

CYCLE INITIAL EN TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION DE SAINT-ÉTIENNE

Transmission par Fibre Optique

JULES FELLOUSE - LUCAS LESCURE

Table des contenus

Introduction	2
PARTIE I Modulation	
Modulation Directe	3
Modulation Externe	3
PARTIE II MULTIPLEXAGE	
Multiplexage en longueur d'onde (WDM)	4
Multiplexage par AWG	4
Multiplexage par cristaux photoniques	5
Multiplexage en Polarité	6
Multiplexage Temporel	7
TDMA	7
TDM	7
PARTIE III Configuration d'un Réseau PON	
Terminal de ligne optique (OLT)	9
Le coupleur (POS)	10
Le terminal de réseau optique (ONU/ONT).	10
Bilan et Conclusion	11

Abstrait

La fibre optique est beaucoup utilisée dans la télécommunication pour transmettre des informations sur de longues distances. On cherche donc à savoir comment c'est réalisable en s'intéressant au fonctionnement des composants essentiels qui interviennent dans cette transmission. En particulier sur le multiplexage, la modulation et la fibre optique. On utilisera les notions acquises dans le but de recréer cette transmission et comprendre comment la lumière peut-être utilisée comme porteuse d'une information.

Introduction

Suite à l'invention du laser en 1960 par le physicien Théodore Maiman et l'amélioration des fibres optiques, la transmission par fibre 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 fil. 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 1000 Go/s par rapport au cuivre qui ne peut pas transmettre plus loin que 100 mètres avec un débit de 100 Mo/s(source?).

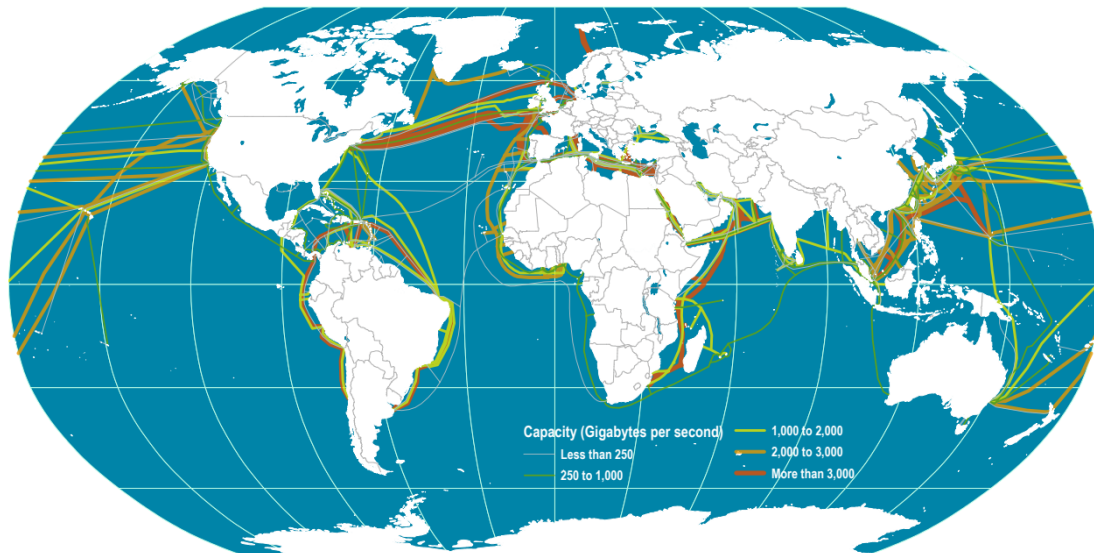


Figure 1: Carte des câbles sous-marin de télécommunication

Ces chiffres sont atteignables grâce aux propriétés de la fibre optique et à des techniques de multiplexage qui permettent d'envoyer plusieurs signaux sur un même fil utilisant l'entièreté de la bande passante disponible. Cependant il reste à comprendre comment la lumière est utilisée pour transmettre des données dans une transmission par fibre optique.

Pour ceci nous nous intéresserons premièrement à la façon d'envoyer un signal optique en utilisant un modulateur. Ensuite nous chercherons un moyen de transmettre plusieurs signaux sur une même fibre en étudiant les différents types de multiplexeurs ainsi que leur fonctionnement. Nous verrons ensuite comment cette donnée se propage à l'intérieur de certaines fibres pour en choisir une adaptée à une transmission de longue distance. Grâce à tout cela nous pourrions alors étudier en détail la configuration des réseaux PON et établir notre propre modèle de transmission.

PARTIE - I

MODULATION

Modulation Directe

Modulation Externe

Comme nous avons vu dans la Propagation (add ref), la fibre optique possède un bande passante dans laquelle on retrouve les longueurs d'onde les moins atténuées et qui seront donc utilisés pour la propagation d'information. C'est cette bande passante que l'on va pouvoir exploiter pour faire passer des téraoctets de données grâce aux multiplexage assurant que toute la bande passante soit utilisée.

Après la modulation de plusieurs signaux grâce à un modulateur externe on cherche à combiner ces différentes longueurs d'onde sur une même fibre. Soit disant il s'agit de prendre un démultiplexeur et inverser son sens. Dans ce raisonnement on traitera les démultiplexeur, en appliquant le sens inverse pour les multiplexeur.

Il existe principalement 3 types de multiplexage, le multiplexage 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 multiplexage 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.

Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

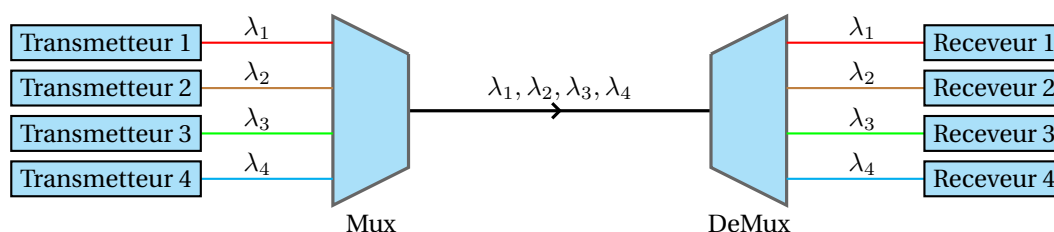


Figure II.1: Schéma du WDM

Comme son nom l'indique le WDM consiste à multiplexer des signaux en fonction de leurs longueurs d'ondes, c'est à dire qu'il va pouvoir différencier certaines longueurs d'ondes des autres. Il existe deux principes différents pour ce multiplexage : le multiplexage à base de diffraction et le multiplexage à base d'interférence. Ce dernier repose sur des filtres par interféromètre de Mach-Zehnder qui appliquent des retards à différents longueurs d'ondes, la longueur des chemins parcouru par les faisceau est ajusté pour que les deux faisceau puisse être combinés[2]. Pour des raisons de simplicité nous ne traiterons pas ce type de multiplexage, mais nous le reverons pour la modulation.

Multiplexage par AWG

Le multiplexage 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 multiplexage à réseau de diffraction, ou "arrayed waveguide grating" (AWG) sépare plusieurs faisceaux de la même source dans des guides d'ondes de longueurs différentes ΔL . Cette variation de longueur entre les guides d'ondes impose un retard au faisceau qui le traverse. À la sortie on obtient alors plusieurs fentes, qui permettent ensuite la diffraction des différentes ondes qui ont traversé les guides d'onde. Le retard de chaque onde permet alors d'établir une diffraction de différentes en plusieurs longueurs d'ondes. On observe alors par construction et déconstruction des ondes, plusieurs points de longueurs d'onde cha-

cune différentes séparés spatialement. Il ne manque donc plus que récupérer ces faisceau dans des fibres différentes pour obtenir le démultiplexage en output.

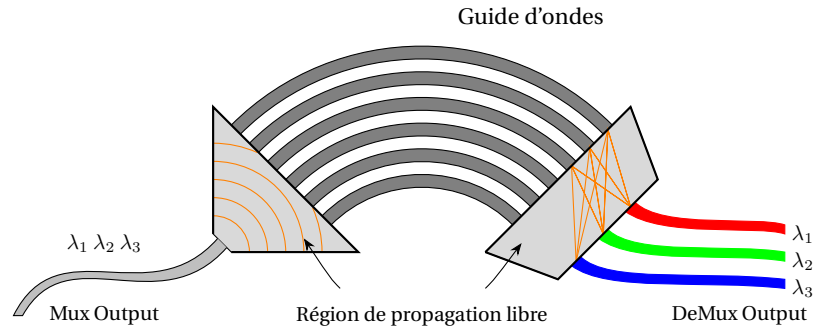


Figure II.2: Schéma WDM avec AWG

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

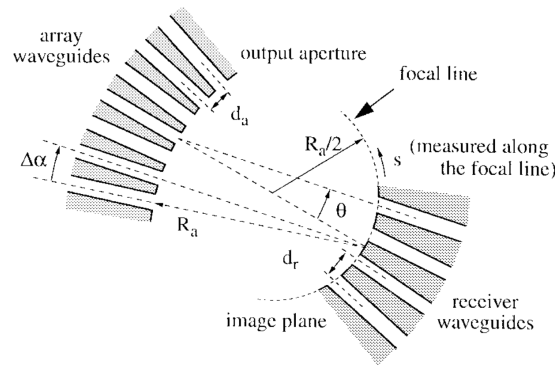


Figure II.3: Région de propagation libre droite du démultiplexeur

Ce qu'il faut retenir c'est le fait que les entrées au niveau de la deuxième région de propagation libre agissent similairement à la focale d'une lentille[3]. De plus en raison des différences de longueur des différents guides d'ondes ΔL , et leur indice de refraction n_g il s'effectue un décalage de phase $\Delta\phi$ entre les différentes ondes. Ce décalage s'exprime de la manière suivante[4] :

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

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

$$\beta = \frac{2\pi\nu n_g}{c}$$

Par interférence et dispersion des différentes de ses 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 [4].

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

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

Multiplexage par cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont une autre alternative de multiplexage utilisant des tubes diélectriques dans une configuration périodique qui laisse ou bloque les ondes lumineuse de passer. Avec certaines configurations on peut espacer ces tubes de façon à faire des guides d'ondes ou bien extraire certaines longueurs d'ondes en utilisant des cavités de résonance.

Ces cavités de résonances sont ajustées de façon à pouvoir absorber une certaine longueur d'onde[5] et de la réémettre sur un guide d'onde différent. Sur [Fig.II.4] on peut constater cette architecture avec les cavités de résonances.

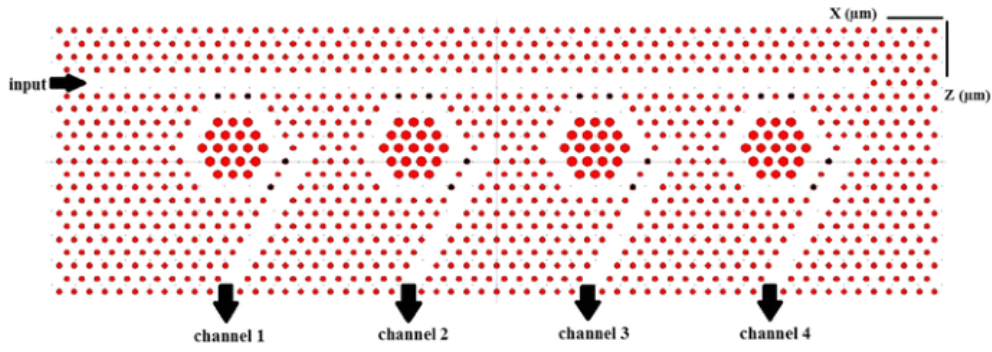


Figure II.4: Architecture d'un cristal photonique

La séparation entre chaque tube diélectrique est donné par $a_n = a_1 - 10^{-9} \cdot (n - 1)[nm]$ démarquant ainsi pour un démultiplexeur à 8 chaînes sur une bande passante de 1550 à 1565 la taille de chaque cavité[6].

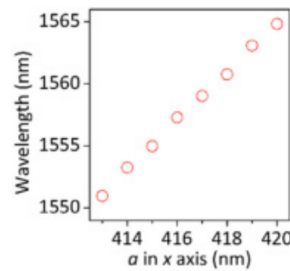


Figure II.5: Taille de la cavité a en fonction de la longueur d'onde sur un cristal photonique

Cette méthode est réalisable par propriété des cristaux photoniques qui confine les ondes à traverser certain chemin par de-construction des ondes se propageant et réfléchissant sur les index de réfraction intervalés périodiquement. Cette structure d'index de réfraction périodique établis un retard sur les ondes reflété de manière a'ce que celle ci se déconstruisent dans l'espace, empêchant donc l'onde de se propager autre que sur un chemin prédéterminé.

À revoir avec info cours et M2 PhC

Multiplexage en Polarité

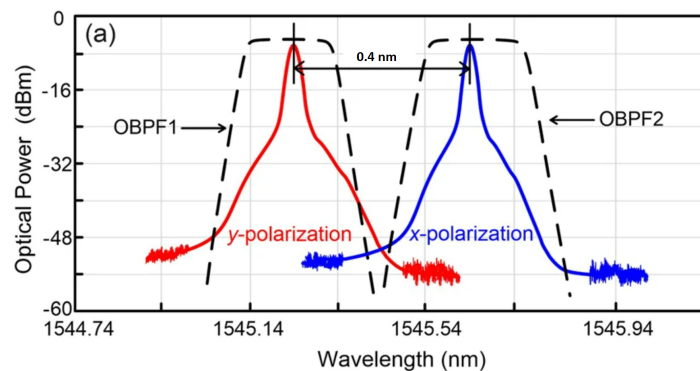


Figure II.6: Polarisation x, y d'un PDM

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[7]:

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

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 la polarisation cross-talk, ce qui peut endommager significativement la performance du multiplexeur[8].

La PDM fonctionne cependant grâce au fait que les deux longueurs d'ondes sur lesquelles on effectue la PDM sont espacées d'environ 0.4 nm ce qui est 2 fois plus petit que la séparation 0.8 nm entre les longueurs d'onde en WDM dense[9]. Évitant 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 polariseur à bande passante (OBPF) pour que chaque donnée puisse être traitée séparément à la réception.

Multiplexage Temporel

TDMA

TDM

Étant donné que les composants électroniques ne peuvent supporter des fréquences supérieures à 10 GHz pour des questions de stabilité, un type de multiplexage a été mis en place : le multiplexage temporel. Ce type de multiplexage permet de combiner plusieurs signaux fonctionnant à des débits peu élevés pour augmenter le débit binaire de transmission. Par la suite, chaque signal se voit affecter l'entièreté de la bande passante durant un court intervalle de temps[13][14].

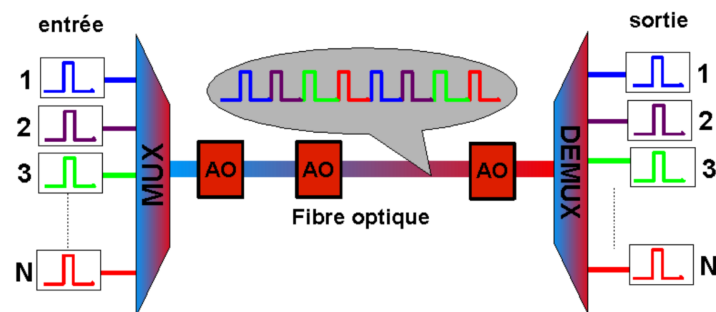


Figure II.7: Schéma TDM

En revanche, ce qui est réellement utilisé dans le réseau fibre optique PON, c'est le TDMA (accès multiple par répartition temporelle). C'est-à-dire que chaque client joue le rôle d'un fragment de multiplexeur car il envoie des données de façon à ce qu'elles n'entrent pas en collision avec celles des autres clients.

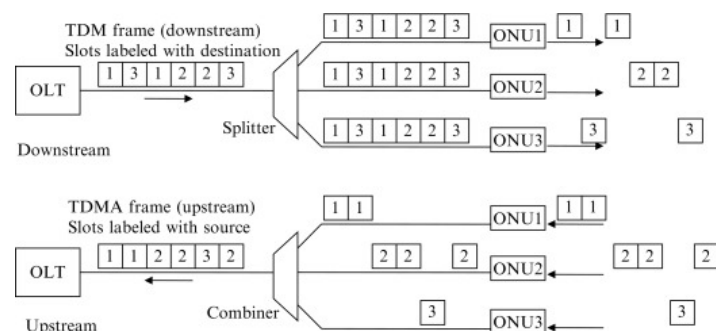


Figure II.8: DeMux/Mux en TDM et TDMA

Ce type de multiplexage fonctionne par retard et nécessite que chacun des émetteurs possèdent la même fréquence d'horloge. En revanche, cette fréquence d'horloge doit être déphasée spécifiquement pour chaque client afin de correspondre à un créneau (time-slot) qui lui aura été alloué. L'allocation de créneau se fait généralement dynamiquement, c'est-à-dire que le client reçoit continuellement les nouveaux créneaux qui ne sont plus occupés par les autres clients : cela permet d'optimiser au maximum la bande passante principale.

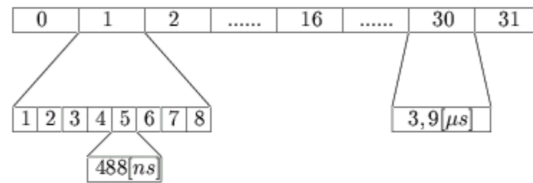


Figure II.9: Structure de la trame

Dans cet exemple, le multiplexage se fait par trame de $3.9 \mu s$ divisées en 8 créneaux distincts. C'est à dire que chaque créneau a pour durée de $488 ns$. Ainsi le temps à l'état haut de chaque horloge devra être inférieur de $488 ns$. Et la fréquence de chaque horloge émettrice sera égale à la fréquence principale divisée par le nombre de créneaux, soit 8 ici. De plus, si l'utilisateur a pour créneau "n" alors il devra appliquer un retard $(n - 1) \cdot 488$ à son horloge[12].

Avant qu'un paquet de données parvienne chez le client d'un fournisseur d'accès internet, celui-ci parcourt de multiples intermédiaires. Nous étudierons une structure de réseau de type PON (passive optical network) FTTH (fiber to the home). C'est-à-dire que plusieurs clients finaux partagent une même fibre optique et que l'utilisateur final possède une fibre optique chez lui en fin de chaîne. Plus spécifiquement nous nous pencherons sur la norme GPON (Gigabit PON) créée en 2003 et utilisée par la majorité des opérateurs français pour toutes les offres fibre à destination des particuliers.

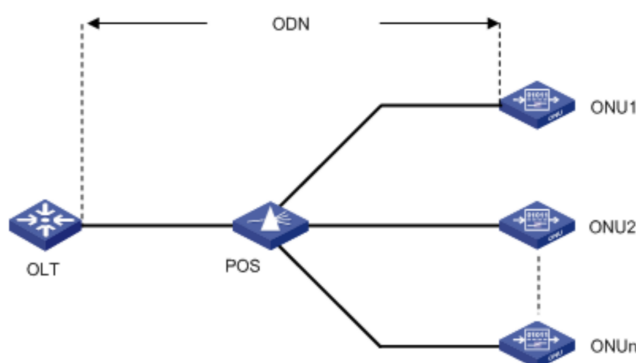


Figure III.1: Structure de réseau

Lorsque un client envoie une information photonique, celle-ci a pour longueur d'onde 1310 nm et lorsqu'il reçoit une information en provenance de l'OLT sa longueur d'onde est de 1490 nm . Cela permet un échange d'information bidirectionnel sur une même fibre optique en évitant tout phénomène d'interférence car 2 longueurs d'ondes distinctes sont utilisées.

Terminal de ligne optique (OLT)

Le terminal de ligne optique est le point de départ de tout réseau fibre optique. Celui-ci est chargé de connecter une dorsale internet (backbone) c'est-à-dire un cœur du réseau internet aux clients doté de la technologie fibre optique. Il est surnommé switch optique car sa fonction est la même que le switch ethernet : connecter plusieurs fibre optique à un routeur ancré dans le réseau internet mondial.

Chaque port permet de connecter une fibre optique qui se partagent entre 32/64/128 clients selon la configuration du PON. Ce partage se fait de façon temporel, c'est à dire que les utilisateurs peuvent utiliser la totalité de la bande passante de la fibre optique principale à tour de rôle : c'est le multiplexage temporel. Sur l'image ci-dessous le port SFP permet de connecter le switch au réseau mondial.



Figure III.2: Image d'un SFP

Lorsque l'OLT envoie une information à un client, il encapsule l'information de façon chiffrée dans une trame et ajoute en

en-tête des informations utiles à la transmission. Cette en-tête contient entre autres un identifiant permettant d'identifier le receveur.

Le coupleur (POS)

Le coupleur ou Passive Optical Splitter permet d'agréger le signal de plusieurs fibres optiques en une seule ou de cloner le signal d'une fibre optique en plusieurs fibres optiques.

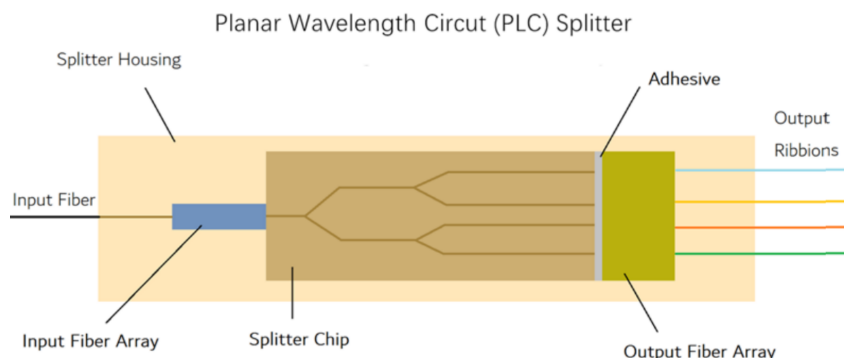


Figure III.3: Passive Optical Splitter

C'est ce mécanisme qui se produit au niveau des points de mutualisation fibre. En général ces points de mutualisation fibre sont placés dans des armoires électriques dans la rue proche d'habitations ou dans la cave de certains immeubles.

Lorsque l'OLT envoie les informations de dizaines de clients (ex : téléchargement) sur la même fibre, cette fibre est clonée puis chaque fibre clonée arrive dans l'habitation du client final. Ainsi chaque utilisateur reçoit les informations des dizaines d'autres clients du même point de mutualisation.

Et lorsque un client envoie des informations à l'OLT (ex : envoi d'un email), la trame va prendre le chemin inverse du précédent, c'est à dire qu'elle va être agrégée à toutes les autres trames des clients pour finir sur la fibre optique de l'OLT.

Ici chaque fibre optique est à destination d'une maison ou d'un appartement et chacun des ports auxquels ces fibres sont branchées transmettent la même information. En effet, chacun des ports transmet la copie du signal envoyé par l'OLT. C'est pour cela qu'un technicien fibre peut se permettre de débrancher votre fibre optique pour brancher celle de votre voisin.

Le terminal de réseau optique (ONU/ONT)

Le terminal de réseau optique est un appareil présent chez chaque client possédant la fibre FTTH.



Figure III.4: Terminal de réseau optique

Celui-ci comprend un port fibre dont une fibre reliée au splitter précédemment évoqué, ainsi qu'un port Ethernet relié à la box internet.

Lorsque le client reçoit une information :

- Le signal photonique est démultiplexé temporellement
- Le signal démultiplexé est modulé en signal électrique
- Si l'en-tête de la trame GPON correspond à l'identifiant de l'ONT alors l'information encapsulée sera déchiffrée via une clé préalablement échangée avec l'OLT.
- Puis l'information sera mise sous forme d'une trame interprétable par le routeur, et envoyé via le port Ethernet

Lorsque le client envoie une information :

- La trame Ethernet est encapsulée de façon à la chiffrer et à ajouter une en-tête contenant l'identifiant de l'ONT.
- Cette trame est modulé en signal photonique et multiplexé temporellement
- Ensuite elle est envoyée via le port optique au point de mutualisation en vue d'être agrégé sur la fibre central de l'OLT.

Bilan et Conclusion

Bibliographie

- [1] Khushbu Solanki, Livre Blanc, Fibre Optics vs Copper Cabling – Understanding the Difference, OptronicsPlus
- [2] Dasan, M. et al., 2019, 'Optically Multiplexed Systems: Wavelength Division Multiplexing', in S. Mohammady (ed.), Multiplexing, IntechOpen, London. 10.5772/intechopen.88086.
- [3] Leijtens, X. J. M., Kuhlrow, B., & Smit, M. K. (2006). Arrayed waveguide gratings. In H. Venghaus (Ed.), Wavelength filters in fiber optics (pp. 125-187).
- [4] 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.
- [5] Jessie Rosenberg, Rajeev V. Shenoi, Sanjay Krishna, and Oskar Painter, "Design of plasmonic photonic crystal resonant cavities for polarization sensitive infrared photodetectors," Opt. Express 18, 3672-3686 (2010)
- [6] Yuta Ooka, Tomohiro Tetsumoto, Nurul Ashikin Binti Daud, and Takasumi Tanabe, "Ultrasmlal in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography," Opt. Express 25, 1521-1528 (2017)
- [7] 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)
- [8] 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>
- [9] Article, SmartOptics, "COARSE AND DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING", accédé le 08/12/2022
- [10] Optical Fiber Telecommunications Volume VIB par Kaminow, Ivan P. en 2013 (ISBN : 978-0-12-396960-6)
- [11] Réseaux et transmissions, Protocoles, infrastructures et services, Lohier Stéphane, Présent Dominique en 2020 (ISBN : 978-2-10-081183-0)
- [12] Cours sur le multiplexage temporel http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total0/elen036/node170_mn.html
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Time-division_multiple_access
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Acc%C3%A8s_multiple_par_r%C3%A9partition_temporelle