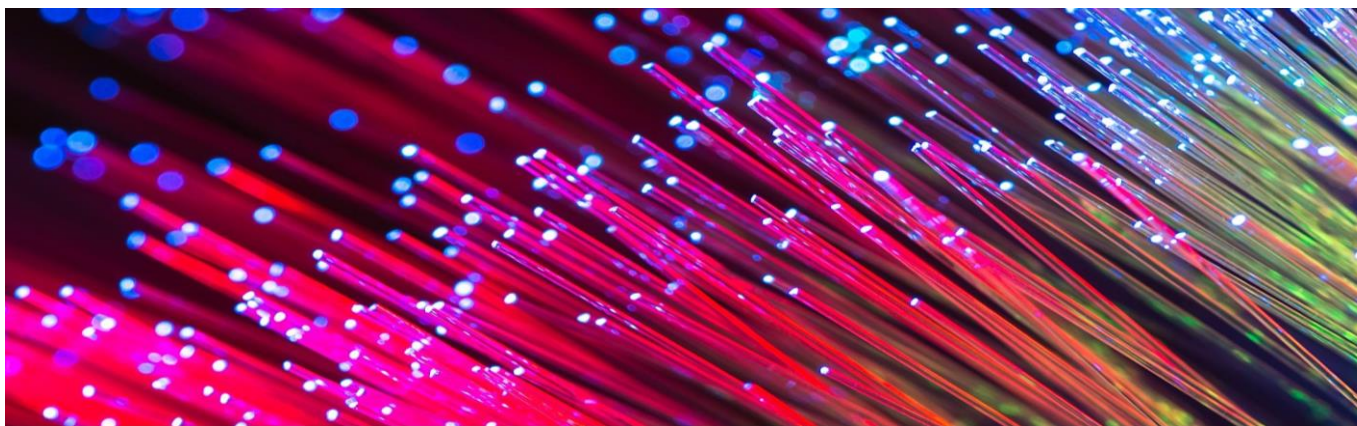




télécom
saint-étienne

école d'ingénieurs
nouvelles technologies

Transmission par fibre optique



Jules Fellouse
Lucas Lescure

Tuteur enseignant : Stéphane Capraro

Introduction	4
1. Propagation dans une fibre optique	4
1.1. Propriétés	4
1.1.a) <i>Bande Passante</i>	4
1.1.b) <i>Modes</i>	5
1.1.c) <i>Dispersion modale</i>	6
1.2. Monomode	6
1.3. Multimode	8
1.3.a) <i>Multimode à indice échelonné</i>	8
1.3.b) <i>Multimode à gradient d'indice</i>	9
2. Modulation du signal	10
2.1. Modulation directe	10
2.2. Modulation externe	11
2.2.a) <i>Modulation par électro-absorption</i>	11
2.2.b) <i>Modulation électro-optique</i>	12
3. Multiplexage	12
3.1. Multiplexage en longueur d'onde	13
3.1.a) <i>Multiplexage par diffraction</i>	13
3.1.b) <i>Multiplexage par cristaux photoniques</i>	14
3.2. Multiplexage en polarité	15
3.3. Multiplexage Temporel	16
Bilan et Conclusion	17
Bibliographie	18

Introduction

Suite à l'invention du laser en 1960 par le physicien Théodore Maiman et l'amélioration des fibres optiques, la transmission de l'information par voie optique a révolutionné le monde de la télécommunication. Aujourd'hui c'est le moyen le plus utilisé en raison de sa faible atténuation par rapport au fil de cuivre. Sur 100 mètres la fibre optique subit une atténuation de 3% tandis que sur la même distance un fil de cuivre porte une atténuation de 90% [1]. De plus, une transmission par fil de cuivre est contrainte à subir des perturbations en raison des interférences électromagnétiques, les différences de température qui varient la résistance du conducteur. En haute fréquence il est presque impossible d'envoyer des données sur des longues distances par le biais de son atténuation, il lui faut de nombreux répéteurs. En contraste, la fibre optique est capable de transmettre un signal sur des kilomètres avec un débit de l'ordre des 1 Go/s [2].

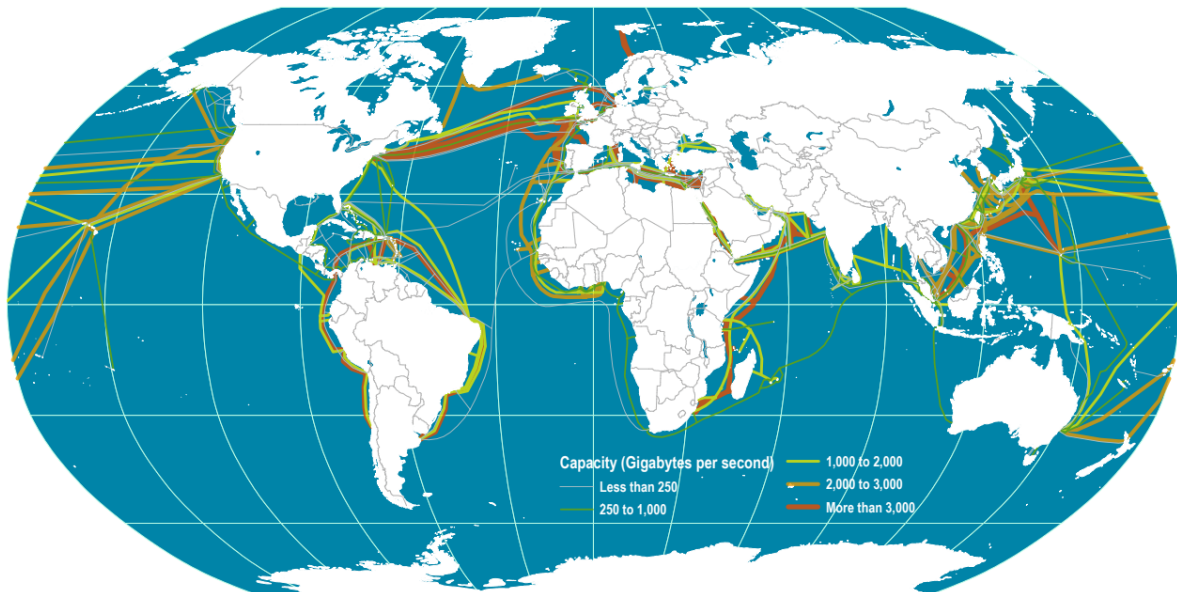


Figure Error! Use the Home tab to apply 0 to the text that you want to appear here..1 Carte des câbles sous-marin de télécommunication

Les propriétés de la fibre optique et les techniques de multiplexage permettent d'atteindre ces chiffres de transmission de données en envoyant plusieurs signaux sur une seule fibre en utilisant l'intégralité de la bande passante disponible. Toutefois, il reste à comprendre comment la lumière est utilisée pour transmettre ces données lors d'une transmission par fibre optique

Dans un premier temps, nous étudierons la propagation de la lumière dans une fibre optique ainsi que les propriétés à prendre en compte lors de ces transmissions. Dans un second lieu, nous chercherons à comprendre comment une information électrique est modulée sur une onde et les problèmes qui peuvent survenir. Ensuite, nous examinerons comment transmettre plusieurs informations sur une seule fibre en étudiant les différents types de multiplexeurs (Mux) et leur fonctionnement. Enfin, nous récapitulerons tout cela en établissant un modèle théorique de transmission optique.

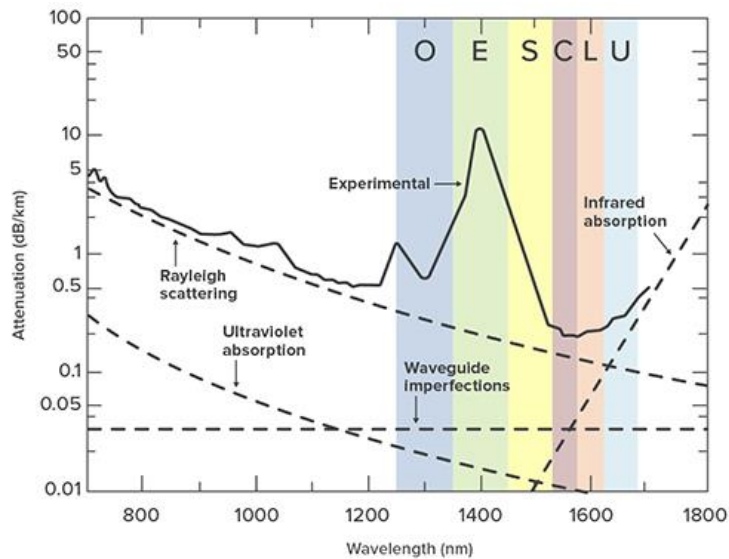
1. Propagation dans une fibre optique

La fibre optique est un élément essentiel pour la transmission d'un signal optique. Cependant, pour travailler avec cet élément, il est important de comprendre comment il fonctionne en étudiant ses différentes propriétés ainsi que les différents types de fibres, tels que la multimode et la monomode, qui ont des applications et des modes de fonctionnement très différents.

1.1. Propriétés

1.1.a) Bande Passante

La première raison qui mène à l'utilisation de la fibre optique comme moyen de transport de l'information vient de sa très faible atténuation. Celle-ci vient du fait que le spectre d'absorption du dioxyde de silicone SiO_2 dans lequel la lumière se propage qui admet une faible atténuation au niveau des longueurs d'ondes entre $1300nm$ et $1650nm$.

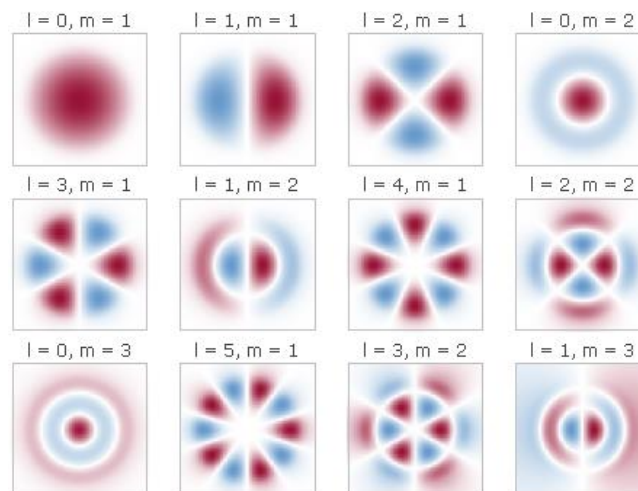


Ces pertes proviennent de la dispersion de Raleigh et de l'absorption, qui disperse ou absorbe certaines longueurs d'ondes empêchant donc l'utilisation de ces longueurs d'onde sur des longues distances [3]. On retrouve aussi des fortes pertes créées par les impuretés sur la fibre, notamment les impuretés OH qui peuvent apparaître lors de l'étape de fabrication [4] responsables des pertes à $1250nm$ et à $1350 - 1450nm$.

Pour la transmission en télécom on a donc tendance à plus utiliser les bandes C et L car celles-ci offrent des atténuations pouvant aller à 0.2 dB/km dans la région des $1.5\mu m$ [5].

1.1.b) Modes

Dans une fibre optique, la lumière peut se propager de manière différente en empruntant des chemins ou des modes distincts. Ces modes sont différenciés par rapport à la mode fondamentale ou d'ordre 0, qui se propage droit au centre de la fibre. Lorsque la lumière ne se propage pas complètement droit, il y a des décalages de phase qui se produisent à chaque rebondissement contre les parois de la fibre [6].



On peut distinguer les différents modes en utilisant la notation LP_{lm} , "polarisation linéaire", où l et m permettent de caractériser les différents modes en décrivant les axes où l'onde s'annule [7]. Par exemple, un LP_{23} comprend 12 modes différents et peut être visualisé comme le produit d'un LP_{21} et d'un LP_{03} .

1.1.c) Dispersion modale

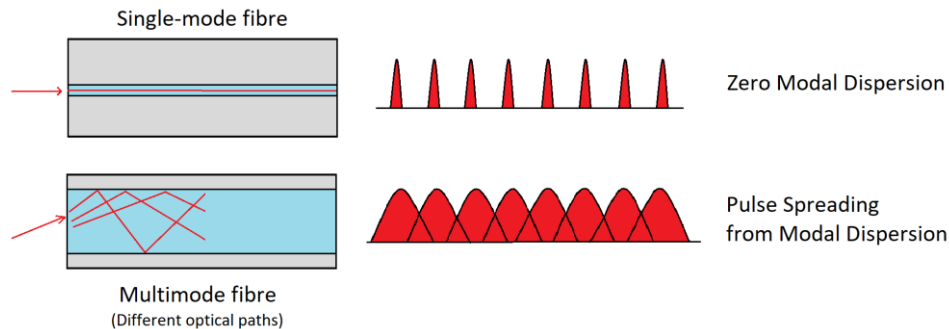


Figure 1.3 Dispersion modale

La dispersion modale est un phénomène qui se produit dans les fibres optiques, où les différents modes de propagation de la lumière se déplacent à différentes vitesses en raison des différents chemins qu'ils empruntent à travers la fibre. Lorsqu'une impulsion de lumière est envoyée à travers la fibre, cette différence de vitesse entraîne l'étalement de l'impulsion dans le temps [7].

Le degré de dispersion modale dépend des propriétés de la fibre, notamment du diamètre du cœur et du profil d'indice de réfraction. Dans une fibre à cœur de diamètre plus grand, il y aura plus de modes de lumière qui peuvent se propager à travers la fibre, ce qui peut entraîner une plus grande dispersion modale [8].

Elle peut être un facteur limitant dans les performances d'un système de fibre optique, car elle peut réduire la vitesse à laquelle les données peuvent être transmises et la distance sur laquelle les données peuvent être transmises sans erreurs. C'est pourquoi il est important de choisir une fibre adéquate en fonction des besoins de la transmission.

1.2. Monomode

La fibre monomode est le type de fibre optique le plus utilisé dans le monde des télécommunications car elle a l'avantage de pouvoir transmettre des données avec un haut débit, le tout avec peu d'atténuation sur de longues distances [9]. Elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 100 Go/s sur une portée de 100 Km [10].

Nous avons vu précédemment que le nombre de modes dans une fibre optique était facteur de perturbations limitant la bande passante maximale autorisée. Comme son nom l'indique la fibre monomode a l'avantage de n'autoriser qu'un seul mode d'onde à traverser le cœur de sa fibre. Déterminons alors comment cette fibre parvient à faire circuler un seul mode d'onde.

Tout d'abord, il existe une formule établie permettant de déterminer le nombre de modes dans une fibre optique et nous allons étudier ses variables pour tenter de diminuer ce nombre.

$$M = \frac{V^2}{2}$$

Le nombre de modes M est facteur de V correspondant à la fréquence normalisée. Cette fréquence normalisée peut être calculée de la façon suivante [11] :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \cdot \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Telle que a désigne le rayon du cœur de la fibre, λ_0 la longueur d'onde qui se propage dans la fibre, n_c l'indice de réfraction du cœur et n_g l'indice de réfraction de la gaine.

Le but est de diminuer la fréquence normalisée un maximum de façon à obtenir dans l'idéal un seul mode de propagation de la lumière. Pour ce faire il semble raisonnable de diminuer considérablement le rayon du cœur de la fibre optique et d'augmenter la longueur d'onde transmise. C'est d'ailleurs ce principe qui a été appliqué, les fibres monomodes possèdent un cœur de diamètre très faible (environ $9 \mu\text{m}$) [11] et une longueur d'onde située entre 1310 nm et 1550 nm [12].

En revanche, la valeur de la fréquence normalisée ne doit pas être trop faible au risque de ne plus transmettre de lumière [13]. On considère que la valeur normalisée optimale est située aux alentours de 2,405 car cette valeur permet de transmettre une quantité importante d'intensité lumineuse tout en conservant un seul mode d'onde. En revanche une valeur de V légèrement supérieure à 2,405 engendrera le passage de plusieurs modes d'ondes, c'est pour cela que les valeurs réellement utilisées se situent entre 2 et 2,405 [8].

Dans le cas où V est parfaitement fixé à 2,405, il suffit que la longueur d'onde diminue faiblement pour que la fibre devienne multimode. Cette longueur d'onde est appelée longueur d'onde de coupure (cut-off wavelength) [8].

Désormais intéressons-nous au seul mode d'onde propagé par les fibres monomodes. Celui-ci est nommé mode fondamental quasi-gaussien (LP_{01}) et possède des propriétés particulières. En effet, il a l'avantage d'être à la source d'une onde lumineuse dont l'intensité maximale est située au centre de la fibre optique.

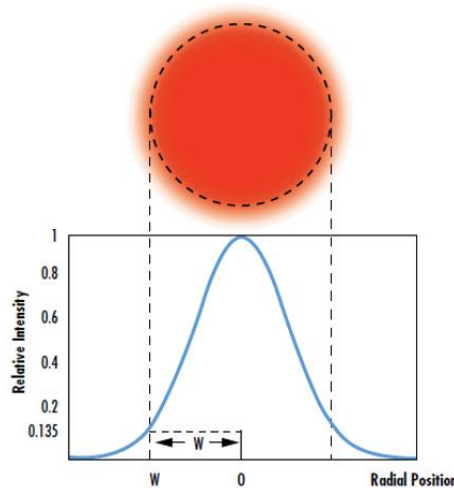


Figure 1.4 Profil d'intensité relatif transversale d'un faisceau gaussien en fonction de sa position radiale

Tandis que pour d'autres modes d'ondes l'amplitude maximale de leurs ondes n'est pas située au niveau du centre du cœur de la fibre optique mais plutôt au niveau de la gaine optique. Ce genre de phénomène engendre donc une atténuation du signal optique.

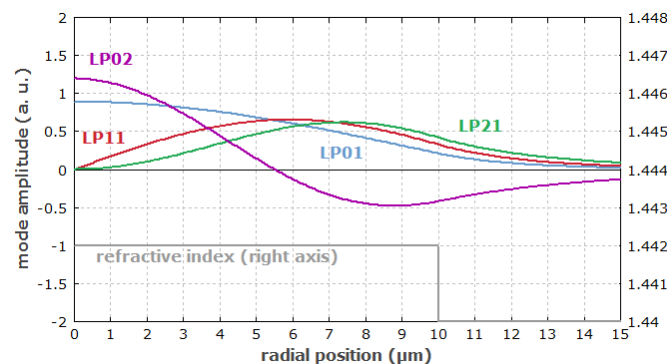


Figure 1.5 Amplitude de modes d'ondes linéairement polarisés (LP) en fonction de leur position radiale

De plus, ce mode est considéré comme le fondamental c'est à dire qu'il parcourt la distance la moins longue possible dans la fibre optique en suivant l'axe du cœur de la fibre optique.

1.3. Multimode

La fibre multimode est un type de fibre optique utilisée pour les communications courtes distances car celle-ci est largement soumise au phénomène de dispersion. Elle présente cependant l'avantage d'être simple et peu coûteuse à fabriquer.

Nous nous intéresserons à deux types de fibres optiques multimode :

- La fibre à saut d'indice, la plus simple à concevoir mais la très sujet à la dispersion. Elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 100 Mo/s sur 2 km au maximum.
- La fibre à gradient d'indice, plus compliqué à fabriquer mais permettant d'atteindre une bande passante plus élevée. Son débit est de 1 Go/s sur une portée maximale de 2 km [10].

1.3.a) Multimode à indice échelonné

La fibre optique à saut d'indice est conçue de telle manière à ce que l'indice de réfraction n soit le même dans tout le cœur de la fibre et diminué dans la gaine.

Dans ce cas, pour que la lumière se propage correctement dans la fibre optique celle-ci doit faire son trajet dans le cœur de la fibre. Ce trajet se fait par le changement de milieu cœur-gaine. La partie supérieure de la gaine va réfléchir totalement le rayon incident qui va se diriger vers la gaine inférieure, cette gaine inférieure va à son tour réfléchir le rayon vers la gaine supérieure [14].

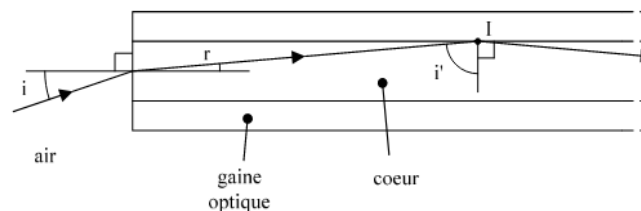


Figure 1.6 Schéma du trajet d'un rayon optique dans une fibre optique multimode

En revanche, cette réflexion totale se fait sous certaines conditions : l'angle i' entre le rayon et la gaine doit être supérieur à un angle limite α . Si l'angle i' est inférieur à α alors il y a un phénomène de refraction se produisant au niveau de la gaine, c'est-à-dire que le rayon n'est pas guidé vers le cœur mais vers la gaine. Cette angle limite se calcule de la façon suivante :

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{cœur}}}$$

En réalité, cet angle limite a peu d'importance car lorsqu'un laser envoie une onde lumineuse dans la fibre optique, celle-ci peut être décomposé en de nombreux rayons. Sachant que pour chaque rayon dès que l'angle incident i est différent alors l'angle i' est lui aussi différent et satisfait ou non l'angle limite. Une partie des rayons seront donc guidés tandis que d'autres ne le seront pas. Chaque rayon guidé parcourra un chemin différent des autres du fait de son angle incident singulier. Et c'est à cause des nombreux chemins empruntés par la lumière que cette fibre est appelée multimode.

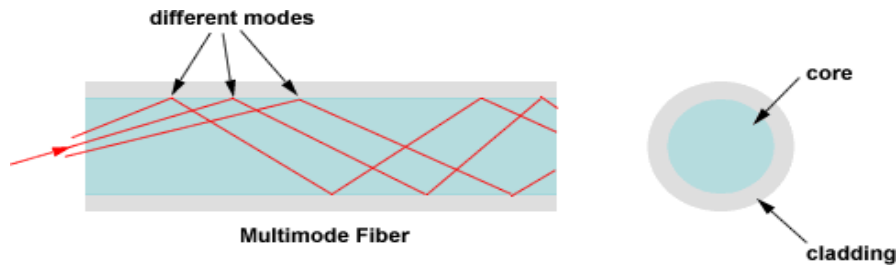


Figure 1.7 : Schéma des différents modes d'ondes dans une fibre optique multimode

Comme plusieurs chemins sont empruntés par la lumière, certains rayons parcourent un trajet plus long que d'autres : lorsque l'angle entre le rayon et la gaine est important alors cela engendre de nombreux phénomènes de réflexion donc un trajet plus long et inversement. Cela va créer une rémanence et une avance de l'onde d'origine en sortie de fibre. On observera alors une impulsion optique étalée à la sortie par rapport à l'origine : c'est la dispersion modale [10].

La conclusion est la suivante : un nombre important de modes dans une fibre optique augmentera le phénomène de dispersion modale qui lui-même accentuera l'interférence inter-symbole, limitant ainsi la bande passante de la fibre optique. Nous verrons par la suite comment la fibre à gradient d'indice permet de modérer ce phénomène.

1.3.b) Multimode à gradient d'indice

La fibre optique à gradient d'indice diffère de la précédente car l'indice de réfraction du cœur n'est pas uniforme. Cet indice va décroître progressivement par rapport à l'axe horizontal de la fibre jusqu'à atteindre l'indice de la gaine optique.

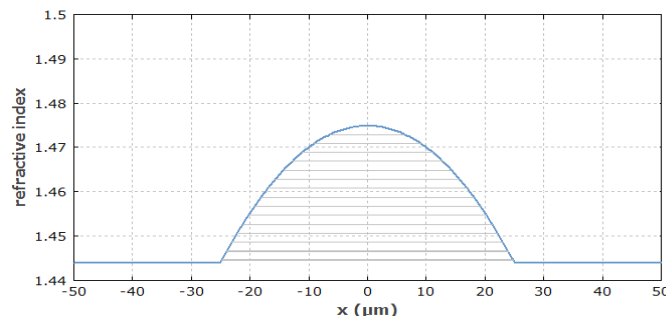


Figure 1.8 Profil d'indice de réfraction d'une fibre à gradient d'indice

L'indice du cœur optique diminue en suivant une loi parabolique.

Contrairement à la fibre optique à saut d'indice, cette fibre ne s'appuie pas sur le phénomène de réflexion totale mais sur celui de réfraction. En effet, le changement progressif d'indice dans le cœur génère une réfraction continue du rayon traversant la fibre. Cela va alors courber le rayon vers l'axe du cœur du fait des innombrables phénomènes de réfraction occurants. Le rayon n'atteint d'ailleurs jamais la gaine, celui-ci est toujours suffisamment réfracté avant. C'est ce phénomène de réfraction à répétition qui est à l'origine de la forme sinusoïdale des rayons. [15][16]

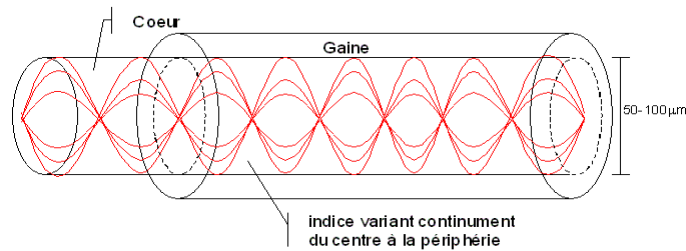


Figure 1.9 Propagation des rayons lumineux dans une fibre multimode à gradient d'indice

De plus, ce type de fibre possède un avantage permettant d'atténuer la dispersion modale. On sait que la vitesse d'une onde dans un milieu vaut $v = \frac{c}{n}$ où c correspond à la célérité de la lumière et n à l'indice de réfraction du milieu. Ainsi comme l'indice de réfraction est plus important au niveau de l'axe de la fibre que vers ses bords alors la vitesse sera moins importante au niveau de l'axe de la fibre que vers ses bords. Cette différence de vitesse permet aux modes d'ondes prenant de long trajet vers les bords de gagner en vitesse par rapport aux modes d'ondes prenant de plus court trajet vers le centre [15].

Cette vitesse variable permet de considérablement diminuer l'effet de dispersion intermodale car tous les modes arrivent au même moment en sortie de fibre.

2. Modulation du signal

Pour améliorer la transmission de données par fibres optiques, il est nécessaire d'utiliser des modulateurs qui permettent de moduler le signal photonique transmis. Il existe plusieurs types de modulateurs, tels que les modulateurs acousto-optiques, électro-optiques, d'électro-absorption, plasmiques, à cristal liquide, etc. [17]. Cependant, les modulateurs à électro-absorption (EAM) et électro-optiques (EOM), qui fonctionnent selon un principe similaire, sont les plus intéressants.

Les modulateurs mentionnés précédemment sont des modulateurs externes, c'est-à-dire qu'ils utilisent une source lumineuse continue pour moduler l'intensité de la lumière transmise. Cependant, il existe également un autre type de modulation appelé modulation directe, qui consiste à moduler directement le signal optique en allumant et en éteignant la source de lumière. Cette technique de modulation peut toutefois altérer la qualité de la transmission en raison de la discontinuité du signal optique.

2.1. Modulation directe

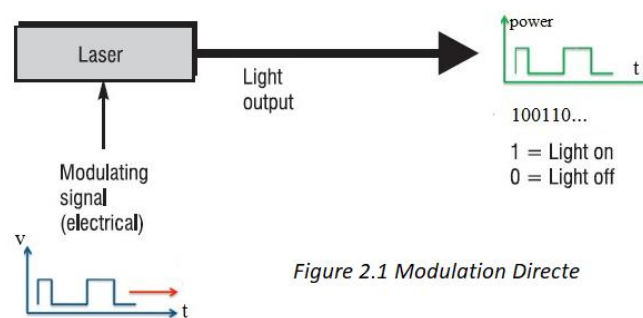


Figure 2.1 Modulation Directe

La modulation directe est simple, rentable et efficace pour les basses fréquences inférieures à 1 GHz [18]. Le problème de cette méthode consistant à allumer et éteindre directement la source est qu'il y a un délai entre les transitions entre les deux états. Lorsque la source de lumière varie constamment entre ces deux états, le gain varie d'un état très faible à un état très élevé. Et étant donné que l'indice de réfraction est influencé par ce gain, nous obtenons alors des variations de l'indice de réfraction [19]. Cette variation à des fréquences élevées entraîne un effet de "Chirp" où le pulse n'est plus transmis à une fréquence fixe. La fréquence centrale a tendance à varier comme nous pouvons le voir sur [Figure 2.2] :

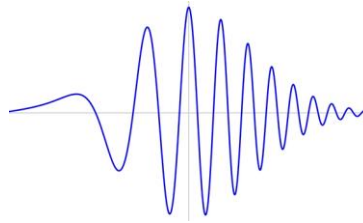


Figure 2.2 Effet de "Chirp"

Lorsque qu'une pulsation affectée par cet effet se propage, chacune des fréquences se propage plus ou moins lentement ce qui étend la pulsation initiale. Ceci pose un problème important sur des transmissions optiques car à haute fréquence, le fait que cette pulsation s'étende signifie qu'elle peut interférer avec les pulsations voisines, convertissant un bit voisin 0 à 1 par exemple [19].

2.2. Modulation externe

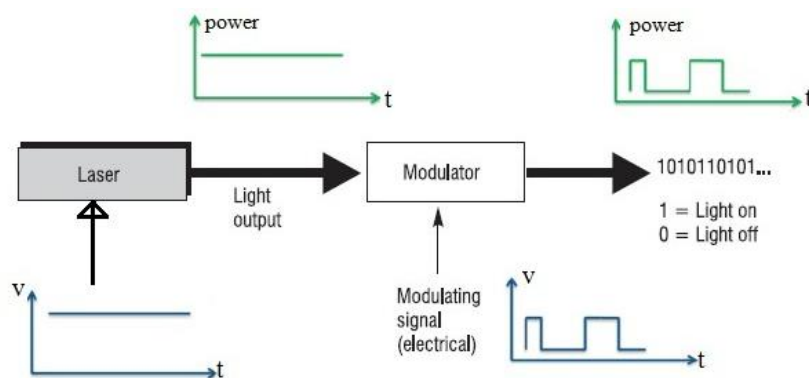


Figure 2.3 Modulation Externe

Pour éviter l'effet de "Chirp", qui peut causer de la distorsion et réduire la qualité d'un signal, on peut utiliser un modulateur externe. Ce dispositif utilise des effets électro-absorption ou électro-optiques pour moduler le signal sans causer un effet de "Chirp" notable. Ce type de modulation est souvent utilisé dans les transmissions à haute fréquence, car il permet d'être moins susceptible aux perturbations et à la distorsion du signal. Le signal peut être transmis de manière plus précise, ce qui permet une communication plus claire et fiable.

2.2.a) Modulation par électro-absorption

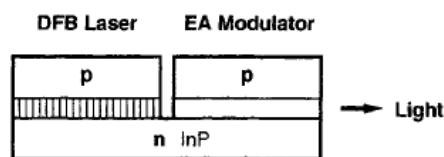


Figure 2.4 EAM intégré avec un laser

L'avantage de ce type de modulation c'est le fait qu'elle peut être intégrée à la source continue lumière puisqu'elle est constituée des mêmes matériaux que celle-ci et nécessite une faible tension de fonctionnement, typiquement entre 1.5 et 4V [20].

L'architecture consiste à intercaler un semi-conducteur entre une jonction PN. En appliquant un courant aux bornes, on crée un champ électrique à l'intérieur du semi-conducteur, ce qui a pour effet de modifier le spectre d'absorption de celui-ci par l'effet Franz-Keldysh [21]. La modification de ce spectre a une influence sur la bande interdite du semi-conducteur, qui est responsable de l'absorption des longueurs d'onde.

Lorsqu'il n'y a pas de tension appliquée à la jonction, la bande interdite est suffisamment étroite pour laisser passer la longueur d'onde du laser. En revanche, lorsqu'une tension est appliquée aux bornes, la bande interdite s'agrandit de manière à absorber la lumière du laser [20].

C'est un modulateur souvent utilisé car il permet d'avoir une bande passante de 10 GHz et nécessite une faible tension de commande pour moduler le laser, contrairement aux EOM qui requièrent une dizaine de volts pour réaliser la même modulation.

2.2.b) Modulation électro-optique

Les EOM sont un type de modulateur externe utilisant une modulation de phase et de l'interférence pour obtenir une modulation de l'intensité du laser. Le terme électro-optique vient du fait qu'un champ électrique permet la modulation du signal optique [22]. Le plus connu de ces types de modulateur est la modulateur Mach-Zehnder.

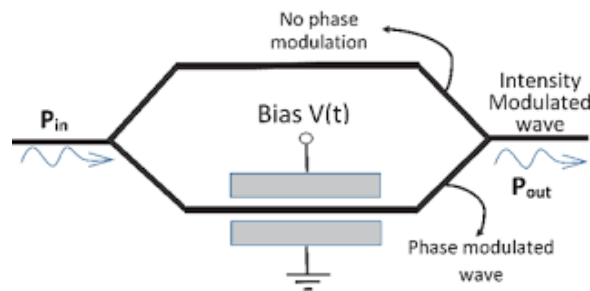


Figure 2.5 Modulateur Mach-Zehnder

Il s'agit d'une structure constituée de deux branches presque identiques, qui sont faites de silicone sur isolant SOI [22]. L'une de ces branches porte des électrodes sur le guide d'onde. Ce matériau a été choisi de manière à ce que son indice de réfraction puisse être modifié par un champ électrique externe [23]. En appliquant une tension aux électrodes, on peut donc modifier la vitesse de propagation de la lumière dans ce matériau.

Cela est crucial, car il devient alors possible de moduler la phase de cette onde en fonction d'une tension donnée. En choisissant soigneusement cette tension, on peut imposer un déphasage de π sur l'onde. Lorsque cette onde modulée se recombine avec celle qui n'a pas été modulée, la somme de ces deux ondes se décompose, empêchant la lumière de passer [20].

Si aucune tension n'est appliquée au SOI, il n'y a pas de déphasage entre les deux ondes, elles se recombinent donc en phase et reconstituent l'onde qui a été transmise en entrée.

3. Multiplexage

Comme nous avons vu dans la partie sur les propagations, La fibre optique possède une bande passante dans laquelle se trouvent les longueurs d'onde les moins atténuées et qui sont donc utilisées pour la transmission d'informations. Cette bande passante peut être exploitée pour transmettre des téraoctets de données grâce aux Mux, qui permettent d'utiliser l'intégralité de la plage de fréquence.

Après la modulation de plusieurs signaux à l'aide d'un modulateur externe, il est nécessaire de combiner ces différentes longueurs d'onde sur une seule fibre optique. Pour ce faire, on utilise un Mux. Nous allons dans certain cas étudier le fonctionnement des démultiplexeurs (DeMux) et leur logique inverse pour revenir au Mux.

Il existe principalement 3 types de Mux, le Mux en longueur d'onde, en polarité, et temporel. En anglais, Wave Division Multiplexing (WDM), Polarisation Division Multiplexing (PDM) et Time Division Multiplexing (TDM).

Chaque type de Mux sera traité mais nous nous intéresserons plus au WDM car c'est celui le plus utilisé et le plus important pour traiter des données optiques.

3.1. Multiplexage en longueur d'onde

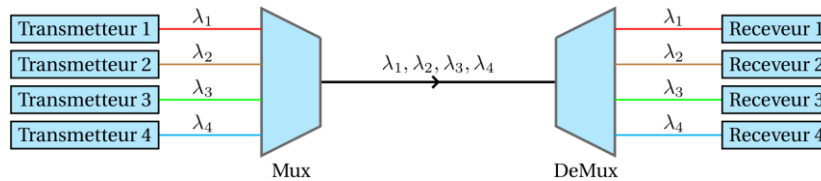


Figure 3.1 Schéma du WDM

Le multiplexage en WDM consiste à multiplexer des signaux en fonction de leurs longueurs d'onde, c'est-à-dire à les différencier selon cette caractéristique. Il existe trois principes de base pour ce type de multiplexage : le multiplexage basé sur la diffraction, le multiplexage basé sur les cristaux photoniques et le multiplexage basé sur les interférences.

Le multiplexage basé sur les interférences repose sur l'utilisation de filtres par interféromètre de Mach-Zehnder qui appliquent des retards à différentes longueurs d'onde. La longueur des parcours des faisceaux est ajustée de manière à permettre la combinaison de ces faisceaux [24]. Pour des raisons de simplicité, nous ne traiterons pas ce type de multiplexage.

3.1.a) Multiplexage par diffraction

Le Mux à diffraction repose sur des éléments dispersifs pour décomposer la lumière en longueurs d'ondes différentes, ceci permet de séparer les ondes spatialement de façon à pouvoir être traitées indépendamment. On réalise ceci avec un réseau de diffraction, un prisme ou bien des cristaux photoniques.

Le Mux à réseau de diffraction, ou Arrayed Waveguide Grating (AWG), sépare plusieurs faisceaux de la même source dans des guides d'ondes de longueur différentes ΔL . Cette variation de longueur entre les guides d'ondes impose un retard au faisceau qui le traverse. Ces guides d'ondes sont ensuite raccordés à un milieu de propagation libre dans lequel les ondes provenant des différents guides d'ondes vont interférer entre elles et faire apparaître plusieurs franges de longueurs d'ondes différentes séparées de façon spatiale. Il ne reste donc plus qu'à récupérer ces longueurs d'ondes dans des guides d'onde de sortie pour réaliser le démultiplexage.

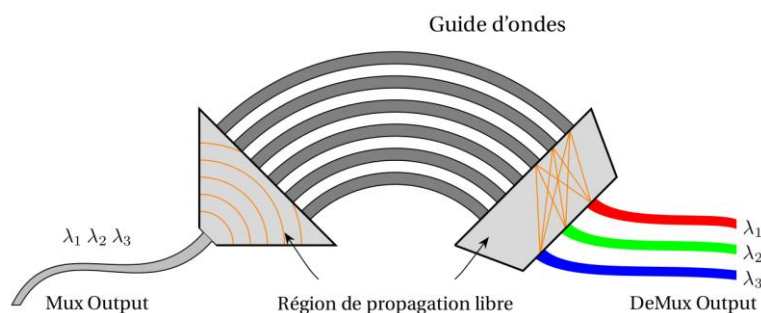


Figure 3.2 Schéma WDM avec AWG

Il est possible de calculer et déterminer les longueurs d'ondes obtenues au DeMux en établissant un modèle équivalent. On mettra donc en évidence l'efficacité et le fonctionnement de cette méthode de démultiplexage.

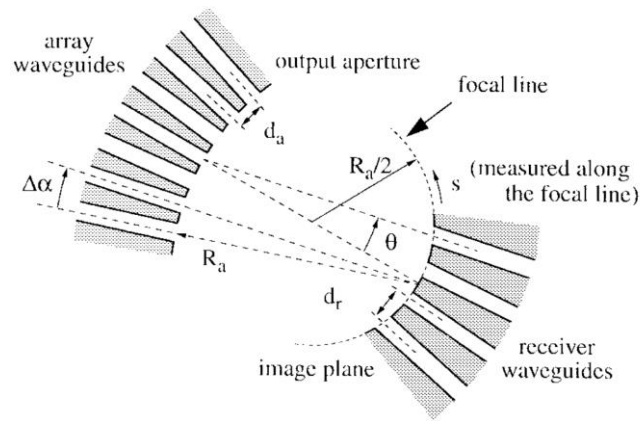


Figure 3.3 Région de propagation libre droite du DeMux

Ce qu'il faut retenir c'est le fait que les entrées des guides d'onde au niveau de la région droite de propagation libre agissent similairement à la focale d'une lentille. Ceci vient du fait que la région de propagation libre n'est pas plane, et légèrement courbée. Cette courbure focalise donc les ondes similairement à un fonctionnement de lentille [25]. De plus en raison des différences de longueur des différents guides d'ondes ΔL , et leur indice de réfraction n_g il s'effectue un décalage de phase $\Delta\phi$ entre les différentes ondes. Ce décalage s'exprime de la manière suivante [26] :

$$\Delta\phi = \beta \Delta L$$

Telle que la constante de propagation des guides d'ondes s'écrit :

$$\beta = \frac{2\pi n_g}{\lambda}$$

Par interférence et dispersion de ses différentes ondes s'établit des franges de diffraction dont la position varie selon la fréquence de l'onde $f = \frac{c}{\lambda}$.

On peut retrouver cette relation grâce à la dispersion de ce réseau de diffraction comme étant la variation du déplacement sur le plan image par rapport à la variation de fréquence de l'onde [26].

$$\Delta s = \frac{1}{f_c} \cdot \frac{n_g}{n_{RPL}} \cdot \frac{\Delta L R_\alpha}{d_\alpha} \cdot \Delta f$$

Avec f_c la fréquence centrale des ondes à démultiplexer, n_{RPL} les indice de réfraction dans la région de propagation libre, d_α l'écartement entre des entrées des guides d'onde, R_α la distance entre les guides d'onde d'entrées et de sortie, et Δs le déplacement du point focal par unité de variation de fréquence [26].

Ainsi pour ce DeMux on joue sur la différence de longueur des guides d'ondes pour établir l'espacement entre des différentes longueur d'onde permettant de séparer chacune l'une de l'autre afin d'être traitées séparément en sortie.

3.1.b) Multiplexage par cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont une autre alternative de multiplexage utilisant un matériel diélectrique permettant d'établir deux milieux séparés de façon périodique. Cette configuration particulière détermine alors où l'onde a le droit ou pas de se propager. C'est alors ainsi que l'on peut construire des guides d'onde ou bien des cavités résonantes permettant d'extraire une certaine longueur d'onde.

Une cavité résonante est une région de l'espace où le champ électromagnétique peut osciller à certaines fréquences de résonance, qui sont déterminées par la taille et la forme de la cavité. Lorsqu'une lumière incidente sur une cavité résonante dans un cristal photonique, seules certaines longueurs d'onde seront en mesure de résonner à l'intérieur de la cavité, tandis que d'autres seront réfléchies [27].

En concevant le cristal photonique avec une périodicité spécifique, il est possible de créer une cavité résonante qui est seulement résonante à certaines longueurs d'onde, ce qui permet au cristal photonique d'agir comme un filtre. Lorsqu'un signal multiplexé est envoyé à travers le cristal photonique, les différentes longueurs d'onde seront soit transmises soit réfléchies en fonction de leur capacité à résonner à l'intérieur de la cavité. Cela permet au cristal photonique de séparer le signal en ses canaux individuels

Sur [Fig.3.3] on peut constater cette architecture avec les cavités résonantes.

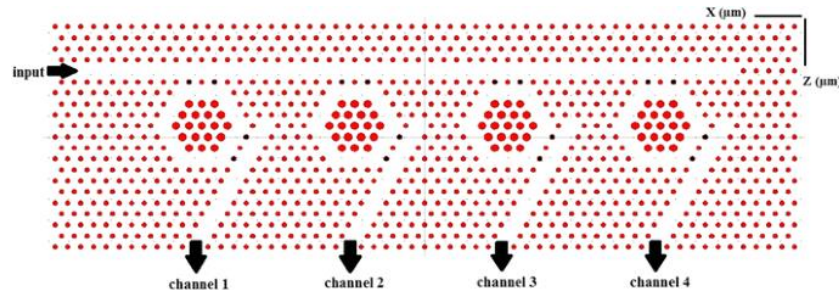


Figure 3.4 Architecture d'un cristal photonique

La séparation entre les deux milieux diélectriques est donnée par la relation $a_n = a_1 - (n - 1)[nm]$ [28]. Avec a_1 la séparation pour la première cavité et n le nombre de cavités voulues. De cette manière on peut donc choisir d'extraire plusieurs longueurs d'onde spécifique. Pour un DeMux à 8 chaînes sur une bande passante de $1550nm$ à $1565nm$ la séparation entre ces cavités peut être figurés celons la longueur d'onde à démultiplexer [28]

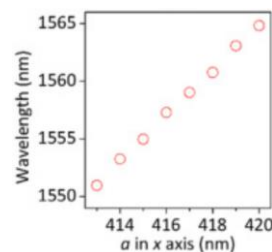


Figure 3.5 Taille de la séparation a en fonction de la longueur d'onde

3.2. Multiplexage en polarité

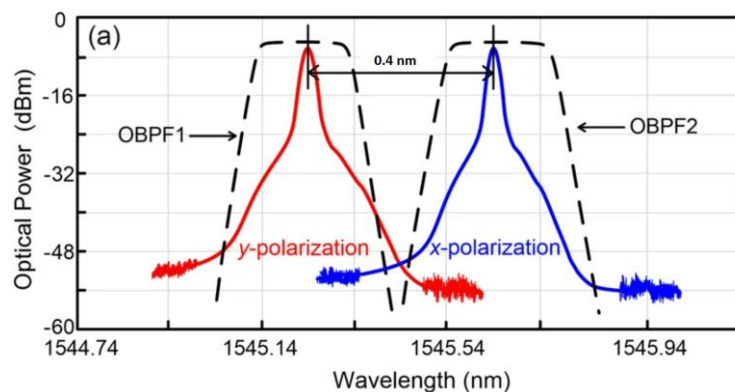


Figure 3.6 Polarisation x, y d'un PDM

Le PDM est une façon efficace de pouvoir doubler le débit sur une transmission en profitant de la polarisation de la lumière comme un autre intermédiaire de multiplexage. Cependant quand on essaie d'appliquer le PDM

pour une transmission optique on rencontre un problème d'interférence entre les polarités. Ceci est dû au fait qu'une dispersion du mode de polarisation (PMD) causé par des imperfections dans le milieu de propagation modifie la polarité du signal en fonction de sa fréquence. Plus la ligne de transmission sera longue et plus cette interférence sera importante. On peut exprimer cette modification de la polarité en utilisant les matrices de Jones pour caractériser les polarisations [29] :

$$\vec{E}_{out}(\omega) = U_{pol} U_{PMD} \vec{E}_{in}(\omega)$$

Avec U_{pol} et U_{PMD} étant les matrices de Jones caractérisant la polarisation de l'onde et la polarisation engendré par le PMD.

C'est pourquoi pour faire marcher le PDM il faut polariser deux longueurs d'ondes différentes, sans séparer ces deux longueurs d'ondes il ne sera pas possible de les démultiplexer en utilisant un filtre à bande passante (OBPF) à cause des interférences entre ces deux polarisations, que l'on appelle le "polarisation cross-talk", ce qui peut endommager significativement la performance du Mux [30].

La PDM fonctionne cependant grâce au fait que les deux longueurs d'ondes sur lesquelles on effectue la PDM sont espacés d'environ $0.4nm$ ce qui est 2 fois plus petit que la séparation $0.8nm$ entre les longueurs d'ondes en WDM dense [31]. Evitant ainsi les interférences entre les longueurs d'onde sur une même polarisation.

On combine ensuite les deux polarisations pour l'envoyer sur la fibre optique, ensuite lors de la réception du signal on applique simplement un OBPF pour que chaque donnée puisse être traitée séparément à la réception.

3.3. Multiplexage Temporel

L'OTDM est une dernière méthode de multiplexage permettant sur un même moyen de transmission d'augmenter le débit d'information. Il n'est généralement pas très utilisé car la bande passante offerte par le WDM est souvent suffisante mais cependant il existe encore des applications de ce Mux [32].

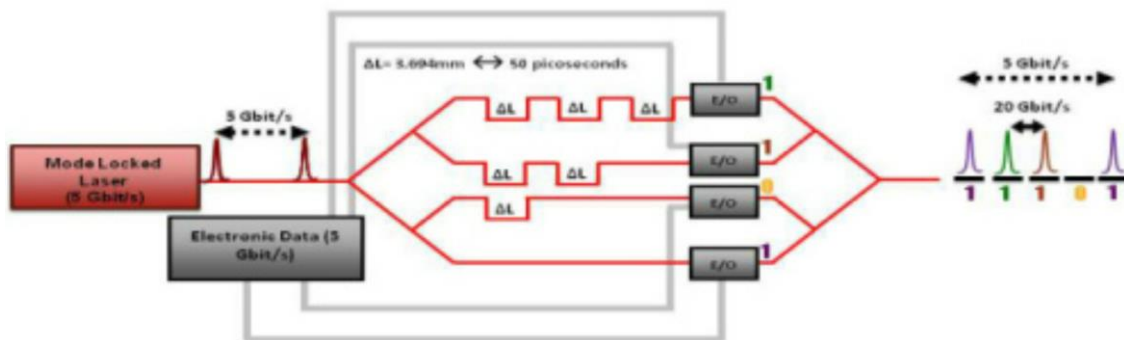


Figure 3.7 Schéma fonctionnel du TDM

Un signal de pulsation périodique est utilisé comme une source de signal que l'on va ensuite séparer sur différentes guides d'onde sur lesquels on y applique un retard permettant de décaler les pulsations les unes des autres. On module ensuite l'information sur chaque chaîne différente avant de les recombinaison et de l'envoyer en sortie. On permet dans le cas de la Figure 3.6 de transformer un signal de $5Go/s$ à $20Go/s$ [33].

Pour appliquer ces retards on va augmenter la distance parcourue par la lumière sur ces guides d'onde différents avec des spirales de délai. On préfère utiliser ces spirales car il existe une contrainte sur la courbature minimale dans l'étape de la fabrication R_{min} , il n'est donc pas pratique de faire des polygones avec.

On peut calculer la longueur totale parcourue comme étant :

$$\Delta D = 2\pi R_{min} + 2\pi \sum_{i=1}^n R_i$$

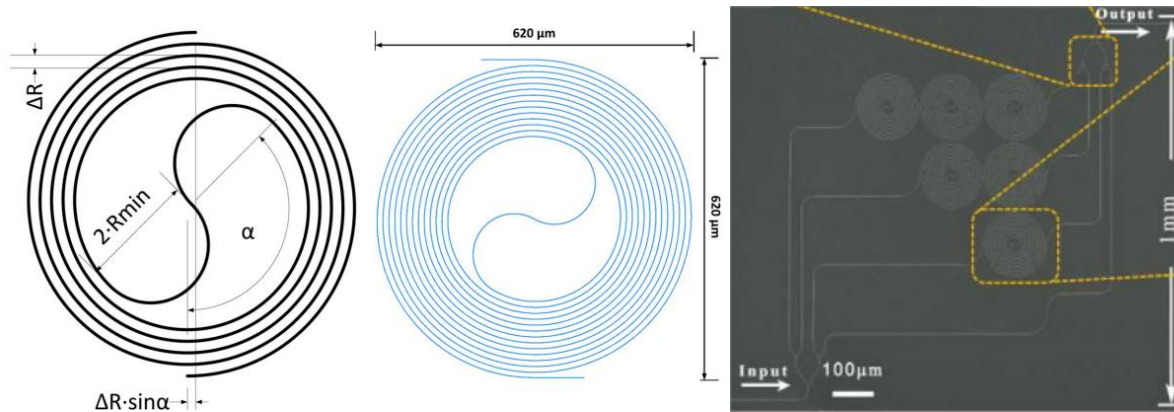


Figure 3.9 Spirales de délai

Pour ensuite démultiplexer ce signal on récupère la fréquence de l'impulsion initiale puis on démulitplexe en fonction de celle-ci pour que chaque receptrer puisse avoir la transmission qui lui correspond[34].

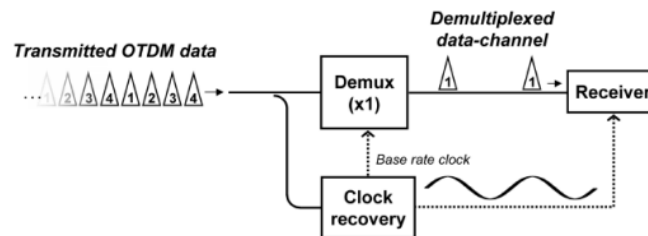


Figure 3.10 DeMux en TDM

Bilan et Conclusion

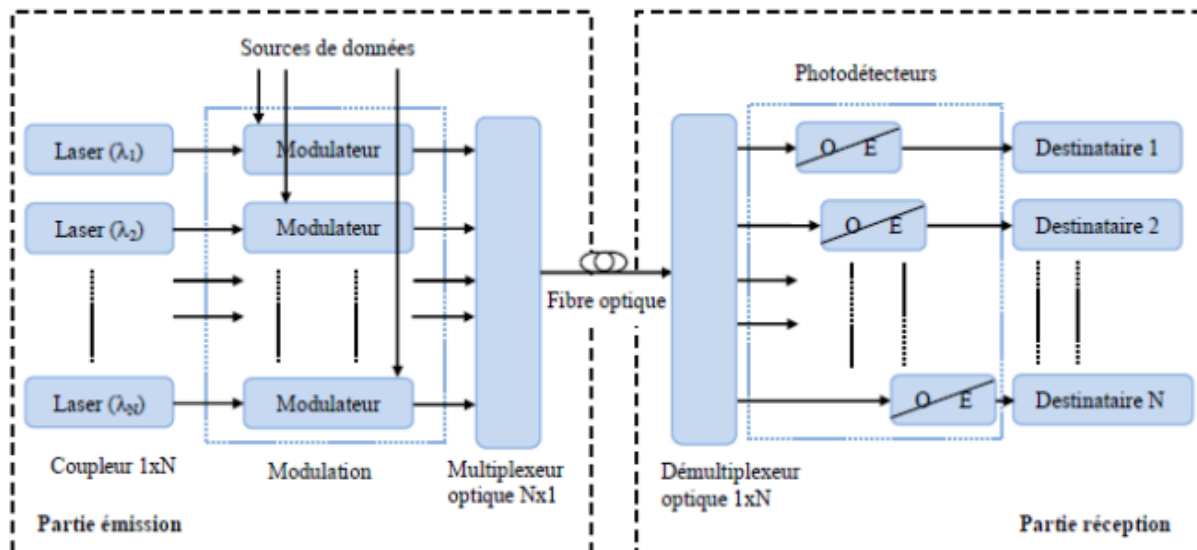


Figure 1 Modèle Transmission par fibre optique

A partir des éléments étudiés lors de ce TIPE, nous sommes désormais en mesure d'établir un modèle de réseau à transmission par fibre optique. Celui-ci devra être en mesure de répondre aux attentes des réseaux

fibres optiques actuels : le support d'une charge importante d'utilisateurs, des débits montants et descendants importants ainsi qu'une bonne maintenabilité de la structure générale.

Pour ce faire nous utiliserons un multiplexeur en longueur d'onde de type AWG permettant de démultiplexer le signal provenant de l'acteur centralisé afin d'être transmis à chaque client. Et multiplexant le signal des clients vers le serveur. L'AWG étant un élément passif cela confère des avantages de coût, de fiabilité donc de maintenabilité au système tout en bénéficiant des débits du multiplexage en longueurs d'ondes. Ce multiplexeur devra être placé au plus proche des utilisateurs finaux du fait des nombreuses fibres en sorties.

Des modulateurs externe par électroabsorption (EAM) seront placés du côté des clients et serveurs car ceux-ci permettent d'atteindre une fréquence de modulation de l'ordre de 10 GHz en plus du fait qu'elles puissent être directement intégrées à la source de lumière continue.

De plus, de par les débits rendus possibles par la totalité de notre système précédemment décrit nous sommes dans l'obligation d'utiliser une fibre monomode afin de ne pas créer de « goulot d'étranglement ». Notons aussi que les distances importantes entre l'acteur centralisé et le point de multiplexage nécessitent une fibre monomode car notre but est de nous affranchir de tout élément actif comme les amplificateurs optiques.

D'après les différents éléments mis en place, nous devons être en mesure d'atteindre des débits symétrique de l'ordre de 10 Gbps pour chaque client, le tout sans élément actif entre l'acteur centralisé et les clients. La fiabilité et la maintenabilité du réseau est donc assuré. En revanche, le multiplexage optique nous oblige à ajouter des lasers à longueur d'onde variable dans l'appareil émetteur de chaque client, ce qui peut représenter un coût supplémentaire dans la mise à niveau du réseau optique. En effet, cette structure de réseau optique n'est pas compatible avec les anciennes structures mises en places à grande échelle. Une question se pose alors : Comment concilier la demande toujours plus importante de bande passante des usagers avec ?

Bibliographie

[1] Khushbu Solanki, Livre Blanc, Fibre Optics vs Copper Cabling – Understanding the Difference, OptronicsPlus

[2] Blog Post, Stefano Meroli, "Optical Fiber vs Copper Cable"
https://meroli.web.cern.ch/lecture_fibre_vs_copper.html Accédé le 14/12/2022.

[3] Article, FOSCO, "Optical Fiber Attenuation" <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation> Accédé le 14/12/2022

[4] Lisa A. Moore and Charlene M. Smith, "Fused silica as an optical material [Invited]," Opt. Mater. Express 12, 3043-3059 (2022)

[5] Article, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-photonics, "Optical Fiber Communications" https://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html, Accédé le 14/12/2022.

[6] Article, Photonics "Fiber Optics : Understanding the Basics",
https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151, Accédé le 14/12/2022.

[7] Article, Modular Photonics "What is modal dispersion ?"
https://www.modularphotonics.com/resources_modaldispersion/ Accédé le 14/12/2022

[8] Article, FOSCO, "Basic Optics for Optical Fiber" <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048070-basic-optics-for-optical-fiber>, Accédé le 14/12/2022.

[9] Cours en Powerpoint, Université de Bordeaux, "La Fibre Optique" https://moodle1.u-bordeaux.fr/pluginfile.php/452332/mod_resource/content/1/Cours_Fibre%20optique.pdf Accédé le 14/12/2022

- [10] Article, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, "Transmission sur Fibres Optiques" http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html Accédé le 14/12/2022.
- [11] Article, Techno-Sciences "Fibre Optique – Définition et Explications" <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fibre-optique-page-4.html> Accédé le 14/12/2022.
- [12] Article, Lycée Chevrollier, "Appellation Communes utilisées pour la Fibre Optique ", <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/13502/13502-appellations-communes-fibres-optiques.pdf> Accédé le 14/12/2022
- [13] Webinar, Dave Gardner, THORLABS "Optical Fiber 101 : Understanding Single Mode Fiber" https://www.youtube.com/watch?v=FbOXRuBQt_U Accédé le 14/12/2022.
- [14] Article, Ameer Smail, Alaili Maher, Amar El Hadji, "La Fibre Optique et le Guidage de la Lumière", <http://physique.unice.fr/sem6/2006-2007/PagesWeb/Telecom/modes.html> Accédé le 14/12/2022.
- [15] Article, Larry, "Fibre Multimode à saut d'indice ou gradient d'indice ?" <https://community.fs.com/fr/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html> Accédé le 14/12/2022.
- [16] Article, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, "La Fibre Optique à Gradient d'Indice" <https://fibre-optique.pagesperso-orange.fr/Pages/principe.html> Accédé le 14/12/2022
- [17] Article, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-photonics, "Optical Modulators", https://www.rp-photonics.com/optical_modulators.html, accédé le 11/12/2022.
- [18] Powerpoint, Fosco Connect, "What is frequency Chirp in an optical pulse", <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/what-is-frequency-chirp-in-an-optical-pulse-video>, Accédé le 12/12/2022.
- [19] Article, MorePhotonics, "Linear Direct Modulated DFB Lasers" <https://morephotonics.com/products/laser-modules/linear-direct-modulated-lasers/#:~:text=Our%20partners%20have%20developed%20low,%3C%20%2D155%20dB%2FHz>.
- [20] Article, Precision, "Causes of Optical Chirp and How to Reduce It", 18/01/2018, <https://www.precisionot.com/causes-optical-chirp-how-prevent/> Accédé le 12/12/2022
- [21] Article, FOSCO, "OPTICAL MODULATORS TUTORIAL – ELECTROABSORPTION MODULATOR (EAM) AND LITHIUM NIOBATE MACH-ZEHNDER MODULATOR (MZ MODULATOR)" <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95050886-optical-modulators-tutorial-electroabsorption-modulator-eam-and-lithium-niobate-mach-zehnder-modulator-modulator-mz-modulator>, accédé le 12/12/2022.
- [22] Article, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-photonics, "Electroabsorption Modulators", https://www.rp-photonics.com/electroabsorption_modulators.html, accédé le 12/12/2022.
- [23] Article, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-photonics, "Optical Modulators", https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html Accédé le 14/12/2022
- [24] M. R. Watts, W. A. Zortman, D. C. Trotter, R. W. Young and A. L. Lentine, "Low-Voltage, Compact, Depletion-Mode, Silicon Mach-Zehnder Modulator," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 159-164, Jan.-feb. 2010, doi: 10.1109/JSTQE.2009.2035059.
- [25] Dasan, M. et al., 2019, 'Optically Multiplexed Systems: Wavelength Division Multiplexing', in S. Mohammady (ed.), Multiplexing, IntechOpen, London. 10.5772/intechopen.88086.

- [24] Leijtens, X. J. M., Kuhlow, B., & Smit, M. K. (2006). Arrayed waveguide gratings. In H. Venghaus (Ed.), Wavelength filters in fiber optics (pp. 125-187).
- [26] Smit, M. K., & Dam, van, C. (1996). PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications. IEEE. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2(2), 236-250.
- [27] Jessie Rosenberg, Rajeev V. Shenoj, Sanjay Krishna, and Oskar Painter, "Design of plasmonic photonic crystal resonant cavities for polarization sensitive infrared photodetectors," Opt. Express 18, 3672-3686 (2010)
- [28] Yuta Ooka, Tomohiro Tetsumoto, Nurul Ashikin Binti Daud, and Takasumi Tanabe, "Ultrasmall in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography," Opt. Express 25, 1521-1528 (2017)
- [29] Zinan Wang, Chongjin Xie, and Xiaomin Ren, "PMD and PDL impairments in polarization division multiplexing signals with direct detection," Opt. Express 17, 7993-8004 (2009)
- [30] Wu, HW., Li, CY., Lu, HH. et al. A PDM-based 128-Gb/s PAM4 fibre-FSO convergent system with OBPFs for polarisation de-multiplexing. Sci Rep 10, 1872 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58558-7>
- [31] Article, SmartOptics, "COARSE AND DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING", accédé le 08/12/2022
- [32] What When How. Optical-Time-Division-Multiplexed-Communication-Networks- Part-4. <http://what-when-how.com/fiber-optics/Optical-time-division-multiplexed-communication-networks-part-4>. Accédé 11/12/2022
- [33] Abdelsalam A. Aboketaf, Ali W. Elshaari, and Stefan F. Preble, "Optical time division multiplexer on silicon chip," Opt. Express 18, 13529-13535 (2010)
- [34] Héctor C. Nuñez (2014), "All-optical communication system based on orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) and optical time-division multiplexing (OTDM) ", Technical University of Denmark (p.89)

Résumé

Un réseau fibre optique est constitué de multiples éléments chargés du bon transport d'une information. En premier lieu pour qu'une donnée à l'origine électrique soit transmise elle doit d'abord être codée en signal lumineux par un modulateur et un laser. Ce signal est ensuite transmis par un support physique : la fibre optique. Par la suite, comme beaucoup d'utilisateurs veulent transmettre des données en même temps ce signal va être multiplexé. C'est à dire qu'il va être agréger/combiner au nombreux autres signaux d'informations lumineux des clients de façon à ce que les informations de plusieurs clients circulent sur la même fibre optique. Cela permet de réduire les coûts : au lieu d'avoir N fibres correspondant aux nombres de clients naviguant vers un acteur centralisé on a plutôt une seule fibre de grande capacité que se partageront beaucoup de clients. Lorsque les données de cette fibre arrive au serveur elles vont être démultiplexées afin de savoir qui transmet la donnée. Par la suite le serveur pourra répondre à tous les clients en combinant toutes ses réponses sur la même fibre optique, puis ces données seront désagrégées pour être envoyées à chaque client. C'est comme cela que fonctionne un réseau fibre optique.

Mots-Clés

Fibre optique, modulation, multiplexage, lumineux, électrique, laser, réseau, transport, information, donnée, agréger

Abstract

A fiber optic network is composed of multiple elements responsible for the proper transmission of information. First, in order for an originally electrical data to be transmitted, it must first be encoded into a light signal by a modulator and a laser. This signal is then transmitted through a physical medium: the fiber optic. Afterwards, as many users want to transmit data at the same time, this signal will be multiplexed. This means that it will be combined with many other light information signals from customers so that the information from several customers can travel on the same fiber optic. This reduces costs: instead of having N fibers corresponding to the number of customers accessing a centralized actor, we instead have a single, high-capacity fiber shared by many customers. When the data on this fiber reaches the server, it will be demultiplexed to determine who is transmitting the data. Afterwards, the server can respond to all customers by combining all its responses on the same fiber optic, and these data will be disaggregated to be sent to each customer. This is how a fiber optic network works.

Keywords

Optical fiber, modulation, multiplexing, light, electric, laser, network, transport, information, data, aggregate