien que prévu. Cela peut être dû à des pertes de flexion excessives inattendues. Le lien subira également une détérioration des performances au cours de sa durée de vie, ce qui aurait dû être pris en compte dans le processus de conception. La marge de sécurité pour tenir compte de ces pertes imprévisibles sera également confirmée lors des tests de mise en service.

Ce chapitre examine les conditions requises pour tester les câbles à fibres optiques. La première partie du chapitre examine les concepts fondamentaux spécifiques à la prise de mesures optiques. La deuxième partie du chapitre examine en détail les principaux tests de fibre optique qui sont normalement effectués sur les câbles et équipements de fibre optique préinstallés et installés en dernier. Enfin, un bilan de liaison par fibre optique est calculée en terme de puissance et de bande passante.

II. Concepts fondamentaux de la mesure optique

II.1. Puissance optique

L'unité de mesure fondamentale utilisée en fibre optique est la puissance. Comme pour l'énergie électrique, la puissance optique est mesurée en watts. La lumière a des propriétés similaires à l'électricité. L'énergie lumineuse comme l'énergie électrique est théoriquement sous la forme d'une onde sinusoïdale. Par conséquent, la base des formules mathématiques qui sont utilisées pour calculer les mesures liées à la puissance avec la puissance électrique pourrait également être utilisée pour calculer les mesures liées à la puissance avec la puissance optique.

L'unité de mesure fondamentale utilisée en fibre optique est la puissance lumineuse. Comme pour l'énergie électrique, la puissance optique est mesurée en watts. La lumière a des propriétés similaires à l'électricité. L'énergie lumineuse comme l'énergie électrique est théoriquement sous la forme d'une onde sinusoïdale. Par conséquent, la base des formules mathématiques qui sont utilisées pour calculer les mesures liées à la puissance avec la puissance électrique pourrait également être utilisée pour calculer les mesures liées à la puissance avec la puissance optique.

Les analogies suivantes s'appliquent aux mesures optiques :

- La puissance est une mesure du taux de transfert d'énergie (où l'énergie est mesurée en joules «Q»). C'est:

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad (56)$$

- La puissance est une mesure de la tension (V) et du courant (I). Une onde lumineuse a un champ électrique et un champ magnétique, qui est analogue au champ de tension et au champ de courant en énergie électrique. Par conséquent: Pour l'énergie électrique :

$$P = VI \quad (57)$$

Pour l'énergie lumineuse :

$$D = \epsilon E \quad B = \mu H \quad S = EH \quad (58)$$

où

D = densité de flux électrique

B = densité de flux magnétique

E = intensité du champ électrique

H = intensité du champ magnétique

ϵ = Permittivité du milieu

μ = Perméabilité du milieu

S = densité d'énergie (watts / mètre carré)

- L'énergie lumineuse est directement proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde électromagnétique. La puissance en énergie électrique est directement proportionnelle au carré des amplitudes de tension ou de courant.

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 R \quad (59)$$

Dans le cas de l'énergie lumineuse, la résistance serait en effet la perméabilité et la perméabilité du verre.

Pour la lumière, l'énergie totale Q est donnée par :

$$Q = NQ_p \quad (60)$$

Où :

Q_p est l'énergie d'un seul photon

N est le nombre de photons

Donc :

$$P = \frac{d(NQ_p)}{dt} \quad (61)$$

Les mesures de puissance lumineuse sont généralement effectuées et spécifiées en décibels.

Le signal qui émane d'un émetteur optique sera sous forme d'impulsions. Le niveau de puissance qu'il transmet varie continuellement. La mesure de cette puissance peut être un pic instantané ou une moyenne. En général, la mesure et la spécification de la puissance optique sont en tant que puissance moyenne.

La puissance est également directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique et inversement proportionnelle à la longueur d'onde de l'onde électromagnétique (comme $C = \lambda f$). La lumière est théoriquement sous la forme de minuscules particules appelées photons, qui sont émises par les atomes lorsque les électrons montent et descendent des différentes couches d'énergie qui entourent les atomes. À mesure que la fréquence augmente (c'est-à-dire que la longueur d'onde diminue), il y a une augmentation proportionnelle de l'énergie dans le photon. Cela signifie en effet qu'il faut plus d'énergie pour exciter un électron pour produire un photon haute fréquence que pour produire un photon basse fréquence. Par conséquent, comme la mesure de la puissance optique est la mesure du flux de photons par unité de temps, la puissance optique est directement proportionnelle à la fréquence et inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Cette relation est décrite dans la loi de Planck :

$$Q = hf \quad (62)$$

où Q est l'énergie dans le photon et h est la constante de Planck.

II.2. Mesure de la puissance

Différents matériaux utilisés pour fabriquer des détecteurs de lumière sont sensibles à différentes longueurs d'onde. Par exemple, les détecteurs au silicium répondent fortement aux longueurs d'onde de 850 nm tandis que les détecteurs à l'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs) répondent fortement aux longueurs d'onde de 1300 nm et 1550 nm. Par conséquent, les détecteurs de lumière utilisés à des fins de mesure de puissance doivent être étalonnés pour la fréquence qu'ils doivent mesurer.

Les détecteurs ne fourniront qu'une réponse linéaire sur une plage dynamique limitée du niveau du signal d'entrée. Par conséquent, ils doivent être calibrés pour une application particulière et la plage de puissances prévue à l'extrémité du câble à fibres optiques dans le détecteur.

Le temps de réponse d'un détecteur dans un posemètre est très lent par rapport à la vitesse des impulsions entrantes. Par conséquent, la plupart des wattmètres optiques sont calibrés pour mesurer la puissance moyenne.

II.3. Bande passante optique et électrique

La bande passante est spécifiée sous deux formes différentes, optique et électrique. La bande passante optique fait référence à la fréquence de modulation la plus élevée à laquelle la sortie du système optique a chuté de 3 dB par rapport aux réponses optiques à basse fréquence. En raison du processus de conversion optique en électrique dans un détecteur optique, une baisse de 3 dB de la puissance optique entraîne une baisse de 6 dB de la lecture de la puissance électrique. La mesure de la bande passante électrique utilise la même règle que la bande passante optique; la bande passante électrique est l'endroit où la réponse en fréquence a chuté de 3 dB. Par conséquent, lorsqu'il est nécessaire de mesurer la largeur de bande optique, il faut se rappeler que le détecteur affichera une baisse de 6 dB de la puissance électrique.

L'équipement de mesure de puissance compensera cela et montrera la puissance optique correcte.

III. Tests standard de fibre optique

Les tests des équipements et câbles à fibres optiques sont généralement effectués avant et après l'installation du système. La section suivante examine les principaux tests effectués sur les systèmes à fibres optiques.

III.1 Test des composants

Les tests des équipements d'émission et de réception ne sont généralement pas effectués avant l'installation, principalement en raison des coûts supplémentaires et des équipements de test impliqués. Cependant, bien que ces composants aient été testés par le fournisseur, il est recommandé de les tester à nouveau avant l'installation, comme pour des performances d'intégrité élevées.

Deux tests principaux sont effectués sur l'équipement d'émission et de réception. La première consiste à tester la puissance de sortie de l'émetteur. L'émetteur est connecté à un court morceau de fibre de référence d'environ 2 m de long. La fibre de référence doit être du même type et de la même taille que la fibre à laquelle l'émetteur a été conçu pour s'interfacer et qui est destinée à être installée dans le système. Un wattmètre est connecté à l'autre extrémité de la fibre et la puissance indiquée est indiquée. Ce chiffre doit se situer à $\pm 5\%$ de la puissance dans le chiffre de fibre fourni par le fournisseur pour cet émetteur. Ce test est illustré à la **Figure 63**.

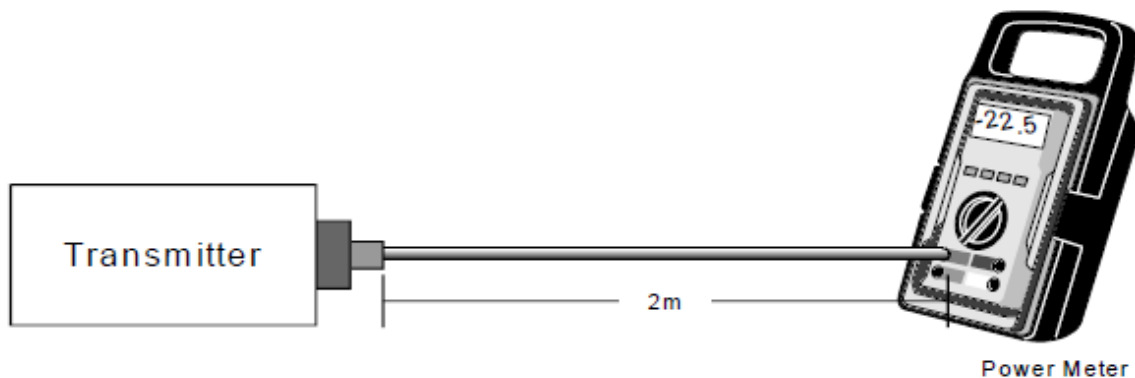


Figure 63. Contrôle du niveau de la puissance dans la fibre d'un émetteur.

Le deuxième test consiste à vérifier le récepteur. Ceci est effectué en connectant l'émetteur et le récepteur à une fibre de référence, qui fournit l'atténuation requise pour que le niveau du signal reçu soit descendu au niveau de sensibilité du récepteur pour un BER de 10^{-9} . Cela devrait correspondre au niveau indiqué par le fabricant dans les spécifications du récepteur (le niveau du signal reçu peut être vérifié avec un wattmètre). Un testeur BER est ensuite connecté à l'émetteur et au récepteur et le BER est testé pendant une période minimale d'au moins 30 minutes. Cela confirmera que le récepteur fonctionne conformément aux spécifications du fabricant et qu'il fonctionnera de manière satisfaisante dans le système pour lequel il a été conçu. Ce test est illustré à la **Figure 64**.

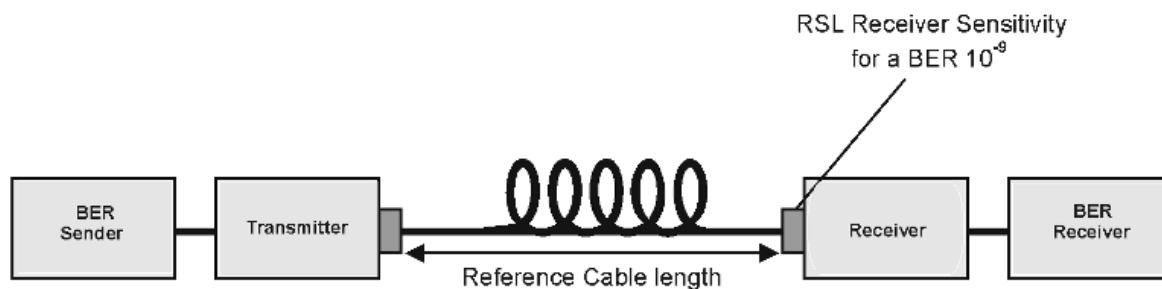


Figure 64. Test du récepteur.

III.2. Test de continuité

L'aspect le plus fondamental de tous les tests de câbles à fibres optiques qui peuvent être effectués est de réaliser un test de continuité. Le test de continuité vérifie simplement que la fibre est continue d'un bout à l'autre. Un faisceau lumineux est inséré à partir d'une source lumineuse à une extrémité de la fibre et est observée sortant de l'autre extrémité de la fibre. Ce test ne fournit aucune information sur l'état de la fibre autre qu'il n'y a pas de ruptures complètes le long de la fibre. Initialement, il a été effectué en faisant clignoter un puissant faisceau de torche le long de l'extrémité de la fibre et en observant la lumière sortant de l'autre extrémité. Cela a bien fonctionné pour les fibres multimodes avec de grands diamètres de noyau sur des distances allant jusqu'à cinq cents mètres environ. Mais il n'était pas fiable sur de très longues distances.

Bien que ce test soit très basique, il s'agit d'un outil extrêmement pratique disponible pour localiser rapidement les fibres correctes à l'autre extrémité d'un lien. La taille du testeur de fibre de continuité est généralement celle d'un stylo et peut être transportée dans la poche de poitrine. Il est largement utilisé dans les réseaux métropolitains et de campus.

Il existe des équipements de test spécifiques qui peuvent être utilisés comme testeur de continuité. L'appareil dispose d'un émetteur à fibre optique avec un connecteur à fibre optique approprié qui transmet une lumière rouge visible de 650 μm . Cela transmettra la lumière visible sur plusieurs kilomètres et peut être utilisé pour des applications telles que les tests de continuité, la détection de fractures dans les fibres ou de mauvaises épissures en observant la lumière qui peut s'échapper et pour identifier les fibres à l'extrémité d'un câble contenant de nombreuses fibres. Il peut également être utilisé pour identifier les fibres le long du parcours d'un câble (où il est nécessaire de pénétrer dans un câble pour une extension du système) en pliant la fibre et en regardant la lumière s'échapper du coude. Ce type de test de fibre optique a une application limitée, car il n'est d'aucune utilité pour trouver des défauts avec des câbles enterrés ou des câbles aériens.

Par prudence, l'utilisateur ne doit pas examiner les groupes de fibres à l'extrémité des câbles si des fibres du système à un endroit quelconque sont connectées à des lasers. La lumière infrarouge des lasers ne peut pas être vue par l'œil humain mais causera des lésions oculaires permanentes. Avant d'essayer de localiser les fibres à l'aide d'un testeur de continuité, assurez-vous que tout l'équipement sous tension est déconnecté.

III.3. Test de la perte d'insertion

L'un des tests les plus courants effectués sur un système à fibre optique consiste à mesurer l'atténuation d'une longueur de fibre. Ce chiffre permettra de vérifier la plupart des éléments de la conception du système.

La plupart des tests de perte d'insertion sont effectués avec une source d'alimentation et un wattmètre. Premièrement, le wattmètre est calibré à la source d'alimentation en connectant les deux instruments avec un petit morceau de fibre optique d'environ 2 m de long. Généralement, la source d'alimentation est réglée pour transmettre un niveau de -10 dBm et le wattmètre est ensuite ajusté en conséquence pour lire -10 dBm. Assurez-vous que le niveau utilisé pour étalonner le wattmètre est dans la plage dynamique du wattmètre.

Il y a quatre points importants à vérifier avant de commencer le test de perte d'insertion. Tout d'abord, assurez-vous que le type de fibre optique utilisé à des fins d'étalonnage est le même type de fibre optique qui doit être testé pour la perte d'insertion. Deuxièmement, le wattmètre et la source d'alimentation doivent fonctionner à la longueur d'onde que l'équipement du système installé doit utiliser. Troisièmement, le wattmètre et la source doivent également utiliser les mêmes types de source et de détecteur (LED ou laser) que l'émetteur et le récepteur du système installé doivent utiliser. Quatrièmement, pour éviter un éventuel étalonnage incorrect, assurez-vous que les mêmes connecteurs sont utilisés pour l'étalonnage que ceux utilisés dans l'installation.

Une fois le wattmètre étalonné, le wattmètre et la source sont mis sur le terrain et connectés au câble installé. Le niveau qui est lu sur le compteur peut être utilisé pour calculer la perte d'insertion à travers la section de câble testée. Cela comprendra les pertes causées par la fibre optique, les épissures et les connecteurs. La procédure de test est illustrée à la **Figure 65**.

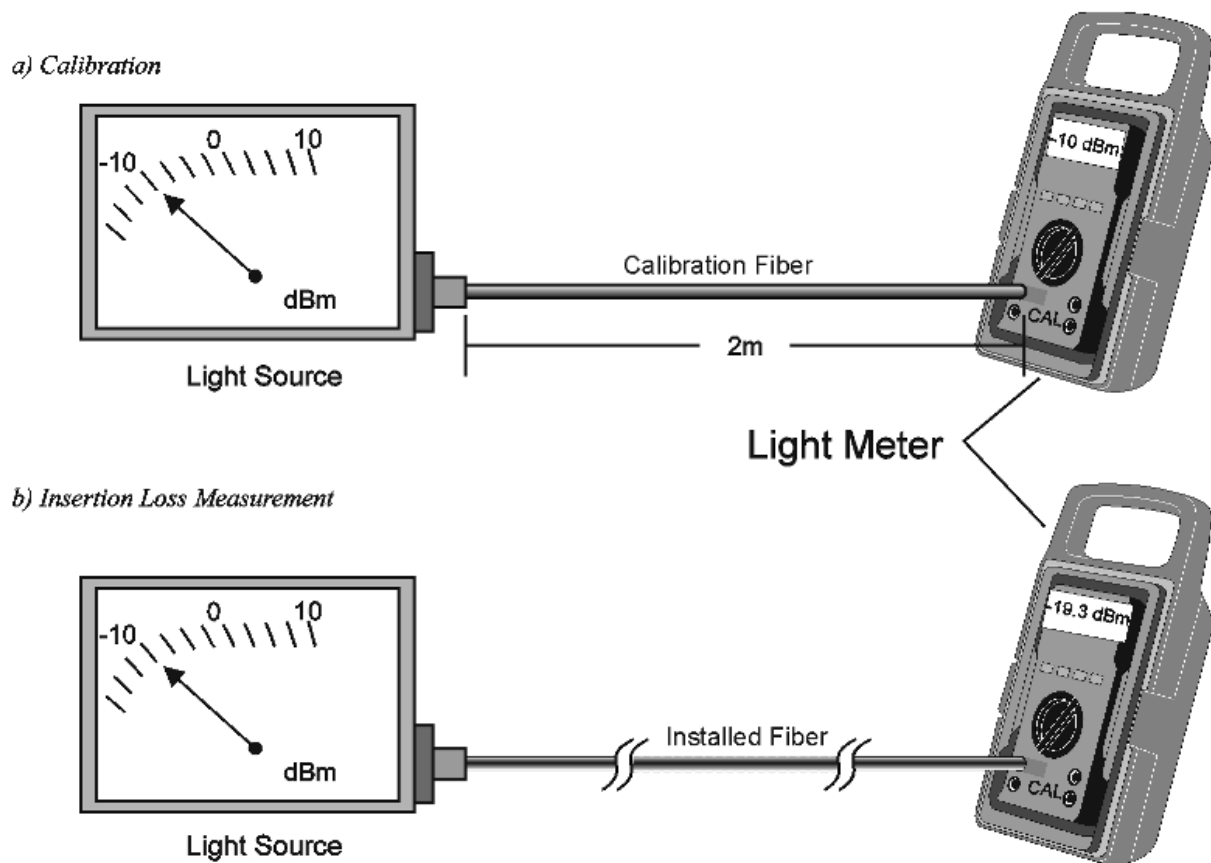


Figure 65. Mesure de la perte d'insertion.

Si la source d'alimentation et le wattmètre sont étalonnés en watts, la formule pour convertir le chiffre de perte en décibels est la suivante :

$$\text{Atténuation(dB)} = -10 \log(P_o/P_i) \quad (63)$$

Où :

P_o est la puissance à la sortie de la fibre

P_i est la puissance dans la fibre

Pour calculer la perte d'insertion, soustrayez la lecture dBm du wattmètre de la valeur de la source d'alimentation d'entrée. Pour l'exemple, la perte d'insertion illustrée à la **Figure 65** est de 9.3 dB.

Il est recommandé d'effectuer la mesure de la perte d'insertion dans les deux directions d'un câble installé. Les pertes mesurées dans chaque direction ont tendance à varier car les connecteurs et les épissures se connectent parfois de manière inégale. Le diamètre central des fibres aurait également tendance à varier légèrement, provoquant une variation similaire des pertes d'insertion. Par exemple, si les diamètres de noyau de deux fibres épissées ensemble sont de 49,5 μm et 50,5 μm , les ondes lumineuses se déplaçant de la fibre de diamètre plus mince vers la fibre de diamètre plus épais entreraient toutes dans la fibre de diamètre plus épais. Pour la lumière se déplaçant de la fibre de diamètre plus épais vers la fibre de diamètre plus mince, une petite quantité sera perdue autour des bords de l'interface entre les deux noyaux. Une

discordance de ce type pourrait expliquer une différence de perte d'insertion dans les deux directions de 0,2 dB.

Si l'émetteur de l'équipement doit être utilisé comme source d'alimentation, la première exigence est de configurer l'émetteur pour envoyer un signal de rapport cyclique de 50% dans la fibre. L'émetteur doit être modulé avec un signal NRZ marche / arrêt continu (1010101010, etc.), qui fournirait un véritable signal moyennant au wattmètre. Le wattmètre doit ensuite être étalonné comme indiqué ci-dessus et la perte d'insertion de la fibre choisie doit être mesurée. Si possible, il est utile d'effectuer le test de perte d'insertion avec l'émetteur en plus d'utiliser une source d'alimentation distincte pour confirmer qu'il n'y a pas une grande variation dans les chiffres de perte d'insertion mesurés.

Des mesures de perte d'insertion doivent être effectuées sur chaque fibre d'un câble dans les deux sens, que les fibres soient prévues ou non.

III.4. Réflectomètres optiques dans le domaine temporel (Optical time domain reflectometers ; OTDR)

La méthode la plus couramment utilisée et la mieux reconnue pour analyser l'état d'une liaison à fibre optique consiste à la tester avec un réflectomètre optique dans le domaine temporel (OTDR). L'OTDR envoie une courte impulsion de lumière dans la fibre et mesure et enregistre l'énergie lumineuse qui est réfléchiée dans la fibre. Une réflexion peut être provoquée par un connecteur, une épissure, une fissure, des impuretés ou une rupture de la fibre. En mesurant le temps nécessaire à la lumière réfléchiée pour retourner à la source et en connaissant l'indice de réfraction de la fibre, il est possible de calculer la distance au point de réflexion.

Les impuretés présentes dans le verre provoquent une réflexion continue de bas niveau lorsque la lumière se déplace à travers la fibre de verre. C'est ce que l'on appelle la rétrodiffusion. Le terme technique correct de ceci est la diffusion de Rayleigh, qui a été discutée au chapitre 3. La force du signal de rétrodiffusion reçu à la source diminue progressivement, à mesure que l'impulsion s'éloigne de la source. Ceci est vu sur un OTDR comme une baisse quasi linéaire du signal réfléchi reçu et la pente de cette baisse linéaire est l'atténuation de la fibre (dB par km). La **Figure 66** illustre une courbe de réflexion typique pour un OTDR et note la rétrodiffusion.

Généralement, un OTDR ne fournira pas de relevés précis des irrégularités et des pertes dans la fibre pour les 15 premiers mètres du câble. En effet, la longueur de l'impulsion et son temps de montée depuis l'OTDR sont relativement importants par rapport au temps nécessaire à l'impulsion pour parcourir la courte distance jusqu'au point de réflexion à l'intérieur de ces 15 m et retour. Pour surmonter ce problème, une bobine de câble est insérée entre l'OTDR et la liaison à tester. Lors de la lecture de l'écran OTDR, la première longueur de câble est ignorée et référée comme la zone morte. En référence au tracé OTDR de la **Figure 66**, l'axe Y du tracé montre l'amplitude relative du signal lumineux qui est réfléchi vers la source et l'axe X représente le temps. La base de temps est directement traduite et affichée en distance par l'OTDR.

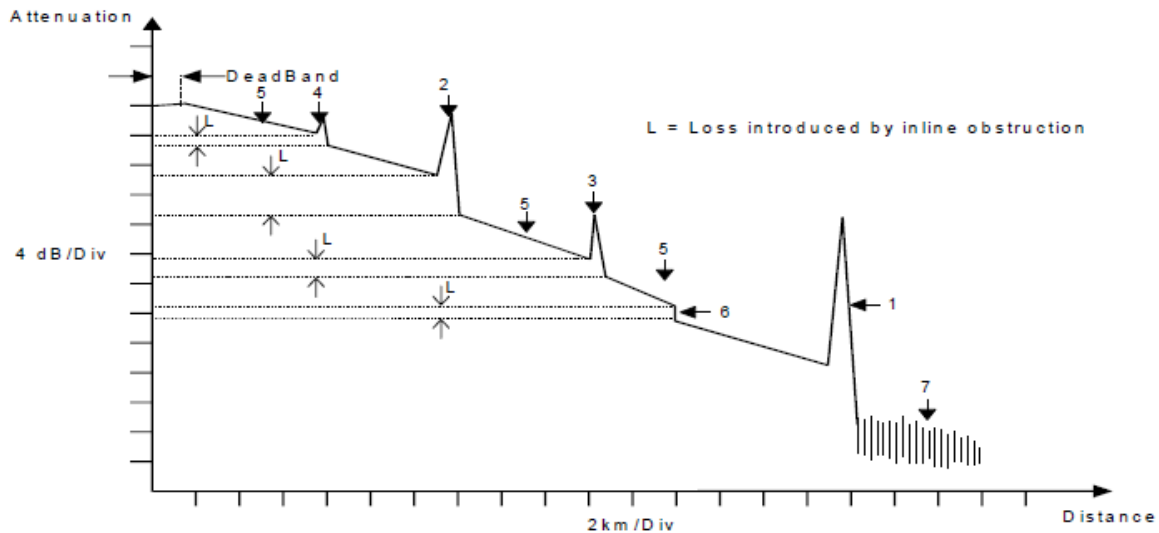


Figure 66. Tracé à partir d'un OTDR.

Les pics soudains qui apparaissent le long de la pente sont les points où des réflexions se sont produites et la lumière qui s'est réfléchi vers la source est plus forte que la rétrodiffusion. Il existe cinq principaux points de réflexion illustrés à la **Figure 66**. Dans leur ordre de grandeur décroissant, ils sont :

1. Réflexion de l'extrémité non terminée de la fibre
2. Réflexion d'un connecteur
3. Réflexion d'une épissure
4. Réflexion d'une fissure capillaire dans la fibre
5. Rétrodiffusion

Après chacune des réflexions, la pente de la courbe d'atténuation diminue brutalement. Cette baisse représente la perte introduite par le connecteur, l'épissure ou l'imperfection dans la fibre.

Le point (6) noté sur la **Figure 66** illustre une épissure où les noyaux de fibres sont bien adaptés à la lumière se déplaçant dans la direction opposée à la source. Cette épissure n'a pas de réflexion mais juste une perte introduite par l'épissure. Le type de chute au point (6) dans la courbe d'atténuation pourrait également être provoqué par un virage serré dans la fibre où la lumière s'échappe de la fibre au virage et n'est pas réfléchi. Certains types de défauts dans la fibre provoquent également des résultats similaires.

Le point (7) noté sur la **Figure 66** montre le bruit de fond de l'instrument. Il s'agit de la sensibilité la plus faible du signal reçu que l'appareil peut accepter. Les mesures effectuées près de ce niveau ne sont pas très précises.

Les tests OTDR peuvent fournir une analyse de défaut très précise sur presque n'importe quelle longueur de fibre. Il est important que le rouleau de câble à bande morte soit toujours inséré entre l'OTDR et la liaison avant d'effectuer la mesure. Sur les instruments de meilleure

qualité, une résolution de 1 m pour la localisation des défauts et de 0,01 dB pour les pertes en ligne peut être obtenue. Certains instruments fonctionneront avec une portée allant jusqu'à 400 km.

En général, les OTDR sont relativement faciles à utiliser et des progiciels d'analyse spéciaux sont disponibles pour télécharger les résultats des tests et effectuer une analyse détaillée si nécessaire. L'inconvénient malheureux de la technologie OTDR est qu'elle est généralement très chère. Même de petites unités de fonctionnalités réduites pourraient être d'un coût prohibitif.

Il faut être prudent lors de l'interprétation des résultats d'un OTDR. Lorsque différentes fibres sont réunies, cette connexion peut représenter un changement d'indice de réfraction, de taille de cœur, de propriétés modales et / ou de propriétés de matériau de la fibre. Par exemple, après une épissure ou un connecteur, l'OTDR peut afficher ce qui semble être un gain de signal à l'écran. Ce qui s'est probablement produit, c'est que la lumière est entrée dans une fibre avec de plus grandes impuretés et il y a eu une augmentation de la rétrodiffusion.

Le test OTDR doit être effectué sur chaque fibre optique d'un câble pendant qu'il est encore sur la bobine avant l'installation, pour s'assurer que les fibres défectueuses ne sont pas installées. Les résultats de ces tests doivent être stockés en mémoire ou sous forme d'impression. Ces tests de pré-installation sont généralement effectués lorsque la garde du câble est transférée d'une partie à l'autre; par exemple, lorsque le câble est remis par l'acheteur à l'entrepreneur d'installation.

Une fois le câble installé, les tests OTDR doivent être effectués à nouveau sur chaque fibre optique. Les résultats des tests tels qu'installés peuvent ensuite être comparés aux résultats des tests de préinstallation pour déterminer si les fibres ont été endommagées ou mal installées.

Les résultats des tests de pré-installation et de post-installation doivent être conservés dans la documentation de mise en service. S'il y a un défaut avec le système à une date ultérieure, les résultats du test de mise en service peuvent être utilisés pour aider à déterminer où les défauts sont localisés. Pour les systèmes à longue distance et à haute intégrité, il convient d'effectuer un audit du système après un certain nombre d'années de fonctionnement, d'effectuer à nouveau les tests OTDR et de les comparer aux résultats des tests de mise en service pour mesurer toute détérioration du système de câblage depuis l'installation.

L'OTDR peut être utilisé pour fournir des mesures d'atténuation précises en supposant que l'OTDR est de haute qualité et qu'il est régulièrement étalonné.

Étant donné que l'OTDR ne fournirait que des mesures relatives, la longueur d'onde à laquelle il fonctionne n'est pas importante. Les lectures de distance, les pertes d'épissure et les pertes de connecteur ne sont pas affectées par les petits changements de longueur d'onde associés aux lasers et aux LED.

De plus, les tests doivent toujours être effectués dans les deux sens. Certains types de défauts apparaîtront dans un sens mais pas dans l'autre. Un exemple de ceci serait un décalage dans les diamètres de noyau. Il a été noté dans la section précédente que la perte d'un connecteur ou d'une épissure peut être différente lorsqu'elle est mesurée de chaque direction dans la fibre optique. Si les pertes de connecteur et d'épissure sont différentes dans chaque direction, une moyenne des deux chiffres peut être prise.

Certains câbles à fibres optiques sont construits de manière à permettre de les poser de façon hélicoïdale autour du centre du câble. Dans ce cas, la longueur du câble ne sera pas la longueur des fibres. Cette différence rendra intrinsèquement difficile la détermination de la distance aux défauts. Pour surmonter ce problème, le fabricant fournira généralement un rapport longueur de fibre / longueur de câble. Le rapport est ensuite utilisé pour calculer la distance exacte du câble au défaut à partir de la lecture de la distance OTDR. En l'absence d'un tel ratio, une mesure OTDR est effectuée sur une longueur de câble connue (généralement 1 km) et le rapport est calculé comme suit :

$$\text{Fibre/rapport du câble} = \frac{\text{Longueur de la fibre dans 1 km du câble}}{1 \text{ km}} \quad (64)$$

$$\text{Distance au défaut} = \frac{\text{Lecture de la distance de l'OTDR}}{\text{Fibre/rapport du câble}} \quad (65)$$

III.5. Test de taux d'erreur par bit (TEB ou Bit Error Rate ; BER)

Le BER est une mesure des performances d'une liaison de communication de données. Le BER est déterminé en attachant des instruments de test BER à l'émetteur et au récepteur, puis en demandant à l'émetteur d'envoyer un motif pseudo aléatoire de bits à travers le système de liaison à fibre optique et en mesurant le nombre de bits incorrects lorsqu'ils sortent du récepteur (l'instrument BER attaché au récepteur connaît également le code binaire pseudo aléatoire). Le test est effectué pendant une période de temps prédéterminée, qui est utilisée comme référence de base pour le coefficient du BER. Le BER est ensuite calculé en ajoutant le nombre total de bits qui étaient en erreur et en divisant par le nombre total de bits qui ont été envoyés sur la période spécifiée:

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits}} \quad (66)$$

Pour les systèmes de liaison à fibre optique, le test BER est généralement effectué pendant une période de 30 minutes ou 1 heure (par exemple, par rapport aux liaisons radio à micro-ondes où il est généralement effectué pendant 24 heures, 48 heures ou plus). Pour la plupart des systèmes de liaison à fibre optique, il est recommandé qu'un TEB résiduel (le BER de fond lorsque le système est disponible pour un fonctionnement normal) de 10 à 9 soit le minimum acceptable (c'est-à-dire un bit d'erreur pour chaque milliard qui est transmis). Si un graphique est tracé pour un système de transmission à fibre optique standard du BER en fonction de la force du signal reçu au niveau du détecteur, on peut voir que le BER reste relativement plat jusqu'à ce que le niveau du signal reçu s'approche de la sensibilité du récepteur, puis il chute très fortement. Ceci est illustré à la **Figure 67**.

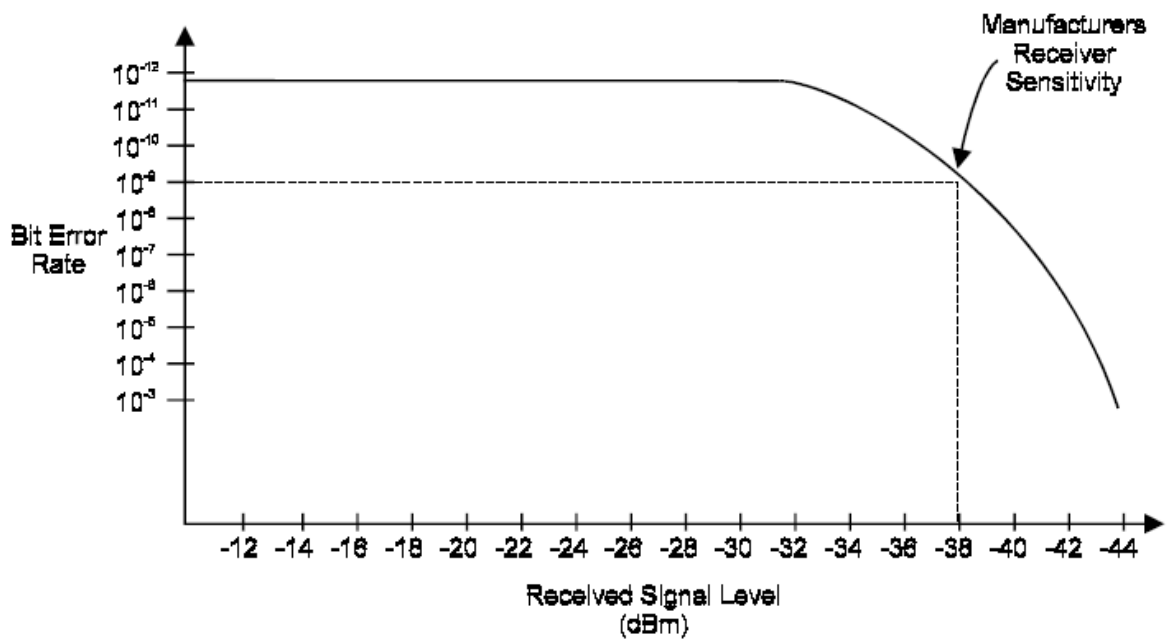


Figure 67. BER vs niveau du signal reçu pour un système de transmission optique standard.

Ce graphique illustre également le fait que le TEB de fond attendu est normalement de 10 à 12 sur une liaison à fibre optique.

En règle générale, les tests BER ne sont effectués que dans les systèmes à fibres optiques qui nécessitent un fonctionnement à haute intégrité. Pour des distances de liaison supérieures à 2 km et pour des débits de transmission supérieurs à 100 Mbps, il s'agit d'un test standard recommandé.

Le BER est généralement lié à une autre mesure du système de liaison appelée «disponibilité». Elle est définie comme le pourcentage de temps pendant lequel un lien est disponible pour une utilisation ininterrompue sur une période de 12 mois pour un BER spécifié minimum (généralement 10^{-9} ou 10^{-12} pour une liaison fibre optique). Le moment où le lien n'est pas disponible pour utilisation est appelé une panne. Étant donné qu'il est impossible d'effectuer un test BER sur une liaison pendant une période de 12 mois (car la liaison est nécessaire à sa finalité de transmission d'informations), les chiffres de disponibilité sont généralement calculés théoriquement en utilisant la marge de sécurité comme base des calculs afin de déterminer la disponibilité du lien.

Par exemple, les performances requises peuvent être que la liaison a une disponibilité de 99,99% pour toute période de 12 mois, par rapport à un BER maximum de 1×10^{-9} .

Cela signifie que le système ne doit pas avoir de pannes sur une période de 12 mois. La panne totale est supérieure à $(365 \text{ jours} \times 24 \text{ heures} / \text{jour} \times 60 \text{ minutes} / \text{heure} \times 0,01\%)$, 53 minutes où une panne est considérée comme étant supérieure à 1 bit par erreur pour chaque million de bits transmis.

Un autre exemple avec des paramètres moins stricts (par exemple, sur un câble en cuivre ou une liaison radio) peut être une exigence de performance avec une disponibilité de 99,85%

pour le mois le moins performant de n'importe quelle année par rapport à un BER maximum de 1×10^{-3} .

Cela signifie que le système ne doit pas avoir de pannes au cours du mois le moins performant totalisant plus de 1 heure, 7 minutes ($= 31 \text{ jours} \times 24 \text{ heures} / \text{jour} \times 60 \text{ minutes} / \text{heure} \times 0,15\%$) lorsqu'une panne est considérée comme supérieure à 1 bit en erreur pour chaque 1000 bits envoyés ($1.5 \text{ bits}/1000 = 0.15\%$).

Standard international

Lors de la mesure du BER pour les circuits de données à haut débit sur des liaisons téléphoniques, la norme internationale exige que le BER soit testé sur les composants à 64 kbps de la liaison à haut débit (souvent 2 Mbps). L'indisponibilité est alors définie comme des périodes de temps où le BER dans chaque seconde dépasse 10^{-3} pendant une période de 10 secondes consécutives ou plus à un débit de données de 64 kbps. Si le BER dépasse 10^{-3} pendant seulement neuf secondes consécutives, la liaison est considérée comme toujours disponible.

Les autres termes utilisés pour ces types de liaisons sont les secondes fortement erronées où le BER dépasse 10^{-3} pendant une seconde complète (c'est-à-dire une seconde avec plus de 64 bits en erreur) et les secondes erronées où il y a un ou plusieurs bits en erreur dans une seconde.

Les systèmes de transmission à fibre optique devraient avoir des chiffres de disponibilité extrêmement élevés. Un chiffre de 99,99% (panne de 53 minutes par an au total) ou mieux devrait être facilement réalisable pour un système à fibre. La raison pour laquelle les chiffres de disponibilité sont si bons est que la fibre optique n'est pas affectée par le bruit externe, les interférences ou la plupart des autres effets environnementaux, tout comme les câbles en cuivre et les systèmes de radiocommunication. Cependant, en raison de la diffusion de Rayleigh, de la dispersion, des changements de température, de la gigue dans les systèmes rapides et d'autres effets imprévisibles, le BER n'atteindra jamais théoriquement 100%.

III.6. Mesures dans le domaine temporel (diagrammes oculaires) - Time domain measurements (eye diagrams)

Il est également important d'analyser le signal de communication de données en temps réel. La méthode la plus efficace consiste à analyser les impulsions numériques à la sortie du récepteur dans le domaine temporel. Les caractéristiques de base de temps d'un signal peuvent fournir une multitude d'informations utiles sur la qualité et les performances du système de transmission.

Les paramètres d'une impulsion numérique qui peuvent être mesurés comprennent la période, le rapport cyclique, le temps de stabilisation, la largeur d'impulsion, le temps de montée, le temps de descente, le dépassement, le sous-dépassement, le pré-déclenchement et le temps de stabilisation. En comparant les formes et les paramètres du domaine temporel des impulsions séquentielles continues, il est possible de mesurer d'autres paramètres tels que le bruit, la gigue, la qualité générale de l'impulsion (appelés masques) et la distance sur laquelle l'impulsion devrait durer (appelée d'extinction).

L'instrument qui prend la mesure dans le domaine temporel doit avoir une réponse transitoire relativement rapide (réponse temporelle) par rapport à l'impulsion qu'il mesure afin d'effectuer des mesures précises des paramètres d'impulsion. Pour que l'instrument puisse mesurer avec précision des signaux d'entrée optiques rapides, la réponse impulsionnelle de l'instrument doit généralement être au moins quatre fois plus rapide que le signal qu'il doit mesurer.

Pour ceux qui ont un esprit mathématique, il convient également de noter que la réponse en fréquence de l'instrument de mesure peut être déterminée à partir de la réponse impulsionnelle en prenant sa transformée de Fourier. L'inverse de ceci est également vrai, où la réponse impulsionnelle peut être déterminée en prenant la transformée de Fourier inverse de la réponse en fréquence.

La mesure du BER nécessite la transmission d'une configuration binaire pseudo aléatoire. Cette configuration binaire peut également être utilisée pour une mesure utile du domaine temporel. En chevauchant les formes d'onde lumineuses de sortie de bits pseudo-aléatoires successifs et en affichant les signaux sur un oscilloscope à mémoire, un motif appelé diagramme oculaire est formé. Un diagramme de l'œil typique est illustré à la **Figure 68**.

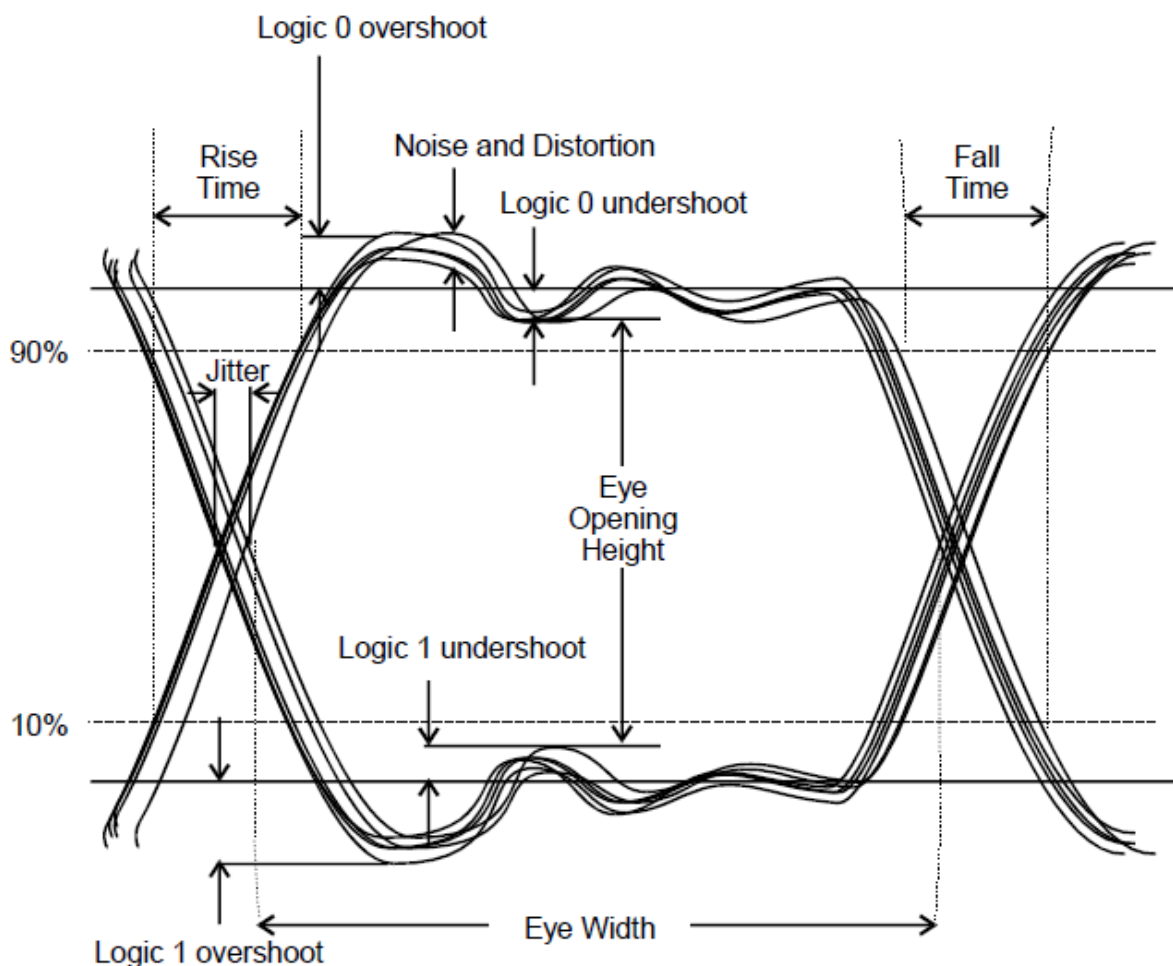


Figure 68. Diagramme de l'œil (eye diagram, eye pattern).

Un diagramme de l'œil donne une indication de la facilité ou de la difficulté du récepteur à faire la distinction entre un logique 1 et un logique 0. Comme l'heure d'arrivée et la forme de chaque impulsion successive vont varier, le diagramme de l'œil se formera avec des lignes épaisses. Plus il y a de bruit dans le système de transmission par fibre, plus la variation de l'amplitude des lignes oculaires est importante. Plus la variation de la différence entre le temps d'arrivée de chaque impulsion consécutive est grande, plus la variation de la largeur des lignes oculaires (appelée gigue) est grande.

Un certain nombre de mesures importantes peuvent être effectuées à partir de l'œil.

- Plus l'œil est ouvert, plus il est facile de distinguer entre une logique 1 et une logique 0.
- La largeur d'ouverture du diagramme de l'œil (le temps entre les croisements de ligne logique 1 à logique 0 et logique 0 à logique 1) indique l'intervalle de temps pendant lequel le signal peut être échantillonné sans erreur en raison d'une interférence intersymbole.
- La hauteur d'ouverture des yeux mesure la marge de bruit à la sortie du récepteur.
- La largeur des lignes oculaires où elles se croisent aux coins de l'œil est une mesure de la gigue dans le système de transmission. La gigue est causée par des variations dans les temps d'activation et de désactivation du laser, la distorsion d'impulsion par la fibre optique et le bruit. La gigue est exprimée en picosecondes, degrés ou en pourcentage de l'intervalle de bits.
- L'épaisseur des lignes d'impulsion en haut et en bas de l'œil est proportionnelle au bruit et à la distorsion dans le système de transmission.
- Le temps de transition du signal du haut (logique 0) vers le bas (logique 1) et vice versa dans la configuration des yeux indique les temps de montée et de descente du système de transmission. Ceux-ci sont généralement mesurés entre les 10% et les 90%.
- Les temps de montée et de descente sont importants pour estimer la sensibilité du système à la synchronisation des échantillons. Plus les temps de montée et de descente du signal sont lents, plus le système est sensible aux erreurs de synchronisation.
- Pour fournir une immunité au bruit maximale dans le système, le meilleur moment pour échantillonner le signal est lorsque la hauteur d'ouverture du diagramme de l'œil est au maximum.