

Introduction générale

Contexte et objectifs

Cette introduction générale, qui permet de cadrer notre travail, est destinée à fournir un aperçu sur les caractéristiques de la fibre qui sont d’une importance primordiale pour comprendre les effets linéaires et non linéaires qui seront introduits et étudiés dans les chapitres 2 et 3, respectivement. Le but essentiel du chapitre 2 est de présenter de façon simple et concise les caractéristiques essentielles de la fibre optique, que nous jugeons nécessaires pour la compréhension de l’impact des limitations physiques sur l’optimisation des liaisons optiques. Actuellement, les performances des différents types de fibres optiques et les composants optiques et optoélectroniques associés sont le résultat d’une recherche intense qui repose en grande partie à la fois sur l’optique géométrique, l’optique physique, l’optique guidée (intégrée), l’optique quantique, la science des matériaux, l’ingénierie des communications, et d’autres disciplines connexes. En conséquence, le mariage entre l’optique, la photonique et la technologie de la fibre optique a provoqué un bouleversement fondamental dans le domaine des télécommunications. Aujourd’hui, nous voyons une grande variété d’applications commerciales et de laboratoire de la technologie de la fibre optique devenues une réalité industrielle.

Chronologiquement, l’utilisation de la lumière pour transmettre de l’information n’est pas un concept novateur récent. En effet, depuis l’antiquité, les signaux sonores et optiques ont été reconnus capables de transmettre une certaine forme d’information. Dans ce contexte, on trouve la trompe du berger médiévale, le tam-tam africain, le phare d’Alexandrie, la fumée des indiens d’Amérique, le photophone d’Alexander Graham Bell (1880), etc. Toutefois, ces moyens de communications primitifs, à capacité et portée très limitées, ont évolués dans le temps pour aboutir aux moyens de communications modernes. Présentement, nous communiquons par faisceaux hertziens, par satellites, par câbles en cuivre et enfin le retour de la lumière comme moyen de communication en utilisant de la fibre optique comme support de transmission. Car, celle-ci semblait aujourd’hui offrir une capacité de transmission quasi-illimitée.

Actuellement, nous nous sommes en possession d’une grande variété d’applications commerciales et de laboratoire de la technologie de la fibre optique. Les applications qui sont discutées dans ce travail seront limitées aux technologies de l’information et des télécommunications. Parmi tous les composants tout-optique utilisés dans le domaine des télécoms, nous nous intéressons qu’aux réseaux de Bragg pour leur grande importance pour la correction de la dispersion dans les lignes de transmission optique. Les propriétés spectrales de ces réseaux, qui sont considérés comme l’une des inventions du siècle, seront étudiés en détail dans le quatrième et dernier chapitre de cette thèse. Dans ce sens, le développement de tout projet de recherche est abordé par la modélisation et la simulation numérique [6], qui est une étape vitale, rapide, efficace et économique vers la conception et la réalisation pratique sur le terrain. A l’état actuel, les techniques de programmation orientées-objet sont devenues des outils populaires très puissants pour l’étude de la faisabilité de tout projet de développement industriel. Donc, notre étude purement théorique est basée sur la modélisation et la simulation numérique sous Matlab.

Fondamentalement, les problèmes de réseaux de Bragg en générale, qui sont utilisés dans le domaine des télécommunications ou des capteurs, sont étudiés moyennant plusieurs

théories et méthodes de calcul numériques. La théorie des modes couplés et méthode de transfert matricielle sont utilisées dans notre travail, qui consiste en l'étude théorique de modélisation et la simulation numérique, pour l'obtention de l'information quantitative sur les différentes propriétés spectrales des réseaux de Bragg : réflexion, transmission, temps de groupe et dispersion. Notons que la théorie des modes couplés est basée sur trois approximations essentielles [7], à savoir, un guidage faible ($\partial n = n_c - n_g \prec 0$) qui permet de considérer une équation de propagation scalaire, l'approximation de l'enveloppe lentement variable qui permet de réduire l'équation de propagation à une équation différentielle du premier ordre, et enfin un traitement perturbatif qui consiste à chercher une solution du problème perturbé en fonction des modes du guide d'onde non perturbés. Notons que la méthode de transfert matricielle est très efficace pour la résolution des équations différentielles couplées, qui gouvernent la propagation des modes résultants (modes incidents et modes réfléchis). Par ailleurs, cette technique peut être utilisée également pour l'étude des réseaux de Bragg uniformes et non-uniformes (réseaux modifiés), autrement dit, des réseaux exotiques.

Les systèmes de transmission haut débit par fibre optique, introduisent des effets non linéaires d'ordre supérieurs qui limitent la capacité et la portée des liaisons optiques. Pour apporter notre contribution, nous sommes amenés, dans une première partie, à faire une étude systématique par la modélisation et la simulation numérique de la propagation des impulsions optiques dans un milieu faiblement dispersif et non linéaire, cas de la fibre optique. D'après les données de la littérature, cette modélisation nous amène à une équation différentielle partielle non linéaire connue en optique sous le nom de l'équation de Schrödinger non linéaire 'NLSE', qui peut être utilisée comme équation maîtresse pour l'étude de transfert de l'information dans les systèmes à fibres optiques. Notons que cette équation n'a de solution analytique que dans deux cas extrêmes très peu réalistes : un régime de propagation purement linéaire ou un régime de propagation purement non-linéaire. Mais, pour tenir compte des deux effets à la fois, celle-ci nécessite une résolution numérique. Ce qui nous permet d'introduire la notion de propagation des impulsions optiques sous forme de solitons, ceci grâce à la compensation mutuelle entre ces deux effets antagonistes. Dans une deuxième partie de ce travail, nous avons abordé les différents processus physiques qui sont derrière l'apparition du phénomène de dispersion chromatique et les méthodes de compensation de celle-ci, notamment l'utilisation de composants optiques passifs tels que les réseaux de Bragg à fibres optiques. Donc, la dynamique de propagation et la compensation de la dispersion chromatique représentent les deux problématiques abordées dans ce travail.

Motivations

C'est en se basant sur l'abondante bibliographie consacrée à la matière, tout particulièrement sur les ouvrages spécialisés consacré notamment à l'optique non linéaire [8, 9], aux solitons optiques [10, 11, 12, 13], à la fibre optique et ces applications dans le domaine des télécommunications optiques [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], qu'il fut possible de déterminer les deux problématiques de ce travail. En effet, l'exploitation de ces sources nous ont permis de répondre à une série d'interrogations inhérentes au sujet : quel est le moyen utilisé pour la correction de la dispersion chromatique, la dynamique de propagation linéaire et non linéaire des impulsions optiques ainsi que les ondes dans les milieux

aquatiques peu profonds, qui sont l'objet de notre travail intitulé "*Définition et optimisation des limitations physiques d'un système de transmission optique et aspects réseaux connexes*". Donc, ce mémoire tend ainsi à démontrer par la simulation numérique que nous avons apporté une contribution pour la correction de la dispersion chromatique linéaire et la dispersion non linéaire quadratique. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux problèmes majeurs qui ont lieu dans les fibres optiques lors de la propagation d'un signal lumineux : l'atténuation de la puissance, la dispersion chromatique, les effets non linéaires origine de la distorsion des signaux optiques. Pour cela, nous sommes amenés à faire une étude et une modélisation de la dynamique de propagation dans un milieu dispersif et non-linéaire : cas de la fibre optique, ainsi que la propagation d'ondes dans les milieux aquatiques peu profonds.

Organisation de la thèse

Ce manuscrit est organisé autour de quatre chapitres. Dans l'introduction générale, qui donne un aperçu de la façon dont la thèse est organisée pour discuter une grande variété d'effets linéaires et non linéaires qui entravent le bon fonctionnement des systèmes de transmission par fibres optiques, nous avons introduit le contexte, les objectifs et l'organisation de cette thèse. Nous présentons dans le premier chapitre les principaux éléments constituant un réseau de transmission optique ainsi que l'aspect des réseaux informatiques connexes.

Le chapitre deux est entièrement consacré aux caractéristiques essentielles de la fibre optique pour la compréhension des phénomènes linéaires et non linéaires ainsi que les limitations physiques inhérentes limitant les performances des liaisons optiques. Les bases théoriques sous-jacentes à ces limitations ainsi que leurs impacts dans les systèmes de transmission optiques sont aussi présentées. Une attention particulière a été accordée à l'origine physique et définitions des différents types de dispersion chromatique en raison de son importance pour la compensation des effets non linéaires. Aussi, ce chapitre fournit une brève introduction à divers effets non linéaires. Parmi ces effets, qui ont été largement étudiés dans la littérature en utilisant des fibres optiques en tant que milieu non linéaire, sont l'auto-modulation de phase et la modulation de phase croisée.

Le chapitre trois de cette thèse est consacré à l'étude de la propagation de solitons à travers différents médias non linéaires. Des méthodes analytiques et numériques sont utilisées pour montrer la propagation des solitons dans ces médias respectifs. Dans le cas des solitons optiques, l'analyse numérique basée sur le "Split-Step Fourier Method" a été adoptée pour la résolution des équations différentielles partielles qui gèrent la propagation des impulsions optiques dans les milieux linéaires et dispersifs telle que la fibre optique. En plus, une étude complémentaire sur la propagation non linéaire des ondes en milieux aquatiques peu profonds, modélisée par l'équation différentielle non linéaire de Kawahara, a été réalisée. Dans ce cas, nous avons cherché les solutions solitoniques exactes de type soliton et onde de choc. Les méthodes d'intégrabilité telles que la méthode d'itération variationnelle modifiée, le principe variationnel semi-inverse, pour construire les différentes solutions de ce modèle, ont été adoptées.

Le chapitre quatre est consacré à l'étude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg à fibres optiques. Ces composants optiques passifs sont utilisés dans le domaine des télécommunications, car ils permettent plusieurs fonctionnalités de base pour la réflexion

(routage) et le filtrage (multiplexage) des signaux optiques. L'étude de l'effet de divers profils coniques des réseaux de Bragg utilisés explicitement dans la compensation de la dispersion linéaire et la pente de dispersion dans les liaisons optiques a été réalisée. Aussi, l'étude sur le temps de retard de groupe linéaire et non linéaire de certains réseaux de Bragg amincis sous contrainte a été réalisée. Le calcul et la simulation numérique est effectué à l'aide d'un code Matlab basé sur la résolution de l'équation de modes couplés en utilisant la méthode de transfert matricielle.

Enfin, nous avons fourni, dans une conclusion générale, une synthèse des résultats obtenus avec tous les détails par comparaison aux données publiées dans la littérature. Les études futures sont également présentées à la fin de cette conclusion.

Chapitre 1

Introduction aux réseaux optiques & aspects réseaux connexes

1.1 Principes fondateurs des réseaux

Ce chapitre particulier fait le point sur l'état de l'art des systèmes de télécommunications optiques modernes. A l'instar des liaisons en fil de cuivre, les liaisons à fibres optiques font appel à plusieurs composants qui sont assemblés entre eux afin de constituer un tout permettant l'établissement de communications à haut débit. Fondamentalement, toute chaîne de communication sur fibre optique (ou câbles en cuivre dans le cas des réseaux connexes), est constituée de trois parties principales, comme le montre le schéma synoptique de la figure (1.1). Essentiellement, elle est composée d'un émetteur, un canal de transmission et un récepteur [1].

Naturellement, le rôle primordial d'un réseau télécom (ou informatique) est de faire circuler des informations (données, voix, images) entre l'émetteur, qui convertit les signaux électriques en signaux optiques, et le récepteur, qui joue le rôle inverse en convertissant les signaux optiques en signaux électriques, via un support de transmission qui est la fibre optique avec un minimum de distorsion et de perte de puissance du signal porteur de l'information.

Dans le cas des télécoms optiques, la fibre optique aux propriétés intrinsèques particulières fait l'objet central du système de transmission. Alors que les composants optoélectroniques d'émission/réception de la lumière (lasers et photo-détecteurs à semi-conducteurs) représentent les éléments primordiaux d'extrémités. Notons qu'à ses deux extrémités s'ajoutent d'autres organes et circuits électroniques très rapides pour la modulation, le codage/décodage, l'amplification en ligne, le traitement de l'information, et enfin la gestion du réseau (détection et correction d'erreurs).

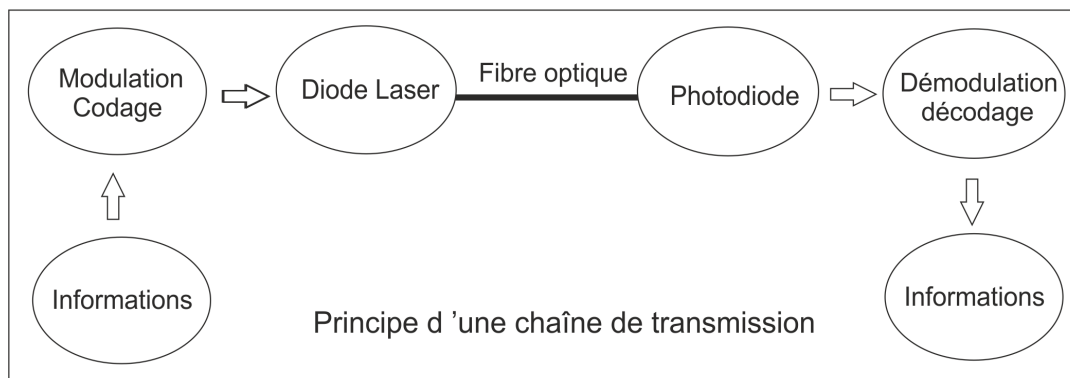


FIG. 1.1: Schéma synoptique d'une chaîne de transmission optique. Elle est constituée de trois parties essentielles : un émetteur, un canal de transmission (fibre optique) et un récepteur, d'après [1].

1.2 Principe de fonctionnement d'une liaison optique

Au début des transmissions optiques, les études théoriques menées sur l'utilisation de la fibre optiques dans le domaine des télécommunications croyaient que la fibre a une bande passante illimitée. Ainsi, elle peut répondre à la demande gourmande en matière de capacité de transmission de la société d'aujourd'hui. Cependant, la fibre présente certaines limitations physiques fondamentales inhérentes telles que la perte de puissance, la dispersion chromatique et les effets non linéaires.

D'après le schéma de principe d'une liaison optique, représenté dans la figure (1.1), l'information à transmettre, sous forme d'un signal électrique, est codée par l'utilisation d'un générateur de bits pseudo-aléatoire. La diode laser à cavité de Bragg distribuée DFB (Distributed FeedBack) est polarisée par un circuit de modulation rapide. Le signal optique généré, porteur de l'information, est injecté dans une fibre monomode, puis amplifié par le biais d'amplificateurs à fibre dopé à l'Erbium EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) placés à des distances régulières (50 jusqu'à 120 km), pour combattre l'atténuation et améliorer, en conséquence, le rapport signal à bruit de la photodiode (PIN ou AD) à la réception. A la sortie du détecteur, le signal électrique est démodulé et décodé par des circuits électroniques rapides pour restituer l'information. Les performances de la ligne de transmission peuvent être évaluées grâce aux différents moyens pour caractériser la qualité de la liaison optique en matière de performances, tel que le calcul du taux d'erreur ou le diagramme de l'œil, qui nous permettent de choisir le meilleur échantionnage et de fixer le niveau seuil de tension pour la prise de décision.

Donc, l'étude globale d'une liaison optique, quel que soit sa simplicité, fait introduire, par les différents composants optoélectroniques et optiques, des limitations physiques de natures différentes. Dans ce travail, nous nous intéressons qu'à la partie médiane du système, qui est la fibre optique. Les deux principales limitations inhérentes, c'est-à-dire, les propriétés dispersives et non linéaires de la fibre optique seront introduites dans le chapitre 3 et dont l'impact sera étudié en détail dans le chapitre 4 de cette thèse.

Cependant, avant d'aborder ces phénomènes avec plus de détail, il est essentiel de faire

passer en revue l'aspect général ainsi que les faits de base sur le concept, les avantages et les inconvénients des différents réseaux connexes. Il est également important de comparer ces types de réseaux de point de vue avantages et inconvénients, qui doivent être pris en considération, lors de l'évaluation de la faisabilité de l'installation de tout réseau de communication.

1.3 Aspects des réseaux connexes

Généralement, un réseau informatique (ou télécom) est représenté par un ensemble d'ordinateurs (ou nœuds et terminaux des utilisateurs) interconnectés entre eux pour échanger de l'information (voix, données, images) [22]. Explicitement, on distingue différents types de réseaux qu'en peut classer, suivant la taille, la vitesse de transfert de données ainsi que l'étendue géographique, en quatre grandes catégories. Le réseau local "LAN" (Local Area Network), celui-ci permet de relier des ordinateurs et périphériques situés dans la même pièce, voire dans le même bâtiment ou campus. Le réseau sans fil "WLAN" (Wireless Local Area Network), il s'agit d'un réseau sans fil utilisant la technologie "WiFi" (Wireless Fidelity) pouvant couvrir plusieurs dizaines de mètres. Le réseau métropolitain "MAN" (Metropolitan Area Network), il peut couvrir une ville entière et ses périphéries. Enfin, le réseau étendu "WAN" (Wide Area Network), celui-ci peut couvrir un pays, un continent, ou le monde tout entier.

Notons bien que ces réseaux sont organisés suivant deux types de topologies : une topologie physique, qui décrit l'infrastructure d'interconnexion des systèmes informatiques et une topologie logique, qui représente l'architecture logicielle d'accès entre machines pour échanger des informations via la topologie physique. L'état de l'art et les tendances de ces technologies seront résumées sommairement dans les paragraphes suivants.

1.4 Topologie logique des réseaux

La topologie logique, qui est une architecture logicielle, désigne le mode d'échange des messages sur le réseau physique. Dans ce contexte, on trouve trois principales topologies logiques les plus utilisées, qui sont l'Ethernet (protocole de réseau local à commutation de paquets), le Token-Ring (réseau en anneau à jeton) et le FDDI (Fiber Distributed Data Interface) [2, 23].

Technologie Ethernet

Ethernet est un protocole (règles et conventions entre entités paires) de transmission de données dans un réseau local. Dans ce réseau, toutes les machines sont connectées à une même ligne de communication. Celle-ci est constituée, généralement, de câbles coaxiaux, de câbles à paires torsadées ou en fibres optiques. La gestion du trafic de données se fait à l'aide du protocole d'accès multiple avec surveillance de porteuse et détection de collision, appelé CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Contrairement au réseau à jeton, avec ce protocole toutes les machines sont autorisées à émettre sur la ligne à n'importe quel moment et sans aucune priorité ou droit de parole. Naturellement, avant d'émettre, chaque machine doit vérifier que le canal de transmission

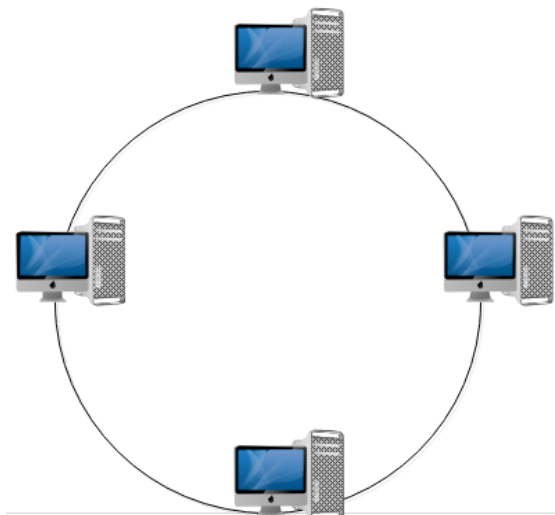


FIG. 1.2: Réseau en anneau à jeton (Token Ring). L'accès au réseau est basé sur le principe de la communication l'un après l'autre (paradigme du rond-point).

est libre. Si, par coïncidence, deux machines émettent simultanément, il y aura collision des trames de données et par suite perte de l'information. Dans ce cas, les deux machines interrompent automatiquement leur communication et attendent un délai aléatoire, qui dépend de la fréquence de collision, puis la première ayant passé ce délai peut alors réémettre à nouveau [23].

Technologie Token Ring

L'anneau à jeton (Token Ring) est une technologie d'accès au réseau basé sur le principe de la communication l'un après l'autre, autrement dit, chaque machine du réseau ne communique qu'à son tour (paradigme du rond-point), comme le montre la figure (1.2). Le jeton, qui est un paquet de données représentant une autorisation et circulant en boucle d'un ordinateur à un autre, détermine quel ordinateur a le droit d'émettre des informations. Lorsqu'un ordinateur est en possession du jeton il peut émettre pendant un laps de temps déterminé, après lequel il remet le jeton à l'ordinateur suivant.

Il est à noter que les ordinateurs d'un réseau de type "anneau à jeton" ne sont pas réellement disposés en boucle, comme le laisse penser notre imagination, mais sont reliés à un répartiteur appelé "MAU" (Multistation Access Unit), qui va gérer la communication entre les ordinateurs reliés en accordant, successivement et dans le même sens, "un temps de parole" à chacun d'entre eux, voire le schéma d'illustration (1.3). Signalons que le défaut majeur de ce type de réseau est que la défaillance d'un hôte rompt la structure du réseau si la communication est unidirectionnelle. Heureusement, en pratique, un réseau en anneau est souvent composé de deux anneaux contrarotatifs [23].

Technologie FDDI

La technologie FDDI (Fiber Distributed Data Interface) est un ensemble de normes pour la transmission de données sur des liaisons en fibres optiques dans un réseau local

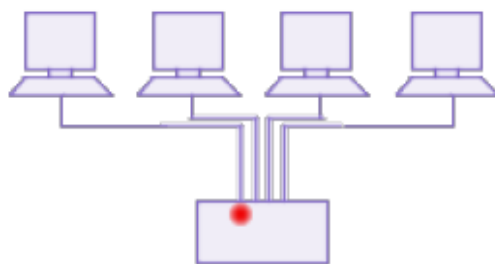


FIG. 1.3: Répartiteur "MAU" (Multi station Access Unit), qui gère la communication entre les ordinateurs reliés en accordant, successivement et dans le même sens, "un temps de parole" à chacun d'entre eux.

qui peut s'étendre jusqu'à 200 km. Le réseau FDDI est redondant, car il consiste en deux anneaux en fibre optique (primaire et secondaire). L'anneau secondaire est utilisé pour remplacer l'anneau primaire dans le cas d'une défaillance technique du réseau, c'est là que l'anneau secondaire prend son importance.

La technologie FDDI est fréquemment utilisée sur l'épine dorsale d'un réseau étendu (WAN), puisqu'elle est faite pour supporter de très gros volumes de données sur de grandes distances. Par ailleurs, le protocole FDDI est basé sur le protocole Token Ring. Donc, le FDDI est un anneau à jeton à détection et correction d'erreurs. Autrement dit, si le jeton, qui circule entre les machines à une très grande vitesse, n'arrive pas au bout d'un certain délai, la machine considère qu'il y a eu une erreur sur le réseau, et elle retransmet le paquet à nouveau. La topologie FDDI ressemble de très près à celle de Token Ring à la différence près qu'un ordinateur faisant partie d'un réseau FDDI peut aussi être relié à un concentrateur "MAU" (Multi station Access Unit) d'un second réseau. On parle, dans ce cas, de système bi-connecté [23].

1.5 Topologie physique des réseaux

Fondamentalement, la topologie physique désigne le mode d'interconnexion des différents éléments du réseau (câblage, micro-ordinateurs, périphériques, switches, routeurs, etc.). Communément, il existe plusieurs topologies physiques : le bus, l'étoile (ou star), l'anneau, le mesh (ou topologie maillée), qui peuvent être combinées pour donner naissance à des topologies hybrides. Dans ce qui suit, nous n'allons parler que des plus utilisées. L'architecture des différents nœuds et périphériques constituant chacun des différents types est expliquée succinctement ci-dessous.

Topologie en bus

L'architecture de ce réseau s'articule sur un câble coaxial unique (bus) sur lequel sont connectés en série tous les ordinateurs et les périphériques réseaux [24], comme le montre la figure (1.4). Dans ce mode, tous les ordinateurs sont liés entre eux via leurs cartes réseaux munies d'un connecteur en T de type BNC (British Naval Connector). En plus, puisque le bus est un réseau ouvert, chaque extrémité doit être munie d'un bouchon de terminaison de 50Ω pour supprimer le rebondissement (réflexion) des signaux qui se sont perdus et de

libérer ainsi le canal de transmission à d'autres machines pour envoyer leurs données sur le câble. Aussi, étant donné que le câble de transmission est commun et bidirectionnel, il ne faut pas que deux ordinateurs communiquent simultanément afin d'éviter la création de collisions. De ce fait, pour éviter la perte de l'information par effet de collision au niveau de la couche liaison de données, on utilise une méthode d'accès multiple au média (couche physique) avec surveillance de porteuse et détection de collision, appelée "CSMA/CD" (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Donc, toute machine qui veut communiquer écoute, tout d'abord, le réseau pour déterminer si une autre machine est en train d'émettre. Si c'est le cas, elle doit attendre que l'émission soit terminée pour transmettre sa communication.



FIG. 1.4: L'architecture de la topologie en bus s'articule sur un câble coaxial unique (bus) sur lequel sont connectés en série tous les ordinateurs et les périphériques réseaux.

Actuellement, ce réseau est devenu obsolète pour plusieurs raisons. Certes, il est le plus simple et le moins cher des réseaux LAN, mais il est limité en matière de débit (10 Mbits/s), difficile à dépanner ou à localiser la panne en cas d'une défaillance technique de l'un de ces éléments. En plus, dans le cas d'une coupure de câble l'ensemble du réseau est mis hors service, car le réseau se sature par effet de rebondissement des signaux émis par les différentes stations communicantes. Par ailleurs, cette topologie favorise les collisions de trames ce qui provoque une surcharge sur le bus et par suite fait diminuer la bande passante, notamment dans le cas d'un réseau d'une taille maximale (30 machines au plus). Avec cette topologie, lorsqu'un nœud émet, le message est envoyé des deux côtés du bus. Donc, si beaucoup de machines émettent simultanément, ce qui conduit à des probabilités de collisions très élevées. Ainsi, les défauts de performance en matière de fiabilité et de souplesse à la réparation ont conduit la topologie en bus à disparaître progressivement au profit de la topologie en étoile.

Topologie en étoile

La topologie physique est dite en "étoile" si tous les nœuds sont reliés à un équipement central appelé commutateur (ou Switch) [24], comme l'illustre la figure (1.5). L'avantage de cette architecture est que l'élément central, qui joue un rôle primordial dans la gestion des communications entre tous les éléments interconnectés, permet d'éviter ou de diminuer au maximum le risque de collision de données. Cependant, la topologie logique utilisée est celle de la technologie en bus. En effet, sur un commutateur, seule une machine peut émettre à la fois. Les autres doivent écouter, à tout moment, le réseau pour savoir si elles

peuvent émettre ou non. Par ailleurs, on note que le principal défaut de cette topologie, grande consommatrice de câblage, réside dans le fait que si l'élément central, qui constitue un point unique de défaillance, tombe en panne tout le réseau sera paralysé. Malgré ce handicap, les professionnels des réseaux préfèrent les topologies de type étoile. Car, il est extensible, c'est à dire, il est facile d'ajouter ou de supprimer des postes sans affecter le bon fonctionnement du réseau. En plus, il est caractérisé par une gestion centralisée, ce qui lui permet d'être rapide et précis dans l'envoi de l'information (messages ciblés). En matière d'implémentation, sa mise en œuvre progressive est très flexible, car les changements futurs ne nécessitent pas de modification dans le pré-câblage, ce qui permet, de manière rapide et économique, toute modification de configuration, contrairement à la topologie en anneau.

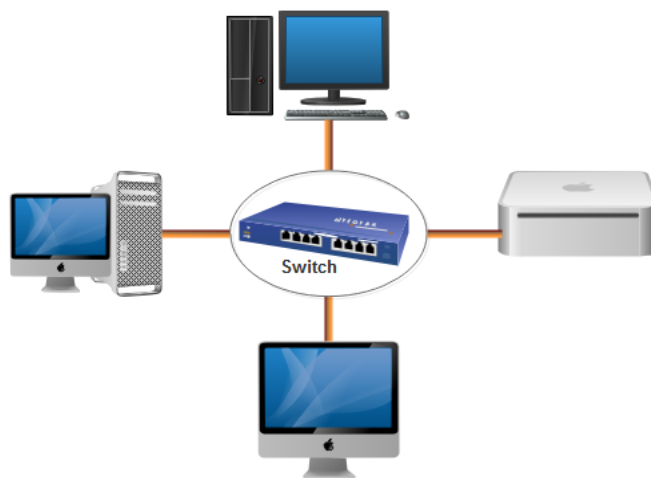


FIG. 1.5: Dans un réseau en étoile, toutes les machines sont connectées à un élément central (Switch), qui gère les communications entre elles.

Topologie en anneau

Dans la topologie physique en anneau tous les éléments sont liés sur une boucle (un bus fermé sur lui-même) et communiquent alternativement à tour de rôle dans un sens unique. Cependant, le mode d'échange des messages sur le réseau est celui du token ring, qui utilise une méthode anticollision toute à fait différente à celle de la topologie en bus. En effet, le système token ring utilise la technique d'accès multiple avec surveillance de porteuse et prévention de collision, appelée CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), qui est principalement utilisée dans les réseaux locaux sans fil où les collisions sont reléguées. Donc, les réseaux en anneau utilisent des techniques de jeton par lesquelles seule la machine qui possède le jeton a le droit de transmettre. Une fois que la machine a transmis ce qu'elle voulait, elle passe le jeton à la machine suivante et ainsi de suite [23].

Topologie maillée

Une topologie maillée correspond à plusieurs liaisons point à point, comme le montre la figure (1.6). Principalement, l'architecture maillée est utilisée dans les réseaux sensibles. Car, dans de tels réseaux les différents nœuds sont connectés via plusieurs chemins de transfert afin de garantir le transport de données en cas de panne d'un nœud quelconque. Internet est l'exemple d'un réseau maillé garantissant ainsi la communication via plusieurs différentes routes déjà disponibles dans les réseaux en anneaux SONET (Synchronous Optical Networking) et SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Le principal avantage de ce type de topologie est la tolérance et l'adaptabilité aux défaillances techniques et de coupure d'une liaison de communication donnée. Alors que son défaut majeur réside dans la difficulté technique liée aux équipements installés dans chaque nœud pour le guidage et le routage des données. Car, les réseaux de transport évoluant vers des topologies de maillage utilisent des éléments de réseau intelligents. Donc, le maillage ou le mélange de plusieurs types d'architectures au sein d'un même réseau est appelé réseau hybride.

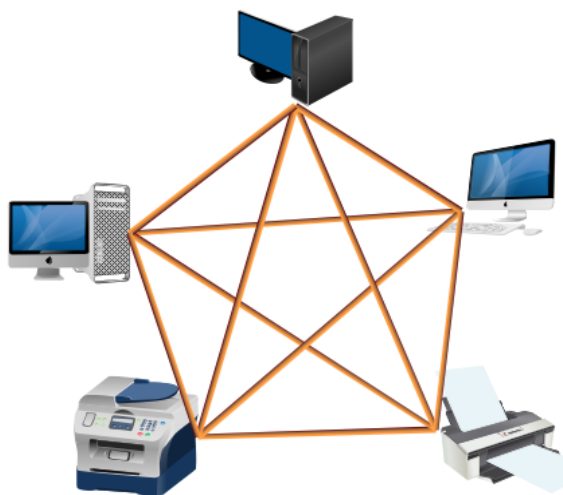


FIG. 1.6: La topologie maillée utilise des éléments de réseaux intelligents. Les différents nœuds sont connectés via plusieurs chemins de transfert afin de garantir le transport de données en cas de panne d'un nœud quelconque.

Topologie hybride

Une topologie hybride consiste en le regroupement de plusieurs topologies différentes, ce qui permet d'éliminer les frontières entre les différents types de réseaux. Par exemple, le réseau des réseaux, qui est Internet, est une parfaite illustration d'un réseau hybride. Car, il joint ensemble différents types de réseaux (anneau, bus, étoile, etc.). Donc, le mélange harmonisé de regroupements de nœuds, qui impose une redondance de câblage, permet d'assurer une connectivité garantie en s'adaptant à toutes les circonstances.

Formellement, le concept de réseau hybride devient de plus en plus présent dans les réflexions des acteurs du marché des télécoms sur le réseau de demain. En effet, face à l'augmentation des besoins en bande passante et sous la pression du contexte économique,

la technologie MPLS (Multi Protocol Label Switching), qui est un mécanisme de transport de données basé sur la commutation d'étiquettes (ou labels) et qui permet d'acheminer sur une même infrastructure différents types de trafic, semble se parfaire au profit de l'apparition de nouveaux réseaux WAN hybrides. Selon cette nouvelle tendance, les technologies réseaux hybrides, qui mixent les réseaux WAN et le réseau Internet sur un même site, font la promesse de performances et de disponibilité accrues pour un coût moindre. Car, l'aspect unificateur pris en compte dans l'approche "réseau hybride", en plus de ces avantages, est de réduire le prix pour l'utilisateur final.

Comme avantages de ces nouveaux réseaux, nous pouvons citer quelques exemples. Le partage des ressources informatiques (imprimantes, photocopieurs, graveurs, disque dur de stockage de fichiers, etc.) représente un investissement très économique pour les particuliers et les entreprises pour l'amortissement de leurs dépenses. De même, le partage des logiciels, qui sont généralement très coûteux en version monoposte deviennent très abordables en version multipostes, est devenu quelque chose de facile grâce à des serveurs équipés de systèmes de prévention de pannes de nature électriques ou logiciels, autour desquels sont interconnectés les ordinateurs et des périphériques du réseau. Par ailleurs, la mise à jour de ces logiciels assure une évolutivité permanente du réseau. Enfin, la sécurité, la gestion, et l'intégrité des documents est assuré par un accès contrôlé par des mots de passe pour l'ensemble des utilisateurs.

1.6 Les réseaux télécoms sur fibres optiques

Pour commencer, on peut se poser la question suivante : qu'est-ce qu'un système de communication optique ? En réponse à cette question, on peut dire que tout le monde est habitué à la transmission d'information sous forme de signaux électriques (téléphone, radio, satellite, etc.). Cependant, il existe relativement un nouveau système de télécommunications moderne utilisant les ondes lumineuses comme ondes porteuses d'informations. La mise au point de ce nouveau mode de communication revient en grande partie à la maîtrise des techniques de fabrication de la fibre de qualité optique, la disponibilité des sources lumineuses infrarouges à base de semi-conducteurs, et le développement avancé des technologies de l'optique non linéaire.

En effet, l'utilisation de la lumière en télécommunications sur fibres optiques est une simple transposition naturelle de la transmission des signaux électriques sur câbles métalliques. Cependant, la communication optique sur les réseaux publics est rendue utilisable grâce à deux avancées technologiques : la fabrication du laser à semi-conducteur à hétérojonction AlGaAs en 1969, et la mise au point de la fibre optique à faible atténuation en 1970. Selon [2], il existe trois principaux types de réseaux optiques publics (WAN, MAN, LAN), schématiquement représentés sur la figure (1.7). Les liens entre les différents sites sont des câbles constitués de plusieurs fibres optiques.

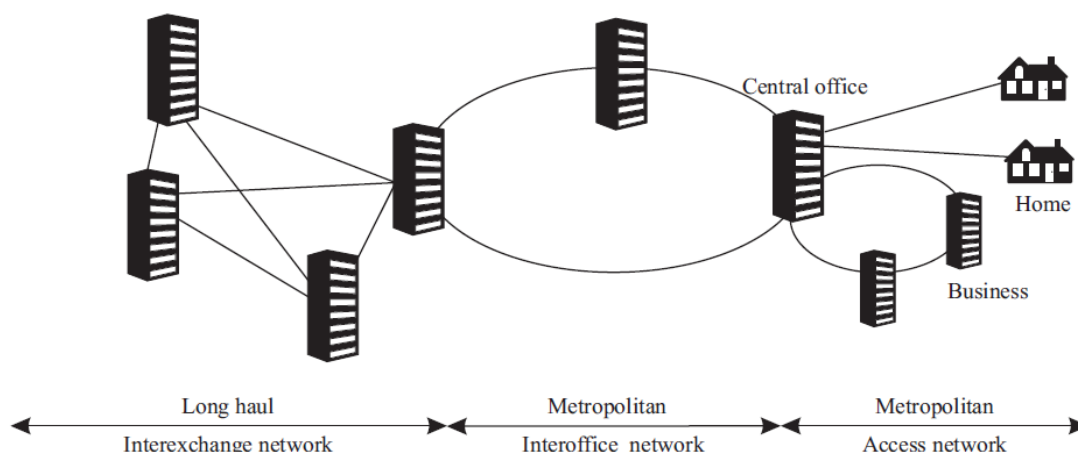


FIG. 1.7: Schéma représentant les trois principaux types de réseaux optiques publics (WAN, MAN, LAN). Les liens entre les différents sites sont des câbles constitués de plusieurs fibres optiques, d'après [2].

1.7 Le réseau étendu (WAN)

Le réseau étendu ou longue distance "WAN" (Wide Area Network) est déployé à l'échelle d'un pays, d'un continent, ou le monde tout entier (Internet est un exemple). Ces nœuds sont de très grands centres urbains reliés par des multiplexeurs d'insertion et d'extraction. Ces derniers utilisent une topologie propre à la hiérarchie numérique synchrone SDH (Synchronous Digital Hierarchy) avec des boucles en double anneau permettant en cas de panne d'un anneau de rediriger les signaux sur l'autre. Les réseaux WAN terrestres (ou sous-marins) sont conçus pour véhiculer des données à haut débit (2.5, 10, 40 Gb/s) et à grande vitesse sur de longues distances à plus de 1000 km moyennant l'utilisation d'amplificateurs et de répéteurs pouvant régénérer le signal optique. Autrefois, ces répéteurs étaient constitués par des stations régénératrices optoélectroniques 3R (Regenerating, Reshipping, Retiming), qui ont pour rôle principale la régénération, la remise en forme et la synchronisation des signaux. Actuellement, on utilise en ligne des composants actifs tout-optique, tels que les amplificateurs optiques EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), et des composants passifs, comme les coupleurs, les multiplexeurs, les réseaux de Bragg, pour la régénération, l'insertion, et l'extraction des signaux optiques [2].

1.8 Le réseau métropolitain (MAN)

Le réseau métropolitain "MAN" (Metropolitan Area Network) est un réseau qui dessert une grande ville et ses périphéries, il joue le rôle d'intermédiaire entre le réseau d'accès (réseau de distribution) et le réseau de transport. Ce type de réseau a une longueur qui peut varier entre 1 jusqu'à 100 km [2]. C'est un réseau évolutif présentant un grand degré de connectivité. Il est basé sur la technologie des anneaux métropolitains, qui se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance. Les anneaux d'accès collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau mé-

tropolitain structurant. En plus, il doit, à la différence du réseau longue distance, prendre en charge des formats, des protocoles, et des débits de transmission très divers. Il est souvent équipé par des cartes transpondeuses multi-débits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mb/s à 2.5 Gb/s. Par ailleurs, étant donné que les distances sont plus faibles, ce type de réseau nécessite moins d'amplificateurs optiques. Il est particulièrement utilisé dans la liaison des succursales des entreprises situées dans la même ville [2].

1.9 Le réseau local (LAN)

Le réseau local "LAN" (Local Area Network) appelé, aussi, réseau d'accès ou de desserte. Traditionnellement, ce réseau dont les distances de liaison entre les différentes machines formant le réseau sont très faibles, on le trouve dans les entreprises, les établissements scolaires, les administrations, les salles informatiques, etc. Généralement, ce réseau est constitué par une partie en fibre, qui se situe entre l'autocommutateur à autonomie d'acheminement et la terminaison du réseau optique (nœud optique), suivie d'une partie en fil de cuivre (coaxial ou torsadé) qui va jusqu'au terminal de l'abonné, c'est la technologie FTTx proprement dites [25].

1.10 Technologie FTTx

Le FTTx est un terme générique pour toute architecture de réseau à large bande, qui utilise la fibre optique pour remplacer le tout ou une partie de la boucle locale, habituellement, en fil métallique. Présentement, l'optique est déjà installée dans les réseaux de desserte grand public. La terminologie FTTx regroupe plusieurs concepts distincts. Plusieurs abréviations sont généralement utilisées pour parler de la technologie FTTx, qui se divise en trois catégories principales. On parle de la fibre jusqu'au quartier FTTN (Fiber To The Neighborhood), la fibre jusqu'au pied d'immeuble FTTB (Fiber To The Building), ou la fibre jusqu'au domicile FTTH (Fiber To The Home). Ainsi, les débits autorisés par la fibre optique permettent bien évidemment de couvrir facilement tous les besoins en bande passante des nouveaux services, qui exigent encore plus de bande passante, comme la télévision en haute définition (HDTV) ou la télévision en relief (3D), les applications du web, la téléphonie sur Internet (VoIP), la vidéos à la demande en 3D, etc.

La technologie FTTH permet concrètement de lever les barrières de débits que la technologie xDSL a imposé ces dernières années. Au vu du grand nombre d'applications déjà disponibles et celles qui vont émerger, elle est devenue la technologie de choix des nouvelles générations de réseaux de communication à travers le monde. Car, elle permet d'offrir d'emblée de nouveaux services, tels que l'apprentissage à distance, le télétravail, la télémédecine, le partage de gros fichiers Peer-to-Peer, les jeux en ligne, les technologies de divertissement à domicile, et enfin l'Internet de tous les objets, c'est à dire, les systèmes domotiques qu'on peut piloter depuis un Smartphone ou un ordinateur que l'on soit à la maison ou à distance.

Généralement, la topologie du réseau FTTx peut être de type point-à-point ou point à multipoint, active ou passive. Les architectures réseaux sont dites actives ou passives,

selon la présence ou l'absence d'équipements actifs. Ces derniers exigent une source d'énergie entre le site central de l'opérateur et les points de desserte. Dans ce qui suit, nous présentons en revue, les différents schémas de déploiement du réseau FTTx [26, 2, 25]. L'accès à la technologie FTTx se divise en quatre grandes catégories avec des dérivées associées en fonction de l'implantation physique choisie par les fournisseurs d'accès, comme le montre la figure (1.8).

La fibre jusqu'à l'abonné (FTTH)

La fibre jusqu'à l'abonné (ou la fibre à la maison) est définie comme une architecture de réseau d'accès dans laquelle le raccordement au logement ou au local professionnel de l'utilisateur final est assuré par fibre optique destinée à desservir un utilisateur unique en services de télécommunications [26, 2, 25]. Dans un réseau point-à-point (P2P), chaque abonné est relié au NRO (Nœud de Répartition Optique) ou au PM (Point de Mutualisation) par une fibre qui lui est propre. Ce dernier point est situé en zone très dense dans un immeuble, en général au sous-sol. En dehors des zones très denses, il est situé dans une armoire de rue ou dans un local technique (shelter). Il est à noter que l'architecture (P2P) est utilisée aujourd'hui pour le réseau téléphonique, où chaque paire de cuivre est reliée au NRA (Nœud de Raccordement d'Abonnés), distant de plusieurs km (3 km au maximum), figure (1.8).

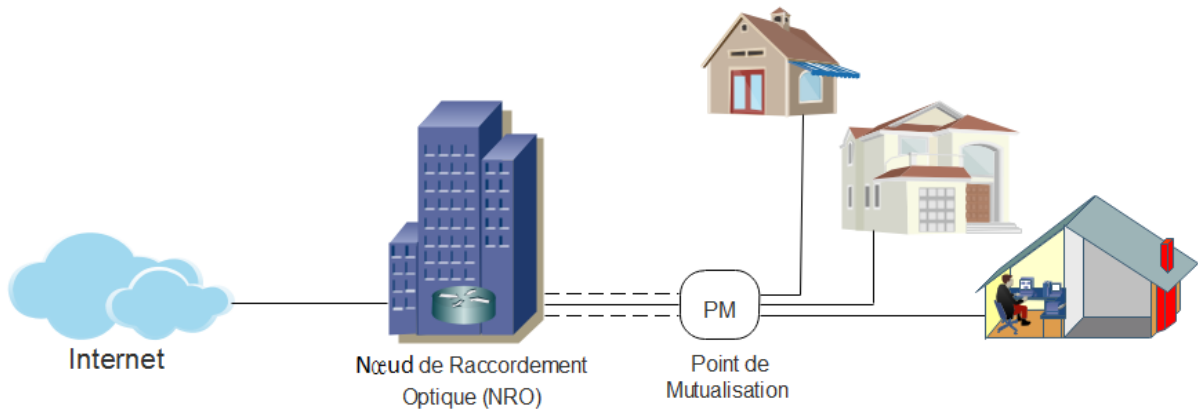


FIG. 1.8: Dans un réseau point-à-point (P2P), les signaux venant des fibres de plusieurs abonnés sont rassemblés par un diviseur (coupleur optique) au sein d'une unique fibre reliée au central OLT (Optical Line Terminal) ou au point de mutualisation (PM).

Alors que dans un réseau point-à-multipoint (P2MP), les signaux venant des fibres de plusieurs abonnés sont rassemblés par un diviseur (coupleur optique) au sein d'une unique fibre reliée au central OLT (Optical Line Terminal), qui représente le central téléphonique. Chaque client ne peut donc pas être dégroupé indépendamment. La seule possibilité de mutualisation d'un réseau P2MP est au niveau du "point de mutualisation" où sont installés les coupleurs PON (Passive Optical Network), figure (1.8). Il est à noter, aussi, que dans ce genre de réseaux optiques, dits passifs, le trafic montant et le trafic descendant sont transportés par deux longueurs d'ondes différentes [2].

La fibre jusqu'à l'immeuble (FTTB)

La fibre jusqu'à l'immeuble est définie comme une architecture de réseau d'accès dans laquelle le raccordement au logement ou au local professionnel de l'utilisateur final est assuré par un support physique qui n'est pas de la fibre optique. La prise optique est située à l'intérieur du bâtiment. Elle est destinée à desservir un ou plusieurs utilisateurs (logements ou locaux professionnels) en services de télécommunications.

La fibre jusqu'au dernier amplificateur (FTTLA)

La technologie de la fibre jusqu'au dernier amplificateur FTTLA (Fiber To The Last Amplifier) permet de réutiliser l'infrastructure en câbles métalliques existante. La fibre est amenée au niveau du dernier amplificateur, soit au niveau du quartier en zone moins dense ou au niveau de l'immeuble en zone très dense. Dans certains cas, la fibre est conduite précisément via les colonnes montantes jusqu'aux répartiteurs d'étages. Donc, les derniers mètres réutilisent l'infrastructure en câble coaxial ou en paires torsadées. Enfin, il est à noter que la technologie FTTx a permis d'ajouter, à l'ensemble des technologies existantes, de nouvelles méthodes de densifications d'utilisateurs et de multiplications de débits, grâce aux techniques de multiplexage.

Techniques de multiplexage

Le principe général du multiplexage est simple à comprendre, il consiste à faire circuler plusieurs types d'informations entre divers équipements télécoms (ou informatiques) sur un seul canal de transmission, figure (1.10, c). Ce canal de communication peut se présenter sous différentes formes, à savoir, le fil de cuivre pour les transmissions analogiques ou numériques, les ondes hertziennes pour les liaisons satellitaires et la téléphonie mobile, et enfin, la fibre pour les transmissions optiques modernes. A l'aide de ce principe simple, de larges économies sont possibles grâce à la réduction des coûts d'installation (ou d'exploitation).

Théoriquement, la bande passante d'une fibre optique monomode utilisée dans les transmissions optiques est de $\sim 25 THz$ pour la longueur d'onde $\lambda = 1550 nm$, celle-ci se situe dans la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible $0,2 dB/km$ [27]. L'importance de la bande passante est qu'elle permet de répondre à la demande en matière de capacité pour de nouveaux réseaux à haut débit de plusieurs Gb/s . Cependant, l'instrumentation électronique associée à l'émetteur et au récepteur n'est pas capable, pour le moment, d'exploiter cette performance offerte par la fibre optique, ce qui limite la capacité de transmission. Mais, actuellement, plusieurs techniques existent pour résoudre ce problème de limitation de débit. Principalement, il existe plusieurs approches notées par des acronymes de type $xDMA$ (x Division Multiple Access) pour augmenter le transfert d'informations sur un seul canal de transmission, notamment la fibre optique, en utilisant une technique de multiplexage.

Le principe est simple, on multiplexe sur la même fibre un nombre N de signaux optiques d'origines diverses (voix, données, images). Chaque signal est modulé séparément à un débit de $d bits/s$, ce qui permet d'obtenir un signal multiplexé avec un débit de $d.N bits/s$. Pour préserver l'intégrité de l'information, on introduit pour le même type de signal une séparation temporelle TDM (pour Time Division Multiplexing), spatiale WDM

(pour Wavelength Division Multiplexing), fréquentielle FDM (pour Frequency Division Multiplexing), ou un codage CDM (pour Code Division Multiplexing).

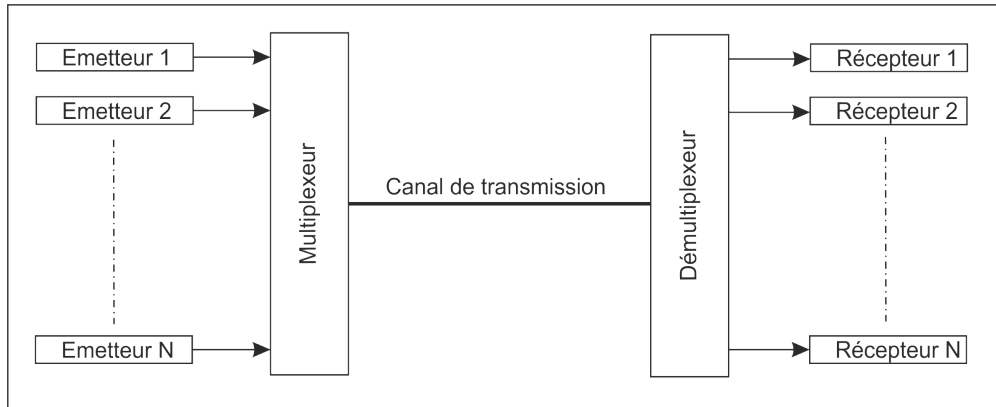


FIG. 1.9: Principe du multiplexage : on multiplexe sur le même canal de transmission un nombre N de signaux d'origines diverses (voix, données, images). Chaque signal est modulé séparément à un débit de $d \text{ bits/s}$, ce qui permet d'obtenir un signal multiplexé avec un débit de $d.N \text{ bits/s}$.

1.11 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage à répartition temporelle TDM (Time Division Multiplexing) consiste à allouer à chaque utilisateur et à tour de rôle la totalité de la bande passante pendant un segment de temps prédéfini T_b . Le principe de fonctionnement, d'après le schéma (1.10, a), est simple, le temps de transmission d'un bit T_b est très inférieur au temps T_e d'échantillonnage (temps entre deux bits successifs). Donc, l'intérêt de ce type de multiplexage est d'exploiter le temps mort ($T_e - T_b$) pour l'envoi d'autre bits. Ainsi, il est possible, d'après la figure (1.10, b), de transmettre jusqu'à huit communications successives durant le temps T_e . A la réception, il suffit d'utiliser un commutateur pour la récupération à chaque instant T_b l'information destinée aux différents utilisateurs.

Dans le système TDM, l'émetteur est constitué par N sources optiques modulées en parallèle au débit $x \text{ bits/s}$, ce qui fait qu'à la sortie du multiplexeur le débit est de N fois x . Actuellement, cette technique permet d'atteindre des débits très élevés (plus de 1 Tb/s), mais elle est beaucoup trop coûteuse étant donné qu'il est nécessaire de réaliser de gros investissements dans de nouvelles infrastructures. En plus, cette technique nécessite que les impulsions optiques émises soient de durée inférieure à T_b afin d'éviter le recouvrement entre symboles. Il est à noter, aussi, que la technique TDM peut s'effectuer de manière tout-optique, on parle alors d'OTDM (pour Optical TDM), ou de manière électrique, on parle donc d'ETDM (pour Electrical TDM). Il ressort de cette manière de procéder différents avantages et inconvénients. En effet, il s'agit d'une technique qui permet tout simplement de regrouper un grand nombre de signaux sur un seul support de transmission, ce qui permet de limiter la perte de bande passante de la fibre optique, par exemple.

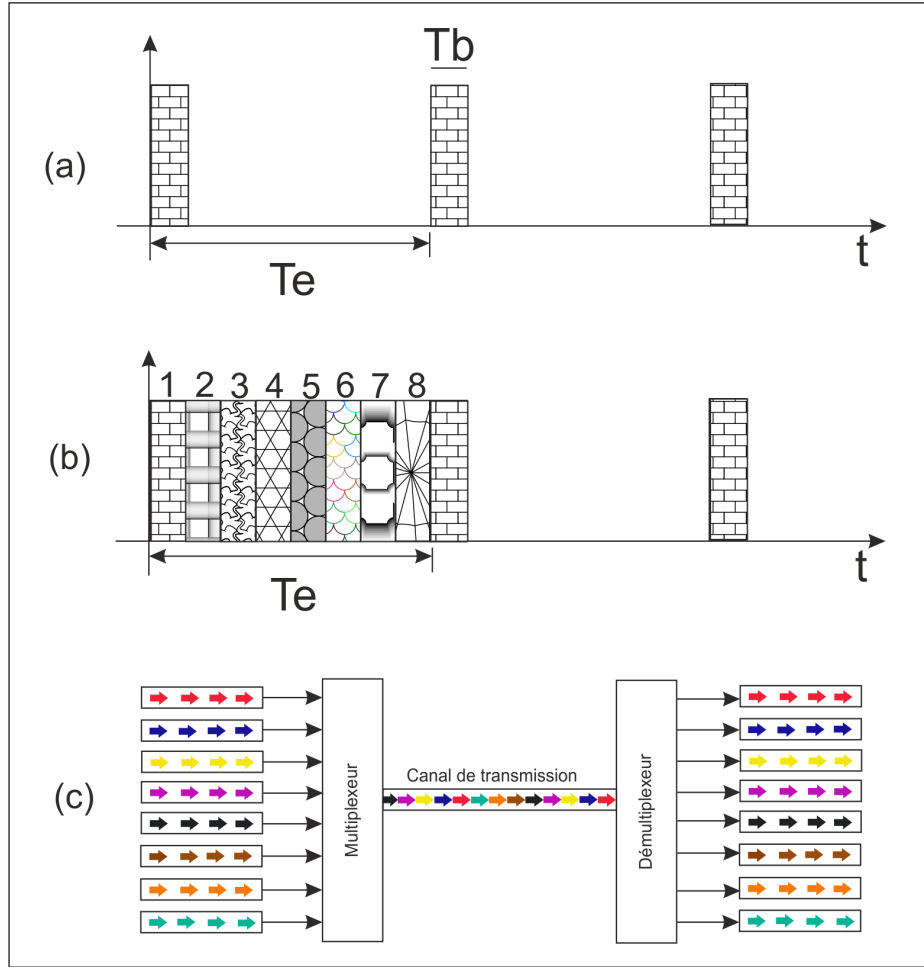


FIG. 1.10: Principe de multiplexage à répartition temporelle TDM (système pour 8 utilisateurs) : a) le temps de transmission de bits T_b est très inférieur au temps d'échantillonnage T_e ; b) le temps mort ($T_e - T_b$) a été exploité pour l'envoi d'autres bits d'informations de durée T_b ; c) illustration schématique du découpage temporel entre les différentes liaisons.

1.12 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Le principe de cette technologie consiste à envoyer plusieurs ondes, porteuses d'informations, de longueurs différentes sur la même fibre afin de maximiser sa bande passante. Le but essentiel de cette nouvelle méthode d'exploitation des lignes déjà enterrées est d'augmenter ainsi le débit de plusieurs ordres de grandeur par comparaison aux liaisons monocanal. Dans le schéma de la figure (1.11), qui décrit l'architecture de base et le fonctionnement d'un réseau "WDM" (Wavelength Division Multiplexing), chaque diode laser est modulée de façon indépendante et toutes les ondes sont ensuite transmises par multiplexage dans une fibre unique à l'aide d'un composant optique passif (multiplexeur). A la sortie de la fibre, les longueurs d'onde sont à nouveau démultiplexées et chaque signal optique indépendant retrouve son détecteur propre. Ainsi, les signaux de sortie sont traités pour restituer l'information aux différents utilisateurs.

Le fait d'utiliser plusieurs longueurs d'ondes différentes, cette technique offre la possibi-

lité de transmettre en bidirectionnelle contrairement à d'autres méthodes de multiplexage qui utilisent une seule longueur d'onde dans les deux sens contraignant à l'utilisation de deux fibres optiques pour la transmission et la réception respectivement.

La technologie WDM nécessite naturellement un développement de diodes lasers monomodes très stables en fréquences (longueurs d'ondes) et de filtres optiques sélectifs, des coupleurs (multiplexeurs), et des amplificateurs. L'avantage de la technique WDM est qu'elle n'est pas tributaire de la vitesse des équipements électroniques. De plus, en WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux. Cependant, à cause des limitations physiques précédemment cités, le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est limité. Il était d'une dizaine de longueurs d'ondes, il y a quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui avec des débits pouvant atteindre 2,5 Gbit/s par canal [28]. De ce fait, il existe aujourd'hui plusieurs technologie WDM, qui restent identiques par leur principe, mais dont la différence unique réside dans la séparation spatiale entre les différents canaux optiques utilisés.

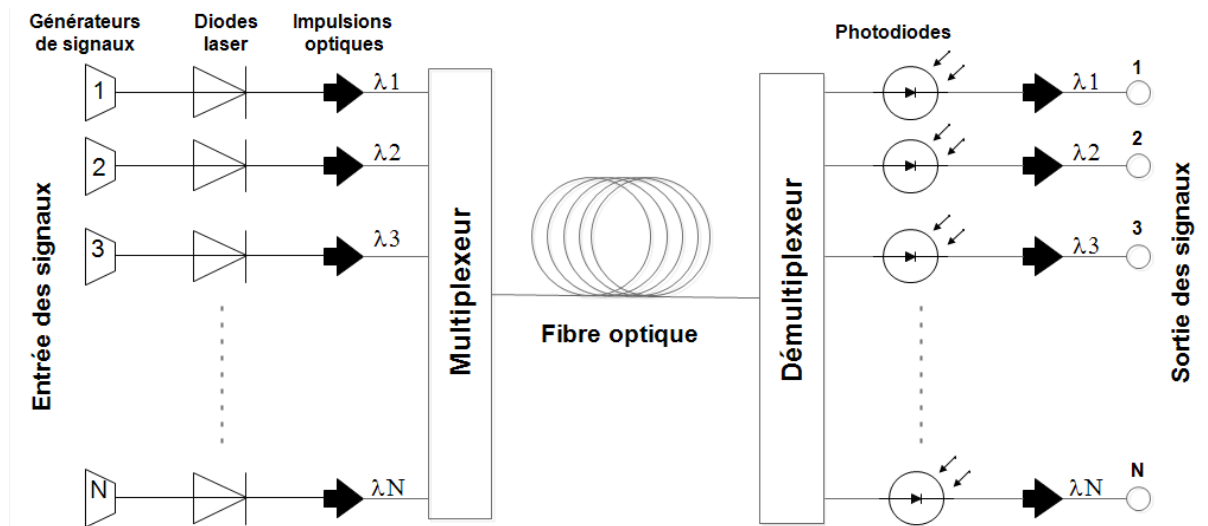


FIG. 1.11: Architecture de base et le fonctionnement d'un réseau WDM : chaque diode laser est modulée de façon indépendante et toutes les ondes sont ensuite transmises dans une fibre unique à l'aide d'un multiplexeur. A la sortie de la fibre, les longueurs d'onde sont à nouveau démultiplexées et chaque signal optique indépendant retrouve son détecteur propre.

D'après la littérature [28], le tableau (1.1) résume les caractéristiques des différents modes WDM les plus répandus. Ainsi, lorsque l'espacement entre les longueurs d'onde se situe entre 20 - 25 nm, on parle de Coarse WDM (CWDM). Dans ce cas, le nombre de canaux peut atteindre jusqu'à 16 longueurs d'onde. La technologie WDM est dite dense (D-WDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm (100 GHz). Des systèmes à 0,4 nm (50 GHz) et à 0,2 nm (25 GHz) permettent d'obtenir jusqu'à 80 et 160 canaux optiques respectivement. Mais, pour des espacements encore plus faibles à 0,08 nm, on parle de U-WDM (Ultra-Dense-WDM). Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0,08

nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques, ce qui offre la possibilité d'atteindre un débit de 4000 Gb/s (4 Tera bits/s) en utilisant un débit nominal de 10 Gb/s par canal.

TAB. 1.1: Résumé des caractéristiques des différents modes WDM les plus répandus.

Désignation	Corse-WDM	Dense-WDM	Ultra-Dense-WDM
Nombre de canaux	jusqu'à 16	8 à 128	$\succ 400$
Espacement des canaux	20 - 25 nm	0,4 - 1,6 nm	0,08 nm
Fênetre spectrale	$\sim 1260 - 1620 nm$	$\sim 1500 - 1600 nm$	$\sim 1500 - 1600 nm$
Débit/longueur d'onde	1,25 - 2,5 Gbits/s	10 - 40 Gbits/s	$\succ 40$ Gbits/s

Notons que les canaux de transmission peuvent être identifiés, soit par la fréquence ν de l'onde porteuse, soit par sa longueur d'onde λ , sachant que ces deux grandeurs sont reliées par la relation $\lambda \cdot \nu = c$, avec c la vitesse de la lumière dans le vide. Effectivement, la relation précédente, nous permet de calculer la largeur de bande optique séparant deux canaux successifs. Celle-ci peut être évaluée en termes de fréquence ou de longueur d'onde. Le facteur de conversion entre les nanomètres (nm) et les gigahertz (GHz) dépend de la fréquence ou de la longueur d'onde centrale considérée. Donc, pour la conversion d'une petite plage spectrale en une plage équivalente en longueur d'onde on utilise l'expression résultante de la différentielle totale de la relation précédente, soit :

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (1.1)$$

1.13 Multiplexage fréquentiel

Le multiplexage par répartition de fréquences FDM (pour Frequency Division Multiplexing) consiste à subdiviser la bande passante en un certain nombre de canaux (sous-bandes fréquentielles) plus étroits affectés en permanence chacun à un usager exclusif, comme le montre la figure (1.12). Dans ce cas, tout le domaine temporel est accordé à tous les utilisateurs, autrement dit, tous les clients peuvent parler en même temps.

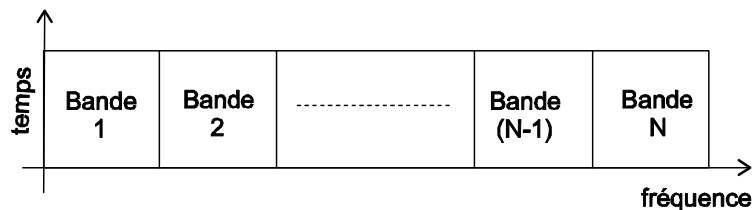


FIG. 1.12: Principe de la technologie de multiplexage par répartition de fréquences FDM : la bande passante est divisée en un certain nombre de canaux plus étroits affectés en permanence chacun à un usager exclusif. Donc, tout le domaine temporel est accordé à tous les utilisateurs, autrement dit, tous les clients peuvent parler en même temps.

1.14 Multiplexage par répartition de code (CDMA)

Historiquement, c'est l'actrice américaine Hedy Lamarr qui est à l'origine de la technique d'étalement radiofréquence CDMA (Code Division Multiple Access), qui est à la base de la téléphonie mobile actuelle. Cependant, cette nouvelle technique a été développée par la marine américaine dans le but de protéger la transmission d'informations confidentielles contre le brouillage et l'interception. Donc, dans les systèmes d'accès multiple par répartition de code, tous les utilisateurs émettent simultanément sur toute la largeur de la bande passante du canal de communication. Pour assurer l'intégrité de l'information, à chaque utilisateur correspond une clé (ou code d'étalement) à l'aide de laquelle son message est codé à l'émission et décodé à la réception. Les systèmes de communication, qui fonctionnent sur la base de ce concept, sont des «systèmes à étalement de spectre» [29]. Dans cette technique, le spectre de fréquence d'un signal de données est étalé en utilisant un code non corrélé avec ce signal. Il en résulte que le taux d'occupation de la bande passante est nettement plus élevé que nécessaire. Les codes utilisés pour l'étalement ont de faibles valeurs de corrélation croisée et sont uniques pour chaque utilisateur. Ceci est la raison pour laquelle chaque récepteur doit connaître le code de l'émetteur prévu, afin de pouvoir sélectionner le signal désiré pour chaque utilisateur.

1.15 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous pouvons dire que la croissance du besoin soutenu par le bien-être de notre société a conduit à la création des réseaux de communications. Le rôle primordial d'un réseau télécom (ou informatique) est de faire circuler des informations diverses (données, voix, images) entre un émetteur et un récepteur via un support de transmission avec un minimum de distorsion et de perte de puissance du signal porteur de l'information. Les avantages offerts par ces réseaux sont nombreux, à savoir, le partage des ressources matériels les plus coûteuses telles que les disques durs hautes capacités de stockage de fichiers, les imprimantes, les scanners, les graveurs, etc. En matière de software, les logiciels sont moins coûteux en version multipostes, leur évolution est garantie une fois installés sur des serveurs, cela permet une meilleure communication et gestion des documents, des messages et des ressources humaines. En plus, les serveurs, qui sont généralement équipés par des systèmes de prévention des pannes électriques (onduleurs), offrent une sécurité d'accès aux données, grâce à des accès sélectifs et à des mots de passe, ce qui réduit aussi le risque de contamination par des virus.

Actuellement, la technologie de multiplexage en longueurs d'ondes "WDM" (Wavelength Division Multiplexing), avec l'intégration d'amplificateurs optiques, est sans concurrence du point de vue évolutivité, portée et capacité de transmission, car le coût de la fibre et des matériaux connexes ne cesse de baisser avec des portées toujours plus longues. L'accroissement de la capacité se fait de deux façons : en augmentant le nombre de canaux dans une fibre et en augmentant le débit par canal lors de l'émission. L'évolution du WDM a permis de battre de nouveaux records en matière de débit. Le constructeur Japonais Nippon Télégraphe and Téléphone détient actuellement un record de débit. Une équipe d'ingénieurs (Sano, Yokosuka, Atsugi, et Tsukuba) principalement japonais dirigée par Akihide Sano de NTT Corporation a démontré la transmission de données sur une section de 450 km de fibre optique multi-cœurs à des taux qui se rapprochent d'une peta

bit par second (1 *peta* = 10^{15}). La figure 1.13 représente la structure de la fibre utilisée, qui est une fibre à 12 cœurs en double anneaux, est conçue pour une utilisation bidirectionnelle, avec six cœurs dédiés à la transmission dans chaque direction ; un taux de 409 Tbit/s dans chaque sens de transmission a été réalisée, pour un total de 818 Tbit/s, d'après [3].

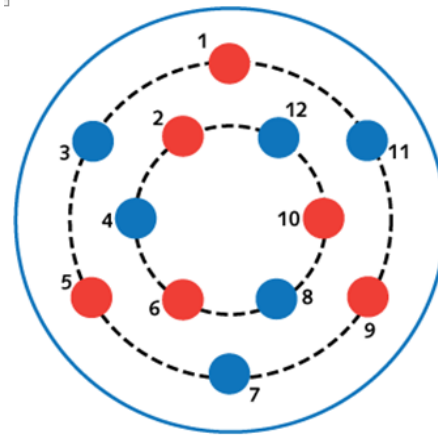


FIG. 1.13: Une fibre optique à 12 cœurs avec un diamètre de gaine de $230 \mu m$ et les zones efficaces de base individuelle de $105,8 \mu m^2$ peut transmettre 409 Tbit/s dans chaque direction, pour un total de 818 Tbit/s. Les positions de base sont entrelacées de sorte qu'ils alternent dans la direction de propagation (représenté en rouge et bleu), d'après [3].

Donc, l'utilisation des différentes techniques de multiplexages, citées précédemment, soutenues par l'arrivée des amplificateurs optiques, des sources lasers accordables et stabilisés en fréquences, l'optimisation et la maîtrise de fabrication de fibres de qualité optique, permet d'obtenir de très haut débits de transmission sur des liaisons longues distances moyennant l'utilisation de répéteurs tout-optique tout les 100 à 150 *km*.