

1 . Réflexion de Fresnel

1.1 . Mise en évidence

Lorsqu'une onde $S_{incidente} = E_i \exp^{j\omega t}$ est incidente sur une interface entre deux milieux d'indice n_1 et n_2 , une partie de l'onde est transmise et une autre partie est réfléchi

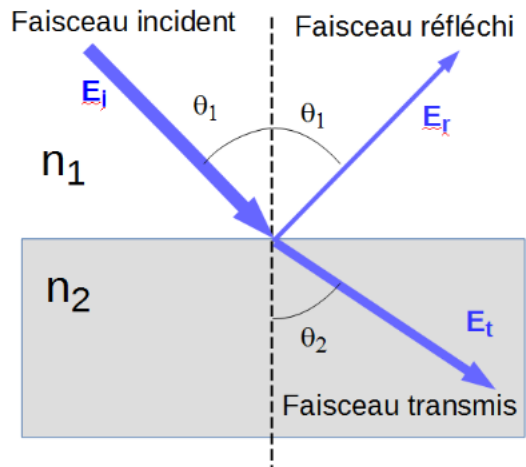
1.2 . Coefficient de Fresnel

On définit le coefficient de réflexion r et le coefficient de transmission t en amplitude de l'onde incidente E_i par :

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{et} \quad t = \frac{E_t}{E_i}$$

où E_t et E_r sont les amplitudes des ondes transmises et réfléchies. Les coefficient de réflexions et de transmission en amplitude dépendent des indices n_1 et n_2 ainsi que des angles θ_1 et θ_2 :

$$r = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad \text{et} \quad t = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$



1.3 . Coefficient de Fresnel en amplitude en incidence normale

En incidence normale, $\theta_1 = 0$ et $\theta_2 = 0$ ce qui permet de simplifier les relations :

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \text{et} \quad t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

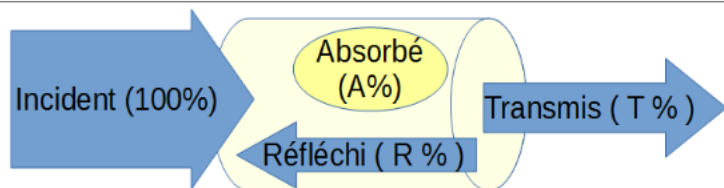
1.4 . Coefficient de Fresnel en Intensité (Puissance)

L'intensité I est définie comme le carré du module d'une onde soit $I = S \cdot \bar{S}$. Pour les coefficients cela se traduit par :

$$R = r^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{et} \quad T = \frac{n_2}{n_1} t^2 = \frac{4 n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

1.5 . Loi de conservation

Le principe de conservation de l'énergie impose que $R + T = 1$ lorsque le milieu est non-absorbant.



R est la réflectance, T la transmittance.

Lorsque le milieu est absorbant on obtient $R + T + A = 1$ où A est l'absorbance.

1.6 . Réflexion et transmission sur la facette d'une fibre :

Une fibre optique d'indice de cœur $n=1,52$ produit à l'interface verre/air de sa facette une réflexion de Fresnel $R= 0,042$ soit 4,2 %. Le coefficient de transmission est donc $T= 0,958$ soit 95,8 % (soit -0,18dB). On peut considérer que chaque interface d'une fibre optique est susceptible de réduire la transmission de 0,18dB. Si il y a N interfaces dans une liaison la transmission sera réduite de $N \times 0,18$ dB.

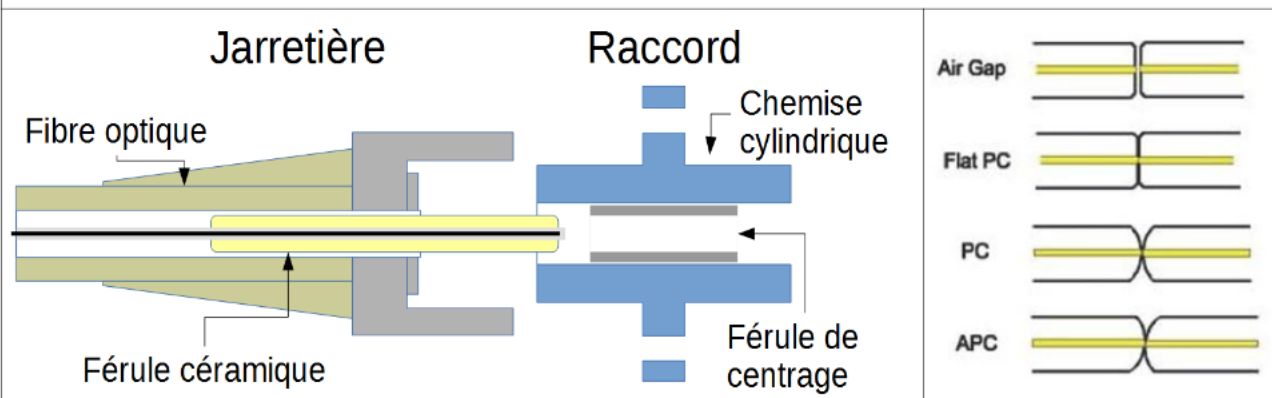
1.7 . Connecteurs et raccords de fibre optique

Des fibres optiques terminées par des connecteurs (jarretières) peuvent être raccordées entre-elles grâce à des raccords. Il existe plus de 20 différents types de connecteurs et de raccords : FC, SMA, ST, E2000, LC, MU,



1.7.1 . Structure d'un connecteur

Les raccords sont des tubes creux avec une fêrle de centrage en céramique dans lesquels les extrémités des jarretières aussi appelées fêrle sont insérées. Le diamètre de ces tubes (fêrle de centrage) ont une précision meilleure que la dimension du cœur de la fibre afin que les cœurs soient parfaitement alignés. Les meilleures prestations du point de vue répétitivité sont offertes par les connecteurs et raccords à fêrle et anneau intérieur (fêrle de centrage) céramique (Zirconium).



L'objectif de la fêrle de centrage est double :

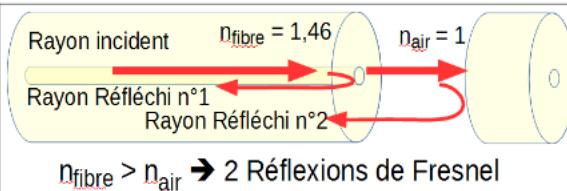
- Elle doit mettre bout à bout les deux fibres optiques sans décalage des cœurs l'un par rapport à l'autre.
- La longueur des fêrles doit aussi permettre que le gap d'air entre les fibres soit le plus faible possible.

Pour réduire les réflexions de Fresnel plusieurs stratégies existent :

- La face des fêrles est polie (flat PC) . Cela évite que les rugosités des facettes des fêrles n'introduisent des micro-gap.
- Si la facette de la fêrle est arrondie (PC) la surface de contact est réduite et l'effet des rugosités est plus faible.
- Les fêrles APC ont un angle qui limite les réflexions de Fresnel.

1.7.2 . Réflexion aux interfaces d'un raccord

Le gap d'air résiduel introduit une double réflexion de Fresnel :



- La première à l'interface cœur_1/air à l'extrémité de la première fibre.
- La deuxième à l'interface air/cœur_2 à l'extrémité de la deuxième fibre.

Sachant que la première facette introduit une réflexion $R_1 = \frac{(n_{fibre} - n_{air})^2}{(n_{fibre} + n_{air})^2}$ et la seconde

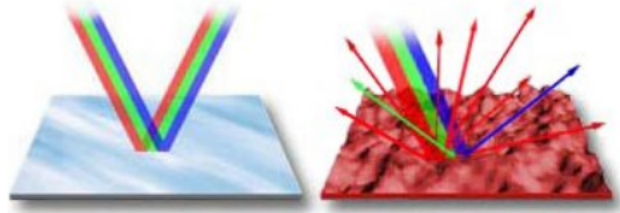
$$R_2 = \frac{(n_{air} - n_{fibre})^2}{(n_{air} + n_{fibre})^2} . \text{ on obtient une réflexion en dB identique pour chaque facette avec } R_1 =$$

2,5 % soit 0,1dB par facette.

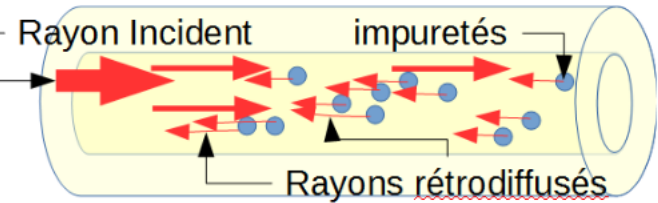
Au total chaque raccord introduit 0,2 dB de pertes par réflexion

2 . Réflexion diffuse

Lorsque les surfaces sont rugueuses, et qu'elles présentent des aspérités dont la taille est supérieure à la longueur d'onde du rayonnement incident, lors la réflexion est diffuse. Chaque Le rayonnement est réfléchi dans toutes les directions à cause des hétérogénéités du milieu. Dans une fibre optique, le matériau qui constitue le cœur n'est pas forcément homogène car il peut contenir des impuretés. Ces impuretés produisent des réflexions qui renvoie de la lumière vers l'entrée de la fibre.



Réflexion spéculaire (gauche) et réflexion diffuse (droite).



2.1 . Diffusion de Rayleigh

Chaque tronçon élémentaire de la fibre renvoie donc une fraction de la lumière qui est incidente. On parle de rétro-diffusion. Le coefficient de diffusion est $\alpha_{diffusion}$.

Le coefficient de diffusion signifie que la fraction dE de l'amplitude de l'onde qui est diffusée en un point dépend de l'amplitude E de l'onde en ce point et s'écrit sous la forme : $dE = \alpha_{diffusion} E$

Sachant que l'amplitude E en un point situé à une distance z de la source s'écrit :

$$E(z) = E_0 \exp^{-\alpha_{absorption} z}$$

La part de l'onde diffusée s'écrit en fonction de z : $dE(z) = \alpha_{diffusion} E_0 \exp^{-\alpha_{absorption} z}$

Si on considère que la diffusion se fait dans toutes les directions et que seulement une fraction S de l'onde est retro-diffusée dans la direction de la source, l'amplitude de l'onde qui ressort par l'entrée de la fibre après avoir fait le chemin retour est :

$$dE(z) = \alpha_{diffusion} S E_0 \exp^{-2\alpha z}$$

Le coefficient d'atténuation α_{total} tient compte non seulement de l'absorption que nous avons vu au cours n°2 avec le coefficient d'absorption $\alpha_{absorption}$ mais aussi du coefficient de diffusion $\alpha_{diffusion}$:

$$\alpha_{total} = \alpha_{absorption} + \alpha_{diffusion}$$

3 . Réflectomètre optique – OTDR

3.1 . Description

Un OTDR (Optical Time Domain reflectometer) est un appareil qui permet de mesurer la longueur de tronçon de fibres optiques. Il permet également de mesurer l'atténuation du tronçon et détecte plusieurs type d'événements.

Les sous-éléments qui le constituent sont les suivants :

- Un DSP (Digital signal processor) avec son horloge
- Un générateur d'impulsion électrique
- Une diode laser
- Un coupleur optique bidirectionnel
- Une photodiode rapide
- Un convertisseur analogique numérique
- Un écran d'affichage



3.2 . Principe d'un réflectomètre optique OTDR

Le principe de fonctionnement d'un OTDR est le suivant :

- Il envoie des impulsions lumineuses à une cadence définie par une horloge interne
- Les réflexions aux interfaces optiques de la fibre, retournent des impulsions vers l'OTDR.

- Le temps de parcours aller-retour entre l'OTDR et l'interface est mesurée grâce à l'horloge.
- A partir de l'indice de réfraction de la fibre et donc de la vitesse de propagation les distances sont mesurés.

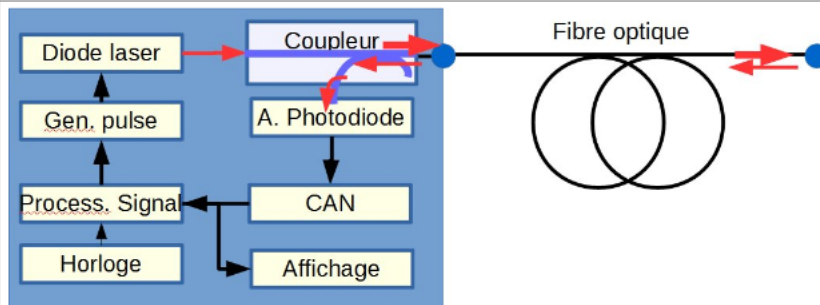


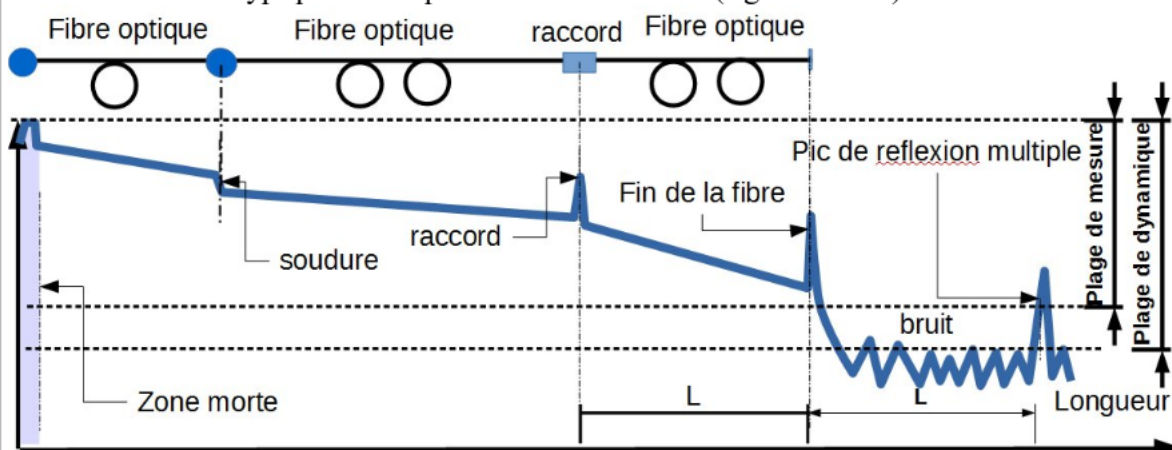
Schéma bloc d'un OTDR

Le signal optique reçu par l'OTDR est la contribution de :

- Réflexion de Fresnel aux interfaces
- Réflexions diffuses. La réflexion diffuse s'effectuant tout au long de la fibre, elle tient compte de l'atténuation de la fibre et donc de l'absorption.

La figure ci-dessous représente :

- Une liaison optique faite de trois tronçons de fibres optiques de longueurs différentes raccordées dans l'ordre avec une soudure (épissure) et un raccord. (figure du haut)
- Un relevé typique de ce que mesure un OTDR. (figure du bas)



On distingue plusieurs types d'événements :

- Une première impulsion située à une distance très faible qui correspond à l'entrée de la fibre. Cela correspond à la distance minimale L_{min} que peut mesurer l'OTDR avec une horloge de période T ($T = n_{fibre} \cdot L_{min} / C$).
- Des pentes faibles fonction de l'absorption de fibre. Provoquées par la rétrodiffusion elle traduit l'atténuation du tronçon de fibre.
- Des « marches » descendantes qui correspondent à une atténuation forte sur une très courtes distances. Elles correspondent à des soudures (épissure)
- Des pics qui correspondent à des réflexions de Fresnel (ponctuelles) et qui correspondent au gap d'air introduit par les connecteurs ou par la fin de la fibre (éventuellement une cassure de la fibre)
- Le bruit qui correspond au bruit que produit la photodiode.
- Des pics de réflexions multiples qui correspondent aux allers et retours potentiels que font les impulsions lumineuses entre les différentes interfaces.

Finalement, l'OTDR mesure un bilan de liaison contenant également des informations sur les réflexions.