

MODULE #2

243-511-RK (2-4-2)

*PROPAGATION DES ONDES ET LIGNES DE
TRANSMISSION*

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2

LES PRINCIPES DE BASE DE LA FIBRE OPTIQUE

Enseignant : Sébastien Richard

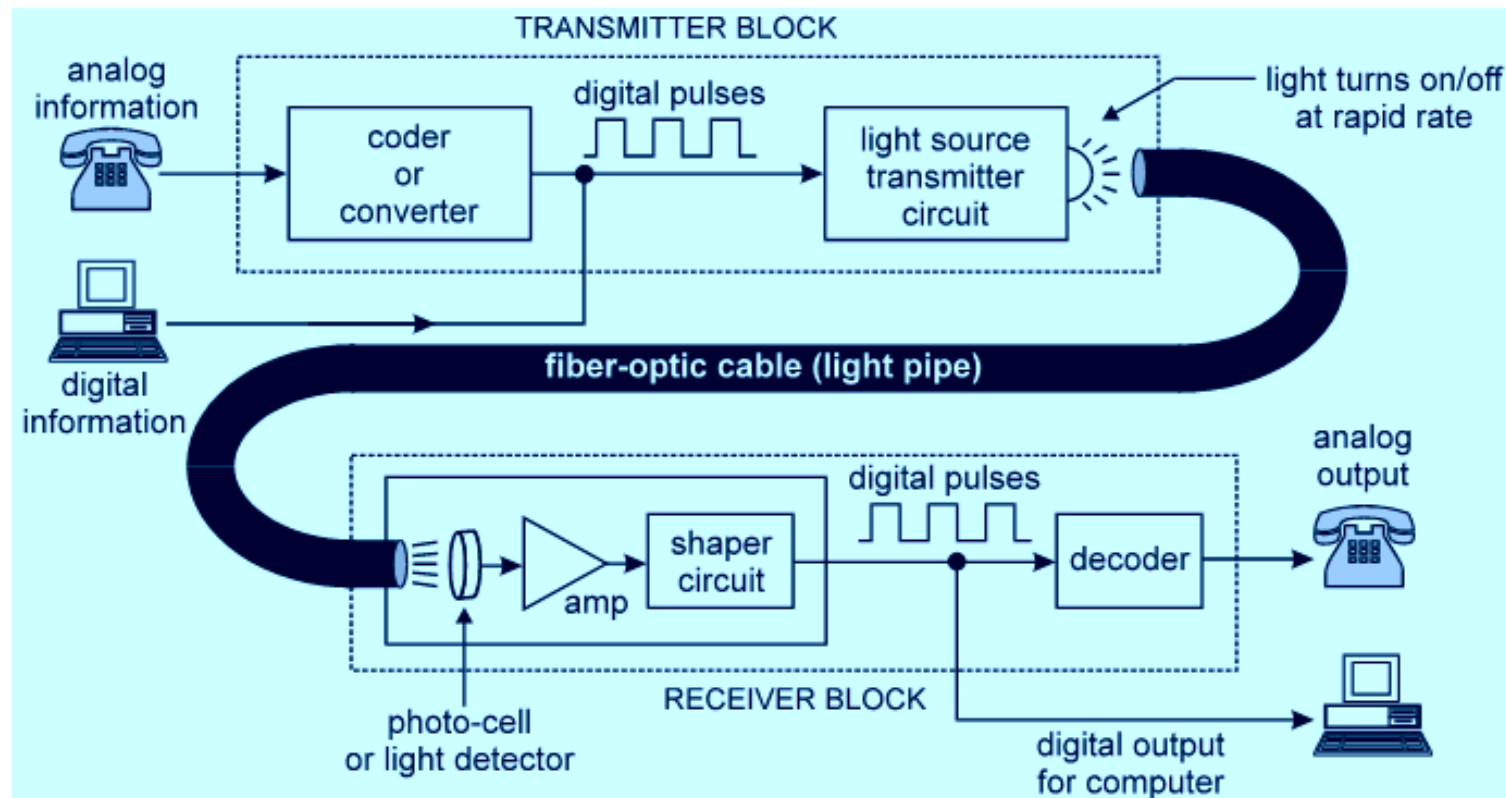
MODULE #2 – Introduction

Les récents progrès dans le développement et la fabrication de la fibre optique ont permis à celle-ci de devenir le lien de transmission privilégié dans plusieurs applications dans le domaine des télécommunications. Elle est utilisée autant dans le domaine militaire que commercial et remplace de plus en plus les câbles de cuivre.

La fibre a aussi remplacé les liens micro-ondes et satellite dans la plupart des liens point à point longue distance, ainsi que les liens transocéaniques.

MODULE #2 – Fibre optique

La base d'un système de communication par fibre optique est plutôt simple, il comprend les éléments suivants.



MODULE #2 – Fibre optique

Les éléments principaux sont :

1. **Une fibre optique** capable de transporter le signal (faisceau lumineux modulé par un signal analogue ou encore des impulsions numériques) sur une distance de quelques pieds ou encore de centaines de kilomètres. Un câble de fibre optique peut contenir plusieurs centaines de fibres optiques.
2. **Une source de lumière** infrarouge invisible pour l'œil humain. Cette source de lumière est produite soit par un LED ou bien un LASER. Celui-ci, sera modulé à l'aide d'un signal analogue ou numérique.
3. **Un détecteur photosensible** qui convertit la signal optique en signal électrique. La photodiode est l'élément le plus répandu pour remplir cette fonction.
4. **Des connecteurs fiables** et avec un minimum de perte d'insertion afin d'éviter au maximum les pertes.

MODULE #2 – Fibre optique – avantages

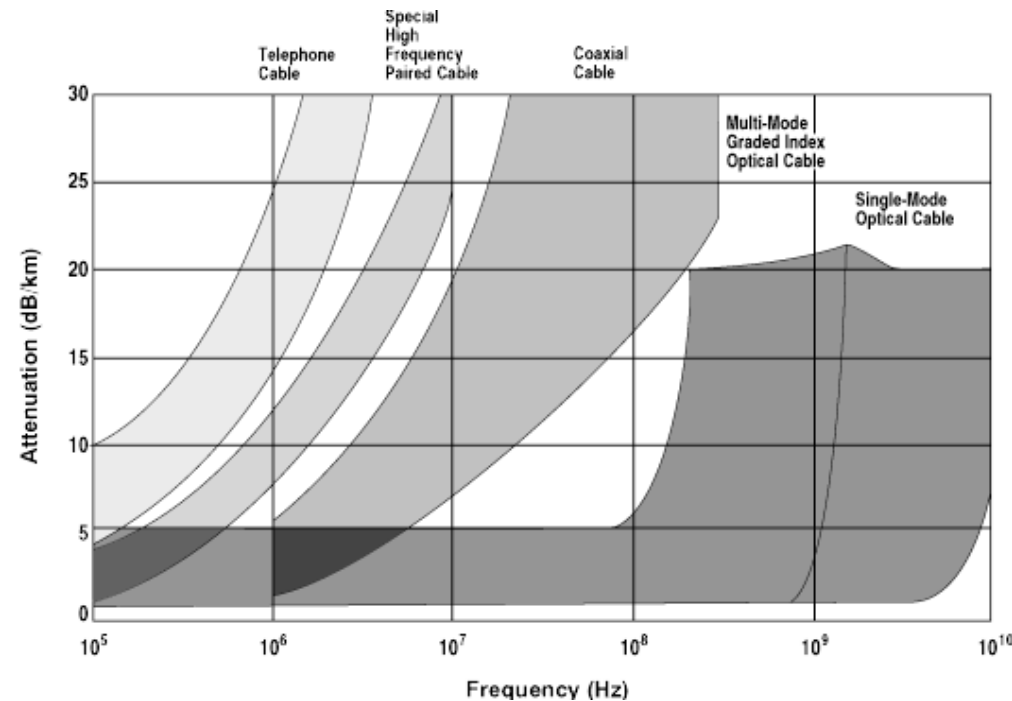
Les principaux avantages de la fibre sont :

1. ***Débit et bande passante très élevés*** : Avec l'utilisation du LED une bande passante de 100 MHz est disponible. Avec le laser, on peut atteindre des débits de plus de 10 Gbps pour une seule fibre. On peut maintenant aussi combiner plusieurs lasers (longueurs d'onde différentes) afin d'augmenter ce débit à plusieurs centaines de Gbps !!
2. ***Immunité aux interférences électrostatiques***. Le bruit électrostatique externe et la foudre n'ont aucune effet sur la fibre optique.
3. ***Élimination du crosstalk***. La lumière à l'intérieur d'une fibre n'interfère en aucun cas avec la lumière d'une fibre adjacente. Ce qui est le cas avec les câbles de cuivre entre autre.

MODULE #2 – Fibre optique – avantages

Les principaux avantages de la fibre sont :

4. **Atténuation minimale du signal.** La fibre, en comparaison avec différents types de lignes de transmission, possède l'atténuation typique minimum. 0,1 à 0,008 dB par 100 pied en comparaison à 11,5 dB par 100 pied pour un RG-59 à 1 GHz.



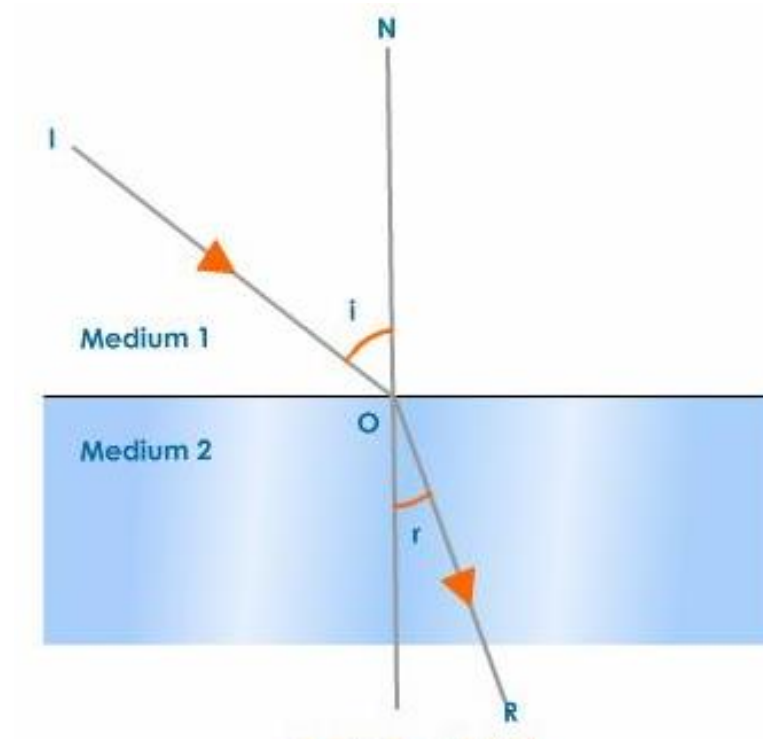
MODULE #2 – Fibre optique – avantages

Les principaux avantages de la fibre sont :

5. **Moins dispendieux.** Les coûts de la fibre optique continuent à diminuer, le coûts des systèmes utilisation la fibre diminue lui aussi et cette tendances semble s'accélérer.
6. **Plus léger et plus compact.** La U.S Navy a remplacé le filage de cuivre dans leur A-7, par de la fibre optique. Résultat : 224 pied de fibre pesant 1,52 lbs ont remplacé 1900 pied de cuivre pesant 30 lbs.
7. **Blindé contre la corrosion.** Le verre est un matériau inerte, les effets de la corrosion ne sont pas un problème.

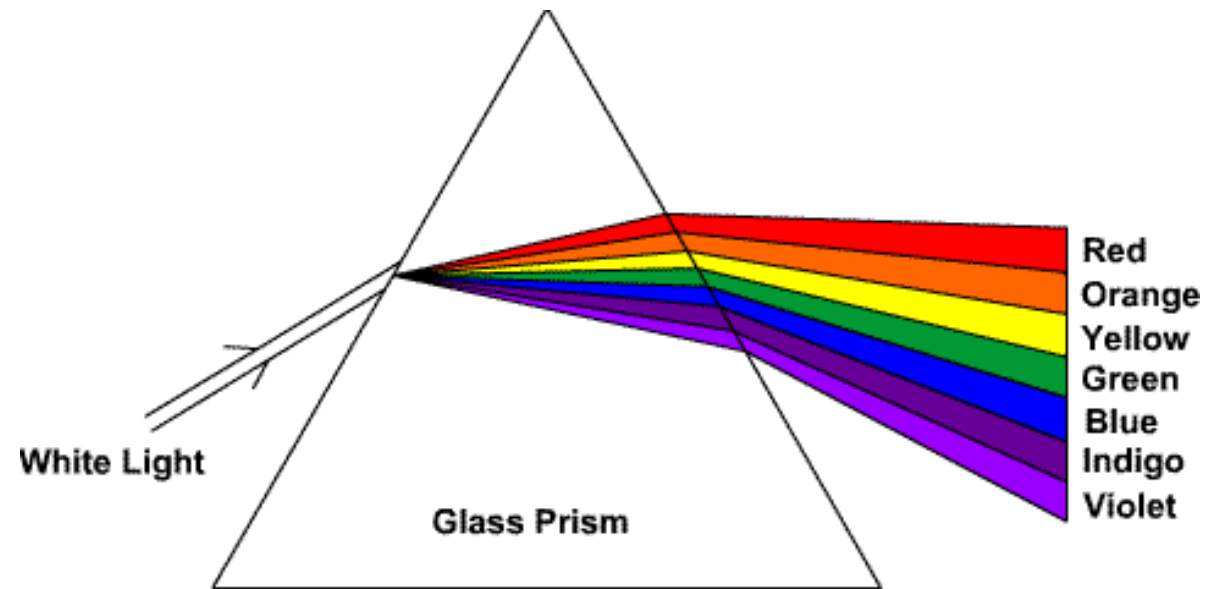
MODULE #2 – Nature de la lumière

On sait que la lumière voyage à 300 000 km/s dans le vide et sa vitesse réduit dans d'autres mediums. Le passage du milieu a un autre plus dense, aura pour résultat une réfraction de la lumière. La réfraction entraîne donc, l'onde lumineuse a courbé.



MODULE #2 - Nature de la lumière

Le changement de vitesse et l'angle de réfraction sont différents pour chaque longueur d'onde. C'est ce qui explique pourquoi la lumière que l'on pointe sur un prisme permet de séparer cette même lumière en différentes fréquences (couleurs). Le même principe se produit pour les arc-en-ciel avec les gouttelettes de pluies.

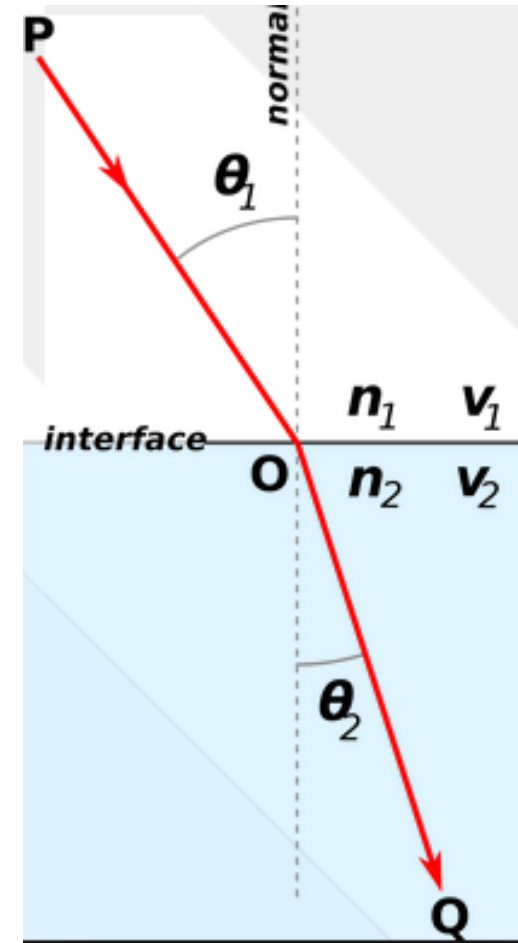


MODULE #2 – Nature de la lumière

L'intensité de la courbure de l'onde dépend de l'**index de réfraction** des deux milieux. Cet index est nommé n , est le rapports entre la vitesse de la lumière dans le vide c et la vitesse dans le milieu. Cet index est légèrement différents pour les différentes longueurs d'onde de la lumière mais nous allons utiliser un index unique pour toutes les couleurs.

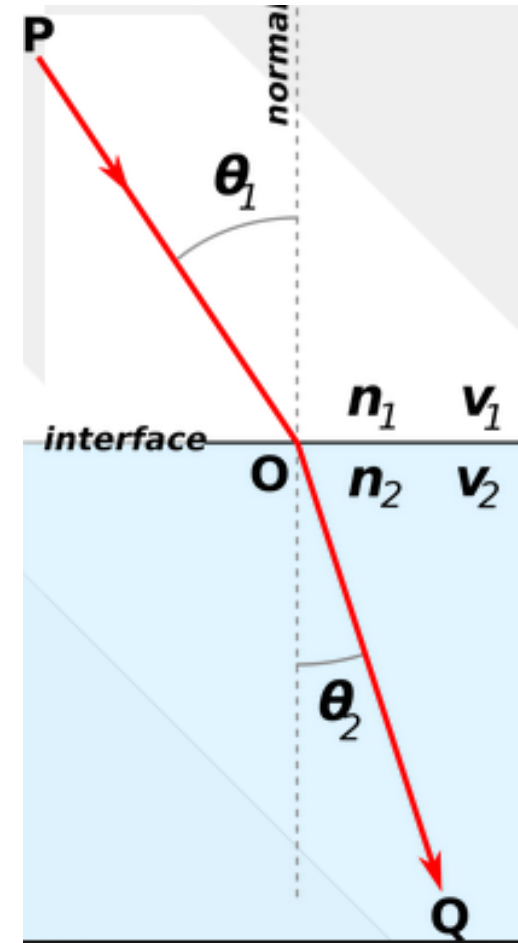
L'index de réfraction est la réciproque de VF.

$$n = \frac{1}{VF}$$



MODULE #2 – Nature de la lumière

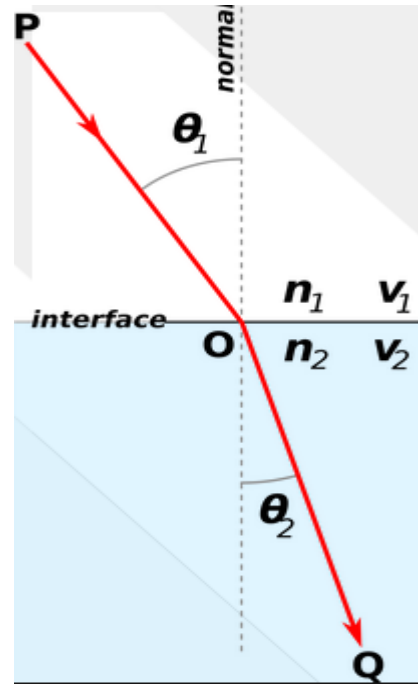
L'index de réfraction du **vide est 1**, celui de **l'air est de 1,003** celui de **l'eau 1,333**. Pour ce qui est de celui de la **fibres**, il varie entre **1,42** et **1,5** selon le matériel utilisé.



MODULE #2 – Nature de la lumière

L'équation suivante, établit la correspondance entre l'index de réfraction de deux milieux et de l'angle de réfraction. La loi de Snell's est :

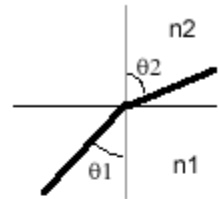
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



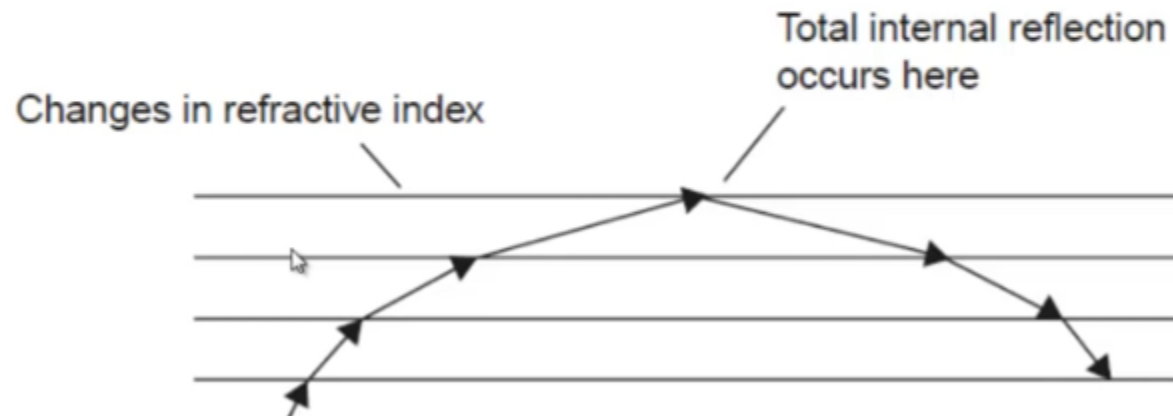
MODULE #2 – Nature de la lumière

L'équation suivante, établit la correspondance entre l'index de réfraction de deux milieux et de l'angle de réfraction. La loi de Snell's est :

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



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



MODULE #2 – Nature de la lumière

Exercice #31

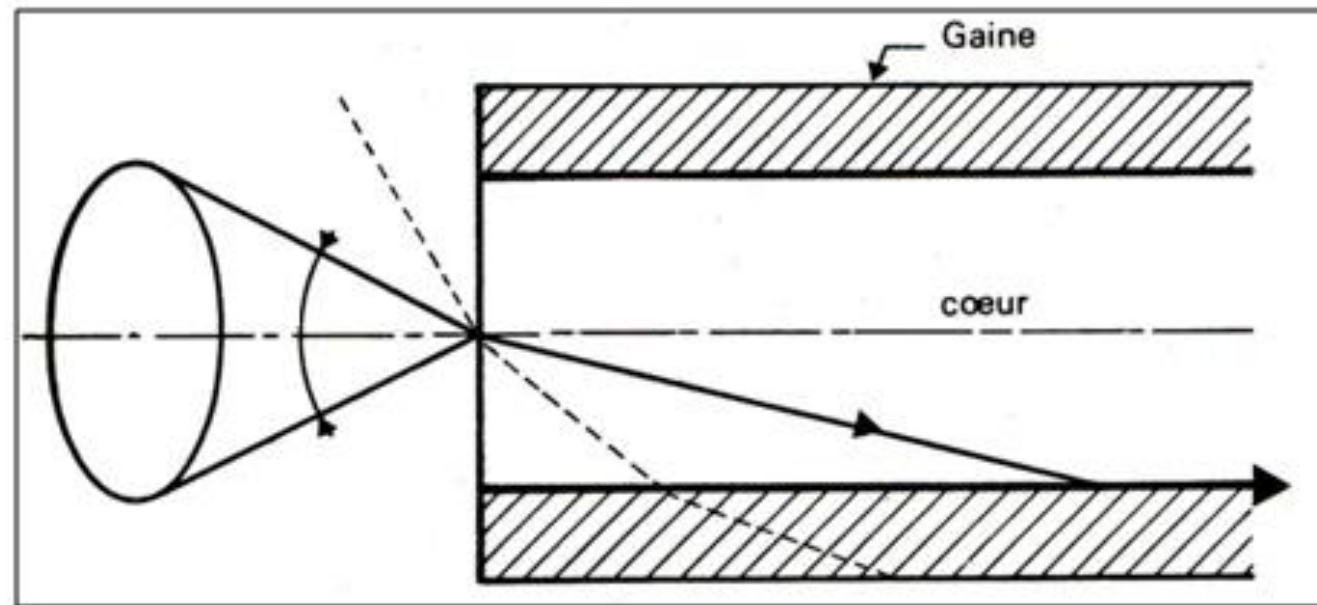
Donnez l'angle de réfraction d'une onde incidente arrivant de l'air (avec l'index de réfraction de 1,003 avec un angle de 25° pour pénétrer dans l'eau (1,33 d'index de réfraction). Dessinez le tout.

Exercice #32

Faites le même calcul et dessin mais maintenant en inversant les milieux.

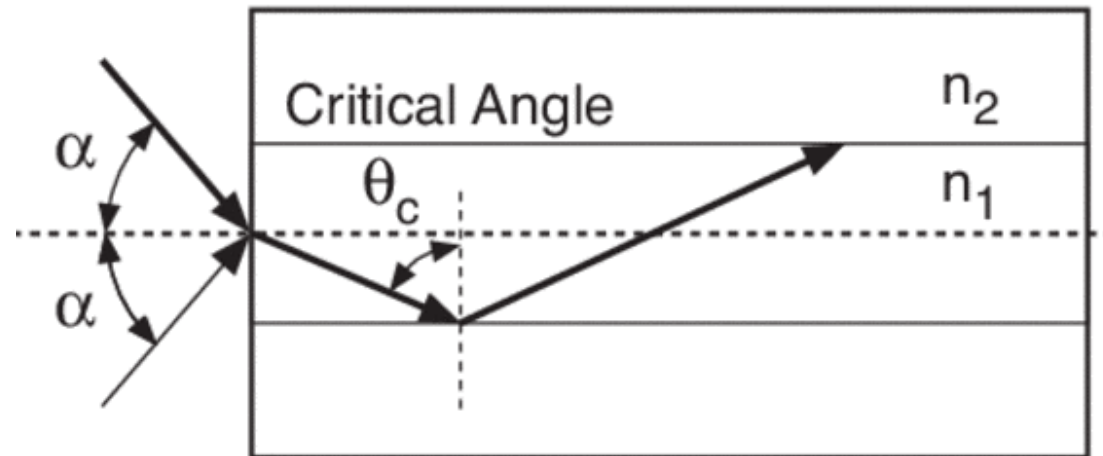
MODULE #2 – Ouverture numérique

L'ouverture numérique (*NA numerical aperture*) d'une fibre optique caractérise le **cône d'acceptance** de la fibre : si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant de ce cône, alors le rayon sera guidé par réflexion totale interne ; dans le cas contraire, le rayon ne sera pas guidé.



MODULE #2 – Ouverture numérique

En posant n_1 , n_2 et α respectivement les indices du cœur, de la gaine et l'angle d'incidence, alors l'ouverture numérique de la fibre s'exprime par la formule :



$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\text{Full Acceptance Angle} = 2\alpha$$

MODULE #2 – Ouverture numérique

Cette expression est indépendante de l'indice de réfraction du milieu extérieur, l'ouverture numérique est une caractéristique propre à la fibre et non du milieu.

Exercice #34

Trouvez le NA , le cône d'acceptance et l'angle incidente maximum que peut avoir une onde optique afin d'être guidée par réflexion totale interne si le cœur et la gaine possèdent respectivement un indice de réfraction de 1,535 et 1,490.

Exercice #35

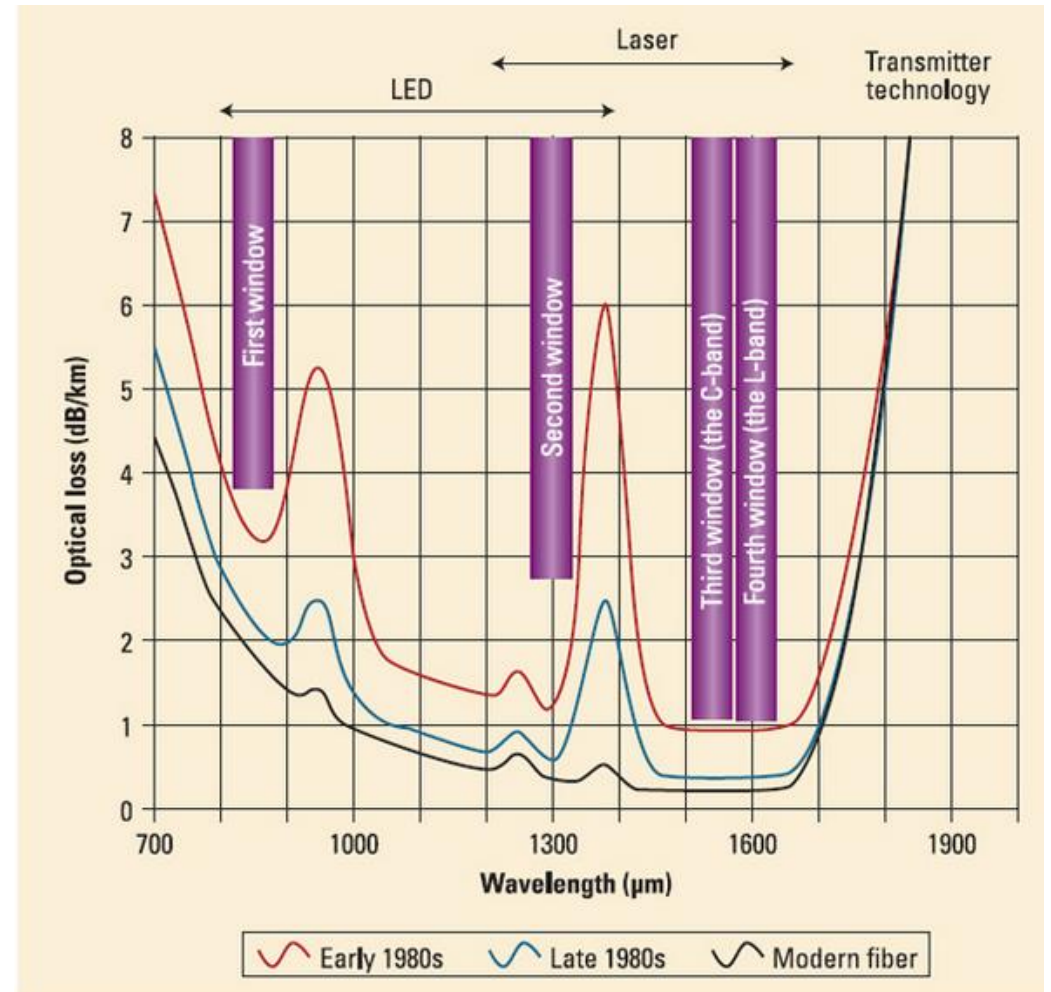
Quelle est l'indice de réfraction du cœur si la gaine possède un indice de réfraction 1,5 et un cône d'acceptance de 60°

MODULE #2 – Utilisation de λ

Dans le domaine de la fibre optique, nous utilisons davantage la longueur d'onde que la fréquence pour identifier un signal. La raison principale est qu'il est beaucoup plus simple, à ces fréquences, de parler en terme de longueur d'onde.

Cette longueur d'onde est toujours calculée selon le vide et non selon sa longueur d'onde dans une fibre optique du fait des la variation de la vitesse de propagation.

C'est ainsi que l'on parle de la bande du **850 nm (multimode)**, de **1300 nm (multimode et monomode)** ainsi que du **1550 nm (monomode)**



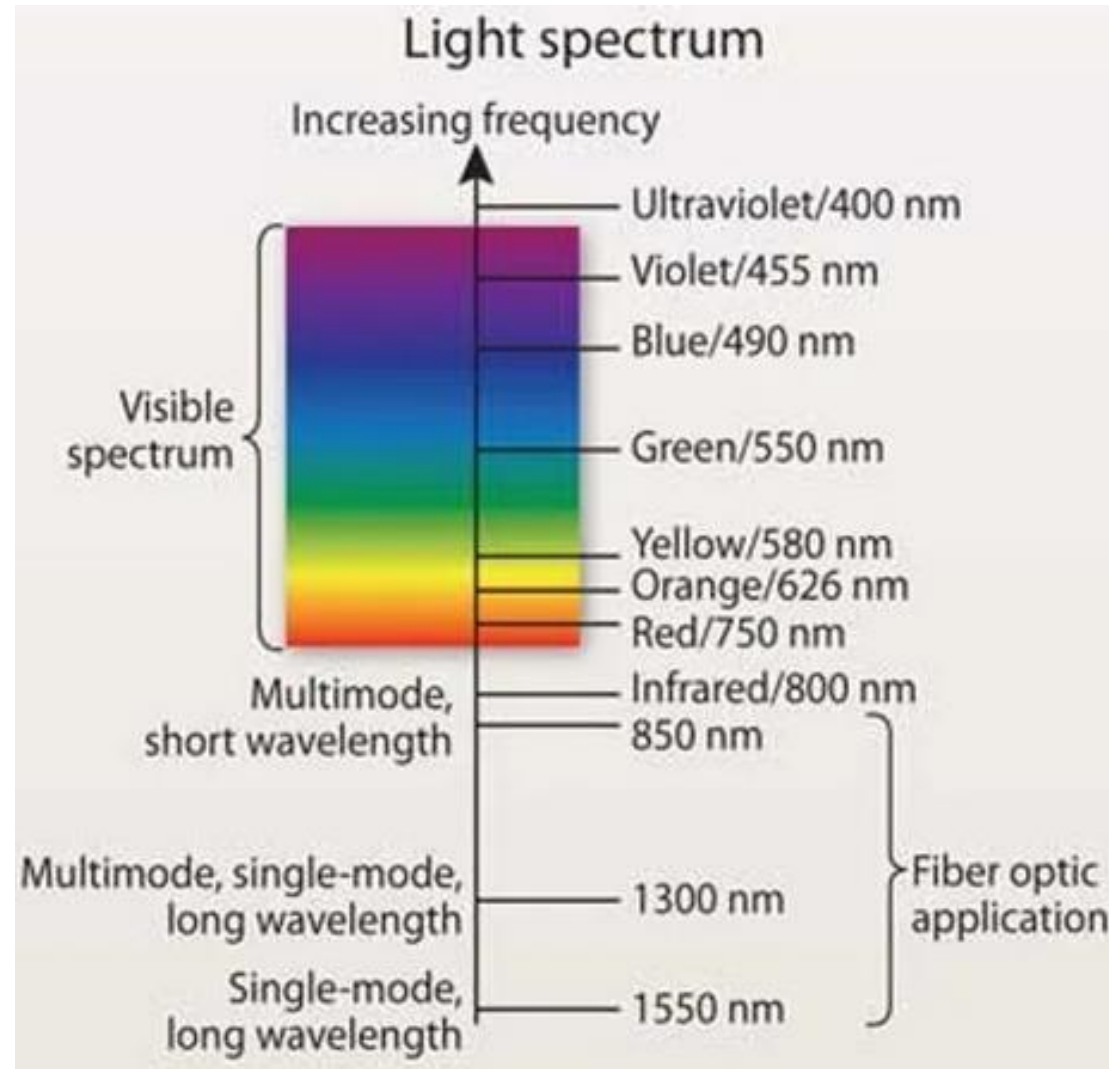
MODULE #2 – Utilisation de λ

Exercice #33

- A. Calculez la fréquence d'un signal optique dans une transmission multimode dans la bande du 850 nm et la bande du 1300 nm.

- B. Calculez la fréquence d'un signal optique dans une transmission monomode dans la bande du 1310nm et la bande du 1550 nm.

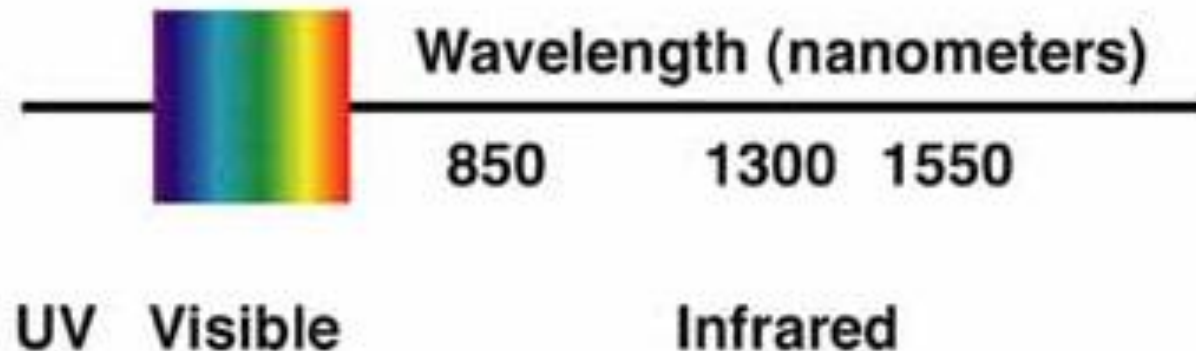
MODULE #2 – Utilisation de λ



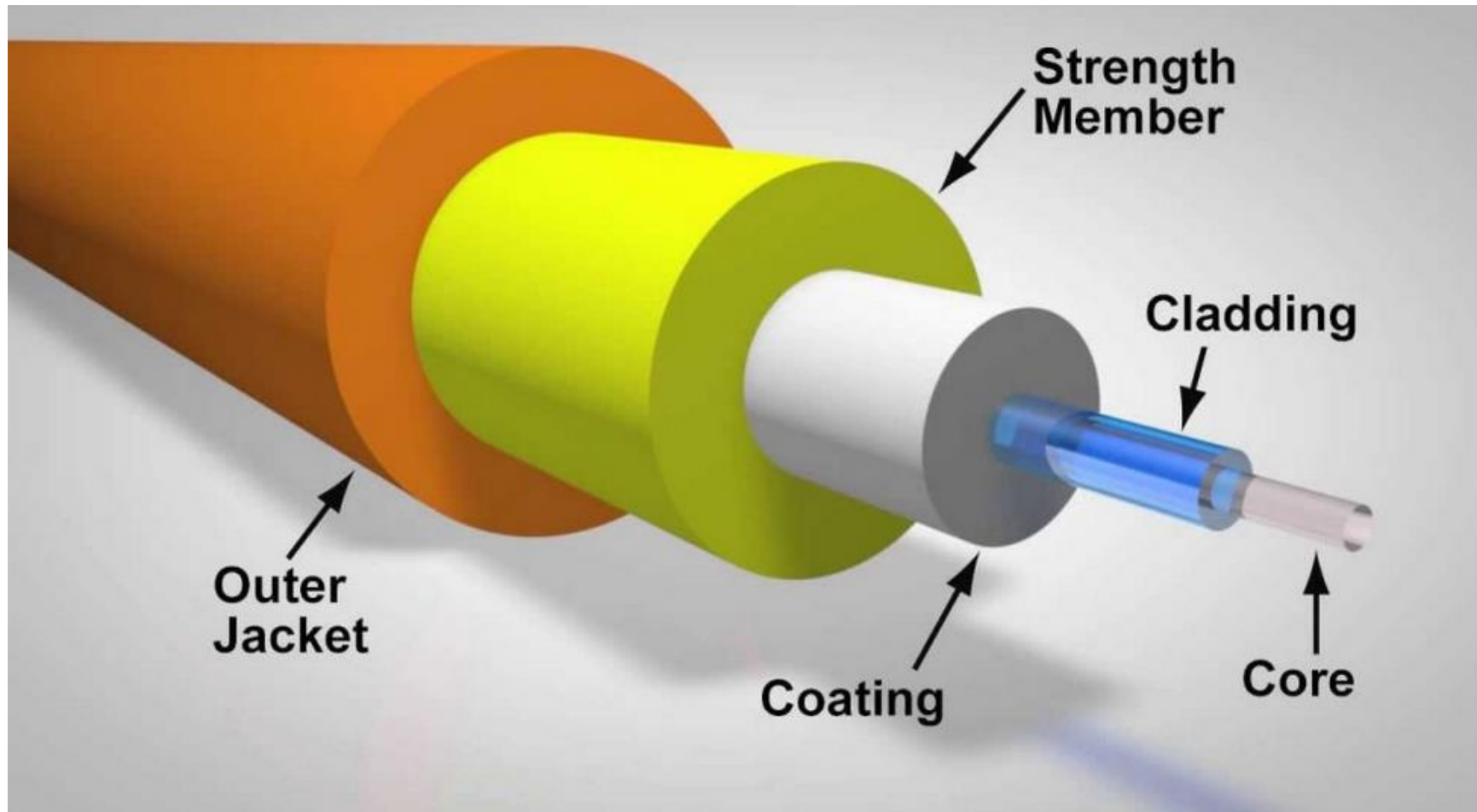
MODULE #2 – Utilisation de λ

Les longueurs d'onde utilisées selon les mode sont données ci-dessous:

- multimode -> **850 nm**
- multimode -> **1300 nm** et monomode -> **1310 nm**
- monomode -> **1550 nm**

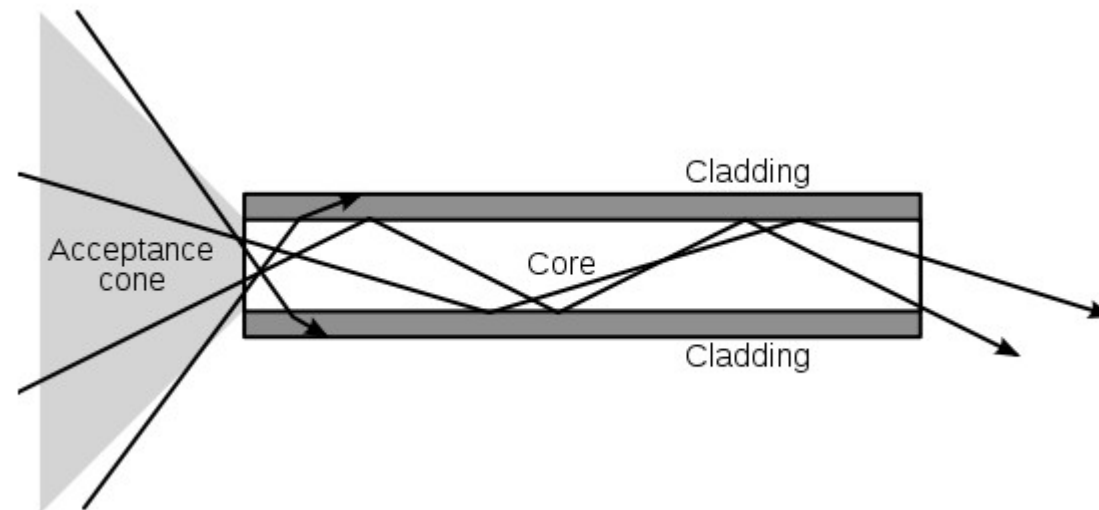


MODULE #2 – Composition de la FO



MODULE #2 – Composition de la FO

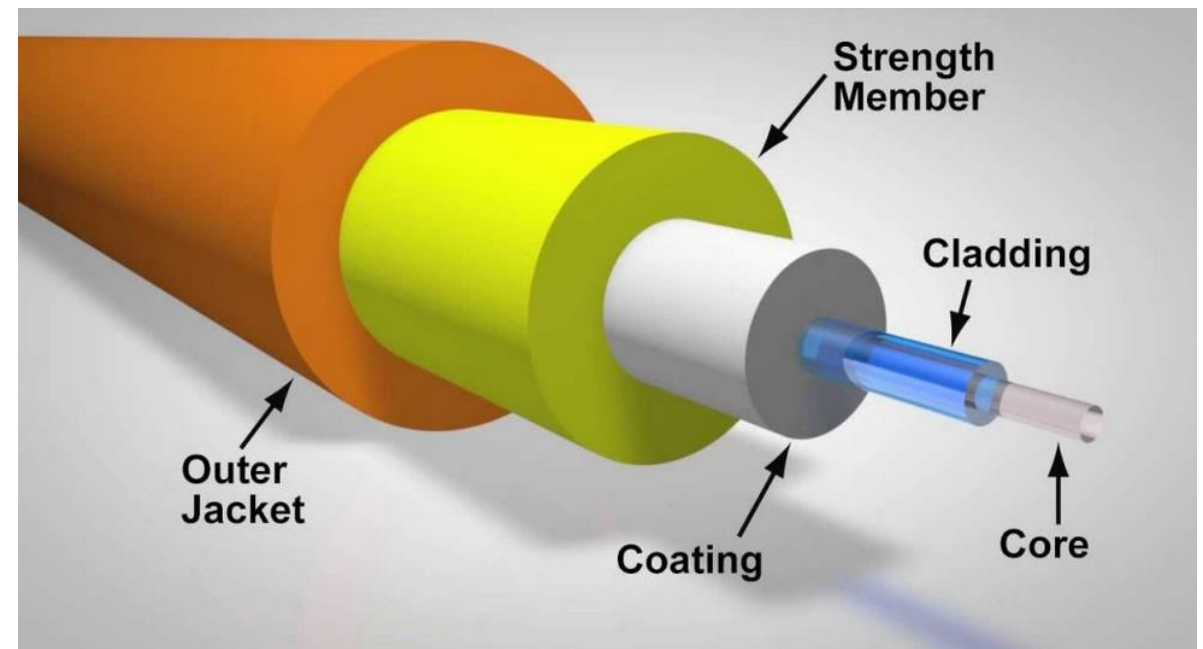
La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un **cœur** entouré d'une **gaine**. Le cœur et la gaine **constitue la fibre optique**. Il est aussi à noter que la **lumière se propage exclusivement dans le cœur**. La gaine réfléchit la lumière à l'intérieur du cœur en raison du phénomène de réflexion totale interne)



MODULE #2 – Composition de la FO

Le **cœur (core)** de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la **gaine (cladding)** et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne).

L'ensemble est généralement recouvert d'un revêtement de **protection (coating)** en acrylique.



MODULE #2 – Mode de propagation

En optique, le mode c'est le nombre de chemins possibles pour une onde qui circule dans une fibre.

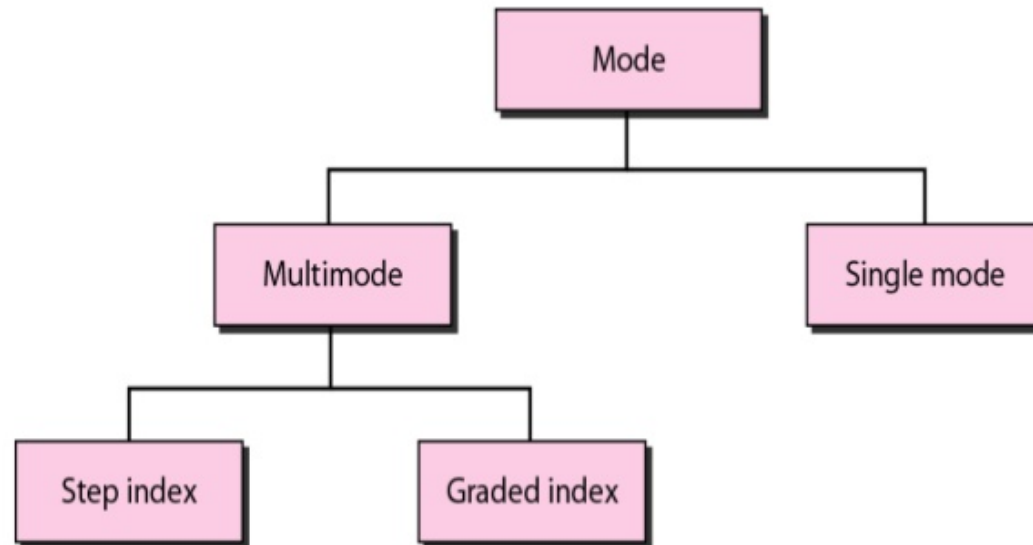
Dans une fibre **multimode**, la lumière peut emprunter un grand nombre de chemins donc plusieurs modes.

Dans une fibre **monomode**, l'onde est prisonnière d'un trajet direct. Elle conserve donc vitesse et cohérence. La fibre **monomode** est une fibre plus performante que la fibre multimode, mais elle nécessite l'utilisation de sources lumineuses (laser) très puissantes et son installation est beaucoup plus exigeante et difficile à réaliser. Elle est aussi plus dispendieuse.

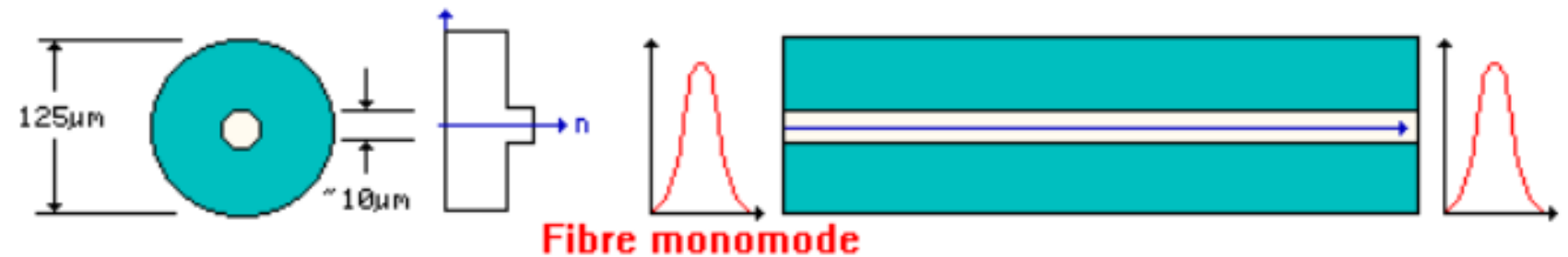
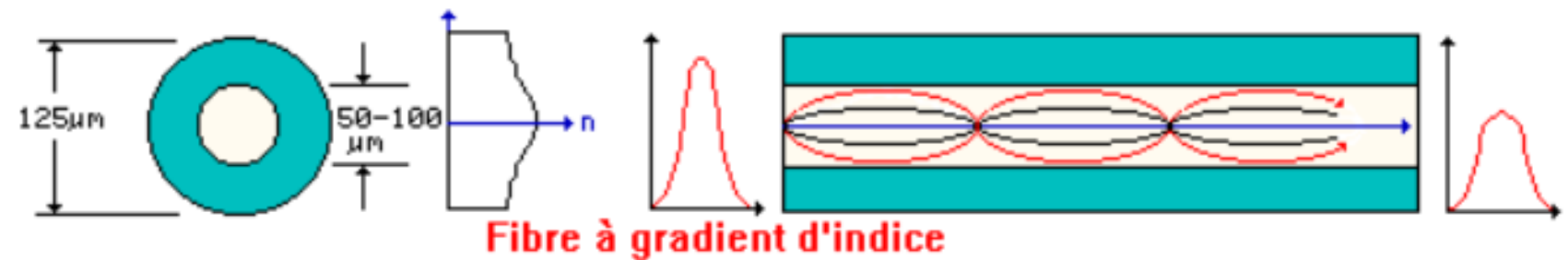
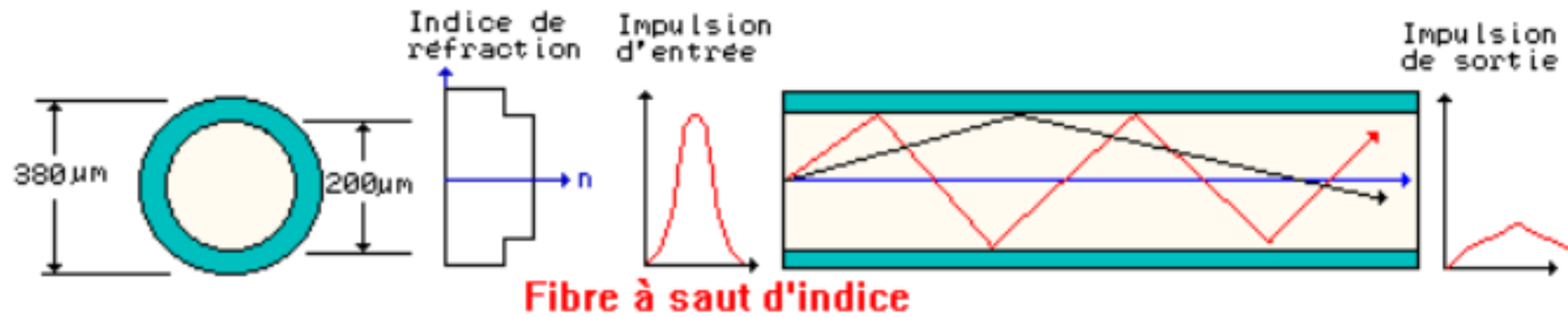
MODULE #2 – Mode de propagation

Il y a trois principaux types de fibre:

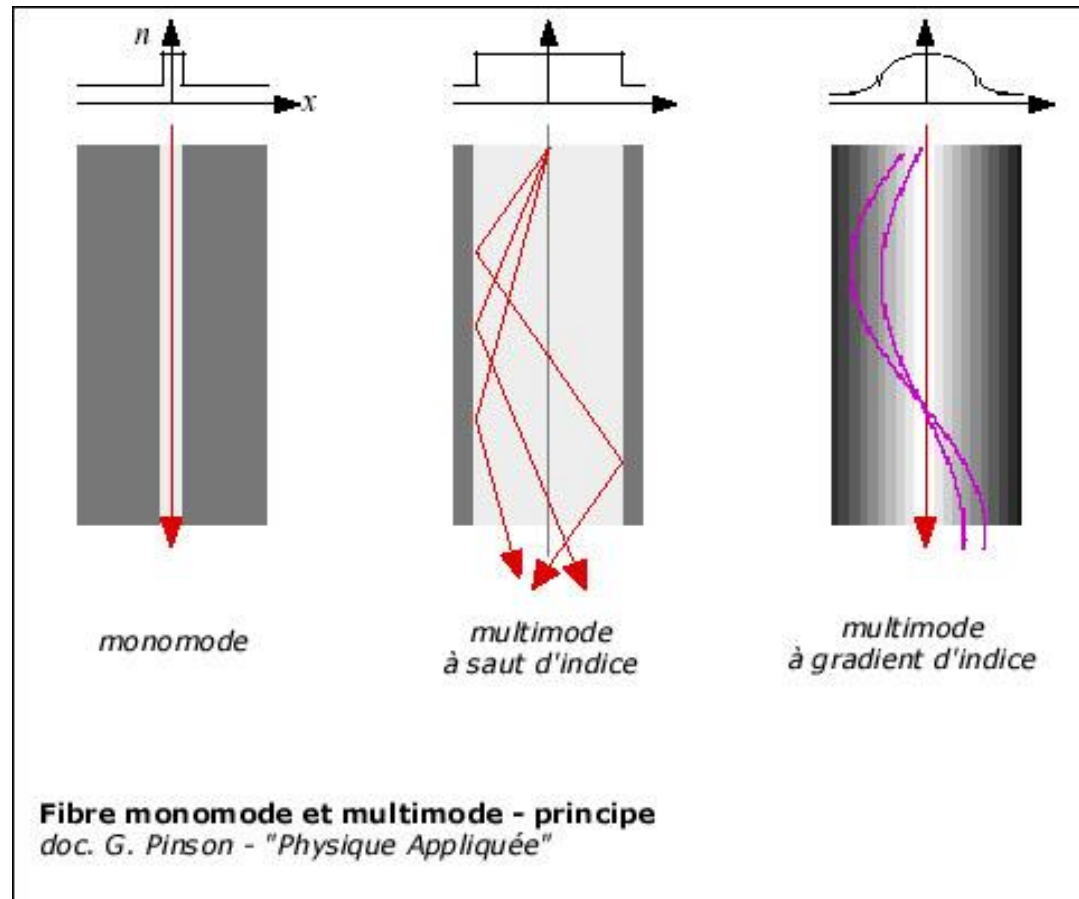
1. La fibre à saut d'indice (*Multimode Step-Index Fiber*)
2. La fibre à gradient d'indice (*Graded-Index Fiber*)
3. La fibre monomode (*Single-Mode Fiber*)



MODULE #2 – Mode de propagation



MODULE #2 – Mode de propagation



Démonstration du mode de propagation : <https://www.youtube.com/watch?v=MrJswUU143M>

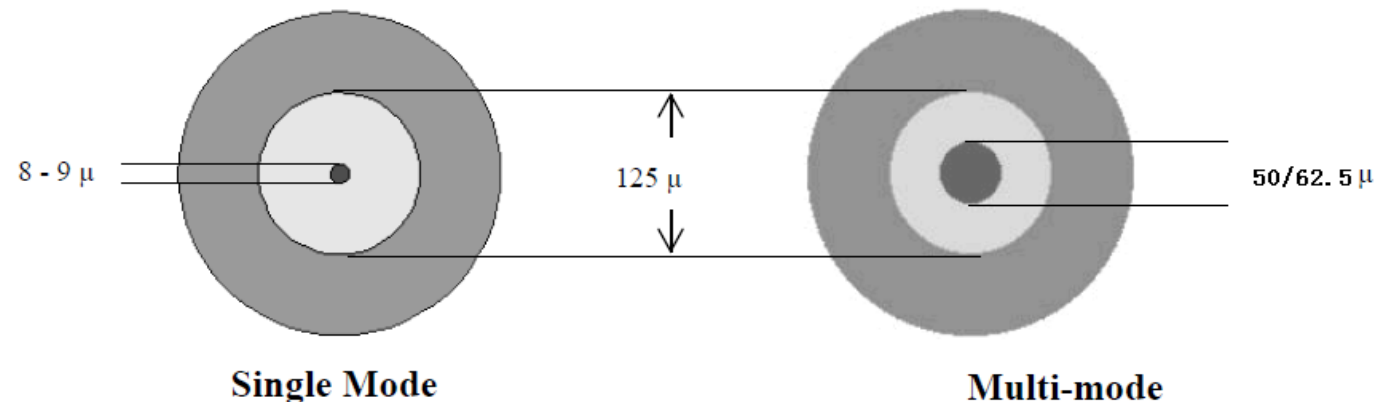
MODULE #2 – Multimode

La fibre **multimode**, (*MMF*) est surtout utilisée dans les réseaux locaux (quelques centaines de mètres à maximum 2km).

Son diamètre est relativement important (50 à 85 microns). On utilise une LED pour générer le signal.

L'implantation de ce type de transmission ne pose que peu de problèmes et ne requiert pas de matériel onéreux ou complexe à mettre en oeuvre.

On distingue les fibres à saut d'indice (bande passante de 400MHz à 1km et 200 MHz à 2km) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s).



MODULE #2 – Multimode

En télécommunication, deux standards plus répandus pour la multimode:

- Gradient d'index avec cœur de **50 μm**
- Gradient d'index avec cœur de **62,5 μm**

Ces fibres sont nommées par la dimension de leur cœur et de leur gaine soient :

- Fibre 50/125
- Fibre 62/125

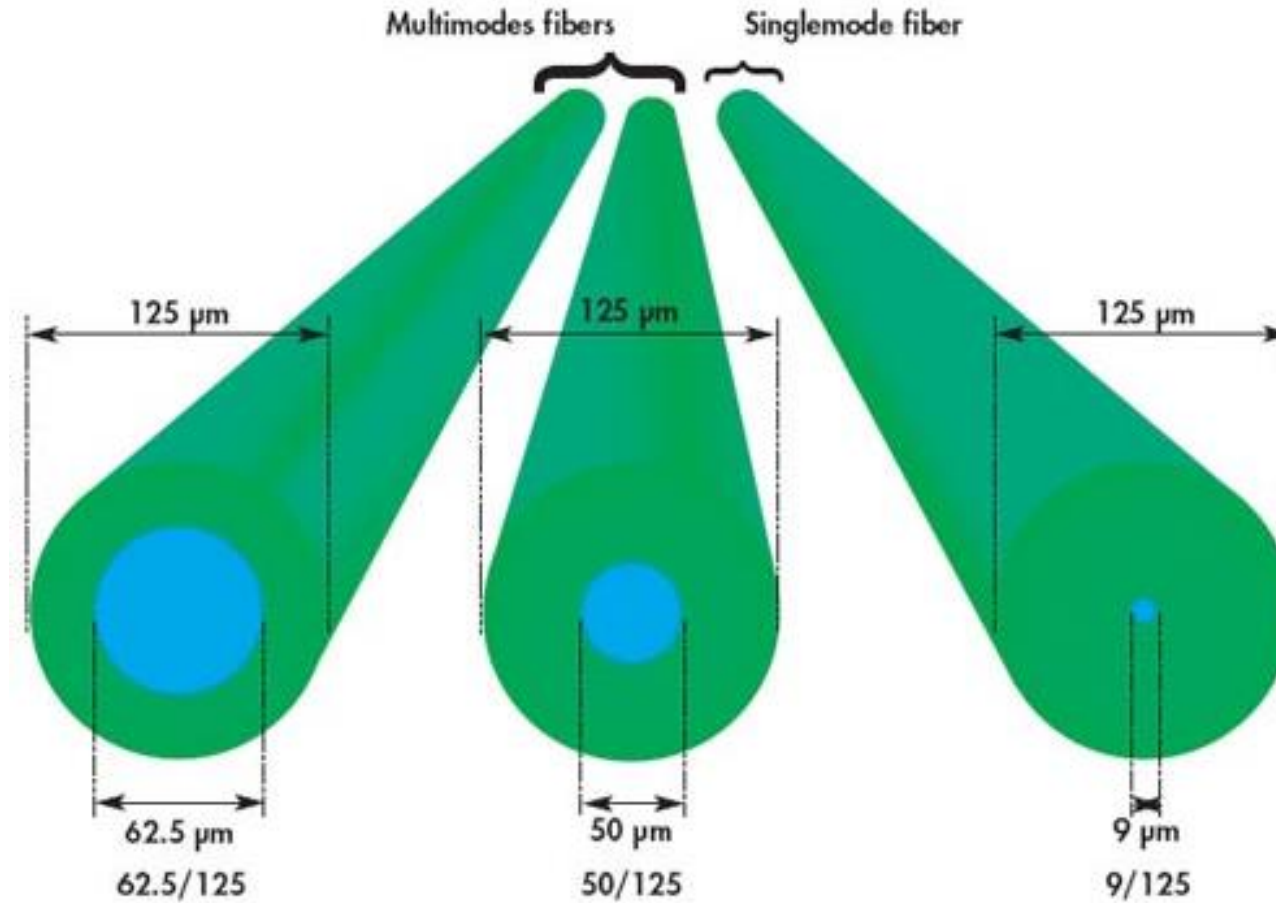
MODULE #2 – Monomode

La fibre **monomode**, ou **SMF** (*Single Mode Fiber*) est utilisée pour les réseaux métropolitains ou les communications longue distance des opérateurs. Son cœur est extrêmement fin (quelques microns).

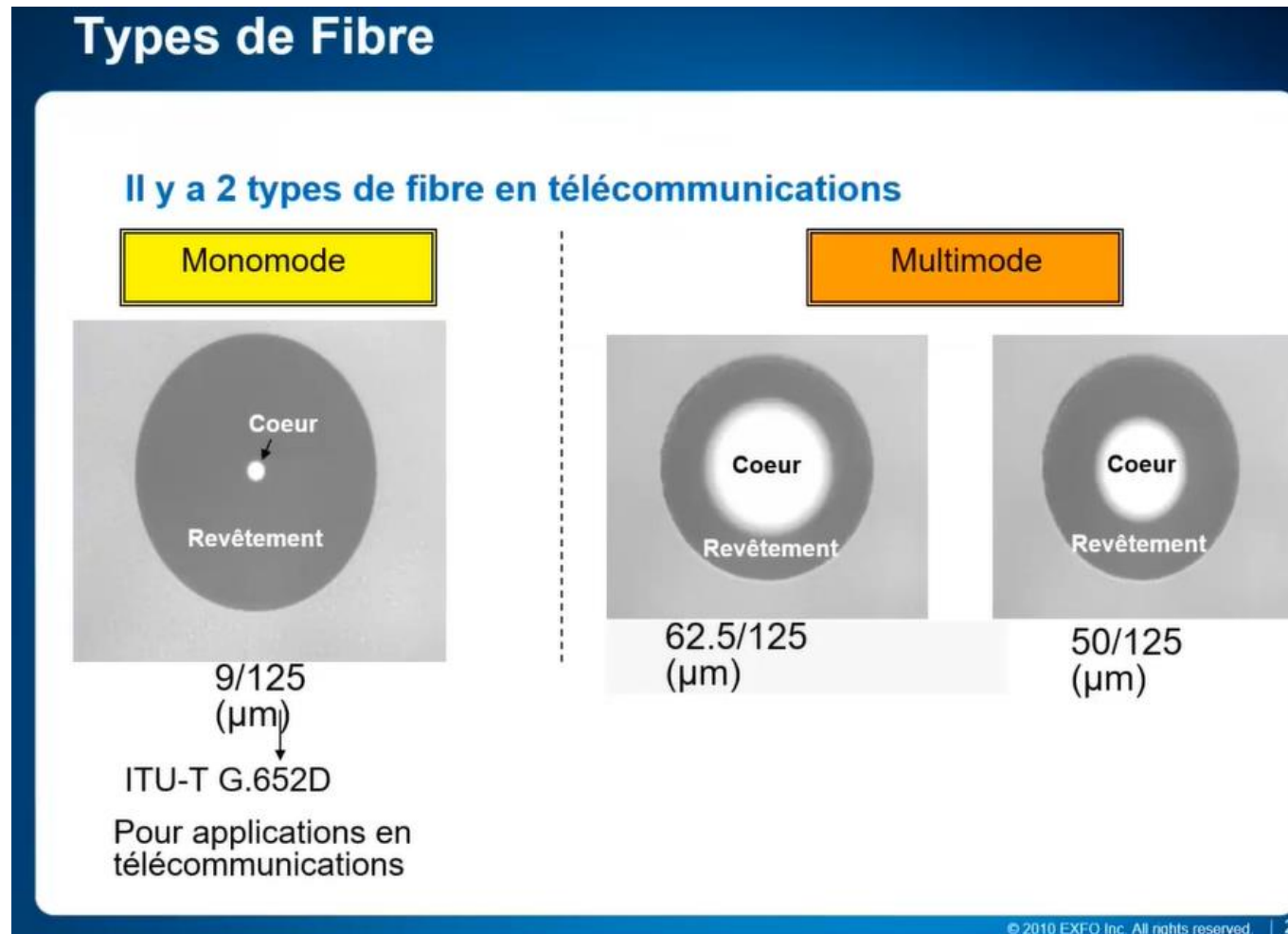
La transmission des données y est assurée par des lasers émettant des longueurs d'onde de 1300 à 1550 nanomètres et par des amplificateurs optiques situés à intervalles réguliers.

On peut distinguer plusieurs catégories de plus en plus performantes, tant en débit qu'en distance.

MODULE #2 – Dimensions FO



MODULE #2 – Dimension FO



MODULE #2

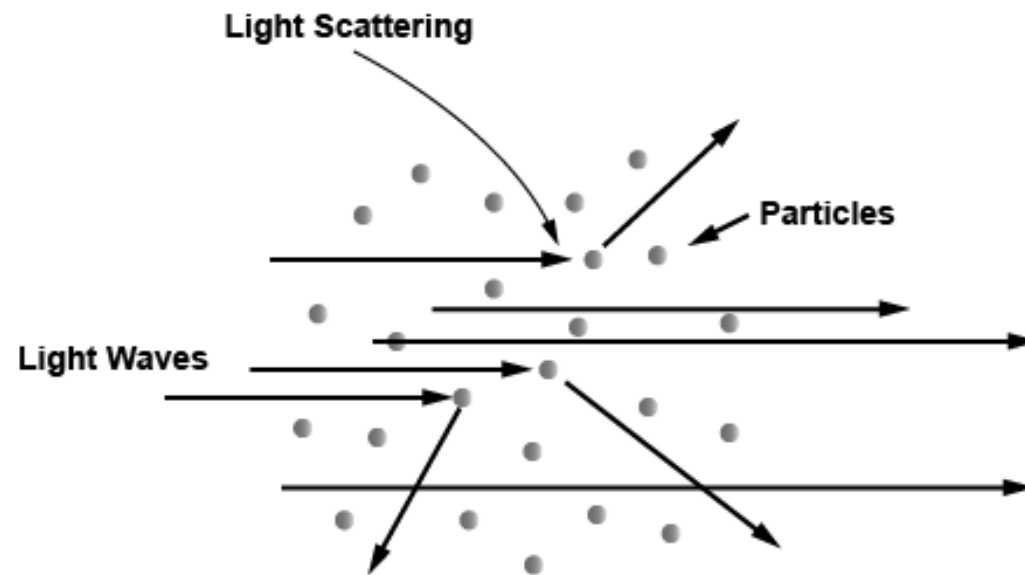
ATTÉNUATION DANS LA FIBRE OPTIQUE

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2 – Atténuation

1. Diffusion (*scattering*)

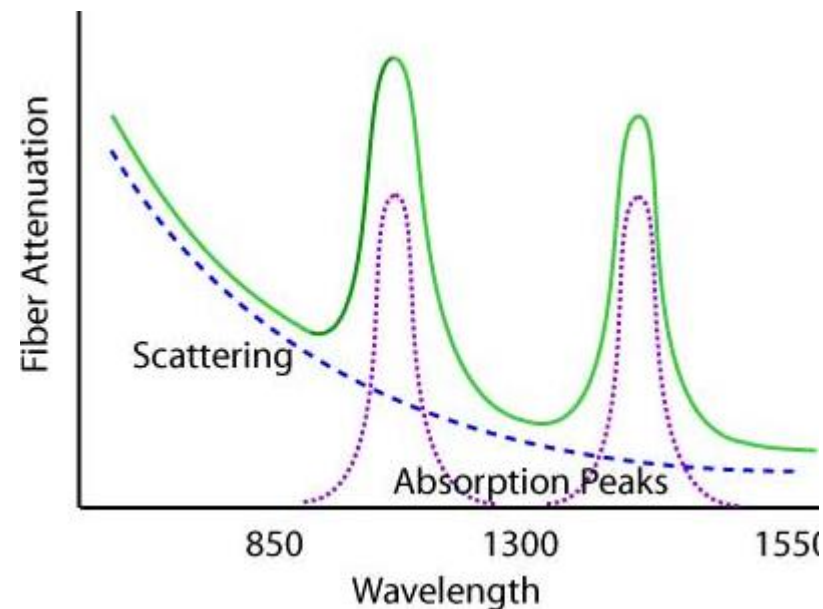
Représente 85% des pertes dans la fibre, ce phénomène est causé par des irrégularités dans la fibre, lorsque la lumière rencontre une irrégularité, elle est dirigée dans toutes les directions



MODULE #2 – Atténuation

2. Absorption (*OH peak*)

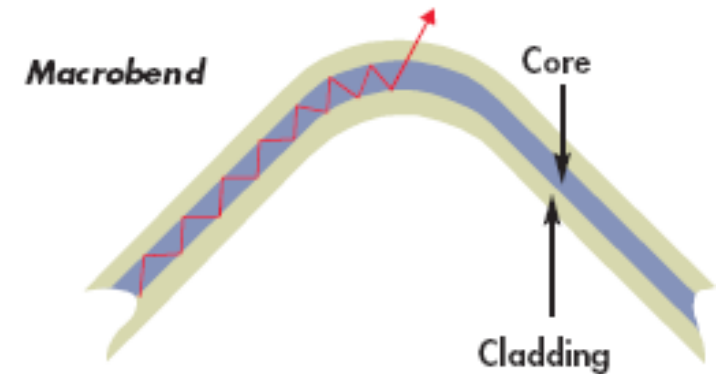
C'est l'équivalent de la résistance dans le câble de cuivre. Cela signifie aussi que l'énergie de l'onde électromagnétique est transformée en chaleur, les *OH peak*, dûes à l'utilisation d'un ion d'OH l'hydroxole dans la fabrication de la fibre en est un exemple.



MODULE #2 – Atténuation

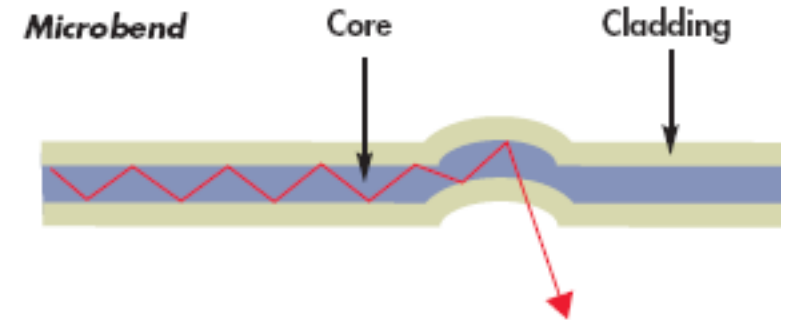
3. *Macrocourbure*

Perte de la lumière dans la gaine due à une trop forte courbure de la fibre. On doit respecter la courbure maximale donnée par un manufacturier lors du rangement dans un cabinet ou lors de la pose de la fibre.



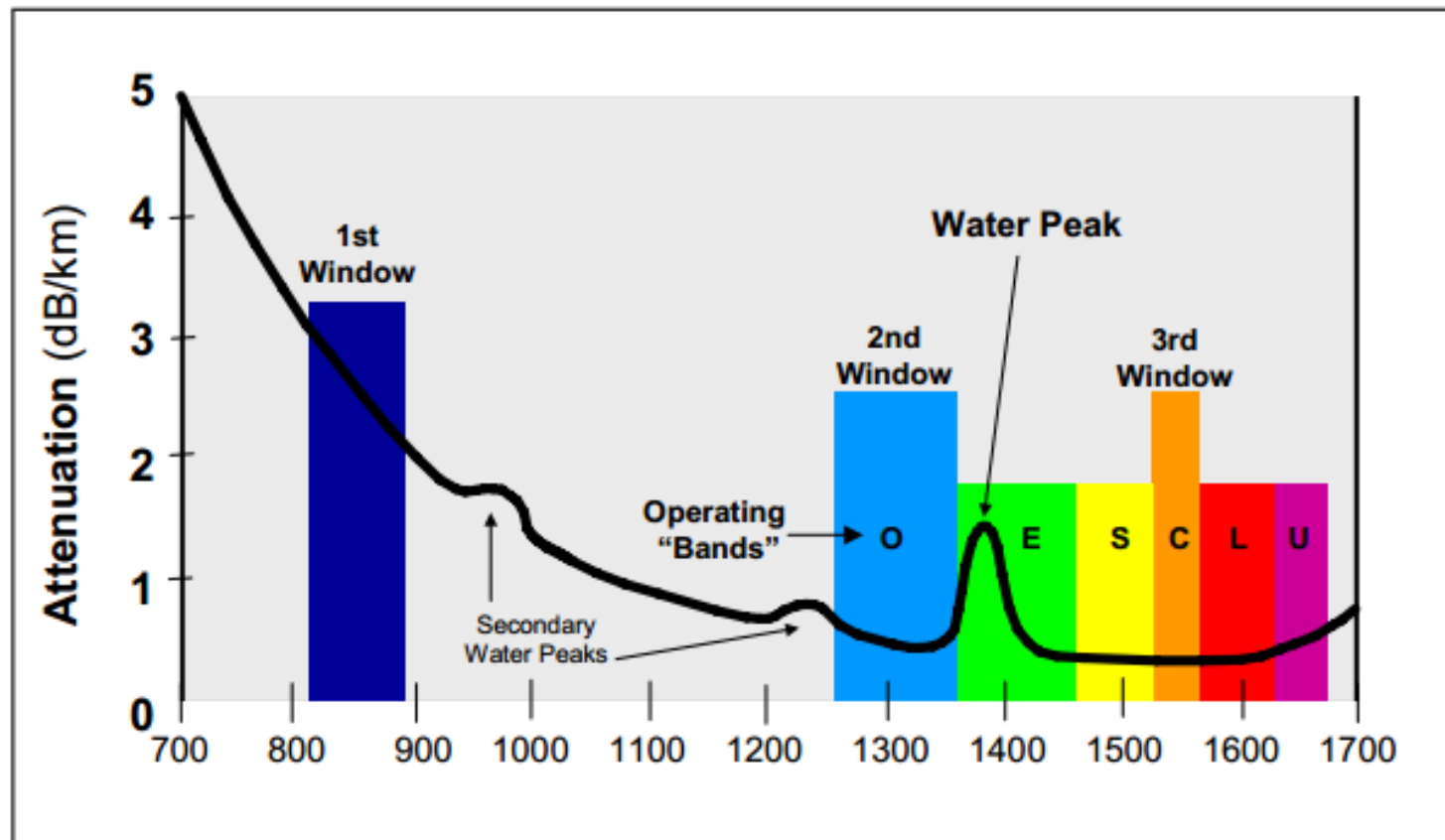
4. *Microcourbure*

Perte de lumière due à des petites déformations de la fibre. On doit faire attention lors de la pose pour ne pas trop serrer la fibre, par exemple lorsque l'on utilise des *tie wraps*



MODULE #2 – Atténuation

L'atténuation s'exprime en dB/km, elle diminue plus on augmente λ ...



MODULE #2 – Dispersion

Trois types de dispersion :

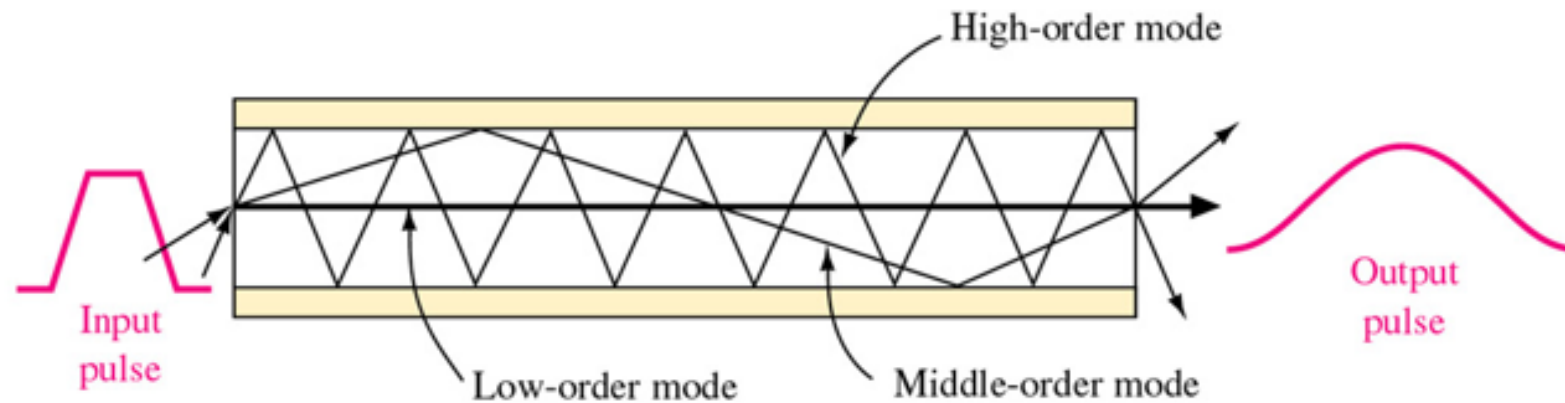
- A. ***La dispersion modale*** : Étant la différence de temps pris par les divers modes pour parcourir une longueur donnée de fibre.

- B. ***La dispersion chromatique*** : Étant l'élargissement de l'impulsion dû à la différence de vitesse de propagation pour différentes composantes spectrales.

- C. ***La dispersion de polarisation (monomode)*** : Étant l'élargissement de l'impulsion dû à la différence de vitesse de propagation pour les composantes X et Y de la lumière

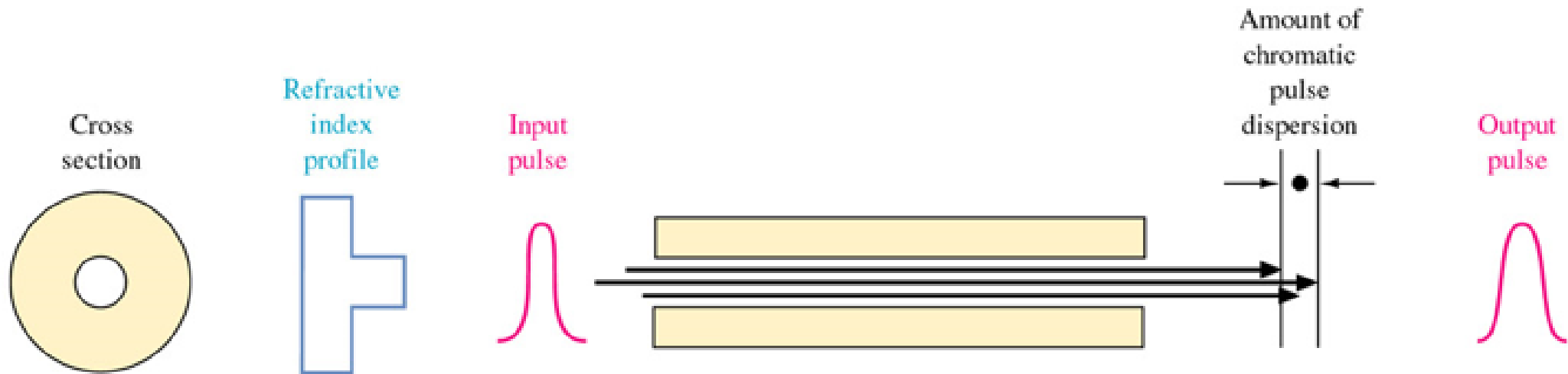
MODULE #2 – Dispersion

La dispersion modale : Étant la différence de temps pris par les divers modes pour parcourir une longueur donnée de fibre.



MODULE #2 – Dispersion

La dispersion chromatique : Étant l'élargissement de l'impulsion dû à la différence de vitesse de propagation pour différentes composantes spectrales.



MODULE #2 – Dispersion

La dispersion de polarisation (monomode) : Étant l'élargissement de l'impulsion dû à la différence de vitesse de propagation pour les composantes X et Y de la lumière.

Pour bien comprendre ce phénomène il faut se rappeler que la lumière comme tous les ondes électromagnétiques est composée d'un champs électrique et d'un champ magnétique, les deux déphasés de 90° .

Dans une fibre parfaitement symétrique, les deux champs voyagent à la même vitesse et il n'y a pas de problème de dispersion de polarisation. comme la fibre n'est jamais parfaite (légère différence au niveau du diamètre du coeur)

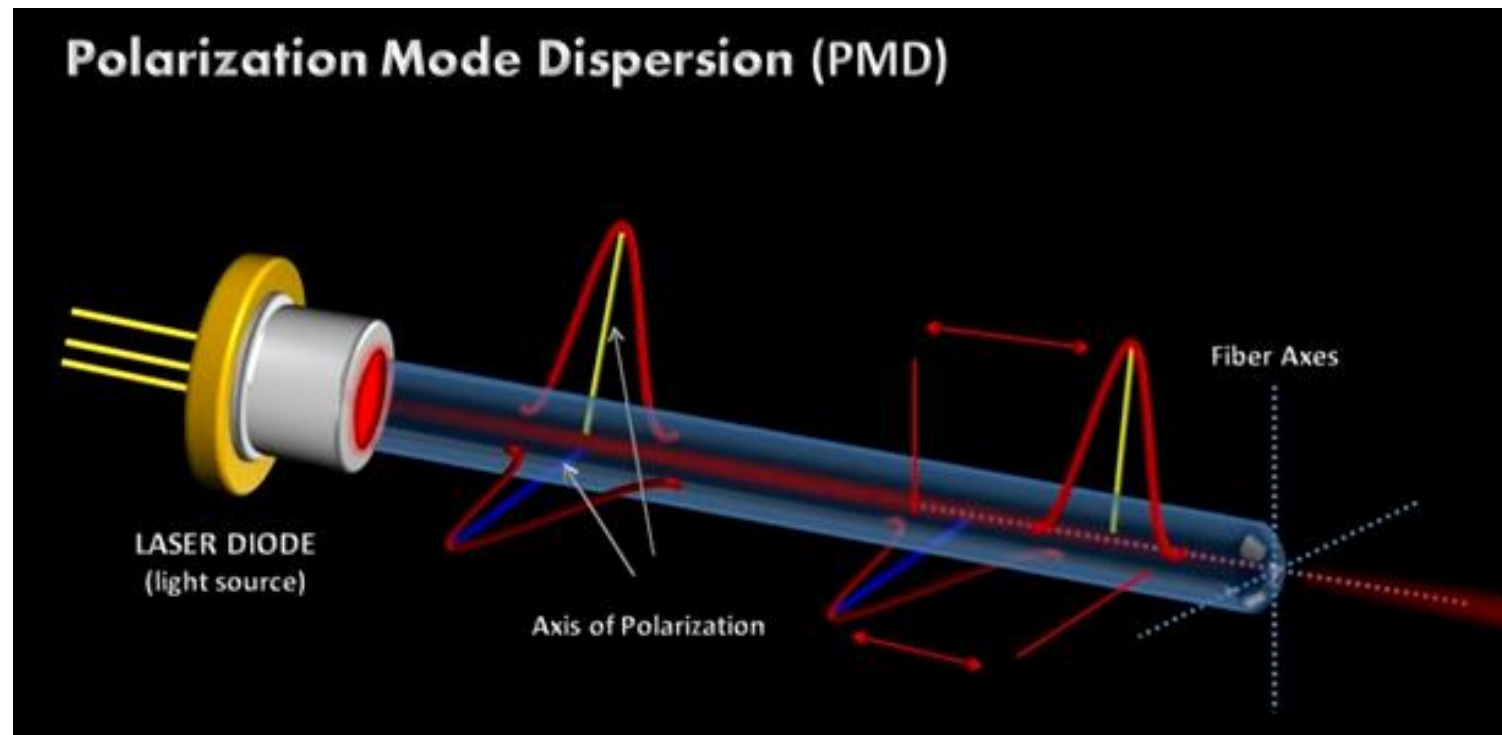
MODULE #2 – Dispersion

Cependant, comme la fibre n'est pas parfaite, de légères différences dans le diamètre du cœur au niveau des deux axes des champs électriques et magnétiques peuvent provoquer un ralentissement de la vitesse de propagation dans l'un de ces deux champs et voir l'apparition d'une dispersion de polarisation (*PMD*).

Le PMD n'a pas d'effet significatif à des débits binaires allant jusqu'à 10Gbps mais avec des vitesses de 40 et 100 Gbps ce phénomène doit être pris en compte.

MODULE #2 – Dispersion

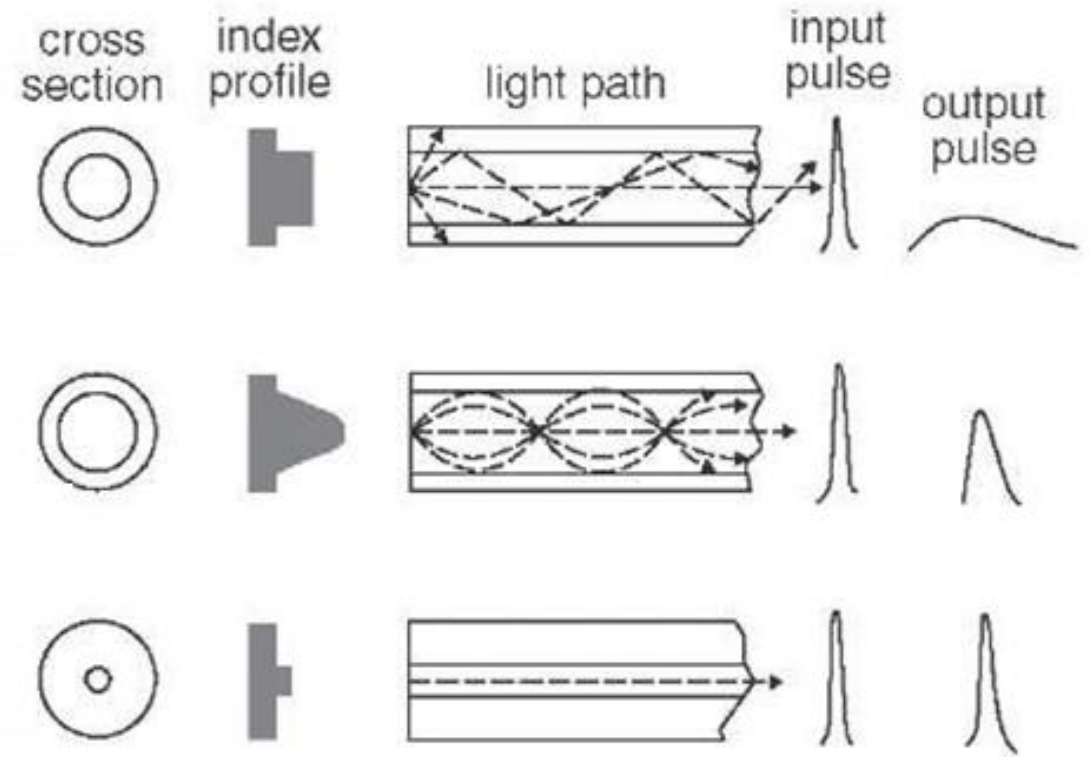
La dispersion de polarisation (monomode) Polarization Mode Dispersion (PMD) : Étant l'élargissement de l'impulsion dû à la différence de vitesse de propagation pour les composantes X et Y de la lumière



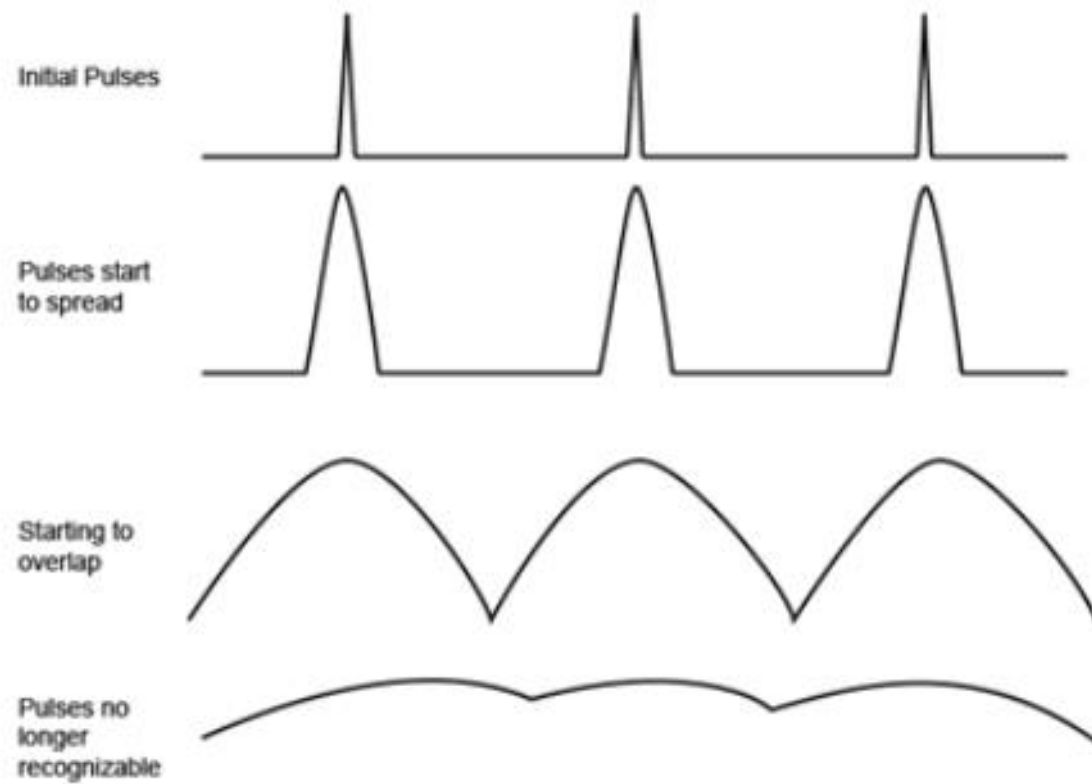
MODULE #2 – Dispersion

La dispersion du signal optique provoque l'élargissement des impulsions ou élargissement temporel.

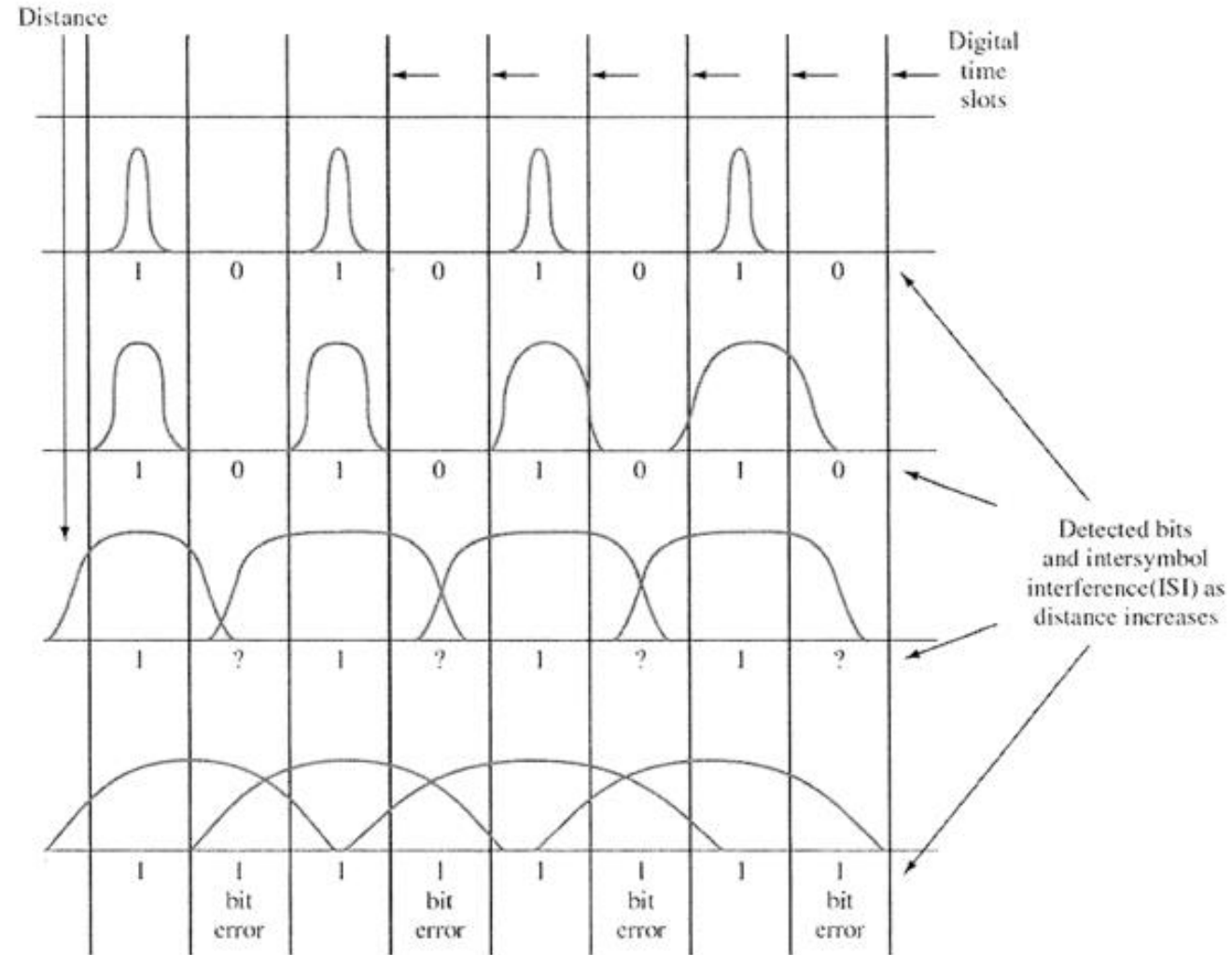
Ce phénomène par lequel une impulsion de lumière s'élargie en passant dans une fibre est appelé dispersion ou encore **pulse broadening**. La dispersion est une limite au débit d'un système numérique.



MODULE #2 – Dispersion



MODULE #2 – Dispersion



MODULE #2 – Dispersion

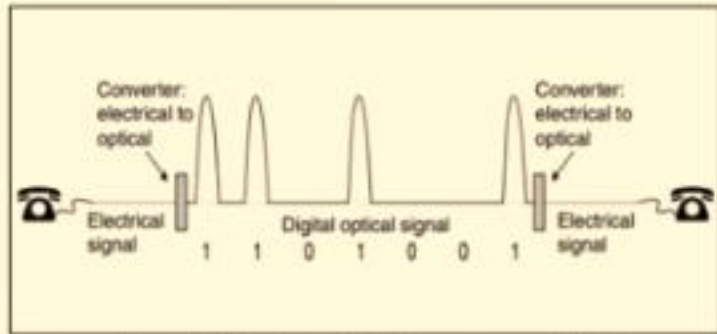


Figure 1. Pulses in a 2.5 Gb/s system are isolated.

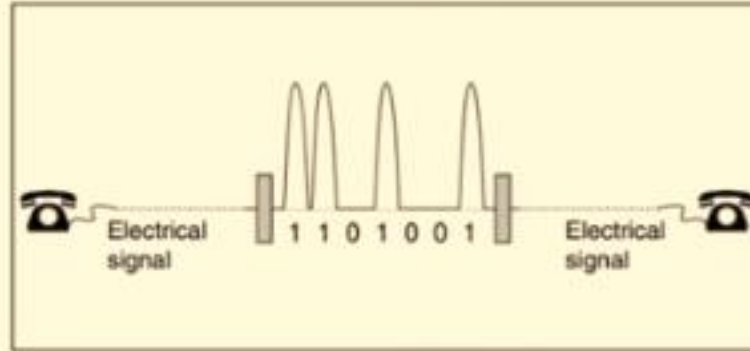


Figure 2. Pulses in a 10 Gb/s system are closer.

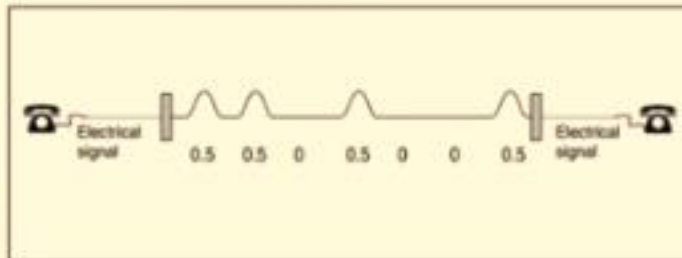


Figure 7. PMD-affected pulses in a 2.5 Gb/s system are still distinct.

2.5 Gbps System

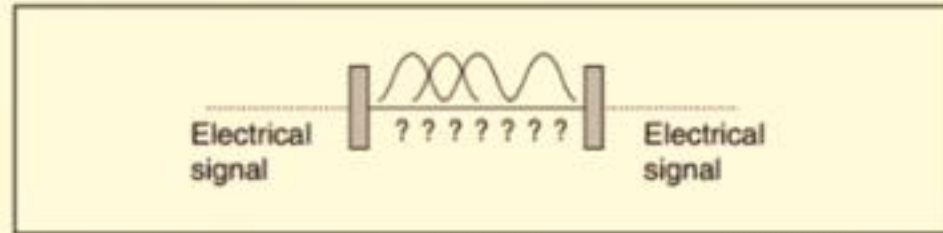


Figure 8. PMD-affected pulses in a 10 Gb/s system overlap.

10 Gbps System

Bit Errors

Fiber Optics For Sale Co.

MODULE #2

COMPOSANTS FIBRE OPTIQUE

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2 – Composants FO

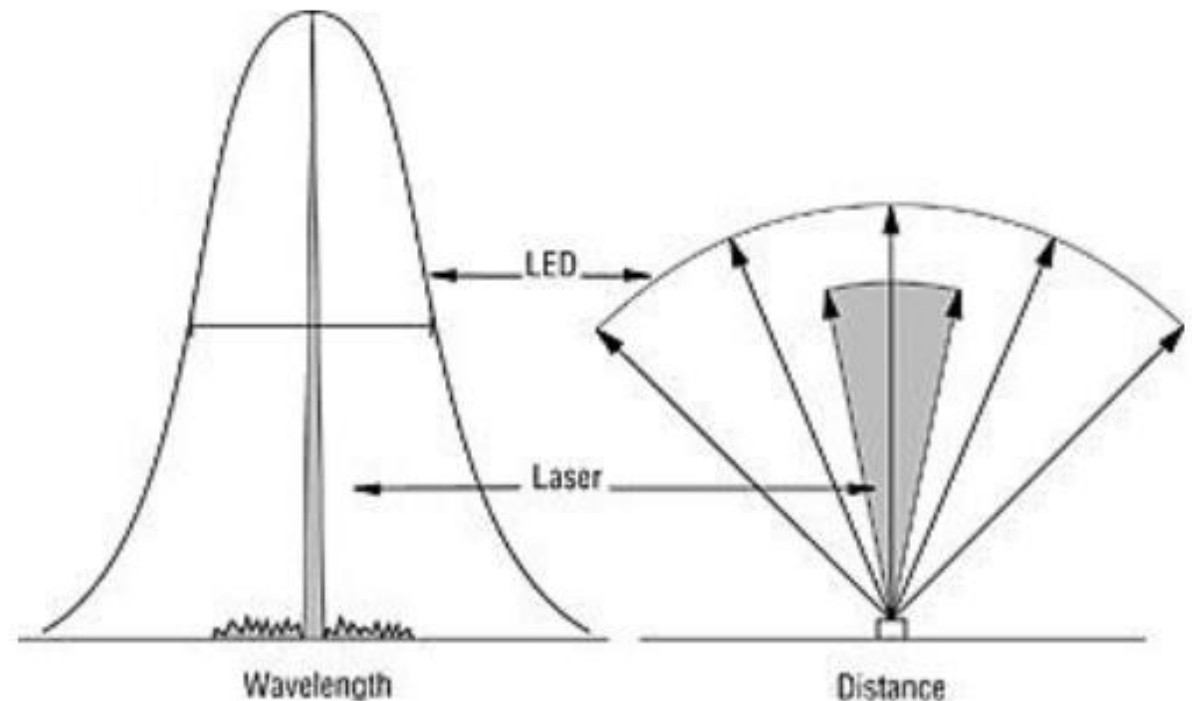
Émetteur

Il y a deux sources qui sont utilisées en fibre optique:

- LED light-emitting diode
- Diode LASER

Le choix de l'émetteur dépend :

- la puissance
- la sensibilité à la température
- le temps de réponse
- la largeur spectrale
- la durée de vie
- le coût

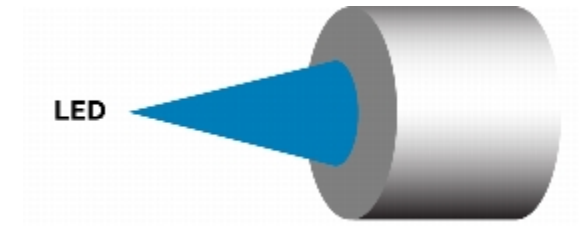


MODULE #2 – Composants FO

Émetteur LED

- Beaucoup moins puissant
- Moins critique à la température de fonctionnement
- Plus lente montée 10 -100ns
- Émission large
- Durée de vie plus longue et prévisible
- Interface moins cher

Usages: Bas taux de transfert et courte distance (LAN)

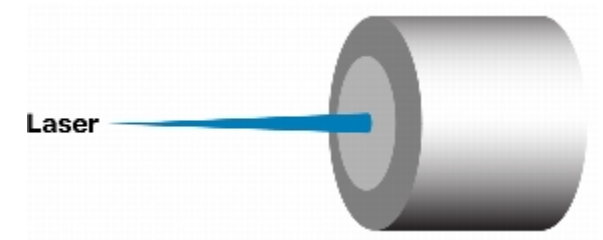


MODULE #2 – Composants FO

Émetteur LASER

- *Beaucoup plus puissant*
- *Sensible à la température de fonctionnement*
- *Transition (rise time) très petit*
- *Émission étroite (permet WDM)*
- *Courte durée de vie*
- *Interface dispendieuse*

Usage : Haut débit de transfert et longue distance



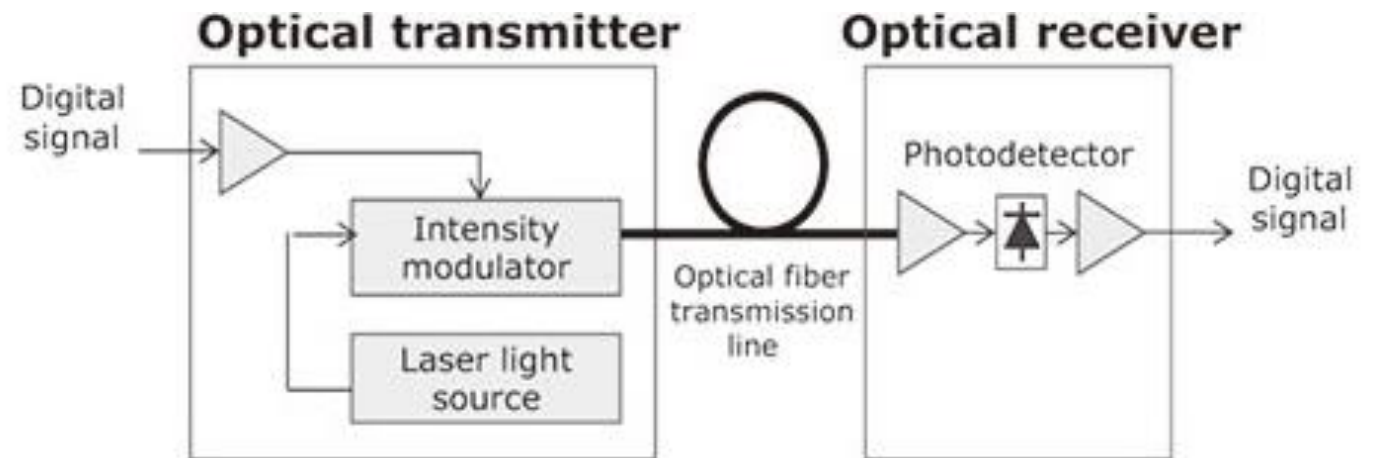
MODULE #2 – Composants FO

Détecteur

- Diode avalanche (APD)
- Diode PIN

Choix d'un détecteur

- Sensibilité
- Largeur de bande
- Longueur d'onde
- Coût



MODULE #2 – Composants FO

Parameter	<i>P-I-N</i>	APD
Bandwidth	Low bit rate < 200 Mbps	High bit rate > 200 Mbps
Wavelength	850 and 1310 nm	1310 and 1550 nm
Sensitivity	Low, -35 dBm to -40 dBm	High, -45 dBm
Dynamic range	Low	High
Dark current	High	Low, less noise
Circuit complexity	Low	Medium
Temperature sensitivity	Low	High
Cost	Low	High
Life	10 ⁹ h	10 ⁶ h
Photon and electron conversion gain	1	3 to 5
Operating voltages	Low	High

MODULE #2 – Composants FO

Types de connexion

- Une connexion peut être démontable, alors on parle de **connecteur** fibre à fibre
- Une connexion peut être permanente, on parle **d'épissure**.

Il existe des fibres ayant une atténuation inférieure à 1 dB/km, une connexion avec une perte de 1 dB est donc l'équivalent d'augmenter la longueur de 1 km.



MODULE #2 – Composants FO

Connecteur fibre à fibre : Les plus populaires dans l'industrie d'aujourd'hui



LC Connector



SC Connector



ST Connector



FC Connector



MTRJ



MU



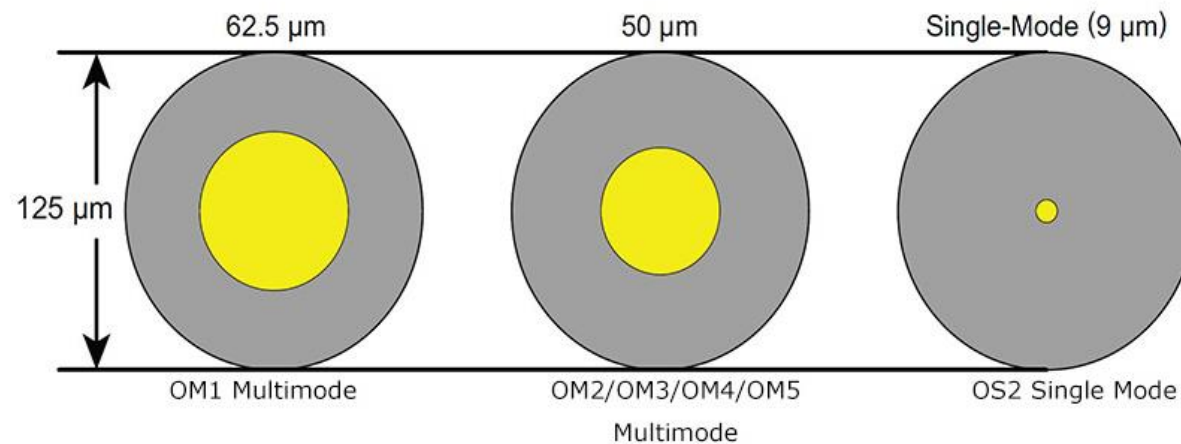
E 2000 Connector

MODULE #2 – Dimension FO

Le câble à fibre optique multimode est préfixé par «OM» et le câble à fibre monomode est préfixé par «OS».

Dans les normes ISO / IEC 11801 et EIA / TIA :

- Cinq types de multimode - OM1, OM2, OM3, OM4 et OM5
- Deux types de monomode - OS1 et OS2



MODULE #2 – Standard FO

Le standard de couleur utilisé pour différencier les différents types de fibres est le suivant :

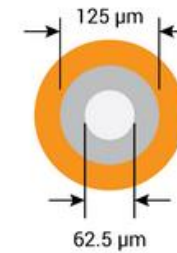
Transmission Standards (core/cladding size μm)		Jacket Color (non-military)
Multimode	100 / 140 μm	Orange
OM1	62.5 / 125 μm	Orange
OM2	50 / 125 μm	Orange
OM3	50 / 125 μm	Aqua
OM4	50 / 125 μm	Aqua
OM5	50 / 125 μm	Green
OS1	~8-10 / 125 μm	Yellow
OS2	~8-10 / 125 μm	Yellow

Fiber Optic
Cable Core Types

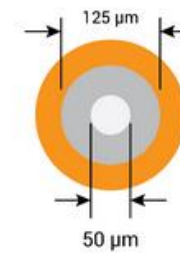


www.sarfm.com

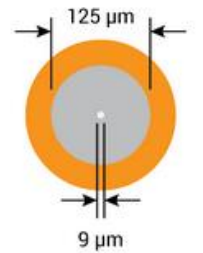
Multimode
62.5/125



Multimode
50/125



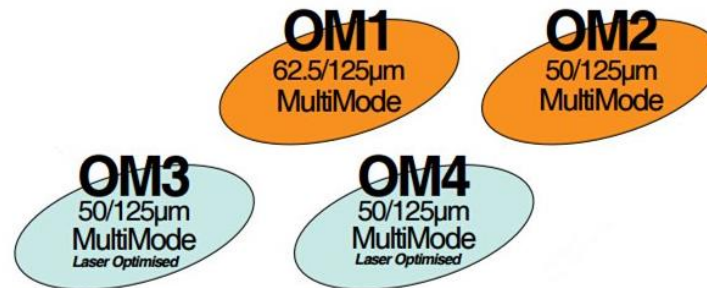
Singlemode
9/125



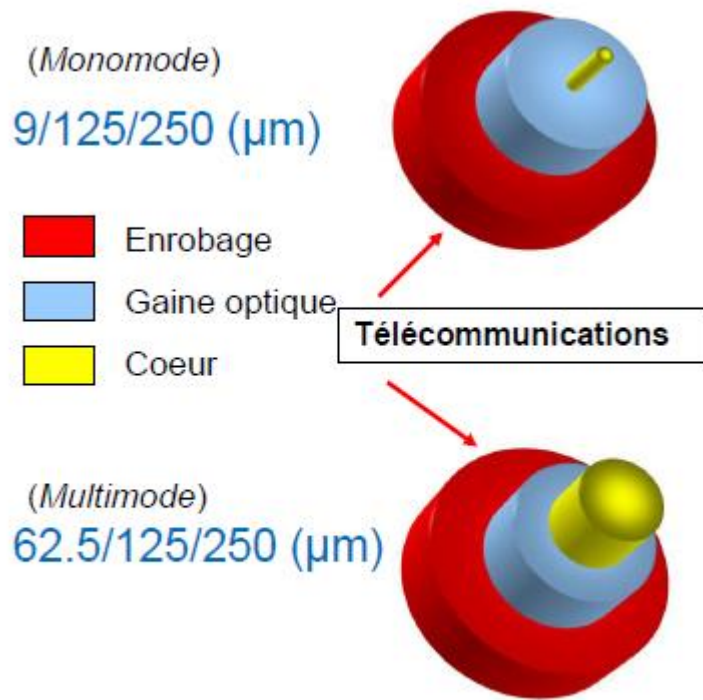
MODULE #2 – Standard FO

Chaque «OM» possède une exigence minimale de largeur de bande modale (MBW).

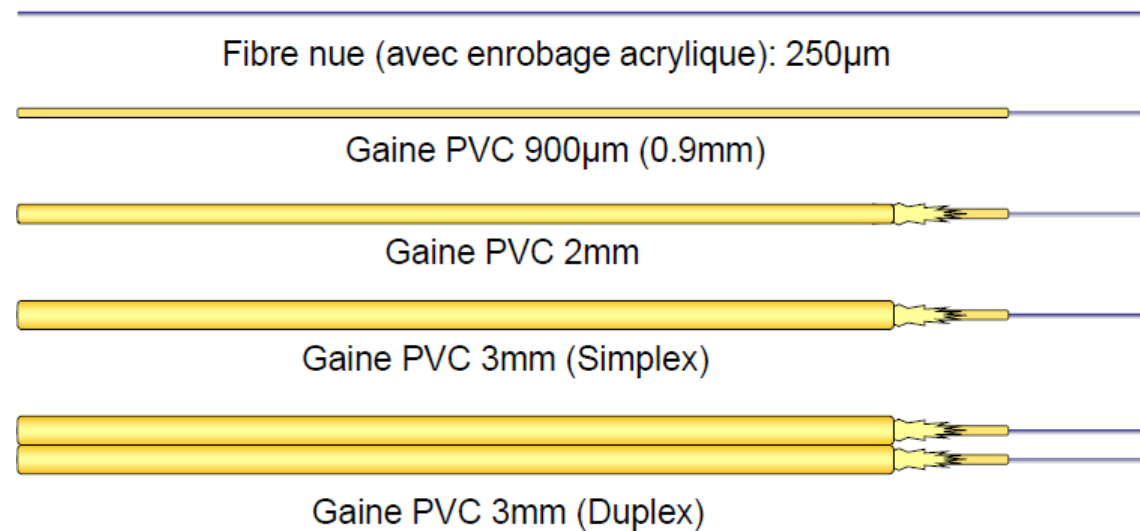
Ethernet Data Rate	Wavelength (nm)	Maximum channel length (meters)			
		OM1	OM2	OM3	OM4
100 Mbps	850	Up to 2000	Up to 2000	Up to 2000	Up to 2000
1 Gbps	850	275	550	550	1000
10 Gbps	850	33	82	300	550
40 & 100 Gbps	850	—	—	100	150
1 Gbps	1300	550	550	550	550
10 Gbps	1300	Up to 300	Up to 300	Up to 300	Up to 300



MODULE #2 – Revêtement FO



- Les gaines de fibre protègent la fibre contre les forces de pression, de torsion et de tension.

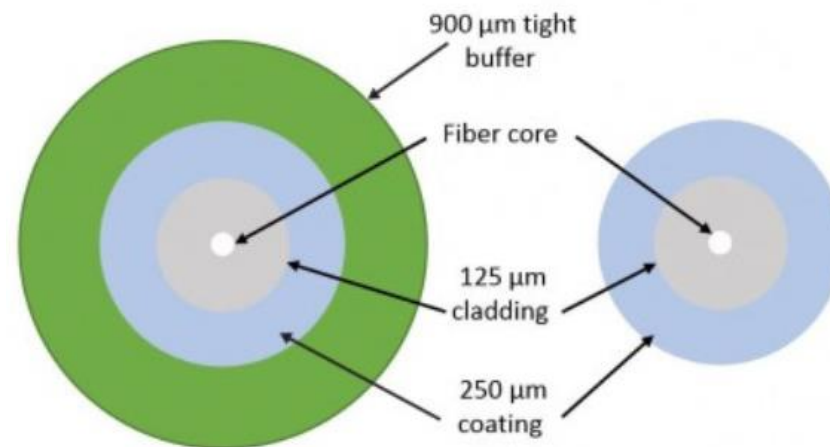


MODULE #2 – Revêtement FO

Il existe plusieurs types de constructions de câble de fibre optique. On peut cependant regrouper ces types de construction en deux grandes familles :

- la famille des fibres à **revêtement lâche** « *Loose tube* »
- la famille des fibres à **revêtement serré** « *Tight Buffered* ».

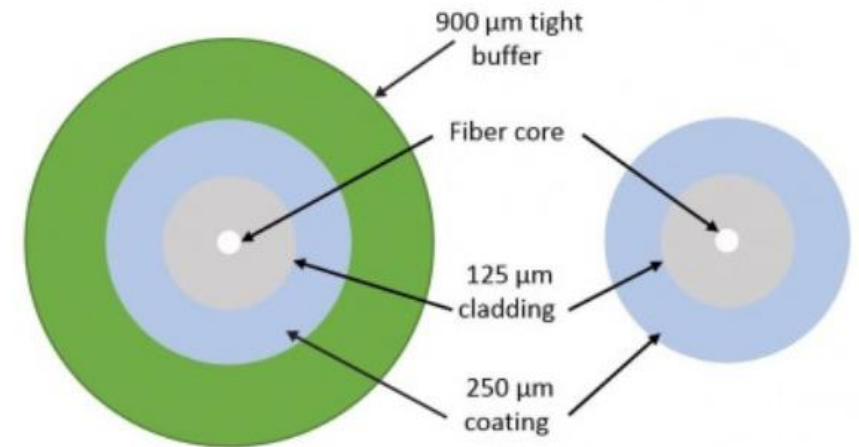
La fibre de type *Loose tube* possède un diamètre de 250 μm et celle de type *Tight Buffered* est de 900 μm .



MODULE #2 – Revêtement FO

Les deux types de fibre possèdent les mêmes dimensions au niveau du noyau (*fiber core*) de fibre (par exemple, 50 ou 62,5 μm pour le multimode et 9 μm pour le monomode), une gaine (*fiber coating*) de 125 μm et un revêtement souple de 250 μm .

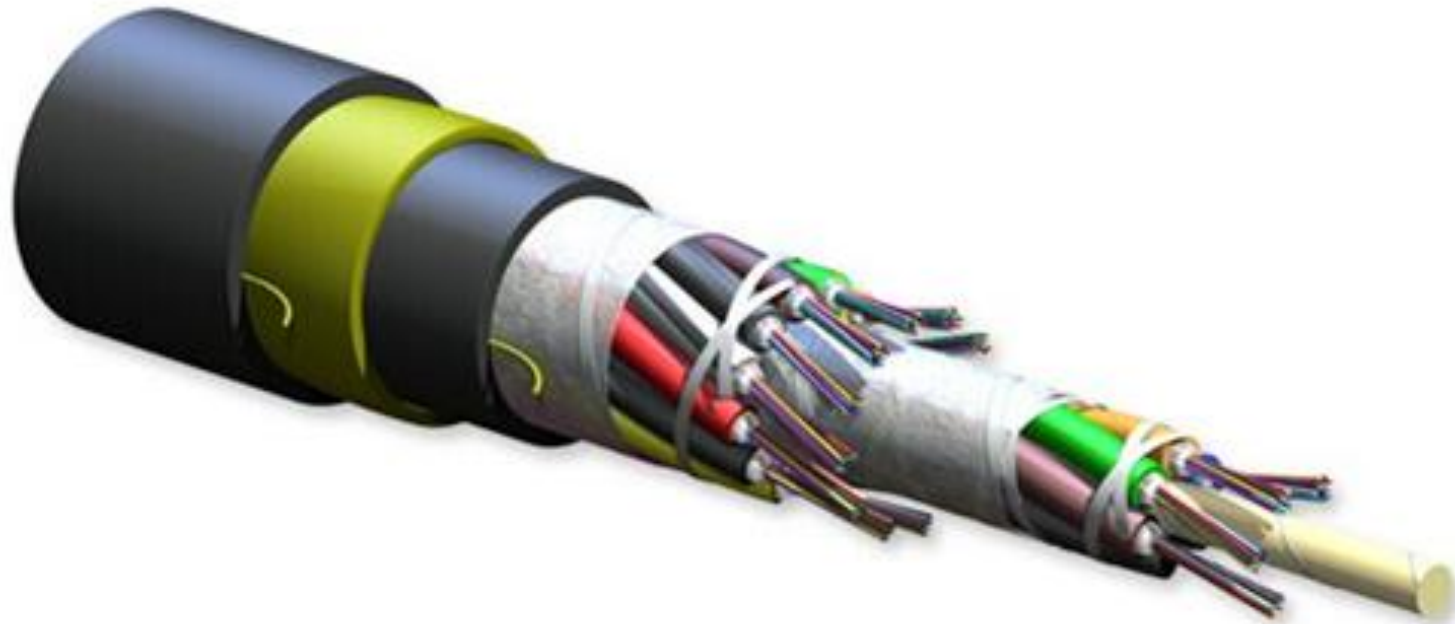
C'est à partir de là que les caractéristiques changent entre les deux familles.



MODULE #2 – Revêtement FO

La fibre à revêtement lâche "*loose tube*"

Elle est optimisée dans les applications extérieures. Ce type de câble est conçu afin de résister aux intempéries et aux différentes contraintes extérieures.

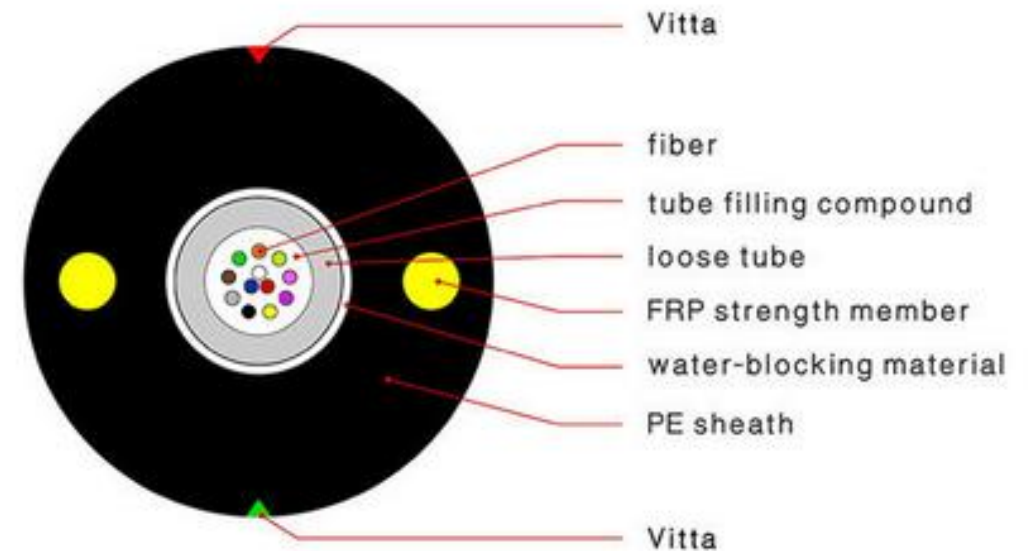


MODULE #2 – Revêtement FO

La fibre à revêtement lâche "*loose tube*"

On peut insérer jusqu'à 12 fibres "*loose tube*" de **250 μm** nues à l'intérieur d'un conduit en plastique flexible, situé autour d'un élément de résistance central avec du fil de Kevlar ou d'aramide pour la protection.

Le conduit de plastique est remplie de gel résistant à l'eau afin de protéger la fibre contre les tensions et ainsi que les contraintes causées par l'environnement extérieur telles que: l'humidité, une grande plage de variations des températures, les chocs thermiques, le poids de glace, etc...

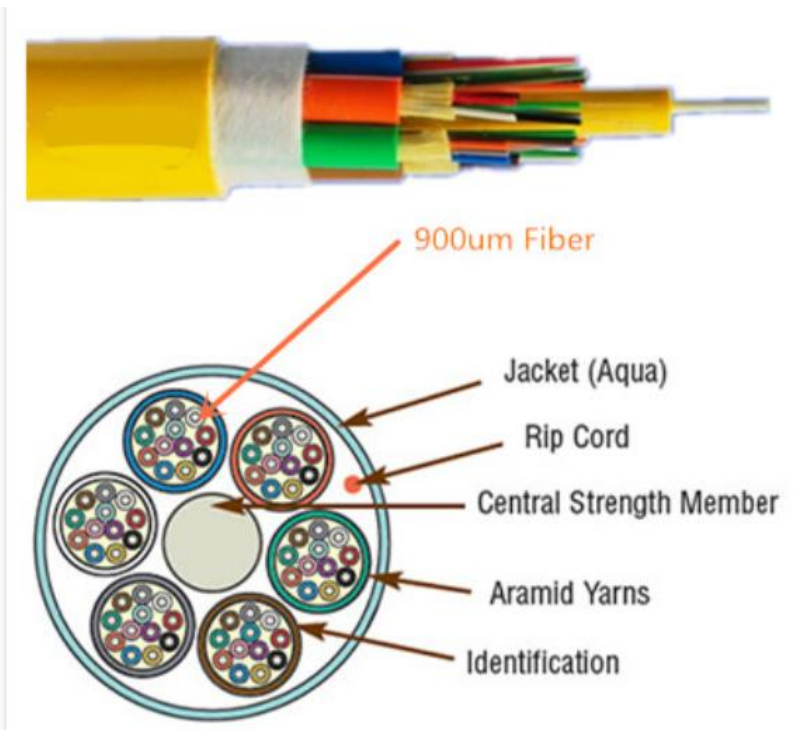


MODULE #2 – Revêtement FO

La fibre à revêtement serré « Tight Buffered »

La fibre « Tight Buffered » possède généralement un diamètre de **900µm**. La composition des premières couches est identique à l'autre type de fibre (les premiers 250µm). Cependant, celle-ci est insérée dans une enveloppe de plastique externe dur qui fournit une protection physique.

La fibre « Tight Buffered » est préférée pour les applications intérieures. Elle est principalement utilisée pour le transport et la distribution dans les édifices.



MODULE #2 – Revêtement FO

	Loose-tube 250um Fiber	Tight-buffered 900um Fiber
Core	9um, SMF; 50um or 62.5um, MMF	9um, SMF; 50um or 62.5um, MMF
Cladding	125um	125um
Coating	Soft plastic: 250um	Soft plastic: 250um
Tight Buffer	/	Hard plastic: 900um

MODULE #2 – Revêtement FO

De plus, ce type de fibre est plus facile à installer car il n'y a pas de gel dans le câble qui doit être retiré, la fibre n'a pas à être nettoyée. Comme elle est protégée par une enveloppe de plastique externe, on peut diviser les fibres contenues dans un câble sans obligatoirement utiliser de panneau de raccordement. Ce type de fibre est cependant beaucoup moins résistant aux intempéries ainsi qu'aux différentes torsions qui peuvent survenir dans un câble extérieur.



Φ LOOSE TUBE : 250 μ m

Φ TIGHT BUFFERED : 900 μ m

MODULE #2

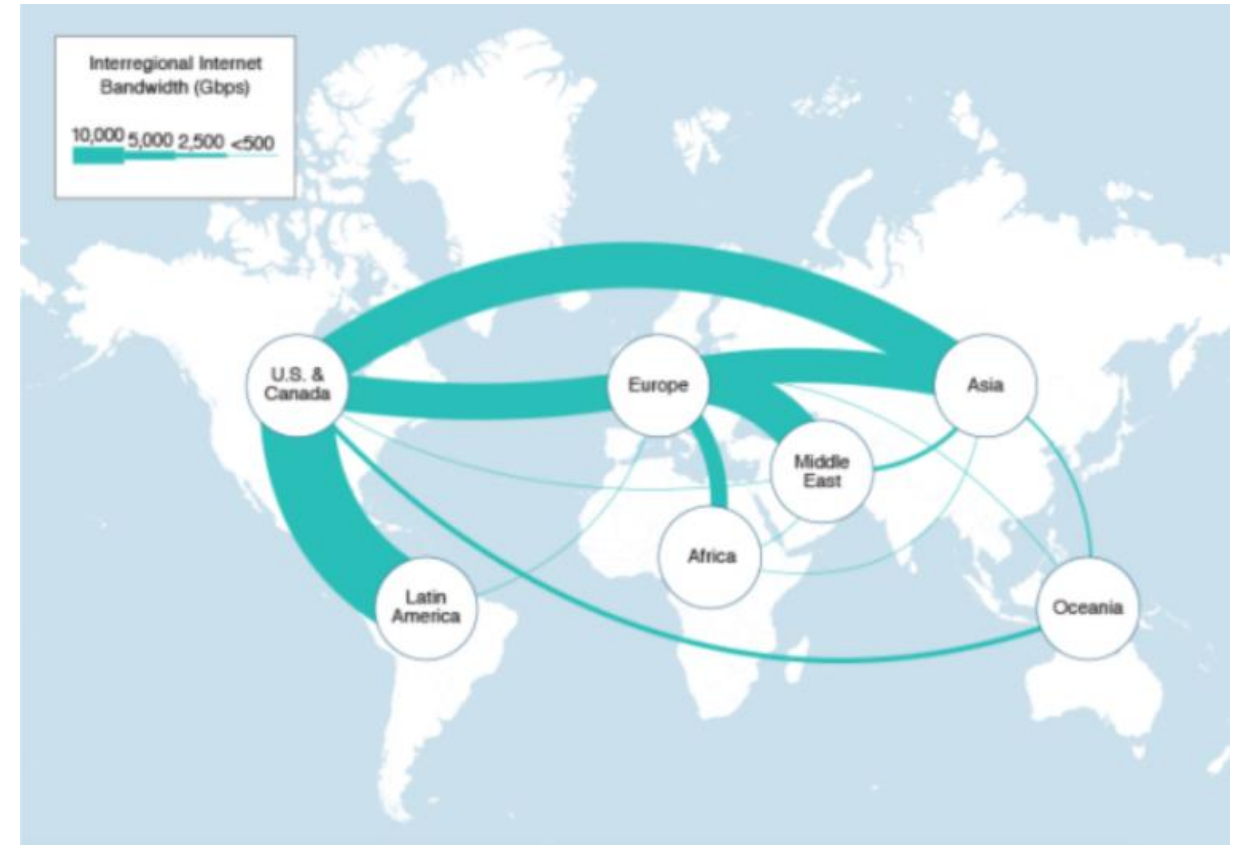
LA TECHNOLOGIE WDM

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2 – La technologie WDM

En raison d'une rapide croissance des liaisons de télécommunication, une capacité élevée et des débits de transmission de données plus rapides sur de plus grandes distances sont nécessaires.

Pour répondre à ces besoins, les administrateurs de réseaux font de plus en plus recours à la fibre optique.



MODULE #2 – La technologie WDM

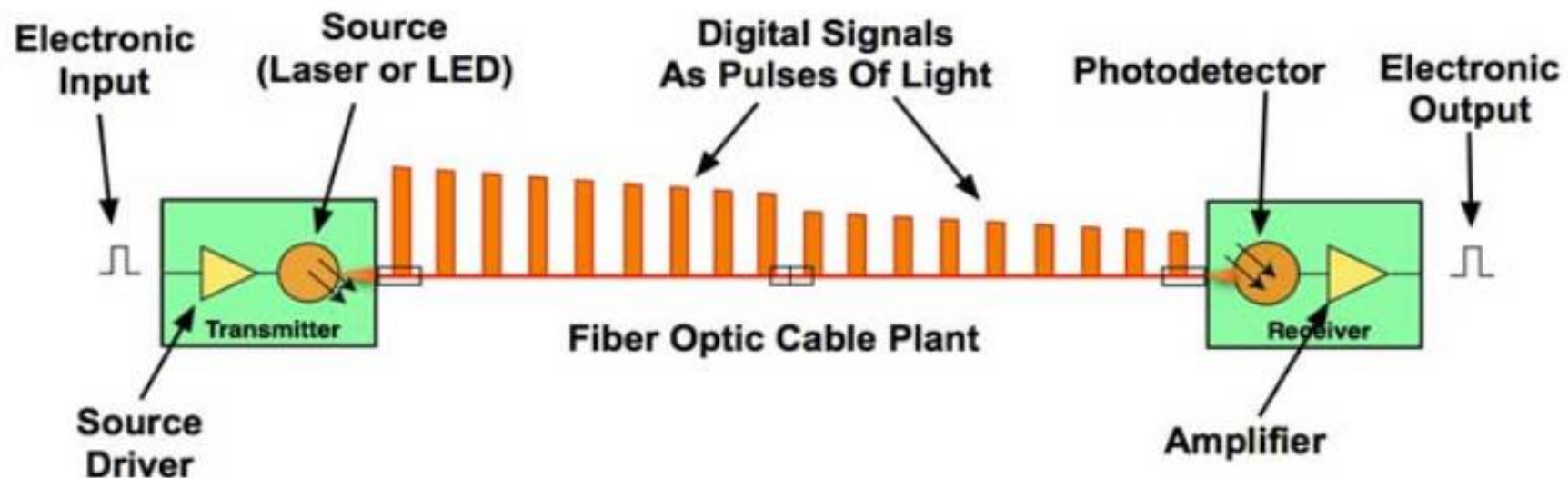
En règle générale, il existe trois méthodes pour augmenter la capacité:

1. l'installation de davantage de câbles
2. l'augmentation du débit du système pour transporter davantage de signaux
3. WDM (multiplexage par répartition en longueur d'onde).

La troisième alternative, la WDM est de plus en plus utilisée de part son efficacité et sa rentabilité.

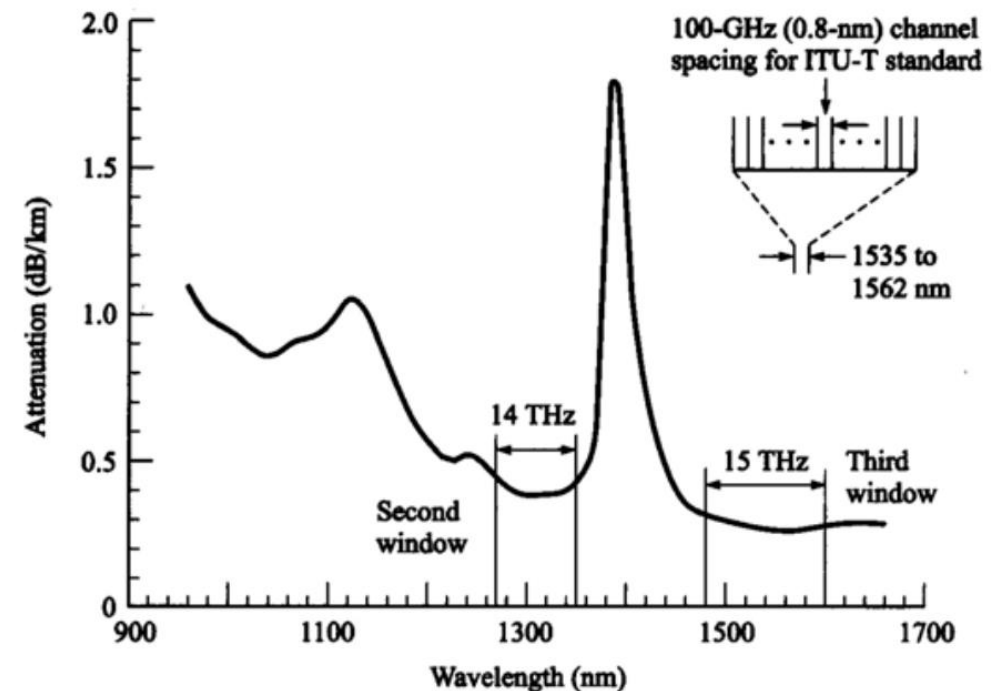
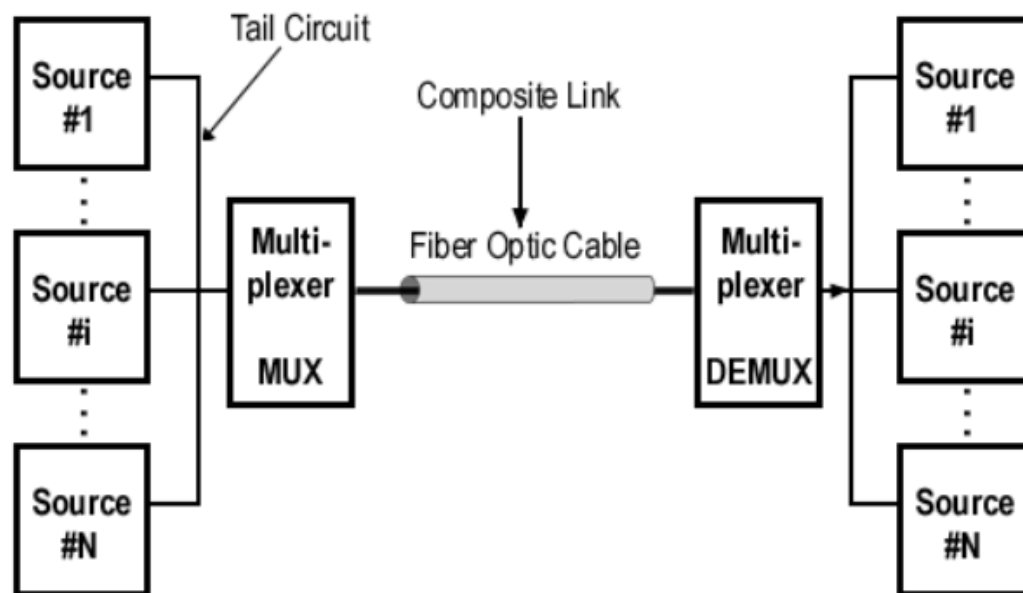
MODULE #2 – La technologie WDM

Dans un liaison point-à-point standard, un seul signal est émis à partir d'une source optique sur une fibre donnée. Comme la source optique utilise une largeur de bande relativement limitée, ce type de transmission ne permet pas d'utiliser de façon optimale les capacités de la fibre optique qui possède une très grande bande passante.



MODULE #2 – La technologie WDM

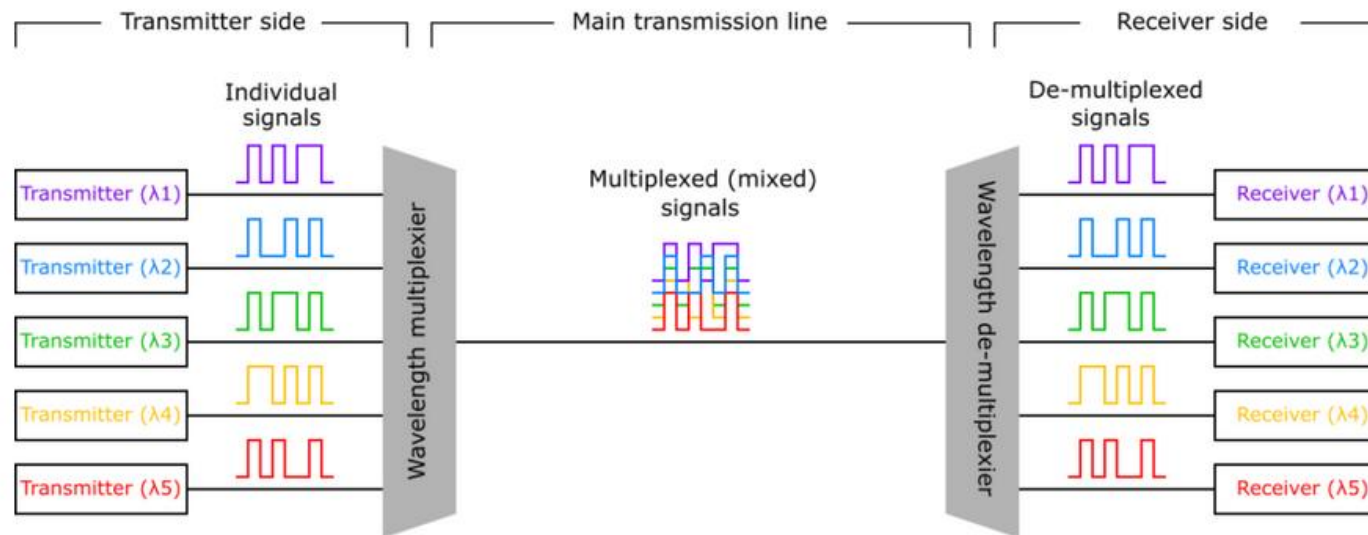
Le WDM (wavelength division multiplexing) est une technique qui permet d'utiliser plusieurs longueurs d'onde différentes suffisamment espacées les unes des autres afin de préserver l'intégrité du message qu'elles transmettent sur la même fibre.



MODULE #2 – La technologie WDM

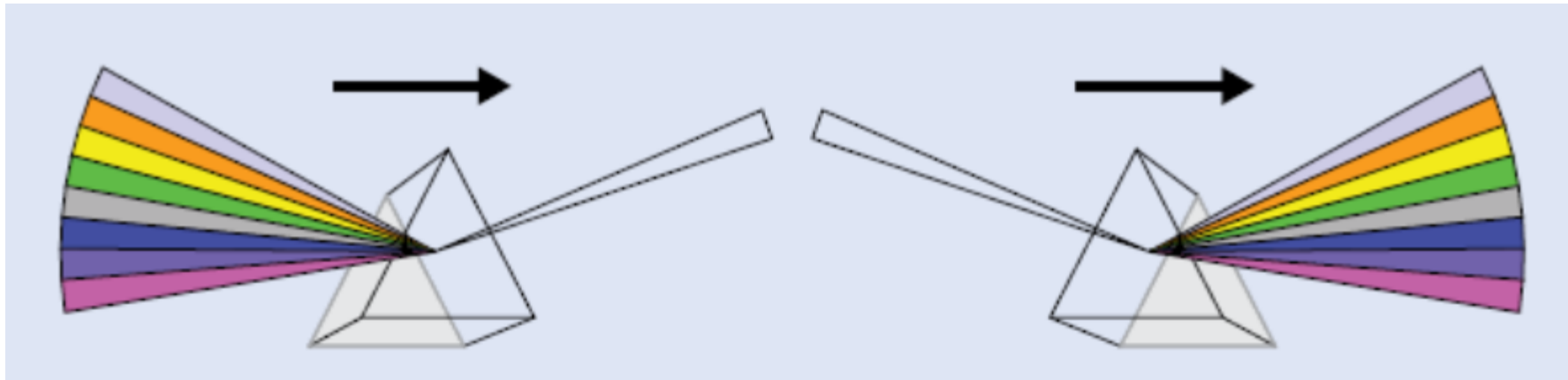
La WDM est une technologie qui consiste à aligner simultanément un certain nombre de longueurs d'onde sur la même fibre. Un des aspects du WDM est que chaque canal optique peut transporter n'importe quel format de transmission.

La WDM augmente considérablement la capacité d'un réseau de fibres optiques.



MODULE #2 – La technologie WDM

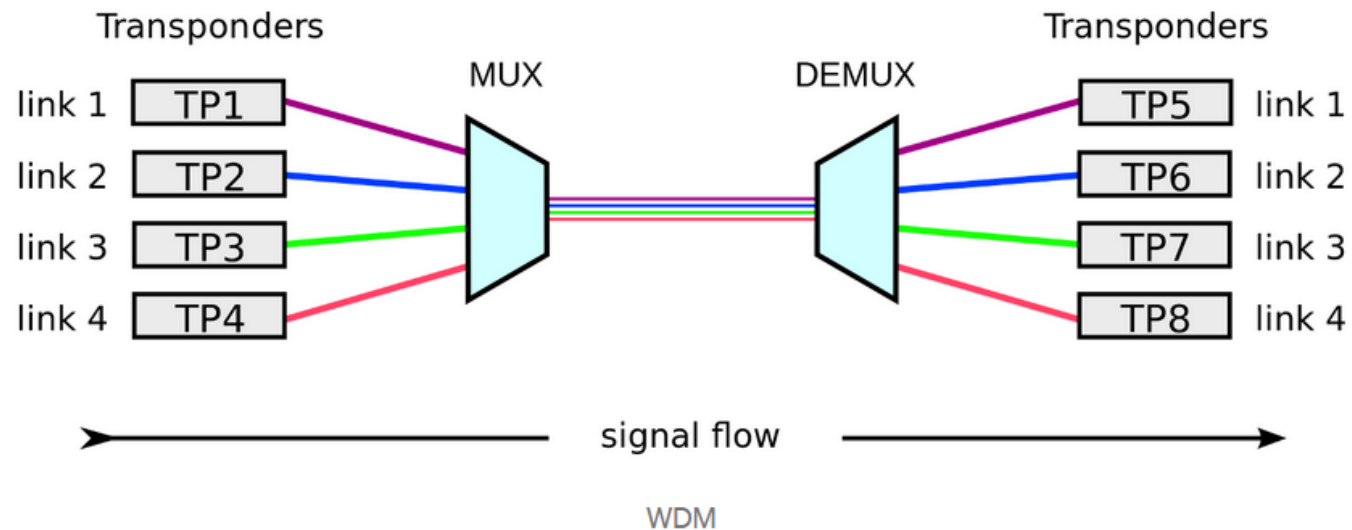
Le principe de fonctionnement du WDM est quand même simple. Considérez le fait que vous pouvez apercevoir plusieurs couleurs de lumière différentes : rouge, vert, jaune, bleu, etc. en même temps. Les couleurs sont transmises dans l'air ensemble et peuvent se mélanger, mais elles peuvent être facilement séparées à l'aide d'un simple dispositif comme un prisme.



MODULE #2 – La technologie WDM

Dans le principe de fonctionnement, le WDM est similaire au prisme. Un système WDM utilise un multiplexeur sur l'émetteur pour joindre les différents signaux ensemble, tandis qu'un démultiplexeur est utilisé au récepteur pour les séparer, comme le montre le schéma suivant.

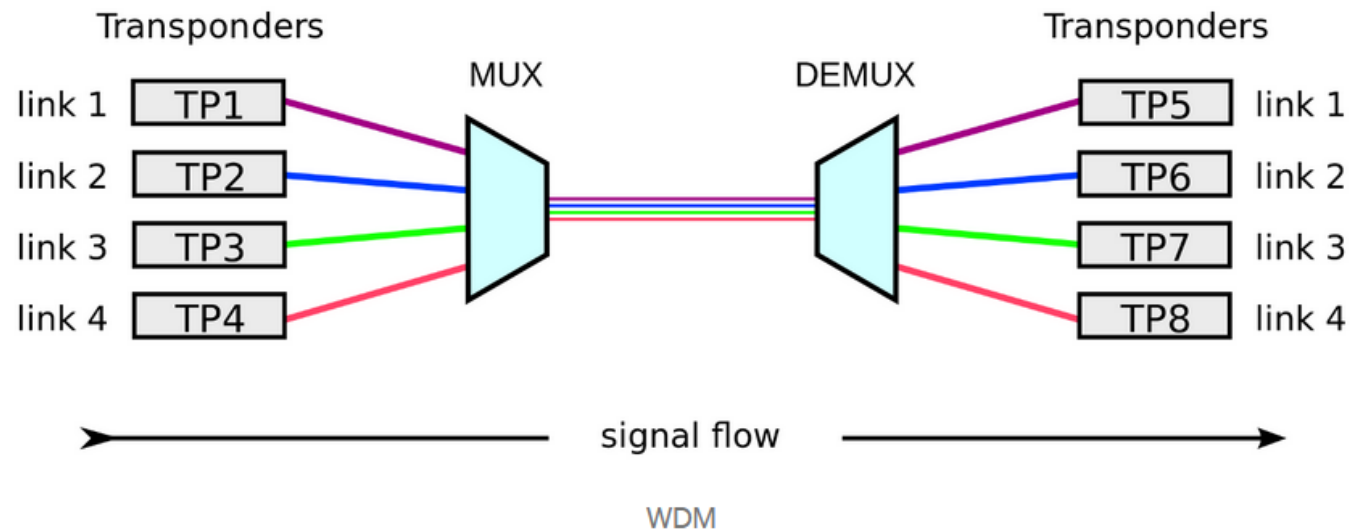
wavelength-division multiplexing (WDM)



MODULE #2 – La technologie WDM

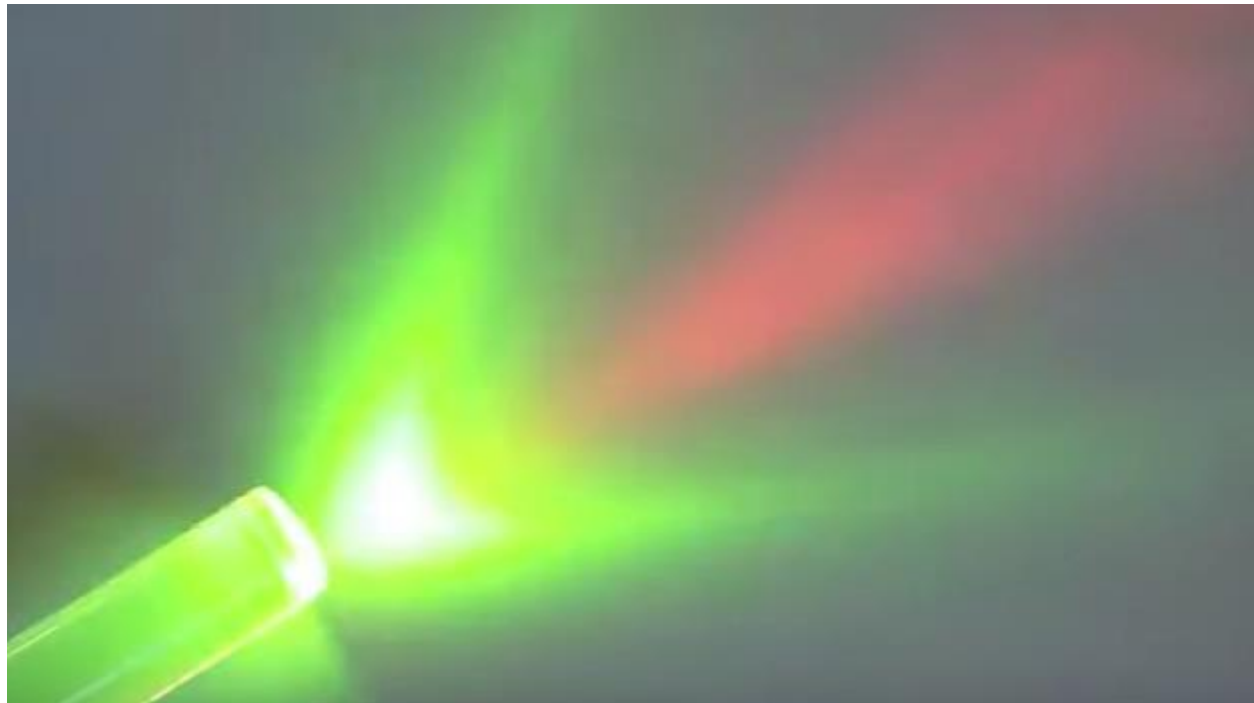
Dans le principe de fonctionnement, le WDM est similaire au prisme. Un système WDM utilise un multiplexeur sur l'émetteur pour joindre les différents signaux ensemble, tandis qu'un démultiplexeur est utilisé au récepteur pour les séparer, comme le montre le schéma suivant.

wavelength-division multiplexing (WDM)



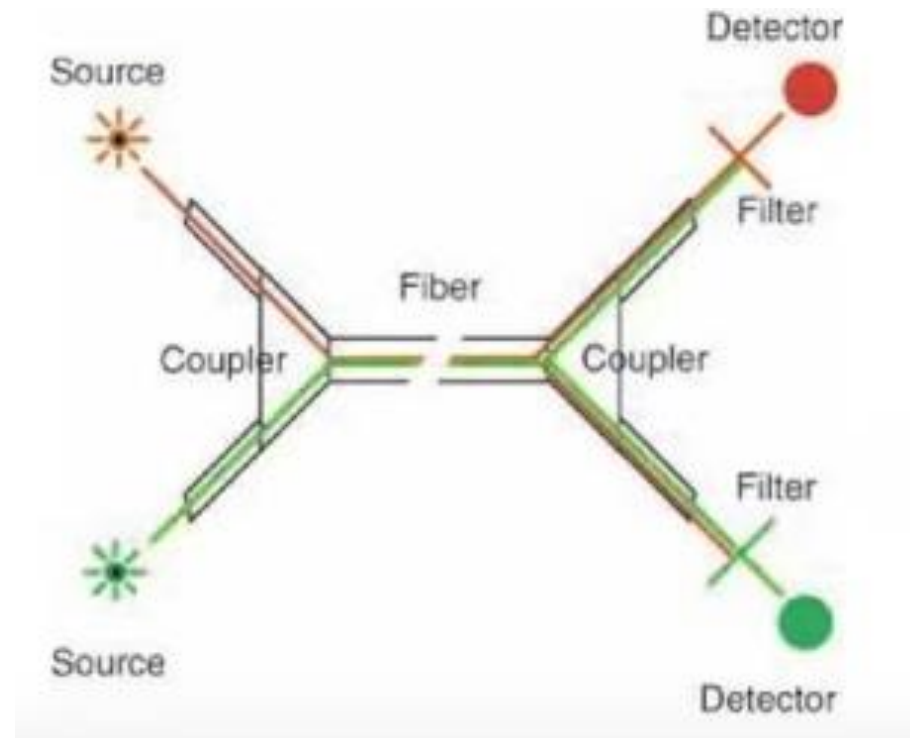
MODULE #2 – La technologie WDM

Dans le principe de fonctionnement, le WDM est similaire au prisme. Un système WDM utilise un multiplexeur sur l'émetteur pour joindre les différents signaux ensemble, tandis qu'un démultiplexeur est utilisé au récepteur pour les séparer, comme le montre le schéma suivant.



MODULE #2 – La technologie WDM

Dans le principe de fonctionnement, le WDM est similaire au prisme. Un système WDM utilise un multiplexeur sur l'émetteur pour joindre les différents signaux ensemble, tandis qu'un démultiplexeur est utilisé au récepteur pour les séparer, comme le montre le schéma suivant.



MODULE #2 – La technologie WDM

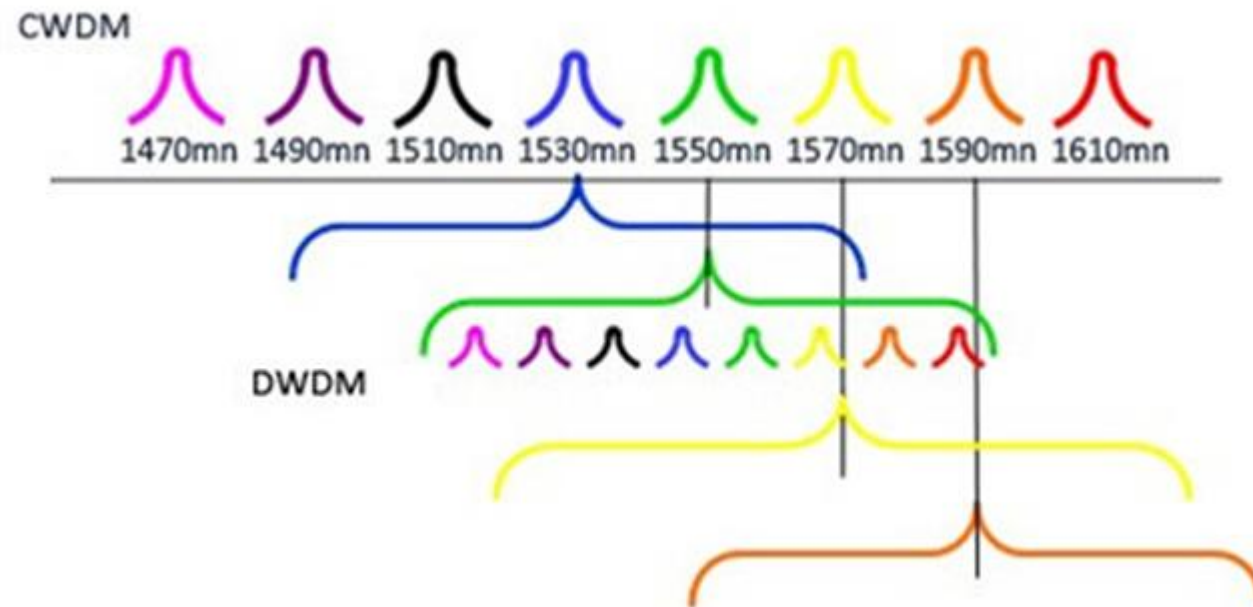
Un des aspects du WDM est que chaque canal optique peut transporter n'importe quel format de transmission.

La WDM augmente considérablement la capacité d'un réseau de fibres optiques.



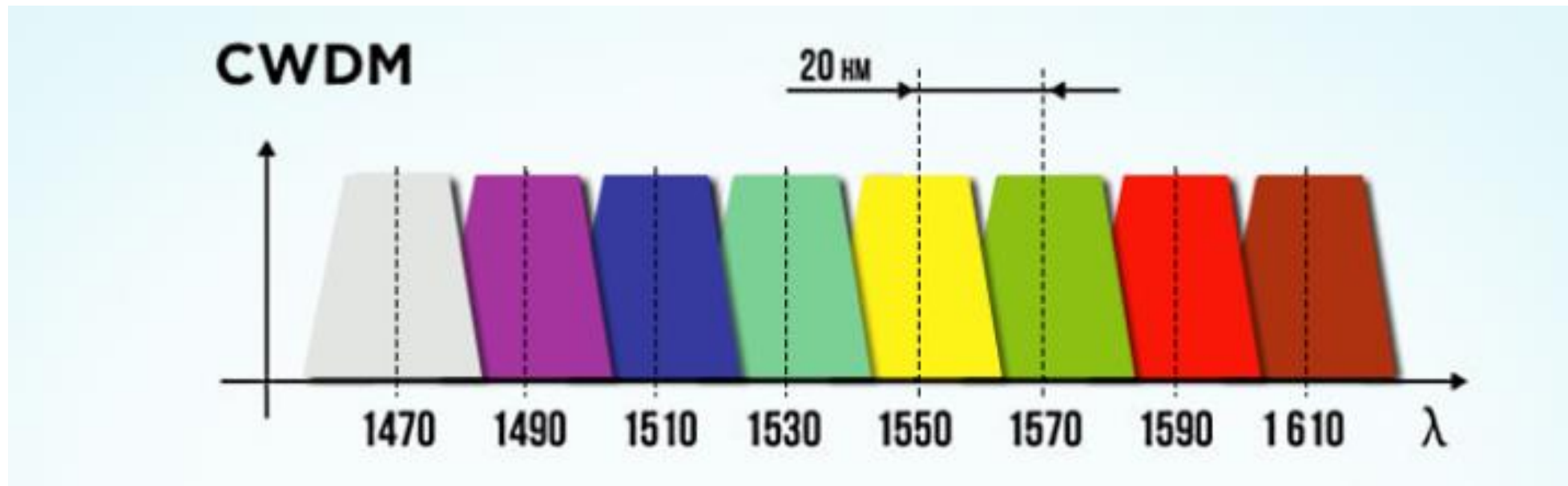
MODULE #2 – CWDM vs DWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) et **DWDM** (Dense Wavelength Division Multiplexing) sont actuellement les deux méthodes utilisées basée sur le WDM. L'espacement des canaux est la différence principale.



MODULE #2 – CWDM vs DWDM

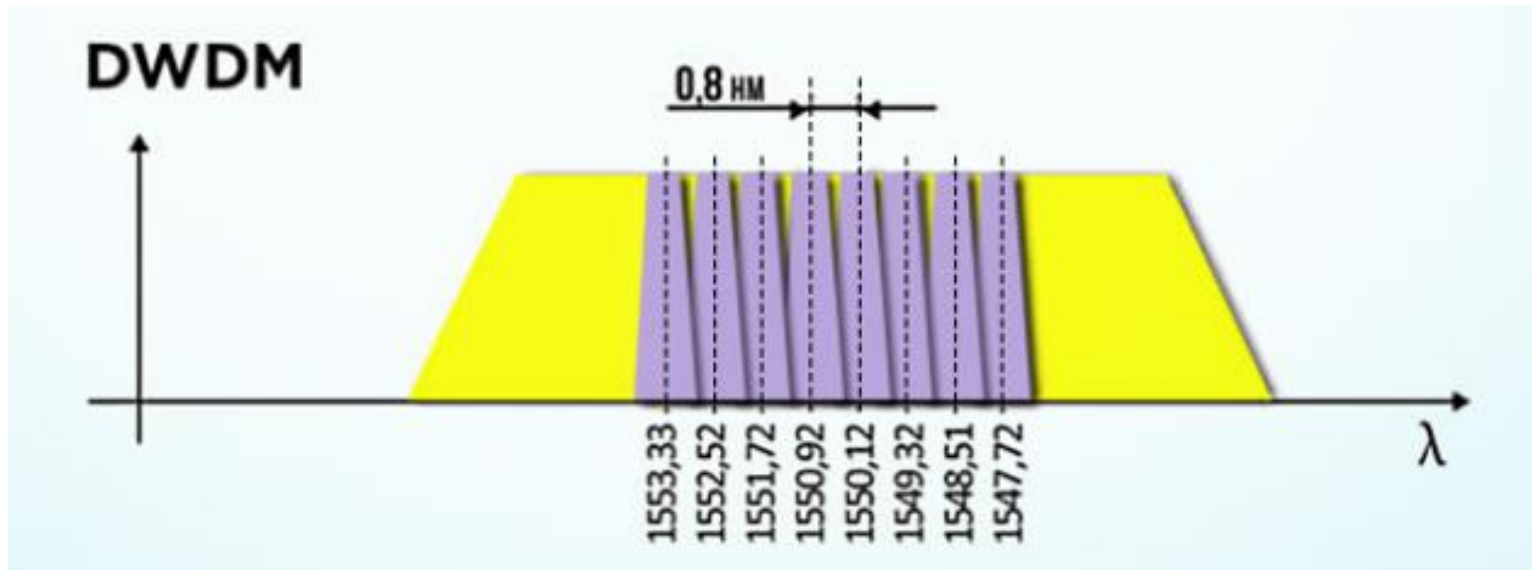
Le CWDM a un espacement plus grand que le DWDM. Il est capable de transporter jusqu'à 18 longueurs d'onde CWDM avec un espacement des canaux de 20nm dans la grille spectrale de 1271nm à 1611nm.



MODULE #2 – CWDM vs DWDM

Le DWDM peut transporter 40, 80 ou jusqu'à 160 longueurs d'onde avec un espacement plus étroit de 0,8/0,4 nm entre canaux

Ses longueurs d'onde vont de 1525nm à 1565nm (bande C) ou 1570nm à 1610nm (bande L).



MODULE #2

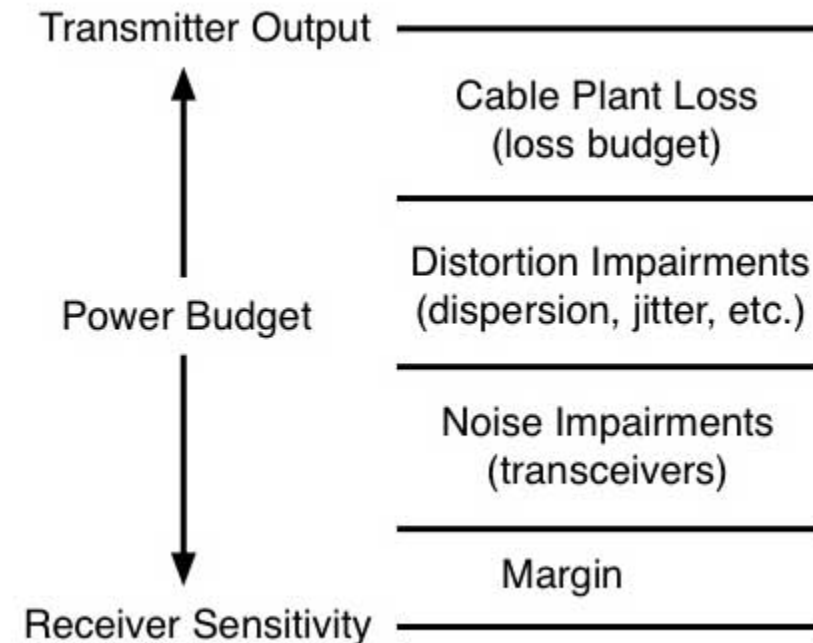
BUDGET DE PARCOURS

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2 – Budget de parcours

Afin de concevoir un lien optique fonctionnel, il faut s'assurer que les équipements que l'on désire mettre en place pourront répondre aux exigences de notre transmission.

Pour ce faire, il est primordial de faire le **budget de parcours de notre lien**.



MODULE #2 – Budget de parcours

Le budget de parcours de notre lien inclut les éléments suivants :

1. **Puissance de transmission** du transmetteur obtenu par les spécifications.
2. **Perte dans le câble** : en dB/Km
3. **Perte des épissures** : varie entre 0,2 et 0,5dB par épissures
4. **Perte des connecteurs** : varie entre 0,25 et 0,5dB par connecteurs
5. **Perte extra** : inclut tous les autres éléments du liens telles que : combiner, splitter, coupleurs, les patch panels, ect.

MODULE #2 – Budget de parcours

Le budget de parcours de notre lien inclut les éléments suivants :

6. **La marge d'opération** : prend en considération les variations causées par la température, la dégradation des équipements etc.. marge statistique
7. **La marge de maintenance** : marge pour les ajouts d'épissures de réparation etc..

Par la suite nous dressons un tableau comme suit.

MODULE #2 – Budget de parcours

ATTENUATION OR LINK LOSS

Sample system

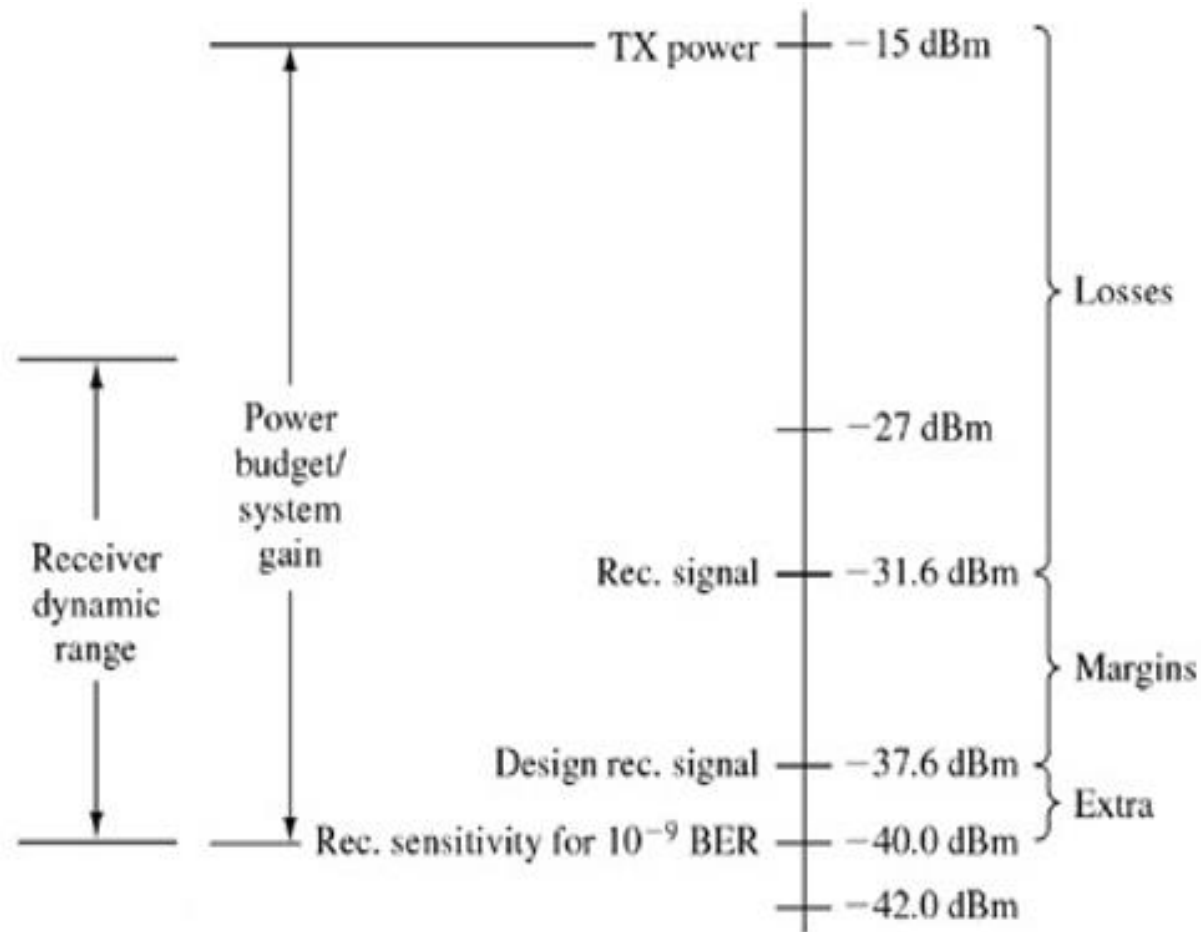
1	Transmitter power output (module, not LD or LED)		-15 dBm
2	Losses: Cable, 18.6 Mi/30 km @ 0.4 dB/km	12.0	
3	8 splices @ 0.2 dB ea	1.6	
4	2 connectors @ 0.5 dB ea	1.0	
5	Extra for two pigtailed and inside cable	<u>2.0</u>	
	Total losses	16.6	<u>16.6 dB</u>
	Received signal power		-31.6 dBm
6	Operational margin	3.0	
7	Maintenance margin	<u>3.0</u>	
	Total margin	6.0	<u>6.0 dB</u>
8	Design receive signal power		-37.6 dBm
9	Minimum receiver sensitivity(RSL) for 10^{-9} BER (module, not APD or PIN)		<u>-40.0 dBm</u>
10	Extra margin		2.4 dB

MODULE #2 – Budget de parcours

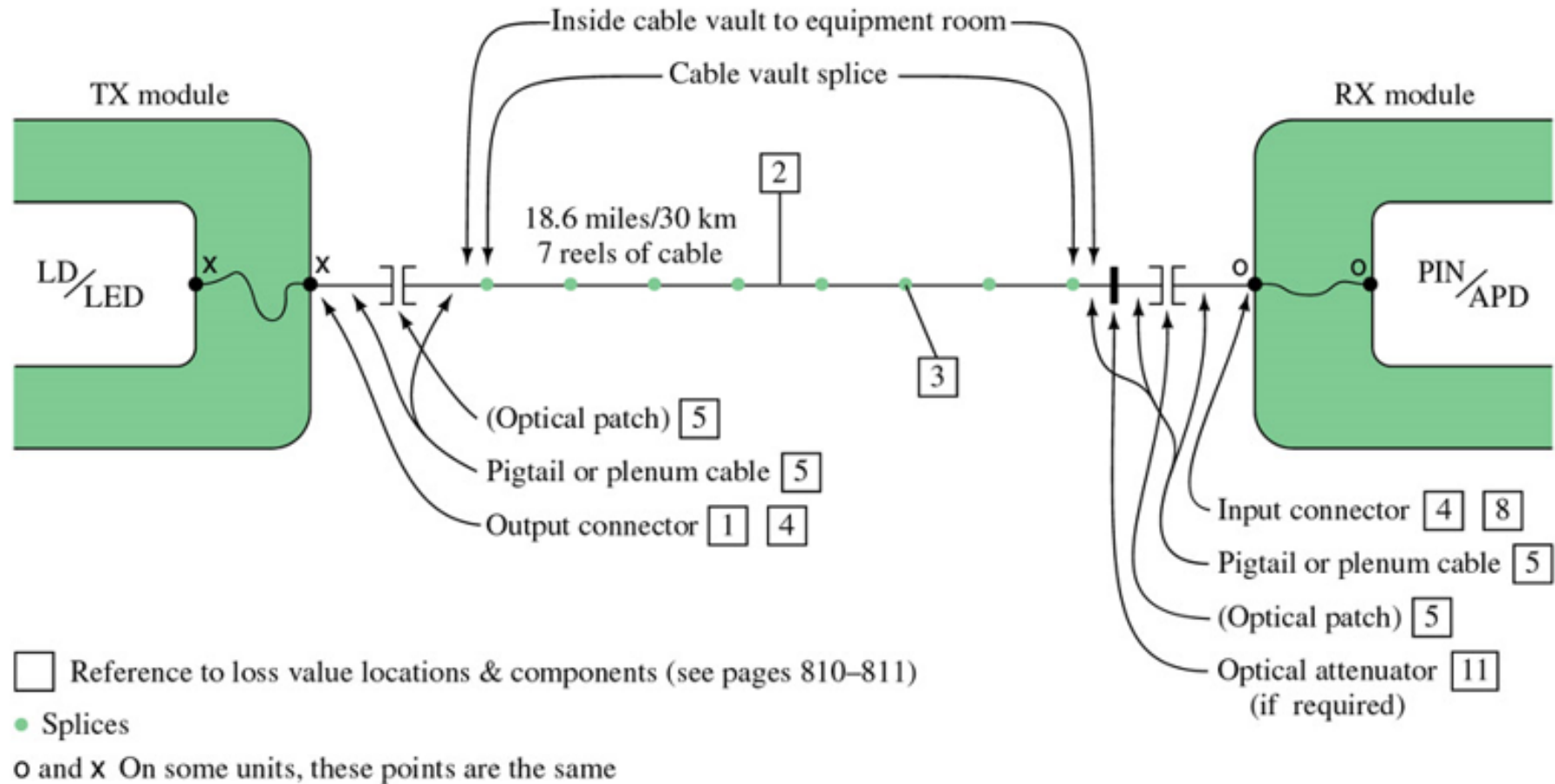
On obtient alors les résultats suivants:

8. **Puissance de signal reçu théorique.** *La valeur obtenue par la sommation des gains et des pertes*
9. **Sensibilité de récepteur.** Appelé *minimum RSL (receiver sensitivity level)* est une donnée fournie par les manufacturiers qui garantit qu'à ce niveau de puissance, le récepteur fournira un BER donné. Dans notre cas le BER = 10^{-9} ce qui représente 1 erreur pour un milliard de données.

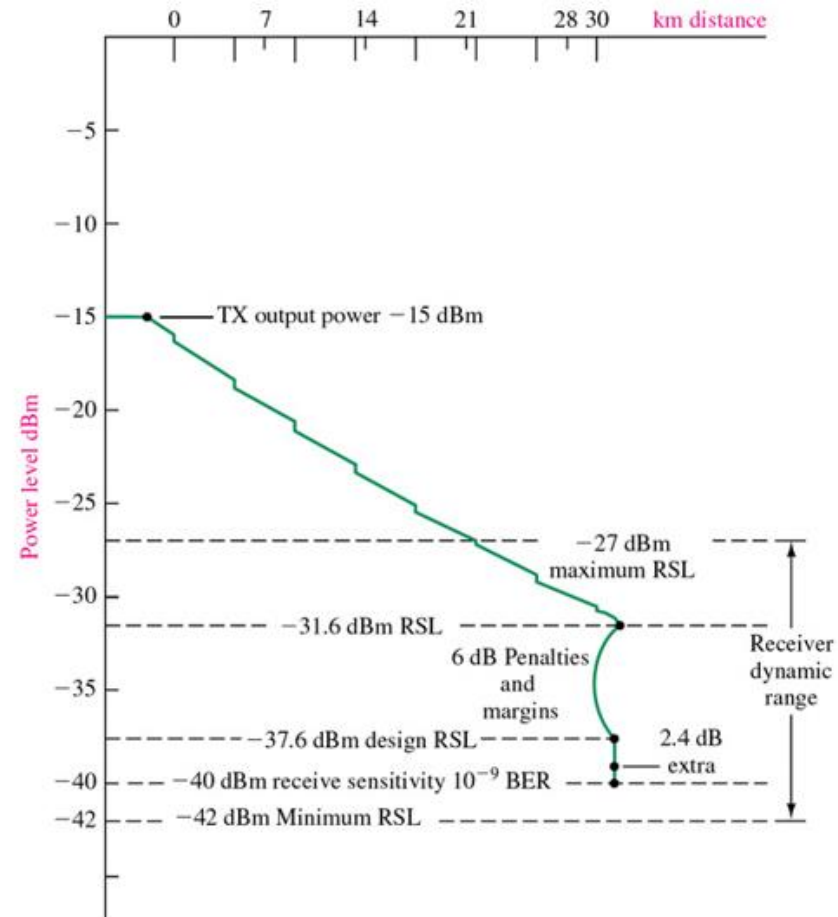
MODULE #2 – Budget de parcours



MODULE #2 – Budget de parcours



MODULE #2 – Budget de parcours



MODULE #2 – Budget de parcours

Exercice #36

Faites le budget de parcours du lien suivant. Un lien de 15 km contenant 1 épissure tous les 2,5 km de fibre et d'un connecteur à chaque extrémité. La fibre possède une atténuation de 0,3 dB/km.

Quelle devra être la puissance minimale du module de transmission si l'on veut garder une marge d'opération et une marge de maintenance de 4 dB chacune. Notre détecteur possède une sensibilité de -35dBm pour un BER de 10^{-6} . Chaque épissure produit une perte de 0,4dB et chaque connecteur 0,5dB. On peut aussi ajouter 2dB pour les patch cords et le reste de la quincaillerie. On veut aussi se garder une marge d'extra de 3 dB.

MODULE #2

ÉQUIPEMENTS DE TEST FO

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #2 – Équipements de tests

Tandis que le cuivre continue de dominer les systèmes de câblage horizontaux où peu d'appareils nécessitent plus de 10 Gbit/s et beaucoup sont alimentés via Power over Ethernet (Poe), l'utilisation de systèmes de câblage fibre optique est en hausse, lorsque les débits atteignent 40 et 100 Gbit/s et plus ou partout où il y a besoin d'une plus grande distance, d'une immunité au bruit et de sécurité.

Selon des études récentes, la taille du marché des fibres optiques mondiales devrait atteindre 6,9 milliards USD d'ici 2024, contre 4,3 milliards USD en 2019.

MODULE #2 – Équipements de tests

Les principaux facteurs qui affectent les performance d'un lien :

- Qualité de la fibre
- Interconnections (connecteurs, épissures)
- Stress physique
- Conditions environnementales (température, humidité, etc...)

Ont pour effet d'augmenter:

- Pertes, atténuation, réflexions (ORL), dégradation de la fibre

Impact sur:

- Le budget des pertes "LOSS BUDGET"

MODULE #2 – Équipements de tests

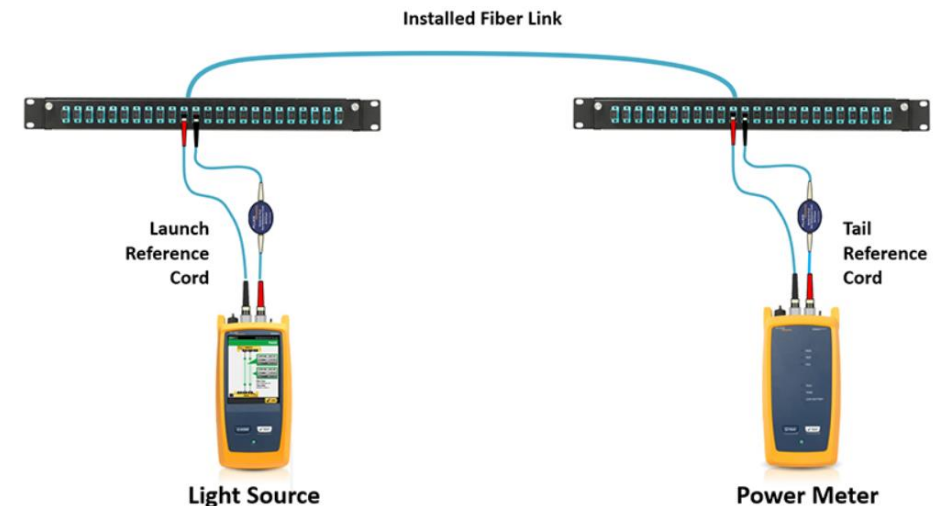
Au fur et à mesure que les déploiements de fibre optique deviennent courants, les propriétaires de réseau et les techniciens utilisent deux dispositifs essentiels afin de tester la fibres optiques : le kit de test de perte optique (OLTS) et le réflectomètre optique (OTDR).

OLTS	OTDR
Optical Loss Test Set	Optical time-domain reflectometer

MODULE #2 – Équipements de tests

Un **OLTS** mesure la **perte d'insertion sur un lien fibre** en utilisant une source lumineuse sur une extrémité et un wattmètre à l'autre afin de mesurer la quantité de lumière sortant à l'extrémité opposée.

Il est requis pour les tests de fibres conformément aux normes du secteur. On utilise le terme « niveau 1 » pour décrire les tests avec un OLTS



MODULE #2 – Équipements de tests

Résultats OLTS :

The diagram illustrates an optical network configuration. At the top, a ring network is shown with buildings representing nodes. Below it, a power meter (wattmètre) is connected to a source (source) via a dashed line. The power meter is connected to a series of optical components, including a coupler, a switch, and a fiber optic cable, which are connected to a series of houses representing end users. The power meter is labeled 'wattmètre' and the source is labeled 'source'.

Test ID	Test Date	Status
Cable_fiber1	2016-05-13, 9:43:12 AM	✓
Cable_fiber2	2016-05-13, 3:00:09 PM	✓
Cable_fiber3	2016-05-13, 4:04:28 PM	✓
Cable_fiber4	2016-05-13, 4:04:05 PM	✓
Cable_fiber5	2016-05-13, 4:04:46 PM	ⓘ ⚠
Cable_fiber6	2016-05-13, 4:04:32 PM	ⓘ ⚠
Cable_fiber7	2016-05-13, 4:04:28 PM	ⓘ ⚠
Cable_fiber8	2016-05-13, 4:05:07 PM	✓
Cable_fiber9	2016-05-13, 4:05:12 PM	✓

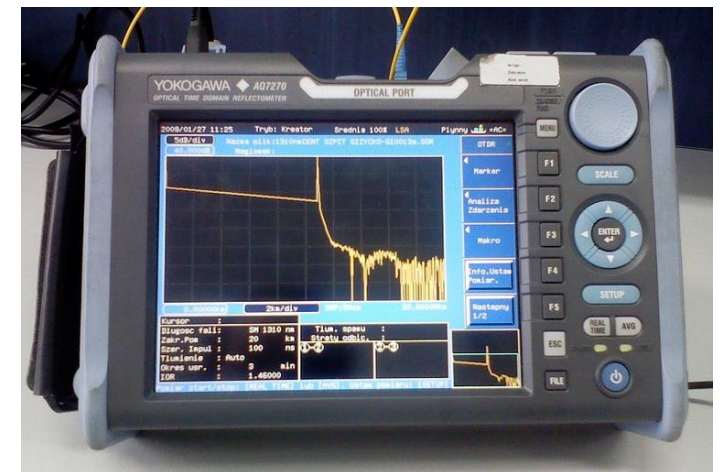
The screenshot shows the OLTS software interface. The main window displays a list of test results for various fiber optic cables. The interface includes a menu bar with options like 'File', 'View', 'Tools', and 'Help'. A sidebar on the right contains buttons for 'Start Test', 'Open', 'Save', 'New', 'Test Configuration', 'User Performance', and 'Tools'. The main area shows a table of test results with columns for test ID, date, and status. The status column shows green checkmarks for successful tests and red warning icons for failed tests.

MODULE #2 – Équipements de tests

L'OTDR envoie une impulsion et mesure la réflexion reçue. À l'entrée d'une fibre, on injecte une impulsion lumineuse à l'aide d'une diode laser.

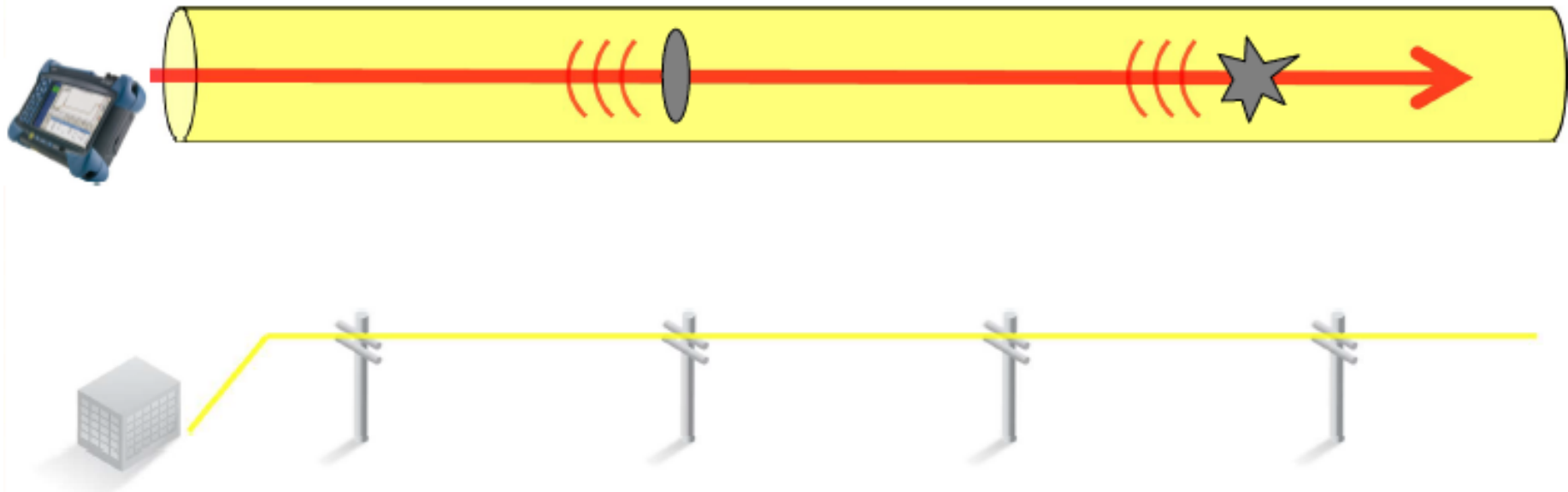
Dès que l'impulsion traversera le milieu d'indice n_1 (lieu du défaut) une puissance réfléchiée P_r reviendra vers la source. Une photodiode PIN permet de récupérer la fraction de la puissance réfléchiée.

Le réflectomètre est muni d'un écran qui affiche la courbe correspondant à la puissance reçue par la diode PIN en fonction de la distance à l'origine.



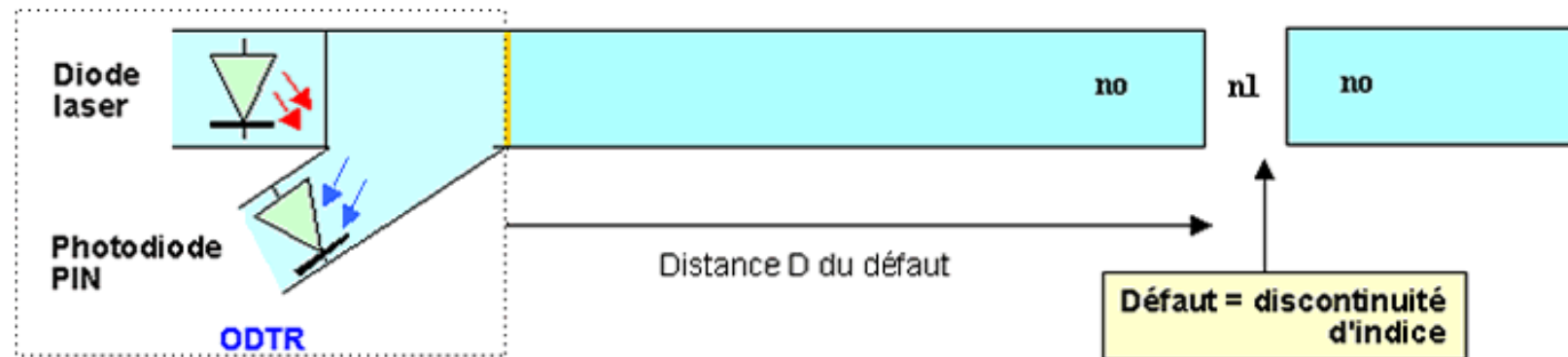
MODULE #2 – Équipements de tests

L'OTDR envoie une impulsion et mesure la réflexion reçue. À l'entrée d'une fibre, on injecte une impulsion lumineuse à l'aide d'une diode laser. Les OTDRs peuvent détecter la position des connections, des épissures, des pertes, des micro courbures, des macro courbures, etc.



MODULE #2 – OTDR

Le niveau reçu par la diode PIN décroît de façon exponentielle en fonction de la distance, un défaut se traduira par pic de puissance et en *fonction du temps* de propagation, on peut en déduire la distance qui sépare l'origine du lieu de défaut.



MODULE #2 – OTDR

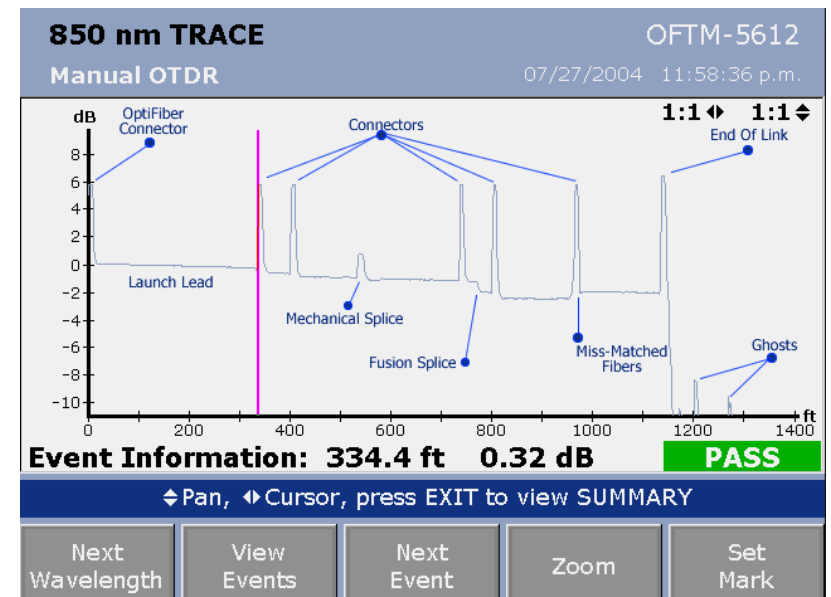
Mise en service d'une liaison – maintenance

Le réflectomètre permet de mesurer l'atténuation de la liaison, de repérer les différents défauts présents lors de la mise en service (mauvaise jonction, contraintes,...)

Il permet d'officialiser la "signature de liaison" lors de l'installation.

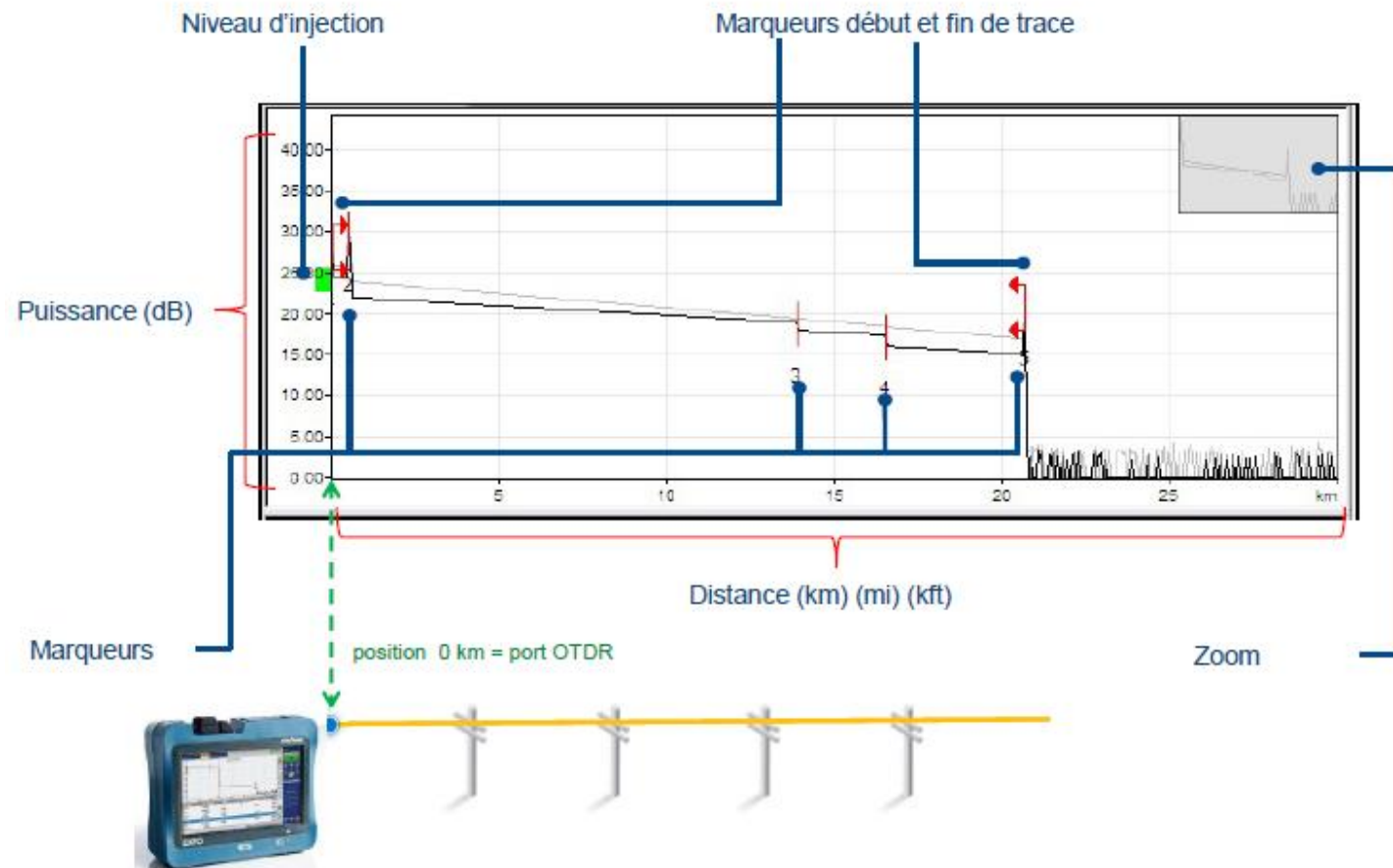
La courbe peut être imprimée et stockée sur un ordinateur pour ensuite être utilisée pour vérifier la performance de liaison par fibre soit périodiquement, soit en continu (en utilisant un système d'alarme)

Le test de l'ODTR doit être effectué **dans les 2 directions**



MODULE #2 – OTDR

Voici un graphique OTDR standard



MODULE #2 – OTDR

Les impulsions subissent de la rétrodiffusion (Rayleigh) et des événements réfléchissants (Fresnel). Une fraction de l'impulsion retourne vers le port de l'OTDR (*backscattering*).

Le signal retourné est proportionnel à la puissance d'impulsion et varie en fonction de l'évènement.

En mesurant le temps écoulé entre le moment de lancement des impulsions et le temps d'arrivée du signal de retour, on peut déterminer la distance entre le point de lancement et l'évènement détecté.

MODULE #2 – OTDR

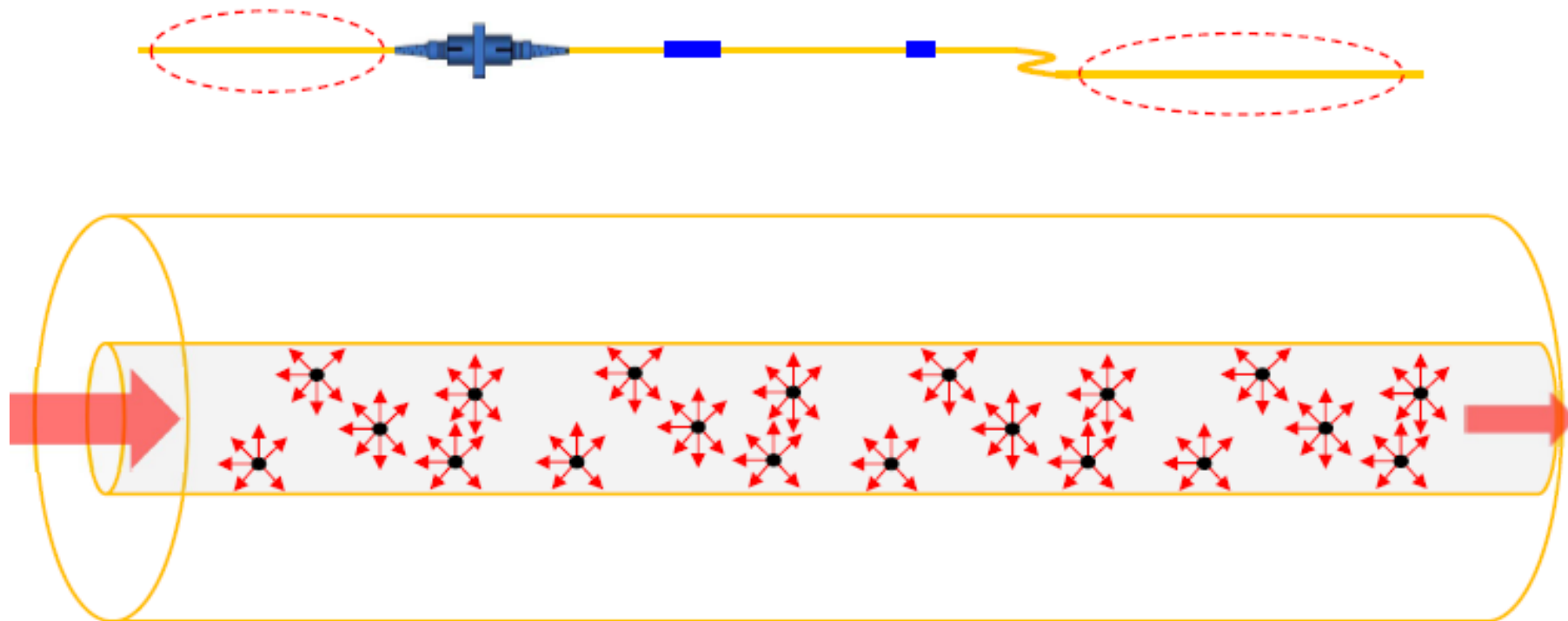
Rétrodiffusion de Rayleigh (*backscattering*)

Les faisceaux lasers sont invisibles, mais lors de l'utilisation dans un milieu poussiéreux, ils apparaissent grâce à la rétrodiffusion de la lumière par les particules de poussière.



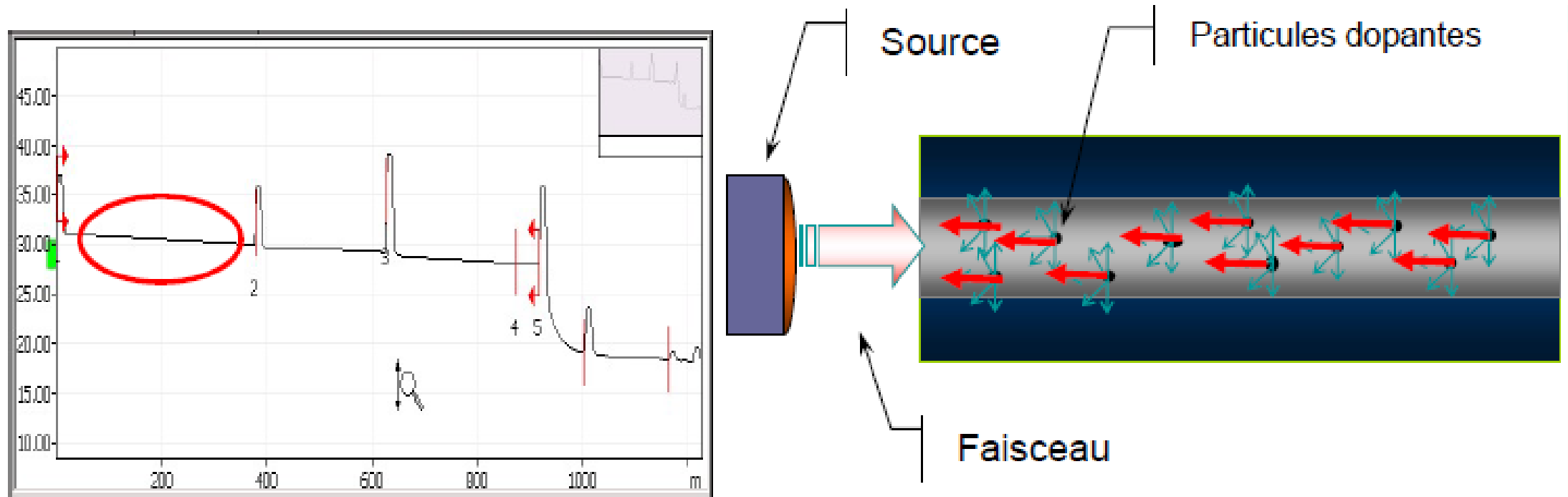
MODULE #2 – OTDR

Chaque fois que le rayon lumineux rencontre une impureté, une partie de sa puissance est diffusée. Une partie de cette énergie diffusée retourne vers l'émetteur. C'est la rétro-diffusion (*backscattering*).



MODULE #2 – OTDR

Les OTDR utilisent la rétrodiffusion de Rayleigh pour mesurer l'atténuation de la fibre (dB/km). Les longueurs d'onde plus courtes seront plus atténuées par la rétrodiffusion.

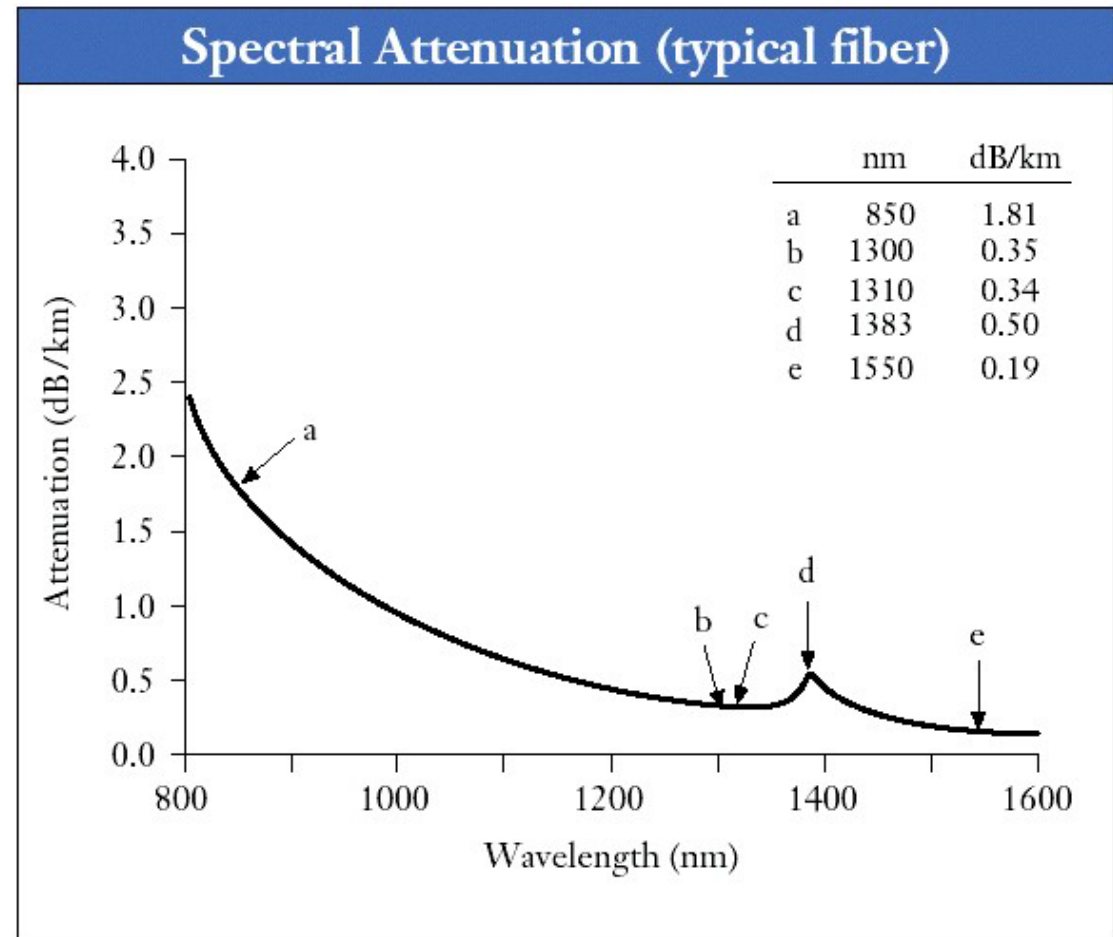


MODULE #2 – OTDR

Les liens optiques sont normalement testés à la longueur d'onde d'opération du système.

Longueurs d'onde OTDR:

- **850 nm (MM)**
- **1300 nm (MM)**
- 1310 nm (SM)
- 1490 nm (SM)
- 1550 nm (SM)
- 1625 nm (SM)

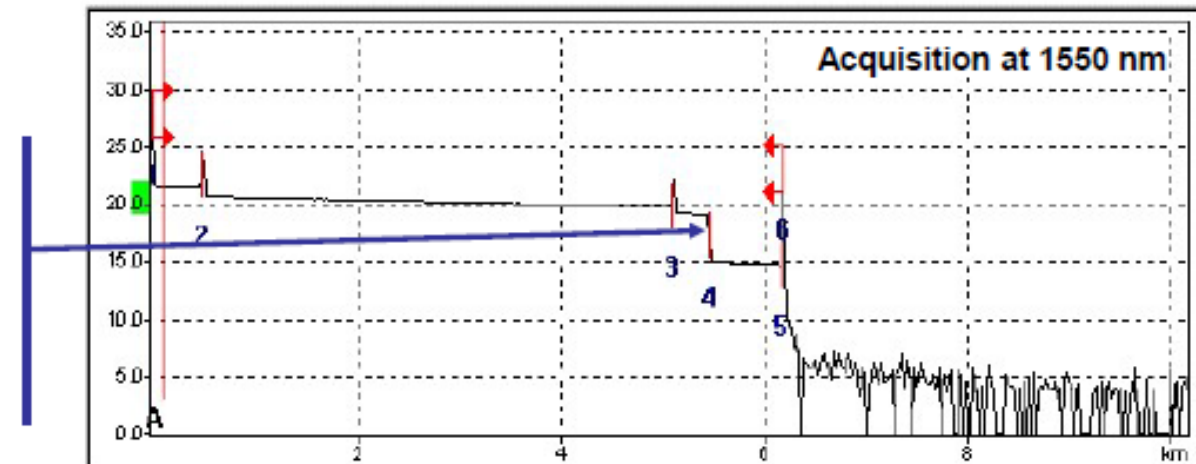
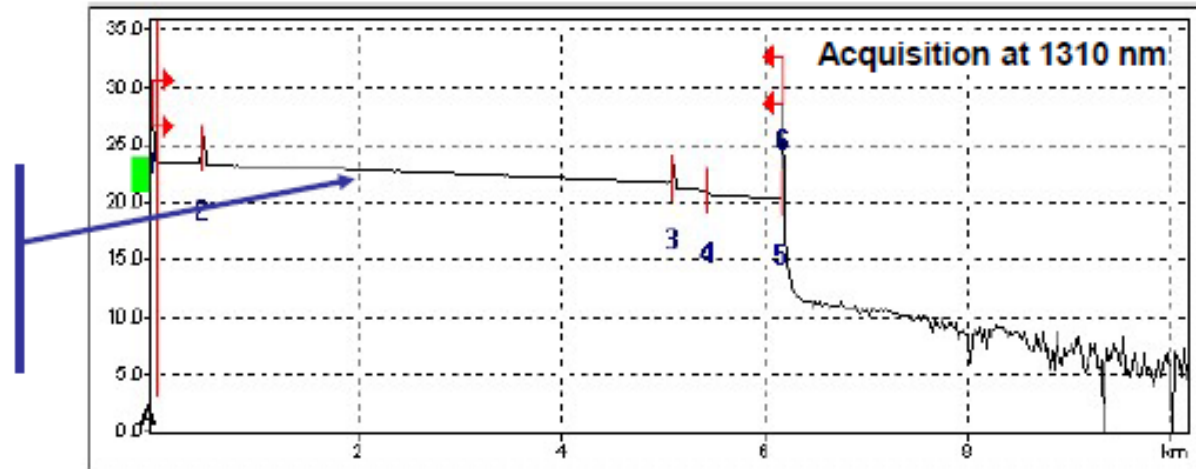


MODULE #2 – OTDR

La perte de signal optique est dépendante de la longueur d'onde.

Les longueurs d'ondes plus courtes sont plus atténuées par les rétrodiffusions de la fibre

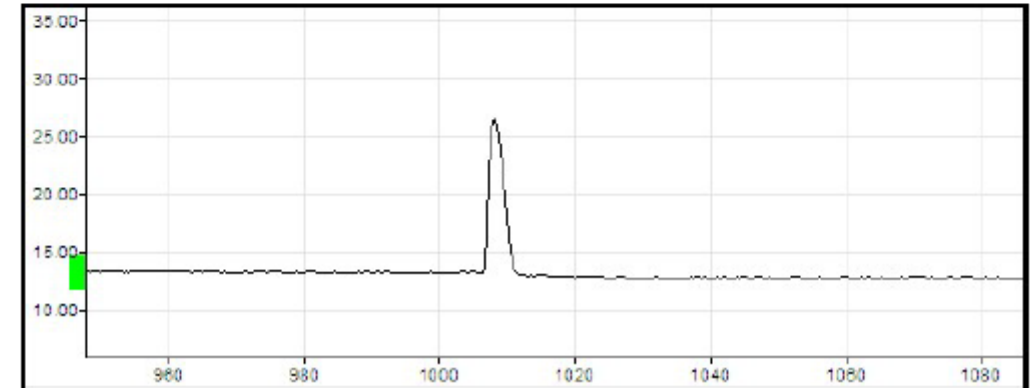
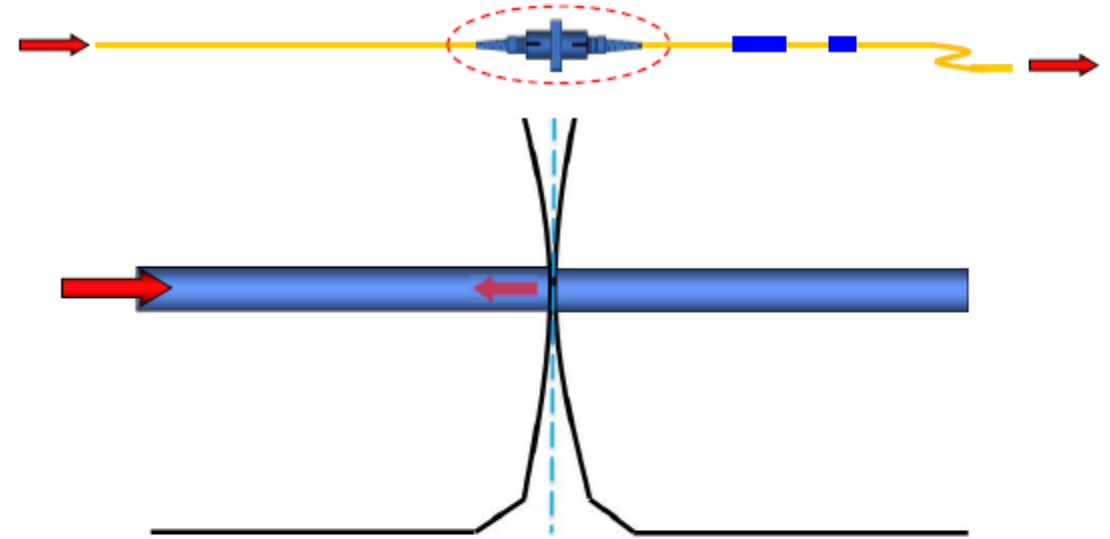
Les longueurs d'ondes plus longues sont plus atténuées par les macro courbures et les défauts de la fibre



MODULE #2 – OTDR

Pour les connecteurs, une mince couche d'air est présente entre les connecteurs et crée une réflexion. Cela est dû à un changement d'indice de réfraction

$$n_{\text{coeur}} \neq n_{\text{air}}$$

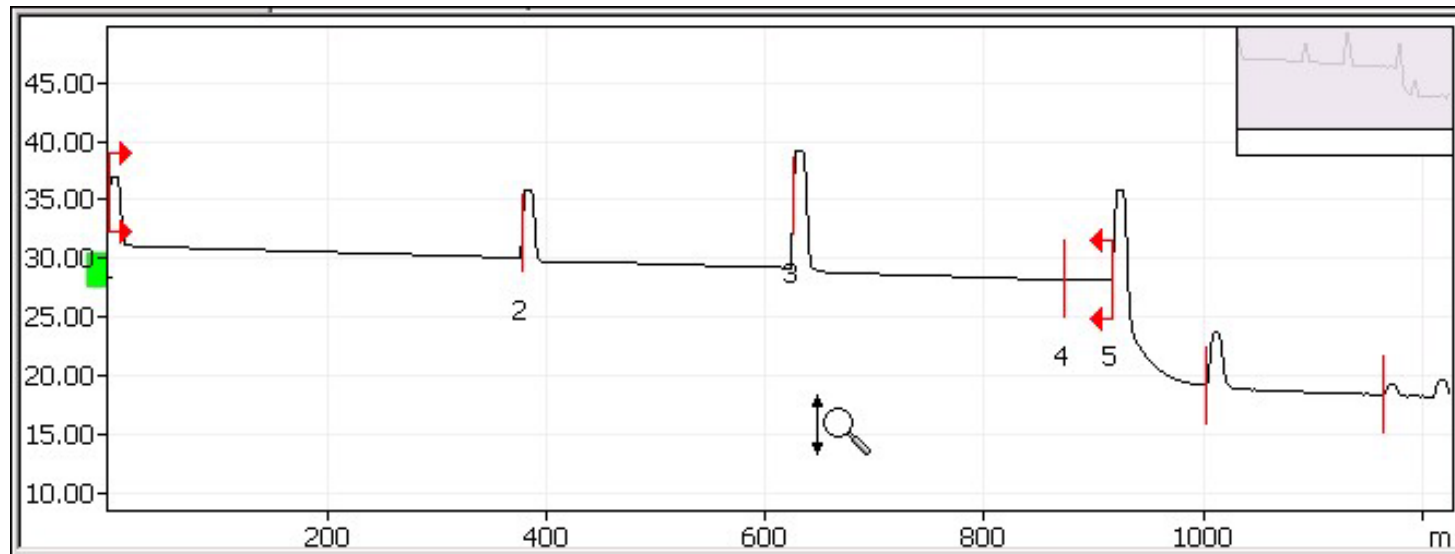


MODULE #2 – OTDR

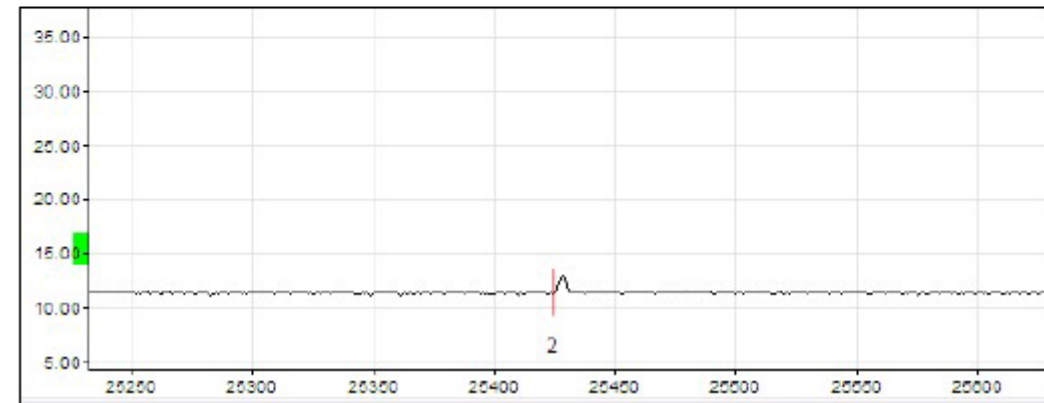
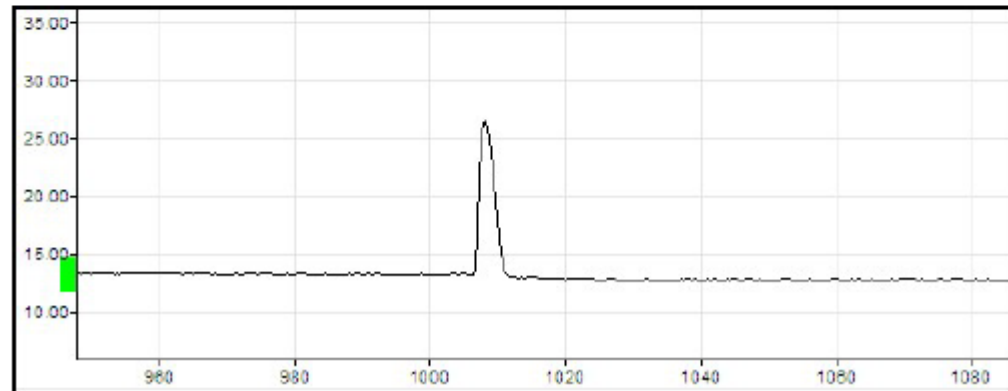
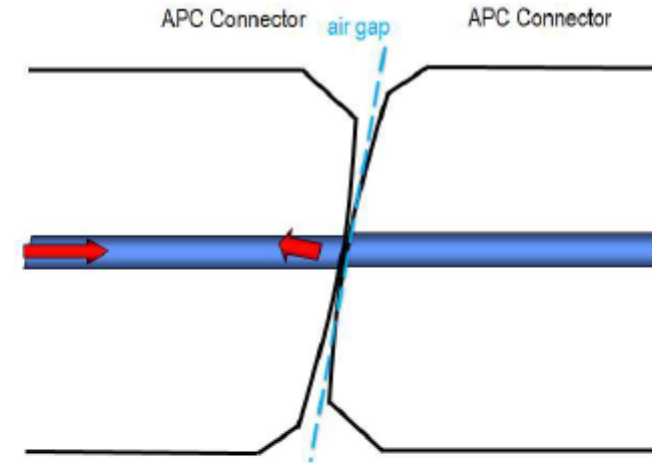
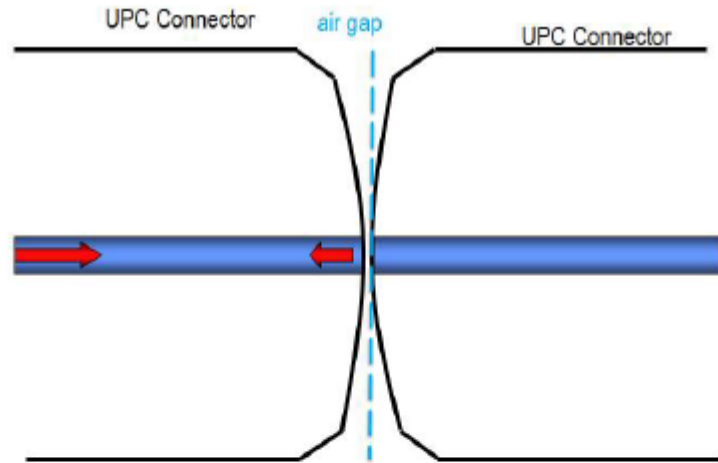
Les réflexions sont causées par des changements abrupts dans l'indice de réfraction: (verre/air)

Fibre brisée, épissure mécanique, connecteur, fin de la fibre

La réflexions de Fresnel sont approximativement 20 000 fois plus élevées que le niveau de rétrodiffusion de la fibre. Une zone morte sera créée après chaque réflexion

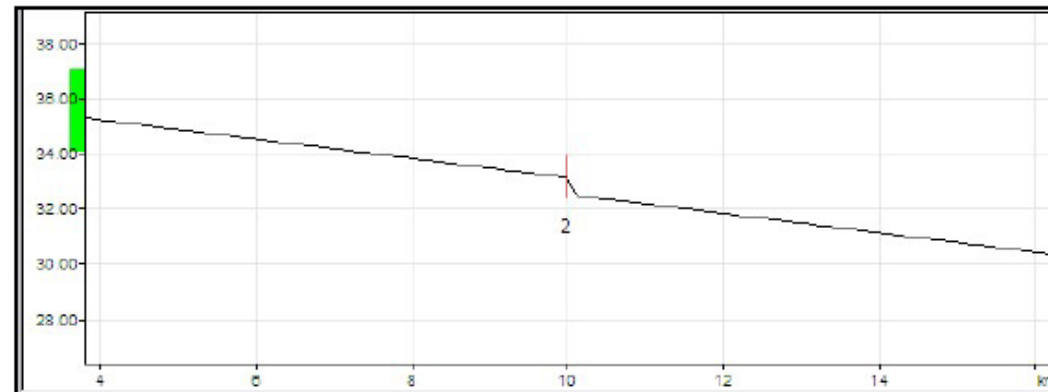
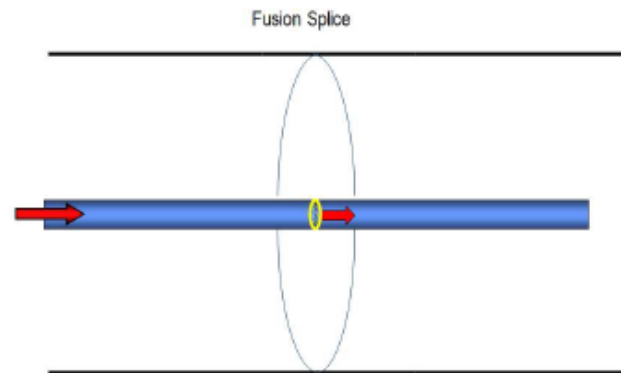


MODULE #2 – Connecteurs UPC vs APC



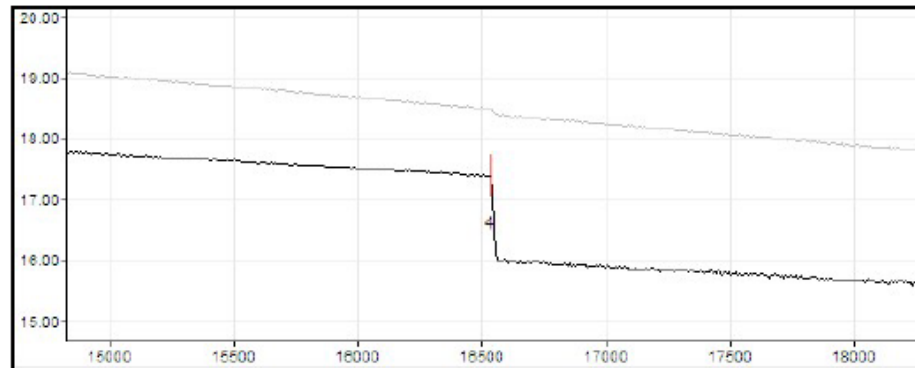
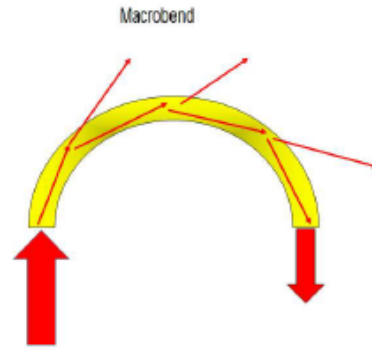
MODULE #2 – OTDR

Lorsqu'un signal lumineux rencontre une épissure par fusion, une partie de son énergie est diffusée, mais en l'absence d'air, il n'y a pas de réflexion de créée.



MODULE #2 – OTDR

Les macro courbures vont aussi créer une atténuation plus ou moins importantes selon la courbure de la fibre.

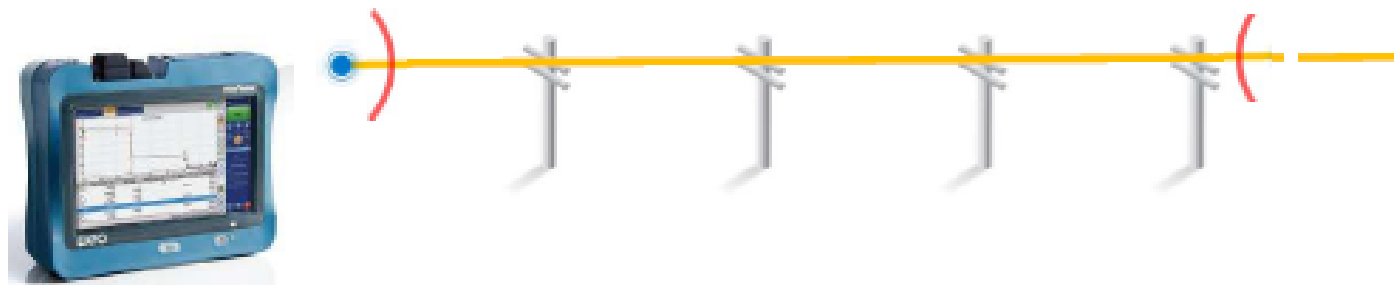


MODULE #2 – OTDR

Calcul de la distance

La distance **D** parcourue peut-être facilement calculée si l'on connaît le temps **t** aller-retour de l'impulsion et la vitesse de la lumière dans la fibre **Vp**.

$$Vp = \frac{c}{n} \quad \text{alors} \quad D = \frac{Vp * t}{2}$$

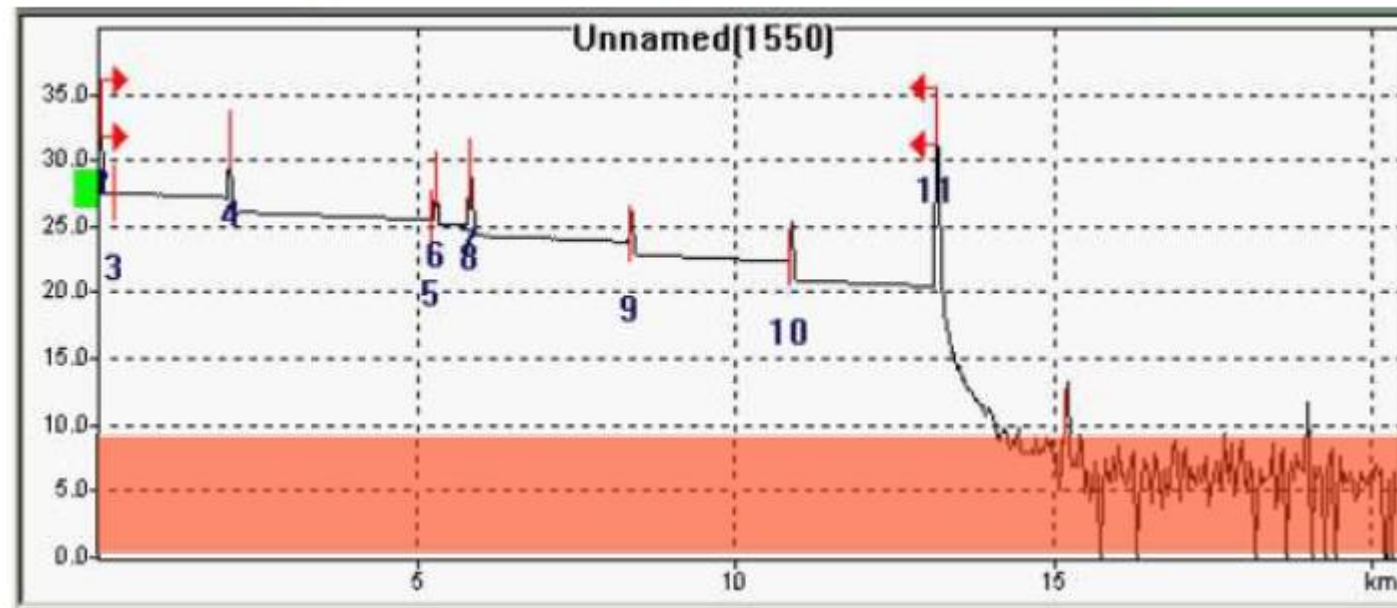


MODULE #2 – OTDR

Plage dynamique de mesure (en dB)

Différence entre le niveau de dispersion d'injection à l'interface de la fibre testée et le niveau 'plafond' de bruit. Anciennement ce plafond était autour de 8dB. Maintenant, il se situe autour de 4dB.

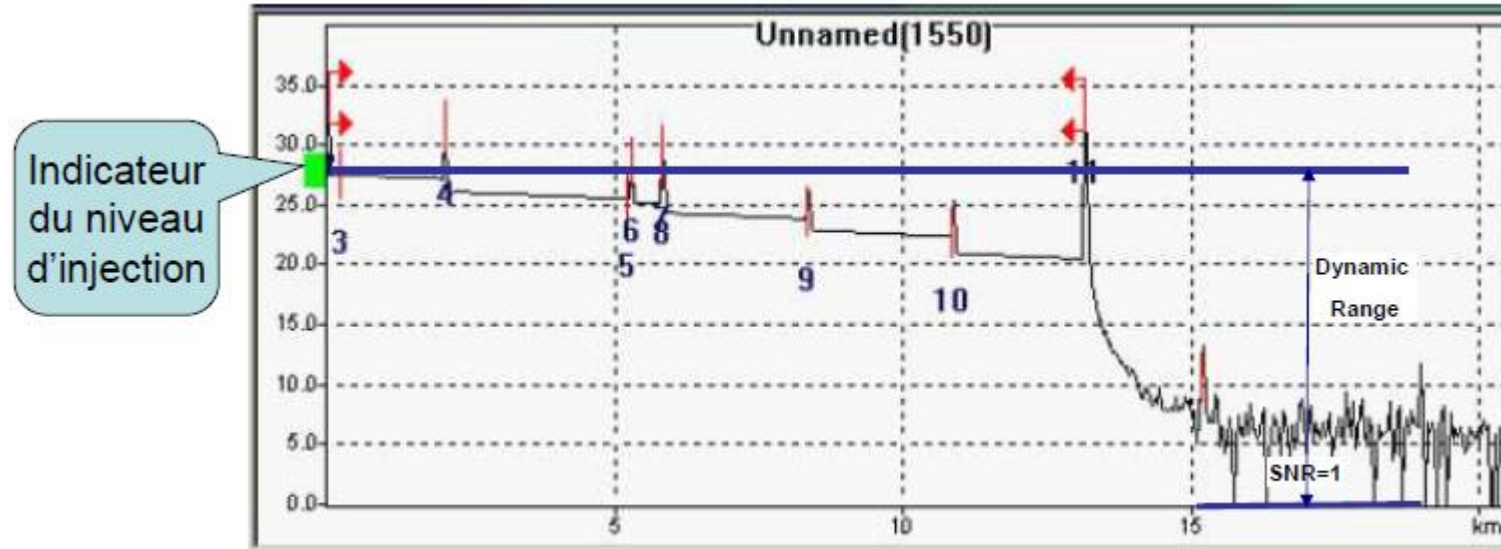
Plage de mesure = Plage dynamique – 8 dB (Anciens OTDR)



MODULE #2 – OTDR

Plage dynamique (en dB)

La différence entre le niveau de rétrodiffusion initiale à l'interface de la fibre sous test et la sensibilité ou le niveau plancher de bruit du récepteurs. Il variera selon la largeur d'impulsion et la longueur d'onde utilisée.



MODULE #2 – OTDR

La zone morte

- Les zones mortes ne concernent que les évènements réfléchifs. Les zones mortes résultent de la grande quantité d'énergie retournée au détecteur par un évènement réfléchissant.
- Le détecteur est temporairement saturé, donc une période de temps est nécessaire pour qu'il puisse récupérer du surplus d'énergie.
- Une des conséquence de ce « masquage » temporaire est qu'une partie de la fibre située immédiatement après l'évènement ne peut être vue.



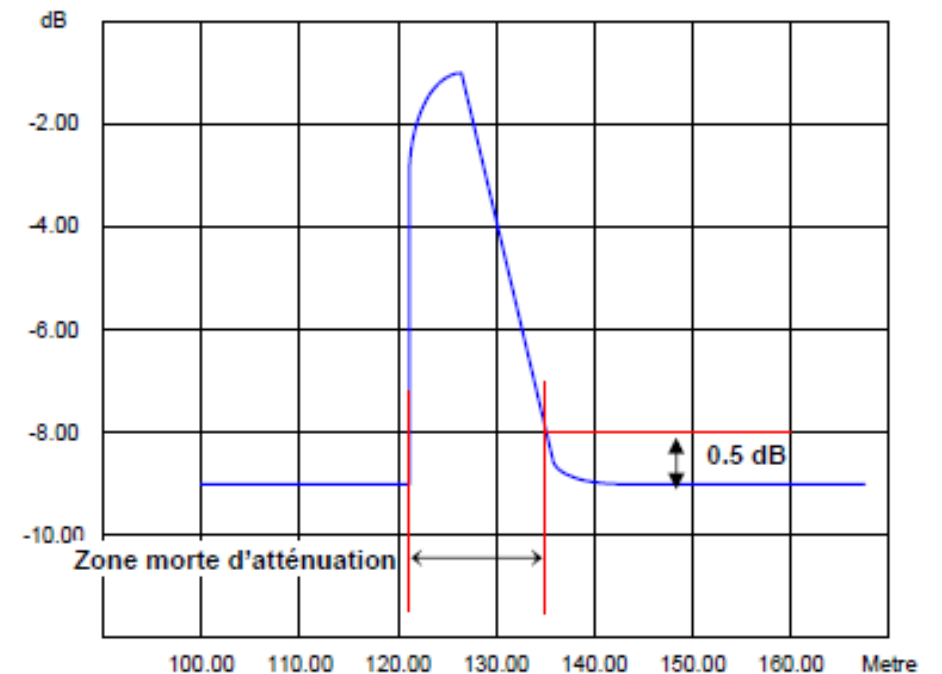
MODULE #2 – OTDR

La zone morte

Si un évènement réflectif ou non est situé à l'extérieur de la zone morte qui le précède, cet évènement sera localisé et sa position et sa perte seront calculées. **Tout ce qui sera à l'intérieur de la zone morte ne pourra être visualisé.**

Deux types de zones mortes peuvent être définies :

- La zone morte « atténuation »
- La zone morte 'évènement'

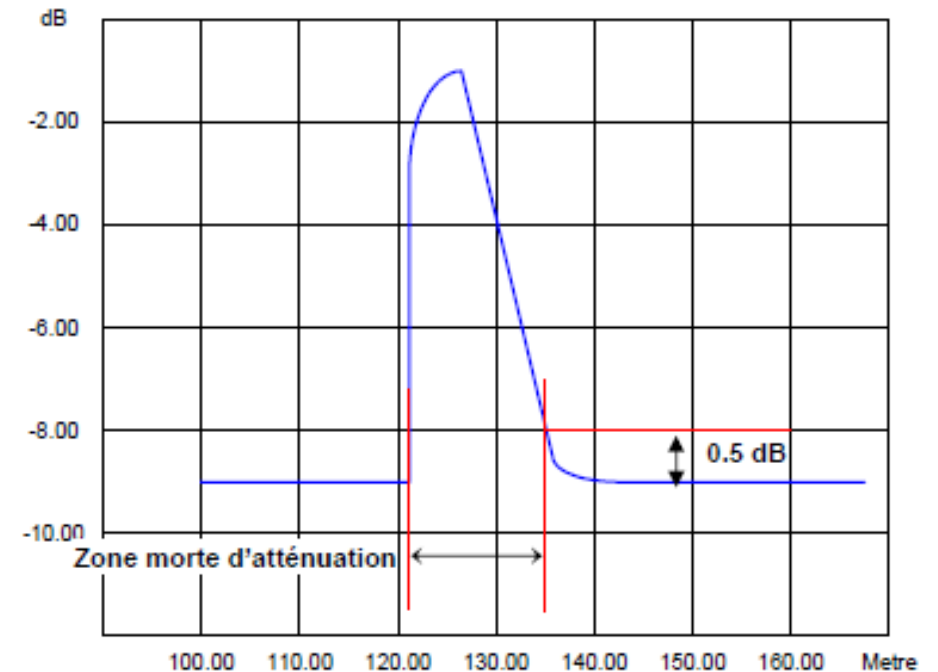


MODULE #2 – OTDR

La zone morte « atténuation »

La zone morte concerne seulement les évènements non-réfléchissants.

La zone morte non réfléchissante est la distance minimale après un évènement réfléchissant où une mesure d'atténuation peut être accomplie.

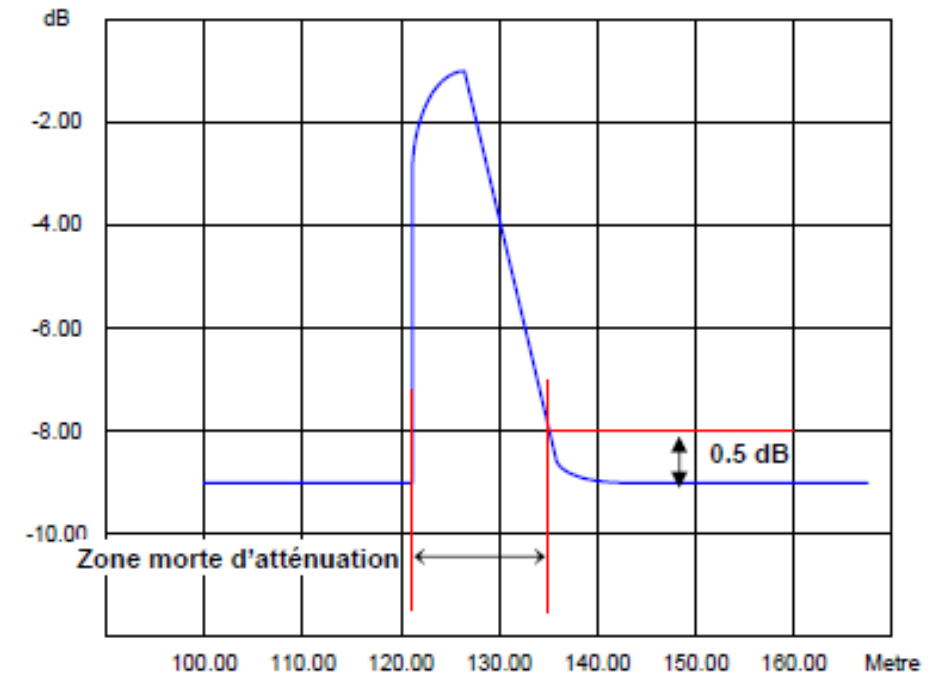


MODULE #2 – OTDR

La zone morte « atténuation »

Si un évènement réflectif ou non est situé à l'extérieur de la zone morte qui le précède, cet évènement sera localisé et sa position et sa perte seront calculées. **Tout ce qui sera à l'intérieur de la zone morte ne pourra être visualisé.**

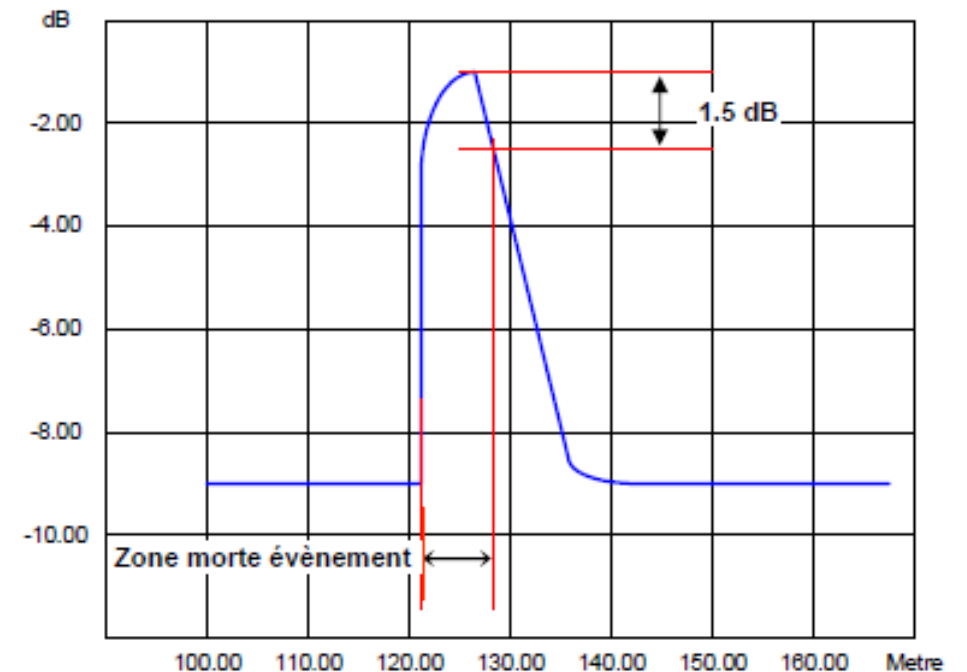
Cette zone équivaut à la distance entre le début de l'évènement et le point de la pente descendante où le détecteur mesure une valeur d'environ 0,5 dB du niveau de rétrodiffusion normale



MODULE #2 – OTDR

La zone morte « évènement »

Elle concerne seulement les éléments réfléchifs. La zone morte « évènement » ou « réflective » représente la distance minimale entre le début d'un évènement réfléchif et le point où un évènement réfléchif consécutif devrait clairement être reconnu.

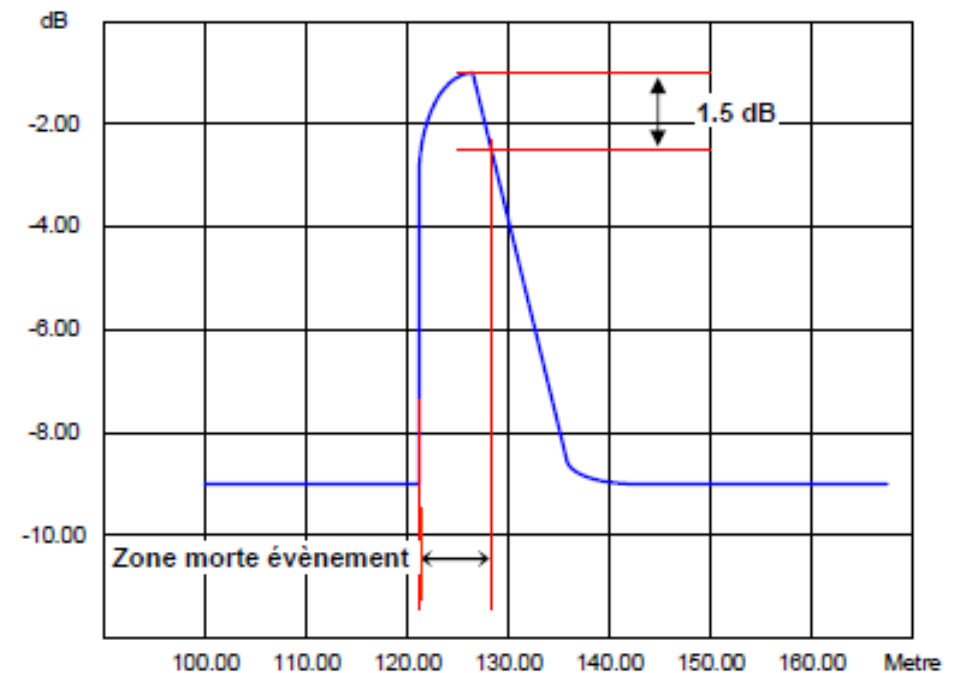


MODULE #2 – OTDR

La zone morte « évènement »

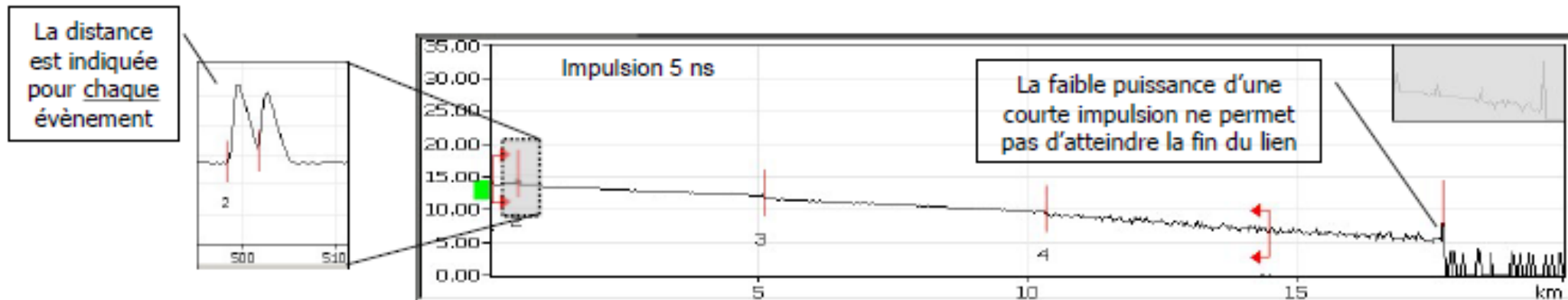
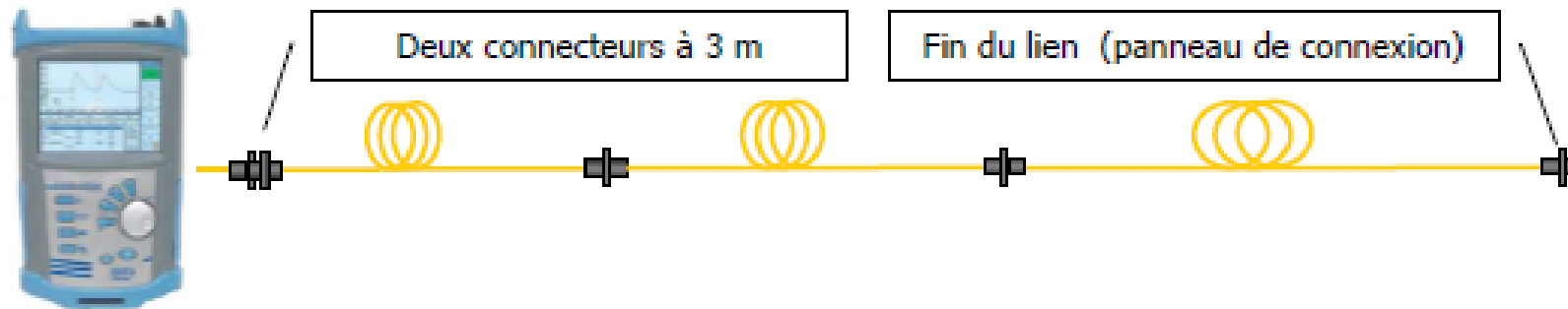
Si un évènement réflectif est situé à l'extérieur de la zone morte qui le précède, cet évènement sera localisé et sa position sera calculée.

Équivaut à la distance entre le début de l'évènement et le point de -1,5 dB situé sur la pente descendante



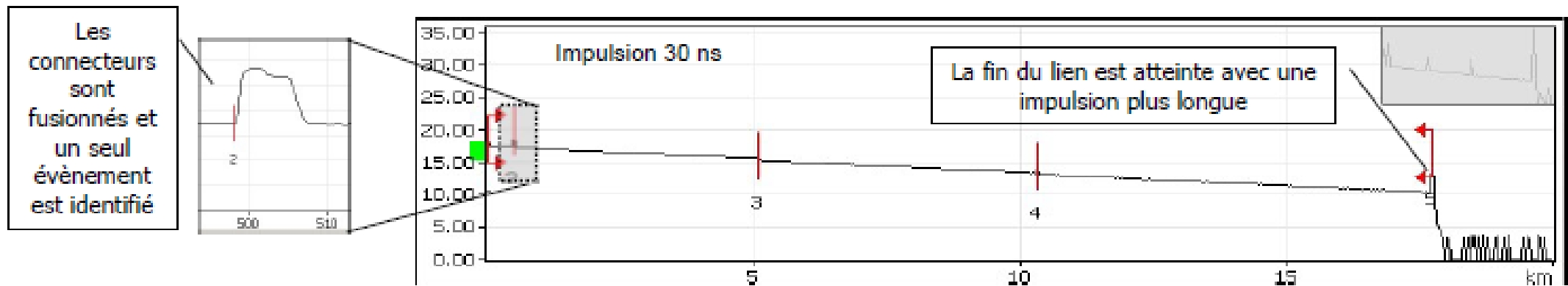
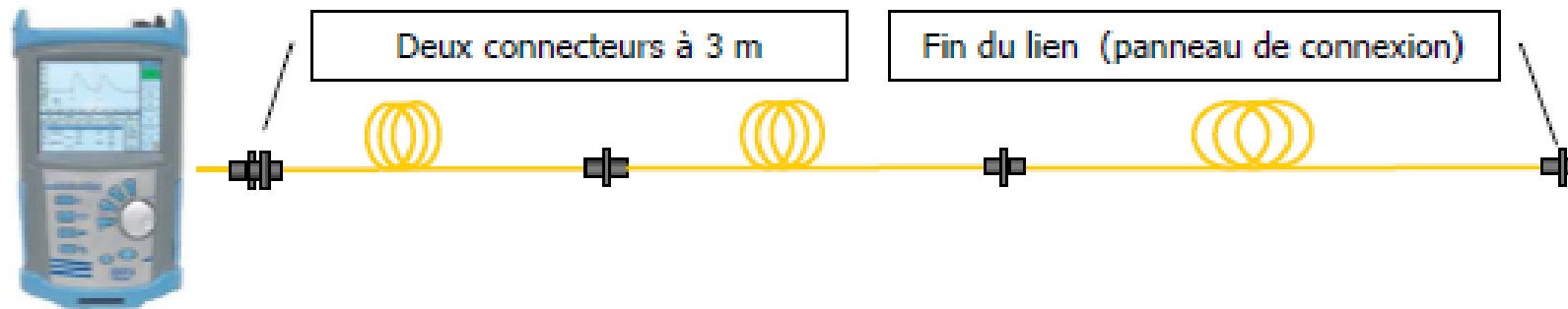
MODULE #2 – OTDR

Les impulsions plus courtes permettent une meilleure résolution mais ont une plage dynamique plus courte.



MODULE #2 – OTDR

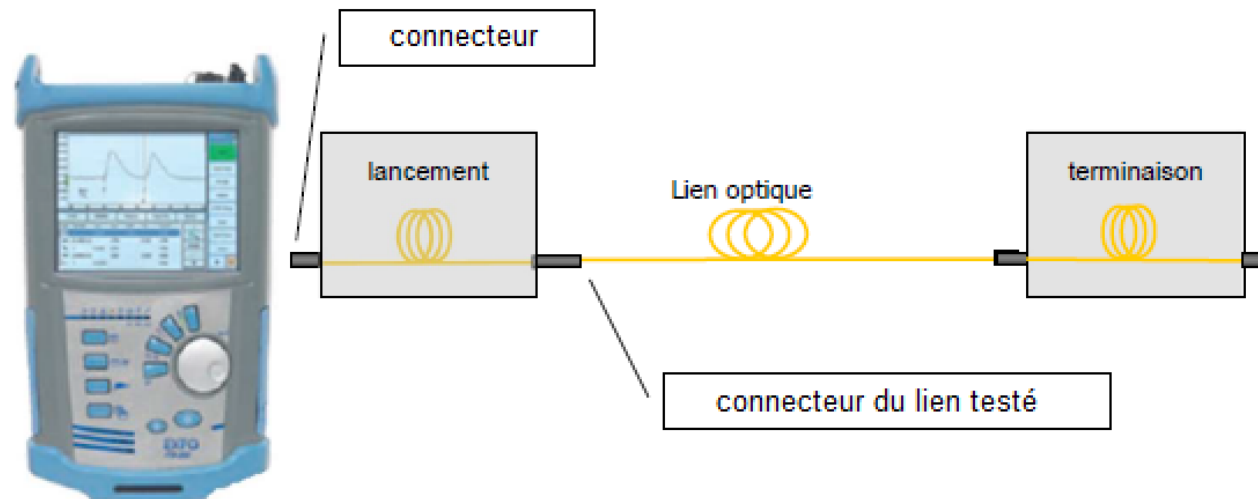
Les impulsions plus longues permettent une meilleure plage dynamique mais ont une moins bonne résolution



MODULE #2 – OTDR

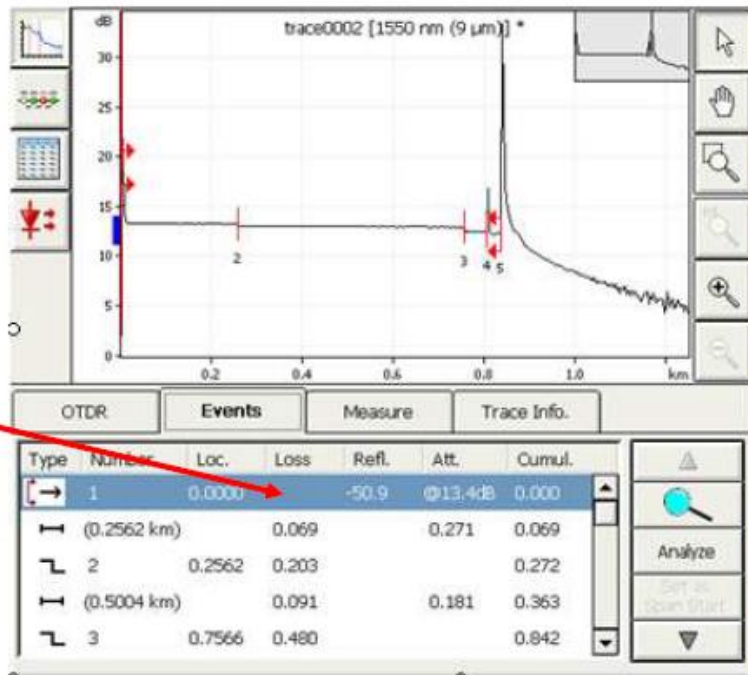
Fibre de lancement (launch) et de terminaison (end)

Une fibre de lancement ou de terminaison est utilisée pour mesurer le premier ou le dernier connecteur sur un lien optique. Cette technique permet l'OTDR d'obtenir une référence de puissance avant et après le connecteur. Ces valeurs sont utilisées pour calculer la perte d'insertion de ces connecteurs dans le tronçon testé.



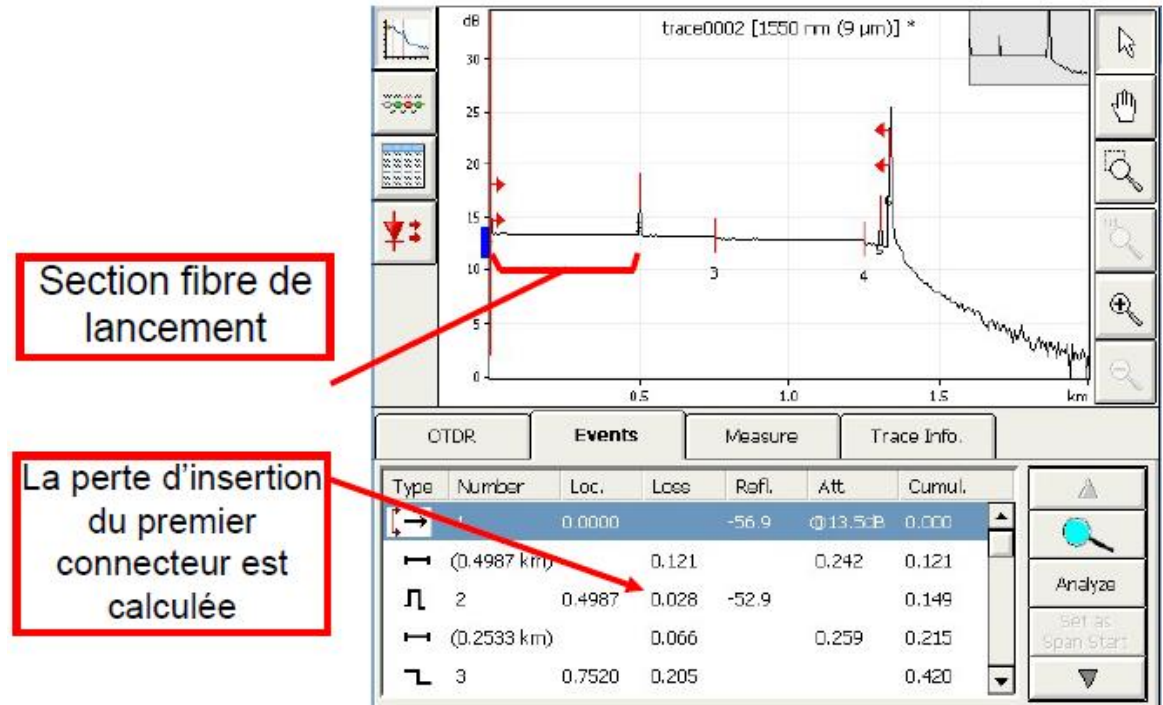
MODULE #2 – OTDR

Sans fibre de lancement:



La perte d'insertion du premier connecteur du lien n'est pas mesurée

Avec fibre de lancement:

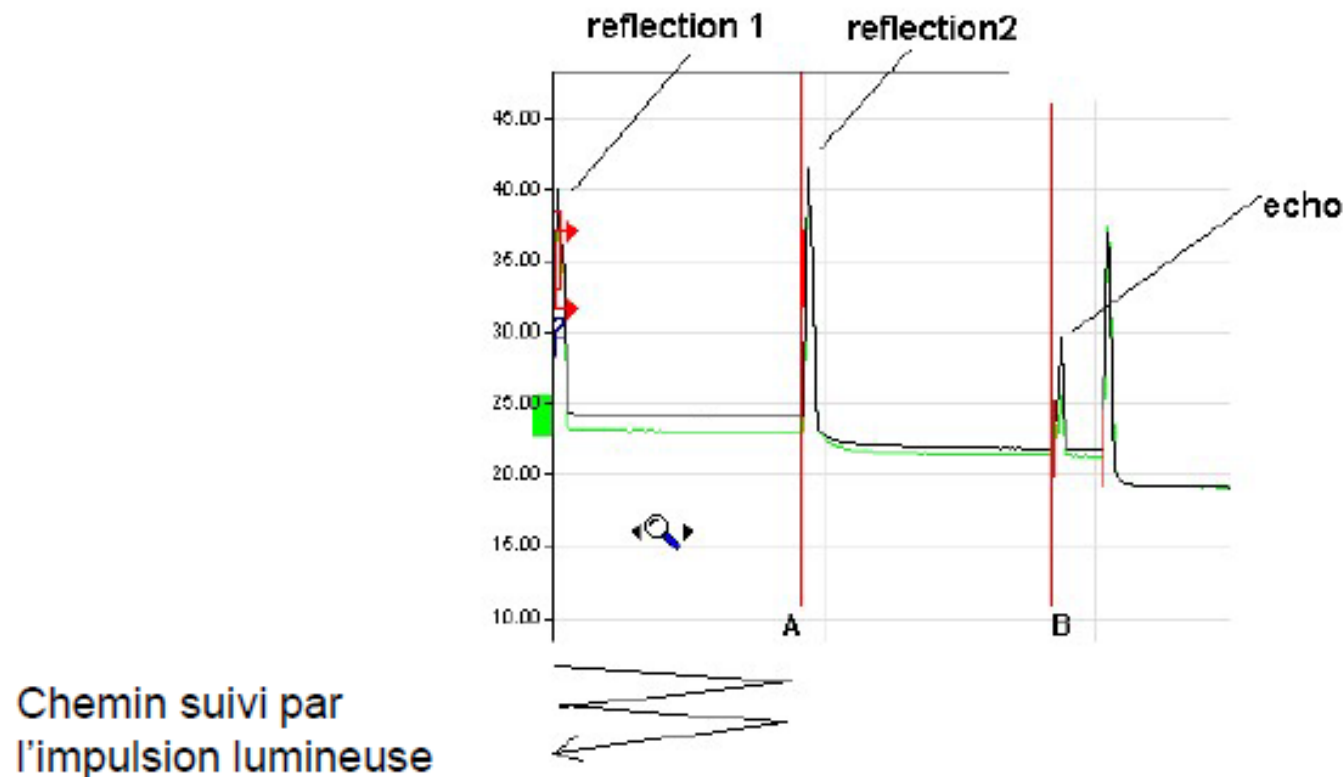


Section fibre de lancement

La perte d'insertion du premier connecteur est calculée

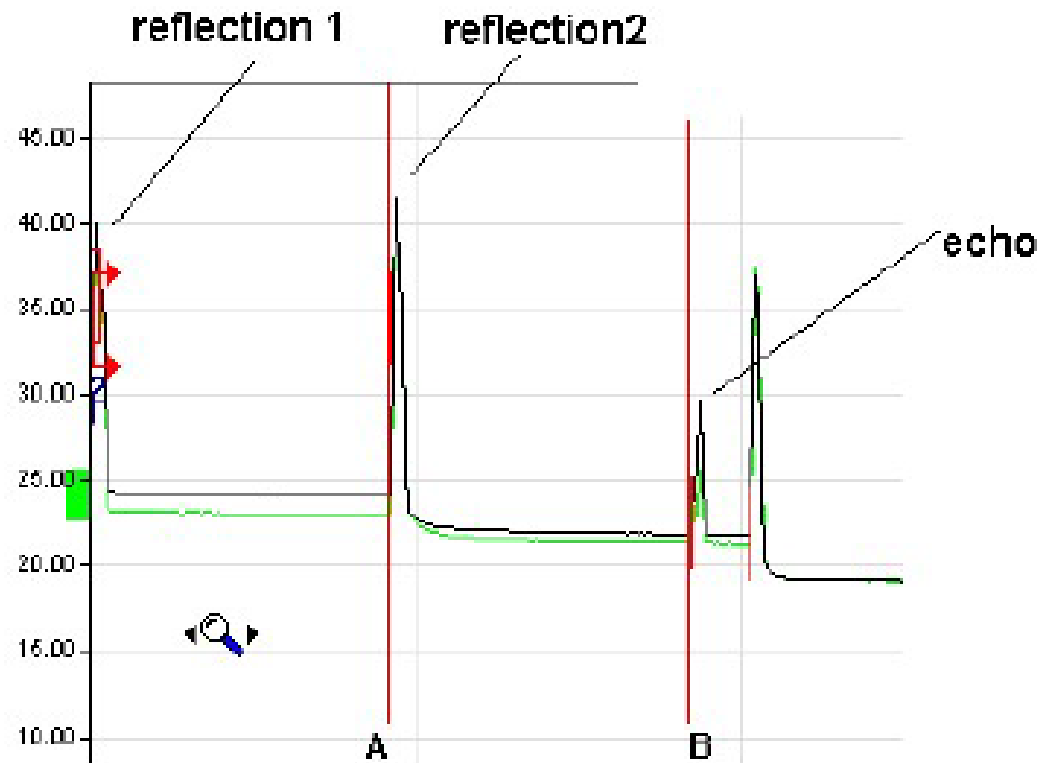
MODULE #2 – OTDR

Écho, ce phénomène est commun avec des liens multimode à cause des **courtes distances** et **hautes réflexions aux connecteurs**. Voici un exemple d'un écho localisé à deux fois la distance de la réflexion du connecteur 2.

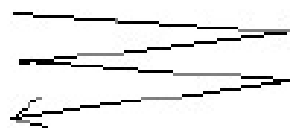


MODULE #2 – OTDR

Aucune atténuation associée au 'faux' événement.



Chemin suivi par
l'impulsion lumineuse



MODULE #2 – Sécurité

Vous ne pouvez pas voir le signal !!!

- A. Ne jamais regarder la sortie d'un signal. (Ex :OTDR)*
- B. Ne pas travailler sur une fibre en fonction.*
- C. Gardez votre espace de travail propre.*
- D. Jetez les bouts de fibres dans un pot.*
- E. Portez des lunettes de sécurité.*
- F. Se protéger des fragments de fibres.*