

Fibres Optiques

1 Introduction

Les fibres optiques permettent la propagation guidée de la lumière sur plusieurs milliers de kilomètres. Elles permettent actuellement une transmission d'information rapide et à haut débit.

Nous verrons dans ce cours le principe de la propagation de la lumière dans une fibre, les différents types de fibres et les phénomènes dont il faut tenir compte pour la propagation d'un signal (atténuation, dispersion). En particulier, nous étudierons la caractérisation d'une installation par rétrodiffusion.

2 Propagation de la lumière dans une fibre

Dans cette partie du cours, on suppose qu'on peut décrire la propagation de la lumière dans une fibre à l'aide de l'optique géométrique. Ce n'est pas toujours le cas, mais les principes de guidage qu'on en déduit restent valables.

2.1 Principe de la propagation : réflexion totale sur un dioptré

Dans cette section, on rappelle le phénomène de réflexion totale qui se produit sur un dioptré séparant un milieu d'indice élevé d'un milieu d'indice faible lorsque l'incidence est suffisamment grande.

Sur la figure 1, on a représenté la lumière arrivant sur un dioptré sous incidence i depuis le milieu 1 d'indice $n_1 > n_2$.

Une fibre optique est essentiellement constituée de deux cylindres coaxiaux en silice (verre). Celui au centre

est plein (c'est le coeur de la fibre) et d'indice n_1 . Celui autour du coeur est la gaine, d'indice n_2 légèrement inférieur à n_1 . La lumière reste confinée à l'intérieur du coeur par réflexion totale sur le dioptré coeur/gaine et se propage le long de l'axe de la fibre.

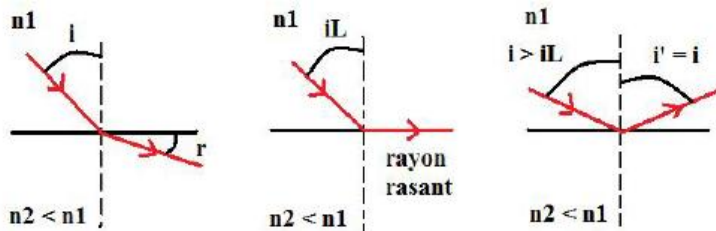


Figure 1: Schéma décrivant la réfraction et la réflexion totale sur un dioptré où $n_1 > n_2$.

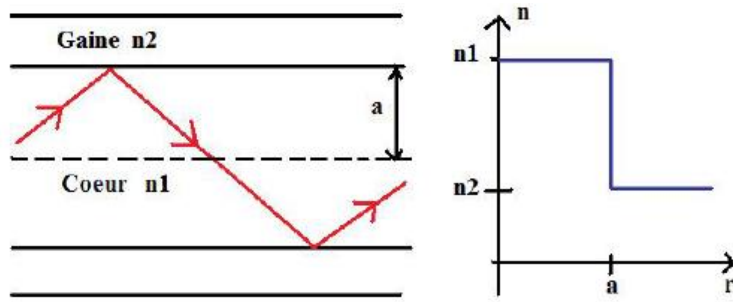


Figure 2: Cette fibre est constituée d'un coeur d'indice uniforme n_1 et d'une gaine d'indice $n_2 < n_1$. L'indice "saute" de n_1 à n_2 au niveau du dioptré. On note a le rayon du coeur de la fibre.

2.2 Fibres à saut d'indice

Une fibre à saut d'indice est constituée d'un coeur d'indice n_1 uniforme, et d'une gaine d'indice $n_2 < n_1$. L'indice "saute" brusquement de n_1 à n_2 sur le dioptré coeur/gaine, d'où le nom de ce type de fibre. La différence d'indice entre le coeur et la gaine est de l'ordre de 0,01 à 0,02 et est donc très faible. On a $n_1 \simeq 1,47$ et $n_2 \simeq 1,46$ ou $1,45$. Le diamètre du coeur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres, et celui de la gaine est souvent normalisé à $125 \mu\text{m}$. Pour les fibres monomodes (voir plus bas), le diamètre de coeur varie de 4 à $10 \mu\text{m}$. Il existe aussi des fibres en plastique au coeur beaucoup plus large : plusieurs centaines de micromètres.

On voit apparaître les deux conditions d'injection de lumière dans une fibre optique : il faut que le faisceau qu'on veut injecter soit très étroit (de taille comparable au coeur) et que l'angle des rayons du faisceau par rapport à l'axe de la fibre soit assez petit pour qu'il y ait réflexion totale sur le dioptré coeur/gaine.

Nous allons voir quel est l'angle maximal d'acceptance θ_{max} pour qu'un rayon soit transmis par la fibre.

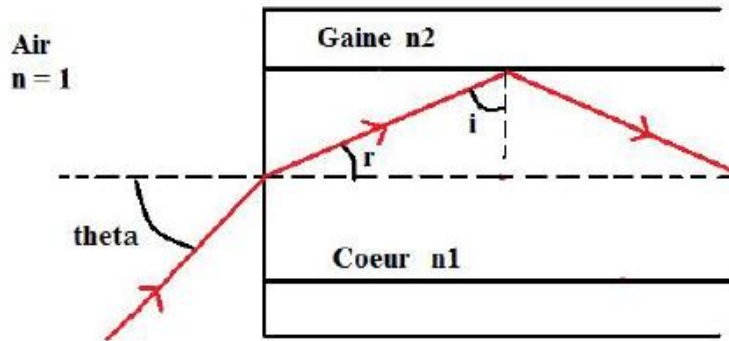


Figure 3: Un rayon lumineux est incident avec un angle θ sur la face d'entrée de la fibre. Il est réfracté avec un angle r tel que $\sin \theta = n_1 \sin r$. L'angle d'incidence de ce rayon sur le dioptré coeur/gaine est $i = 90^\circ - r$. Il y aura réflexion totale si $i > i_L$, c'est à dire $\theta < \theta_{max}$.

2.3 Fibres à gradient d'indice

2.3.1 Profil d'indice

Dans les fibres à gradient d'indice, le coeur possède un indice $n(r)$ qui dépend de la distance r à son centre, et qui décroît continuellement de n_1 au centre à n_2 dans la gaine sur une distance a (rayon du coeur). Les procédés de fabrication font que

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

dans le coeur ($0 < r < a$) et $n = n_2$ pour $r > a$ (gaine). α est l'exposant du profil d'indice et Δ est la différence relative d'indice définie comme précédemment. Comme $\Delta \ll 1$, on peut utiliser $\sqrt{1+x} \simeq 1+x/2$ et $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$. On trouve :

$$n(r) = n_1 - (n_1 - n_2) \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha$$

- Si $\alpha = 2$, le profil est parabolique (gradient linéaire). Cette situation est la plus fréquente en pratique.
- Si $\alpha \rightarrow \infty$, alors $(r/a)^\alpha = 0$ pour $r < a$ et $n(r) = n_1$. On retrouve une fibre à saut d'indice.

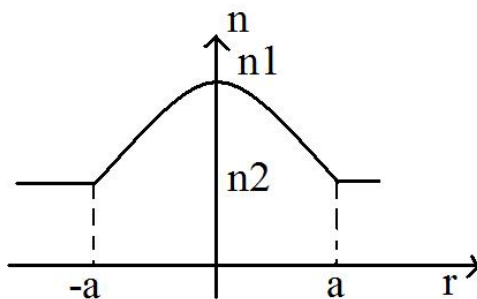


Figure 4: Allure du profil d'indice parabolique d'une fibre à gradient d'indice.

2.3.2 Trajectoire de la lumière dans le coeur

Lorsque l'indice varie continuellement, on peut se représenter localement le trajet d'un rayon lumineux qui passe de r à $r + dr$ comme la traversée d'un dioptre entre l'indice $n(r)$ et l'indice $n(r + dr)$. Voir la figure 5 pour les notations. L'angle $i(r)$ que fait le rayon avec la normale au dioptre devient $i(r + dr)$ tel que

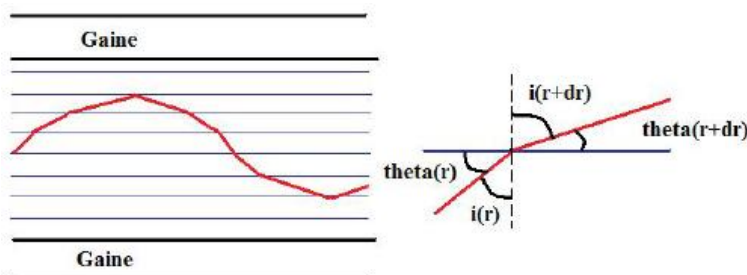


Figure 5: À gauche : on peut se représenter le trajet de la lumière comme la traversée d'un grand nombre de dioptres très resserrés. À droite : l'angle d'inclinaison θ par rapport à l'axe de la fibre vérifie $\theta = 90^\circ - i$ et on a $n(r) \sin i(r) = n(r + dr) \sin i(r + dr) = \text{constante}$. Donc $n(r) \cos \theta(r) = \text{constante}$.

$n(r) \sin i(r) = n(r + dr) \sin i(r + dr) = \text{constante}$. L'angle $\theta(r)$ que fait le rayon avec l'axe de la fibre vérifie $\theta(r) = 90^\circ - i(r)$. On a donc $n(r) \cos \theta(r) = \text{constante}$. C'est l'équation du rayon lumineux. En utilisant le fait que $\tan \theta(r) = dr/dz$ où z est l'abscisse le long de l'axe, on en déduit une équation différentielle que vérifie la fonction $r(z)$. Sa résolution dans le cas d'un profil parabolique montre que le rayon lumineux a une trajectoire sinusoïdale. Un maximum ou minimum de la sinusoïde correspond à la réflexion totale.

Les rayons sinusoïdaux parcourent un chemin géométrique dans le coeur plus grand que celui se propageant sur l'axe. Par contre, ils se propagent plus vite car ils voient un indice en moyenne plus faible. La différence de temps de parcours entre deux rayons est donc moindre que dans une fibre à saut d'indice. Cela signifie qu'un

signal injecté dans une fibre à gradient d'indice s'étalera moins dans le temps au cours de sa propagation dans la fibre et qu'on peut y envoyer des signaux à un rythme plus rapide. Les fibres à gradient d'indice sont donc privilégiées pour émettre des signaux à haut débit.

2.3.3 Ouverture numérique

Si un rayon lumineux est incident en un point de rayon r à l'entrée de la fibre, quel est l'angle maximal $\theta_{max}(r)$ qu'il peut faire avec l'axe de la fibre pour pouvoir se propager dans la fibre ? Comme $n(r) \cos \theta(r) = n_2 \cos 0^\circ$ où 0° est l'angle entre le rayon et l'axe au niveau de la gaine quand il y a réflexion totale, on en déduit par un raisonnement similaire à celui de la fibre à saut d'indice que l'ouverture numérique est : $O.N.(r) = \sin \theta_{max}(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2}$. Cette ouverture numérique est locale. Elle est maximale au centre du coeur, où elle est égale à celle d'une fibre à saut d'indice dont le coeur aurait un indice n_1 .

Comme l'ouverture numérique détermine la largeur angulaire du faisceau qu'on peut injecter dans la fibre, elle détermine aussi la puissance lumineuse qu'on peut y injecter. Une fibre à saut d'indice ayant une ouverture numérique plus grande que celle d'une fibre à gradient d'indice, on privilégiera les fibres à saut d'indice pour transmettre un maximum de puissance lumineuse.

3 Modes de propagation

On a vu jusqu'à présent la nécessité de la réflexion totale pour que la lumière soit transmise par une fibre optique. Cette condition nécessaire n'est pas suffisante. En effet, il faut aussi que les rayons lumineux interfèrent constructivement après un aller-retour le long d'un diamètre de la fibre. Les nombreuses réflexions de la lumière font que la fibre se comporte comme une cavité dans la direction du diamètre. Pour que l'onde puisse se propager dans cette cavité, il faut qu'elle vérifie la condition de résonance (en tenant compte que la direction de propagation n'est pas celle de l'axe de la cavité). Les modes correspondants sont les modes de propagation dans la fibre.

Pour simplifier, l'étude suivante est limitée aux fibres à saut d'indice, mais les résultats restent valables pour une fibre à gradient d'indice.

3.1 Définition des modes

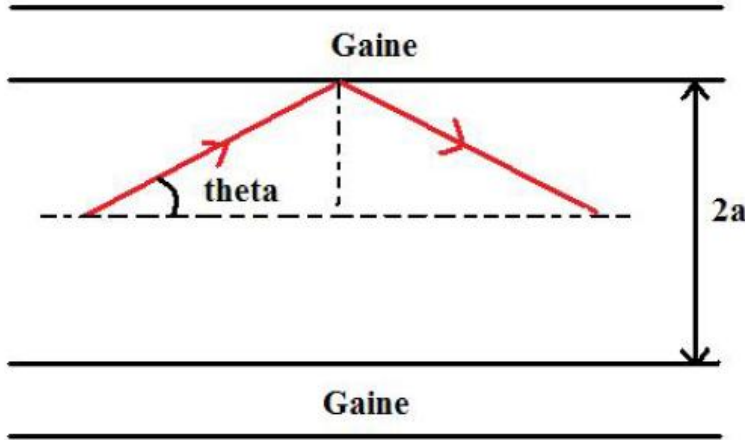


Figure 6: Une fibre à saut d'indice. Le déphasage dans la direction du diamètre doit être un multiple entier de 2π pour que la structure transverse de la lumière transmise ne soit pas détruite par interférences destructives.

Soit λ_0 la longueur d'onde dans le vide de la lumière se propageant dans la fibre. La composante du vecteur d'onde suivant la direction du diamètre de la fibre est $2\pi \sin \theta / \lambda_0$ et le chemin optique parcouru lors d'un aller-retour est $n_1 \times 4a$. La condition de résonance pour les modes de la fibre s'écrit :

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} 4an_1 \sin \theta + 2\phi_r = p2\pi$$

avec p entier et où ϕ_r est le déphasage dû à une réflexion. On voit qu'à chaque valeur de p correspond une valeur de θ . Les modes correspondent aux différentes directions de propagation possibles dans la fibre.

Cependant, le produit $n_1 \sin \theta$ est limité par l'ouverture numérique de la fibre. Il y a donc une valeur maximale de p , c'est à dire un nombre limité de modes qui se propagent pour $O.N.$, λ_0 et a fixés.

3.2 Fibres monomode et multimode

3.3 Allure des premiers modes

Les modes se propageant dans une fibre optique sont appelés modes LP_{ml} et sont analogues mais pas identiques aux modes TEM d'une cavité laser. m représente la moitié du nombre de pétales du mode, et l le nombre de couronnes, tache centrale comprise. L'allure est représentée sur la figure 7. Le mode fondamental quasi-gaussien est LP_{01} .

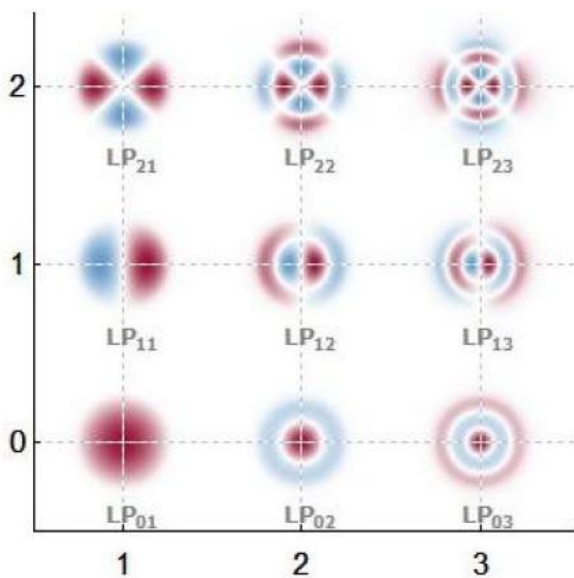


Figure 7: Allure des modes LP_{ml} .

4 Propagation d'un signal dans une fibre optique

Lors de sa propagation dans une fibre optique, un signal lumineux peut-être atténué ou déformé à cause de la dispersion. Après avoir étudié qualitativement et quantitativement ces phénomènes, nous verrons quelles sont les conditions de transmission d'un signal sans perte d'information. La notion de bande passante sera introduite.

4.1 Atténuation

Dans une fibre optique, il y a essentiellement deux types d'atténuation : une atténuation locale liée à un défaut ou une connection, qui s'exprime en dB par $A = 10 \log(P_{\text{sortie}}/P_{\text{incident}}) < 0$ où les P sont les puissances avant et après le défaut (l'atténuation est ici comptée négativement). Il y a aussi l'atténuation uniformément répartie dans la fibre, liée à l'interaction lumière-matière entre le signal à transmettre et le matériau de la fibre. Elle s'exprime en dB/km et est donnée par $\alpha = 10 \log(P_{\text{sortie}}/P_{\text{incident}})/L$ où les puissances sont mesurées en entrée et sortie de fibre et L est la longueur de la fibre en kilomètres.

4.1.1 Diffusion Rayleigh

La diffusion Rayleigh est un phénomène de diffusion de la lumière par des défauts petits devant la longueur d'onde de la lumière. Les petites longueurs d'onde sont davantage diffusées que les grandes car cet effet est proportionnel à $1/\lambda_0^4$. Cette lumière diffusée n'est que très peu transmise par la fibre car elle est émise dans toutes les directions, y compris vers l'arrière, et pas seulement dans celles des modes. Il en résulte donc une atténuation.

Les longueurs d'onde dans l'infrarouge seront moins atténuées que celles dans le visible si on tient compte de la diffusion Rayleigh.

Remarquons que cette diffusion Rayleigh est quotidiennement observée : les molécules d'air de l'atmosphère diffusent la lumière du soleil. Comme les courtes longueurs d'onde sont davantage diffusées, le ciel paraît bleu.

4.1.2 Absorption par des atomes ou molécules

Les fibres optiques sont fabriquées dans la silice la plus pure possible afin qu'elle soit transparente au maximum. Elles contiennent cependant aussi de l'eau et quelques ions. Ces ions sont soit des ions OH^- issus de l'eau, soit des ions métalliques.

En dehors des bandes d'absorption de ces impuretés, il y a trois fenêtres de travail pour transmettre un signal : autour de 850 nm (proche IR, absorption relativement forte tout de même), de 1300 nm et de 1550 nm. Voir la figure 8.

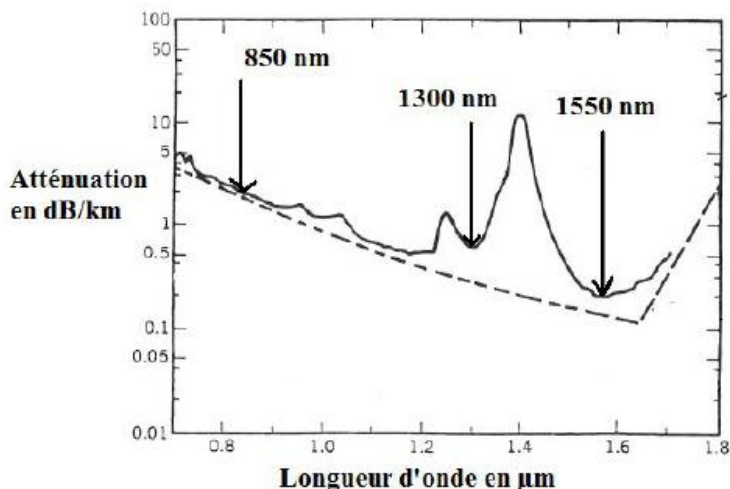


Figure 8: Absorption linéique d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde. Il y a trois fenêtres de travail. La courbe en pointillé est la limite inférieure : la partie décroissante rend compte de la diffusion Rayleigh et la partie croissante de l'absorption par les niveaux de vibrations de la fibre en silice. On voit que les pertes linéiques sont de l'ordre du dB/km.

4.1.3 Pertes aux courbures

Lors de la fabrication de la fibre, il se crée des micro-courbures : la fibre n'est pas parfaitement droite. Or une courbure modifie l'angle d'incidence d'un rayon lumineux sur le dioptré cœur/gaine. Il se peut par exemple que l'incidence devienne inférieure à l'angle limite : il n'y a alors plus réflexion totale. Une partie de la lumière est réfractée dans la gaine et de l'énergie et de l'information sont perdues.

4.1.4 Pertes de raccordement

Lorsque l'on connecte deux fibres optiques entre elles, il y a aussi des pertes.

Il se peut en effet que les deux fibres n'aient pas le même diamètre de cœur, qu'elles ne soient pas alignées ou fassent un angle entre elles. Il y a alors des pertes car une partie de la lumière sortant de la première fibre ne peut pas entrer dans la seconde.

Il y a aussi ce qu'on appelle les pertes de Fresnel : c'est la réflexion et la transmission de la lumière sur les dioptrés de sortie de la première fibre et d'entrée de la seconde fibre. Pour un dioptré air/verre, la transmission n'est que de 96%. On ajoute parfois un liquide adaptateur d'indice entre les deux fibres à connecter pour améliorer la transmission.

Evaluons les pertes de Fresnel : il y a 96% de transmission sur chaque dioptré de sortie et d'entrée, soit $P_{\text{sortie}}/P_{\text{incident}} = 0,96^2 = 0,92$. La perte en dB est $10 \log(0,92) = -0,35$ dB. Comme il y a aussi les autres sources de pertes, on tolère une perte de -0,6 dB pour un connecteur.

4.2 Dispersion dans les fibres optiques

Lorsqu'on envoie une impulsion lumineuse très brève dans une fibre optique, on récupère en sortie une impulsion plus longue. Ce phénomène est lié à la dispersion de la lumière, dont on distingue deux types : la dispersion modale, car les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse, et la dispersion chromatique, car les différentes longueurs d'onde se propagent avec des vitesses différentes (même une impulsion laser possède une largeur en longueur d'onde).

4.2.1 Dispersion modale

Fibre à saut d'indice

Fibre à gradient d'indice Pour une fibre à gradient d'indice, il faut calculer le chemin optique le long de la trajectoire sinusoïdale traversant l'indice variable $n(r)$ du mode le plus élevé, et le comparer au chemin optique $n_1 L$ du mode fondamental. On trouve que le mode le plus élevé est le plus rapide, et que la durée entre l'arrivée des modes extrêmes est

$$\Delta T_m = \frac{n_1 L \Delta^2}{8c}$$

Cette durée est quelques centaines de fois plus courte que pour une fibre à saut d'indice.

Fibre monomode Pour une fibre monomode, il y a un seul mode et donc pas de dispersion modale : $\Delta T_m = 0$.

4.2.2 Dispersion chromatique

En pratique, on envoie un paquet d'onde dans la fibre, qui est une superposition de plusieurs longueurs d'onde.

La dispersion chromatique du matériau est déterminée par

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \left(-\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right)$$

Comme l'indice varie avec la longueur d'onde, il y a un élargissement du signal car certaines vont moins vite que d'autres. Si $\Delta\lambda$ est la largeur en longueur d'onde de la source, la durée entre les arrivées des longueurs d'onde extrêmes est

$$\Delta T_c = M(\lambda) \Delta\lambda L$$

pour une longueur L de fibre. $\Delta\lambda$ est de l'ordre du nm pour une diode laser, et de quelques dizaines de nm pour une DEL. $M(\lambda)$ vaut quelques dizaines de ps/nm/km.

4.2.3 Dispersion totale

- pour une fibre multimode à saut d'indice, $\Delta T_m \gg \Delta T_c \Rightarrow \Delta T \simeq \Delta T_m$.
- pour une fibre monomode, $\Delta T = \Delta T_c$.
- pour une fibre multimode à gradient d'indice, $\Delta T = \sqrt{\Delta T_m^2 + \Delta T_c^2}$.

4.2.4 Dispersion et bande passante

Signal analogique

Signal numérique Dans un signal numérique, on transmet des chiffres binaires appelés bits (contraction de l'anglais "binary digits") qui prennent la valeur 0 ou 1, représentés par une absence de signal ou par un signal assez élevé. On envoie donc une série d'impulsions séparées par la même durée. Par exemple, le code binaire 1011 est constitué d'une impulsion, une période sans impulsion, puis deux impulsions.

5 Caractérisation d'une installation de fibres optiques par réflectométrie

Une installation de fibres optiques relie deux points par une fibre optique, ou plusieurs fibres optiques connectées. Un moyen de caractériser cette installation (longueur des fibres, pertes linéiques et pertes aux connecteurs) pourrait consister à mesurer l'intensité lumineuse transmise en plusieurs points bien choisis, mais cette méthode demanderait de démonter l'installation.

La méthode par réflectométrie exploite la diffusion Rayleigh : une partie de la lumière diffusée est renvoyée vers l'arrière (rétrodiffusion), c'est à dire vers la source. On peut exploiter cette lumière rétrodiffusée pour évaluer l'atténuation d'un signal en tous les points de l'installation et localiser les connecteurs et soudures de l'installation.

Le réflectomètre est un appareil qui envoie des impulsions lumineuses dans l'installation à mesurer. Pendant la durée τ de la largeur d'une impulsion, la lumière parcourt une distance $\ell = c\tau/n$ qui est la résolution spatiale de la mesure. C'est la précision maximale avec laquelle on pourra localiser un défaut. L'impulsion se propage le long de l'installation, et une partie de son énergie est rétrodiffusée tout au long d'une fibre. Après une durée t , la position z est atteinte par l'impulsion et la lumière rétrodiffusée parcourt en tout la distance $2z$ pour retourner au réflectomètre où son intensité est mesurée. Cette intensité est $I(z) = I(0)R_d 10^{-\alpha \times 2z/10}$ où α est l'atténuation linéique en dB/km et R_d le facteur de rétrodiffusion de la fibre. Le réflectomètre montre l'intensité en fonction de z ou t avec une échelle logarithmique (en dB). Pour une fibre homogène, on voit une droite décroissante dont la pente est α . Voir figure 9.

Sur un connecteur, la réflexion de l'impulsion est importante et on obtient un pic de réflexion à cette position. L'atténuation due au connecteur se mesure au niveau du début du pic : on prolonge vers la gauche la droite qui est après le pic jusqu'au début de celui-ci. La différence de puissance au niveau du début du pic entre la courbe du réflectomètre et la droite prolongée est la perte au niveau du connecteur. Voir figure 10.

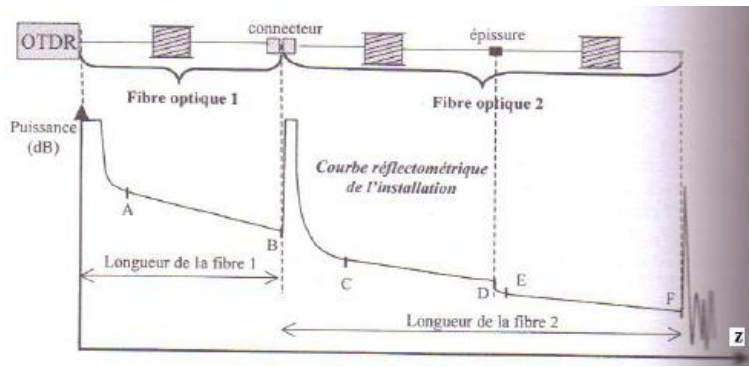


Figure 9: Installation et affichage correspondant du réflectomètre. OTDR désigne le réflectomètre (Optical Time Domain Reflectometer). La courbe réflectométrique d'une fibre optique est une droite, dont la pente est l'atténuation linéique de la fibre. On observe des pics de réflexion l'entre (dioptré air/verre) et à la sortie (dioptré verre/air) de l'installation. Les connecteurs sont aussi caractérisés par un pic de réflexion. Les soudures (épissures) sont caractérisées par une rupture de pente. Figure issue de F. Weil, "Optique Moderne".

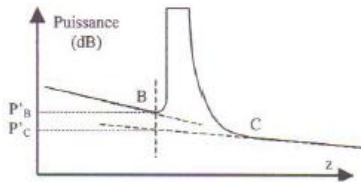


Figure 10: Principe de la mesure de l'atténuation au niveau d'un connecteur. Figure extraite de F. Weil "Optique Moderne".

La longueur d'une fibre entre deux connecteurs est mesurée entre les débuts de chaque pic.

En bout d'installation, il y a une dernière réflexion sur le bout de la fibre, puis plus que du bruit.

Pour examiner une installation en entier, il faut qu'une seule impulsion à la fois la parcourt. L'intervalle de temps T entre les impulsions doit être assez long pour que $L \leq cT/n$, mais pas trop long pour que le réflectomètre puisse faire des mesures rapprochées. Le signal affiché est une moyenne sur plusieurs mesures pour diminuer le bruit.

Un défaut va se manifester par une réflexion ou une atténuation subite du signal. On peut le repérer si la résolution est suffisante.

Une bonne mesure par réflectométrie doit faire la moyenne des valeurs mesurées pour les deux sens de propagation de la lumière. Cela est rendu apparent par le fait qu'une soudure, par exemple, peut se manifester par une *augmentation* de signal dans un des sens de propagation, ce qui est lié au changement de facteur R_d lors du changement de fibre. En fait, il faut faire la moyenne des deux sens de propagation et on obtient la bonne valeur de l'atténuation.

La réflexion sur un connecteur étant parfois intense, il se peut qu'une partie de la lumière soit aussi réfléchi par le réflectomètre et qu'elle refasse un aller-retour dans l'installation. Arrivée sur le connecteur, cette lumière donne lieu à un pic de réflexion indiqué à une distance double de la distance réelle. Un tel pic est appelé fantôme ou ghost en anglais. Il se repère car il est à distance double du vrai connecteur et il n'y a pas d'atténuation : la droite au milieu de laquelle il se trouve n'est pas discontinue.