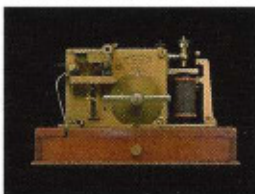




# Les transmissions optiques

### HISTOIRE DE TÉLÉCOMMUNICATION

Les réseaux de télécommunications, nés en 1793 avec le télégraphe optique, n'ont cessé de se développer au cours des décennies, gagnant toujours plus en rapidité et permettant de communiquer de plus en plus loin. À partir de 1840, le télégraphe optique laisse sa place au **télégraphe électrique** puis, à la fin



des années 1870, le téléphone filaire fait son apparition. La découverte des ondes électromagnétiques et les progrès en électronique permettent le développement des communications sans fil dès 1900.

Par la suite, apparaissent successivement la radiodiffusion sonore, le radiotéléphone, la télévision (1930), la transmission par faisceaux hertziens, à partir de 1940, puis par satellite dès 1960 et enfin le téléphone cellulaire depuis 1990.

L'ensemble de ces moyens de télécommunications représente aujourd'hui un réseau de plusieurs dizaines de milliers de centres de communications et des millions de kilomètres de lignes de transmission tout autour du globe.

Ce développement s'est caractérisé par l'utilisation d'un domaine de fréquences de plus en plus vaste allant de quelques kilohertz pour les premières **lignes téléphoniques** à

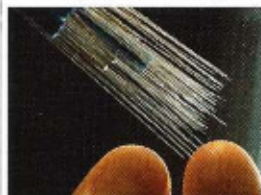


quelques dizaines de gigahertz pour les liaisons radio. La lumière a permis d'agrandir le spectre de fréquences utilisé dans le réseau. En effet, d'un point de vue physique, plus la fréquence d'un signal est élevée, plus il peut transporter d'informations par unité de temps. La fréquence de la lumière étant beaucoup plus élevée que celle des ondes radio de la communication sans fil ou des ondes électromagnétiques utilisées sur le cuivre (ADSL, câble...), les débits autorisés sont donc beaucoup plus importants. Les distances de communication entre deux équipements actifs sont également plus élevées (plusieurs dizaines de

kilomètres si nécessaire), en raison de phénomènes d'atténuation moins marqués. L'introduction de la lumière a donc permis de transporter un débit d'informations plus élevé sur des câbles, appelés fibres optiques, et ainsi de réduire les coûts de transmission de l'information.

### LA FIBRE OPTIQUE

La fibre optique est un guide diélectrique, c'est-à-dire un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Néanmoins, ceci ne signifie pas qu'il ne peut pas y avoir de phénomènes électriques. Par exemple, soumis à une onde électromagnétique comme la lumière, le milieu peut se polariser et permettre à l'onde de se déplacer par des phénomènes comme la réflexion de l'onde, sa réflexion, ou encore son absorption. La **fibre optique** est donc un guide



qui conduit la lumière sur une grande distance. Elle est habituellement circulaire et composée de plusieurs couches. Le cœur de la fibre possède un indice de réfraction plus élevé que la gaine qui piège la lumière : le rayon lumineux, à chaque fois qu'il touche l'interface cœur-gaine est réfléchi et repart dans le cœur.

Les divers problèmes rencontrés lors de la propagation de la lumière dans une fibre optique sont :

- L'atténuation. Elle est exprimée en décibels, en fonction de la distance  $z$  parcourue dans la fibre, et de la puissance initiale du signal  $P(0)$ . Si on appelle  $A$  l'atténuation par unité de longueur, celle-ci est définie par la relation :  $10 \log (P(0)/P(z)) = A \times z$ . L'atténuation peut avoir diverses origines. La fibre est composée de différents verres qui n'ont pas exactement la même densité, or les angles de réflexion varient avec la densité du matériau. Un même rayon de lumière qui touche l'interface cœur-gaine est donc diffusé dans plusieurs directions, ce qui diminue la puissance du signal transmis dans la fibre. On parle dans ce cas d'atténuation Rayleigh. L'atténuation trouve également sa cause dans le fait que certains ions comme les ions OH ou les métaux de transition absorbent des fréquences précises. Enfin, puisqu'une fibre est toujours

composée de divers tronçons de l'ordre d'un kilomètre de long, les ruptures de géométrie à chaque jonction accentuent l'atténuation du signal transmis.

- La dispersion chromatique. Une onde de fréquence  $f_1$  va mettre un temps différent par rapport à une autre onde de fréquence  $f_2$  pour parcourir la même fibre optique. Ce décalage s'appelle la dispersion chromatique. Elle est exprimée en picosecondes par nanomètre par kilomètre (ps/nm/km) et on la note généralement  $D$ . La dispersion chromatique est due à la variation de l'indice de réfraction du matériau en fonction de la longueur d'onde du signal. Le récepteur à l'autre bout de la fibre n'est sensible qu'à la puissance du signal. À cause de la dispersion de ce dernier, les différentes impulsions initiales sont progressivement recouvertes les unes par les autres et le signal en sortie tend à devenir illisible. Dans la fibre optique standard, la dispersion chromatique vaut - 17 ps/nm/km, pour une longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$ . Il est à noter que pour un signal de longueur d'onde 1,3  $\mu\text{m}$ , la dispersion chromatique est nulle mais, qu'en revanche, l'atténuation est plus forte à cette longueur d'onde qu'à 1,55  $\mu\text{m}$  ce qui explique l'utilisation des deux fréquences pour l'envoi de signaux.
- Les effets non linéaires. L'indice de réfraction du milieu, en théorie constant, dépend en réalité du champ électromagnétique qui l'entoure. Cette modification d'indice provoque une dispersion chromatique néfaste à la bonne transmission du signal.

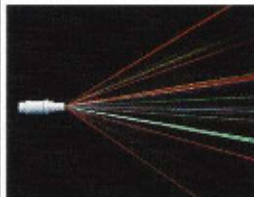
### LES DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES

Une fibre optique est constituée de plusieurs couches d'indices différents. Au centre, le cœur, entouré d'une gaine d'indice en théorie constant, et à l'extérieur une couche plastique protectrice. Il existe deux grandes familles de fibres optiques :

- La fibre multimodale. Son cœur a un diamètre relativement important par rapport à la longueur d'onde du signal (environ 100  $\mu\text{m}$ ). Elle n'est pas très chère mais elle est assez peu efficace et présente tous les inconvénients détaillés ci-dessus. Il existe deux types de fibre multimodales : la fibre à saut d'indice, aujourd'hui abandonnée, dans laquelle surviennent des variations brutales de l'indice de réfraction entre le cœur et la gaine et la fibre à gradient d'indice, dans laquelle le guidage de l'onde lumineuse subit une variation progressive de l'indice qui

« ramène » le signal vers le cœur.

- La fibre monomodale. Son cœur a un diamètre de l'ordre de la longueur d'onde (inférieur à 10  $\mu\text{m}$ ). Elle se caractérise par la propagation d'un seul mode parmi les nombreux que peut posséder une onde. Néanmoins seule la



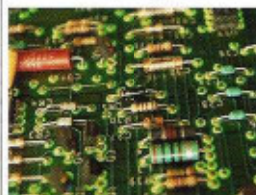
lumière d'un **laser** est utilisable avec ce type de fibre. Cette fibre est exclusivement utilisée dans les réseaux à très haut débit alors que les fibres multimodales sont utilisées dans les réseaux locaux à débit peu élevé.

### SOURCES ET RÉCEPTIONS

Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes actuels utilisent des sources à semi-conducteurs de longueur d'onde 1,3  $\mu\text{m}$ , 1,55  $\mu\text{m}$  mais aussi 0,85  $\mu\text{m}$ . Cette dernière longueur d'onde a été imposée par l'utilisation de matériaux semi-conducteurs, c'est-à-dire des matériaux qui possèdent une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Actuellement, le seul type de source utilisé est le laser, qui a un spectre de raies très fines et très resserrées autour de la fréquence choisie. La puissance de la raie principale est très supérieure à celle des autres raies (environ 30 décibels ou plus).

### Les récepteurs

La détection du signal est assurée par des diodes semi-conductrices qui, sensibles à la puissance du signal qu'elles détectent, émettent un courant électrique proportionnel à la puissance détectée. On parle alors de moyenne temporelle, qui correspond au temps d'intégration (c'est-à-dire le temps nécessaire entre deux variations d'un signal pour que la diode puisse les détecter) caractéristique de la diode. En effet, la diode ne perçoit pas les modulations d'amplitude dont la fréquence est supérieure à celle qu'elle peut détecter. Si jamais la diode peut détecter toutes les modulations d'amplitude du signal sur une période donnée, le courant retransmis est directement proportionnel à la puissance optique captée. Si le temps d'intégration de la **diode** est trop long pour détecter

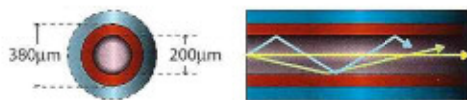
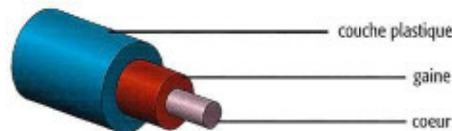


toutes les modulations d'amplitude du signal, on parle alors de moyenne de la puissance.

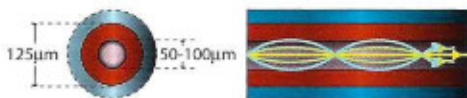
### Le débit

On appelle débit la quantité d'informations transmises via un canal de communication selon un intervalle de temps donné. Le débit d'une connexion internet s'exprime généralement en kbps (kilobit par seconde). Dans le cas d'une fibre

### Les types de fibres optiques



Fibre à saut d'indice



Fibre à gradient d'indice



Fibre monodale

### Transmission au fil du temps

1793

Invention du télégraphe optique.

1840



Invention du télégraphe électrique par Samuel Morse.

1876



Invention du téléphone filaire.

1930

Invention de la télévision.

1955

Fabrication des premières fibres optiques.

1987

Invention de l'amplificateur optique à fibres.

Dans la fibre monomodale



Le débit peut atteindre **14 Tbps**

Le débit: le plus important



optique multimodale, si elle est à saut d'indice, le débit est limité à 50 Mbps, si elle est à gradient d'indice, le débit est alors poussé à 1 Gbps. Pour une fibre monomodale, le débit peut aller jusqu'à 14 Tbps sur une distance de 160 kilomètres ! Il faut noter que plus la distance est grande, moins le débit peut être élevé. En effet, les pertes sont nombreuses et sans la diminution de celles-ci, la fibre optique ne pourrait pas être utilisée aujourd'hui sur de longues distances comme c'est le cas. En 1960, l'atténuation atteignait la valeur de 1 000 dB/km et aujourd'hui cette valeur se limite à 1,14 dB/km ! Pour arriver à de tels résultats, il a fallu mettre en place une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'utilisation d'amplificateurs optiques.

#### LES AMPLIFICATEURS OPTIQUES

Apparu dans les années 1970 sous la forme d'un amplificateur à semi-conducteurs, l'amplificateur optique permettait d'amplifier l'amplitude d'un signal dans une large gamme de fréquences mais provoquait en contrepartie l'apparition de non linéarités. C'est pourquoi, dès la fin des années 1980, on voit apparaître l'amplificateur optique à fibres qui possède deux caractéristiques principales : sa linéarité par rapport au signal entrant (le signal en sortie de l'amplificateur est proportionnel au signal entrant), et le fait qu'il produise un bruit faible. L'amplificateur peut dépasser la simple utilisation qu'on peut en faire car il permet non seulement de régénérer le signal atténué mais également de l'amplifier. L'amplificateur optique à fibre est remarquable par sa simplicité. Les deux isolateurs, un en entrée et un en sortie, ne laissent passer la lumière



que dans un seul sens, pour éviter toute pollution due à un éventuel retour de lumière dans la cavité. À l'intérieur du dispositif, on trouve une pompe, en général un laser à semi-conducteurs et une fibre dopée avec les ions appropriés (les plus utilisés sont les ions erbium). Le multiplexeur permet de coupler la lumière de la pompe et la lumière du signal d'entrée. La pompe place les atomes qui se trouvent dans la partie de fibre dopée dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique dopée, il désexcite les ions qui produisent alors des photons de même fréquence que le photon incident. Ainsi, le nombre de photons en sortie de la fibre dopée est le double de celui en entrée : ceux du signal d'entrée en plus de ceux produits par les ions qui se désexcitent. Le signal a donc été amplifié. Néanmoins, on constate que du bruit apparaît. En effet, certains ions de la fibre dopée se désexcitent spontanément. Ces ions peuvent alors aller dans toutes les directions et provoquer eux mêmes des désexcitations spontanées. Ce

phénomène diminue également l'efficacité de l'amplificateur. Le gain des amplificateurs dépend fortement de la longueur de la fibre dopée, de la puissance de la pompe et du signal ainsi que de la fréquence du signal d'entrée. On parle alors de bande passante : si la fréquence du signal se trouve dans la bande passante de l'amplificateur, le signal est effectivement amplifié, mais si la fréquence du signal se trouve hors des limites de la bande passante, l'amplificateur ne joue plus son rôle et le signal n'est pas amplifié. On a donc cherché à obtenir une bande passante la plus large possible. Dans le cas des amplificateurs à ions erbium, il existe deux bandes passantes : la bande passante « conventionnelle » entre 1525 nm et 1565 nm, appelée C et la bande passante « longue » entre 1570 nm et 1610 nm, appelée L. La bande L correspond à une longueur plus importante de fibre dopée. En associant ces deux bandes passantes, on obtient une bande passante totale de près de 90 nm. À forte puissance, l'amplificateur sature, c'est-à-dire que la puissance de sortie n'est plus linéairement proportionnelle à la puissance d'entrée et tend vers une valeur asymptotique. De plus, comme on l'a vu, des phénomènes qui dégradent la qualité du signal au cours de la propagation apparaissent. L'un d'entre eux, le bruit, est également amplifié dans les amplificateurs optiques, tout comme les effets non linéaires. Un dernier phénomène parasite, la dispersion chromatique, est aussi présent et elle peut être réduite par le placement sur la fibre de compensateur à fibre.

#### L'UTILISATION OPTIMALE DE LA FIBRE OPTIQUE

À l'heure actuelle, le besoin en bande passante est une réalité. Mais poser une fibre représente un coût et c'est pourquoi l'on souhaite optimiser l'utilisation des fibres déjà installées en y faisant passer un maximum d'informations. Or la bande passante d'un canal de communication standard (ligne torsadée, **câble coaxial**, fibre



optique) est souvent beaucoup plus large que la bande passante nécessaire au signal. C'est de là que vient l'idée du multiplexage : transmettre plusieurs signaux de fréquences différentes simultanément dans une même fibre optique grâce à l'importante bande passante des amplificateurs. Il existe plusieurs types de multiplexage dont le multiplexage en longueur d'onde, le multiplexage temporel, et le multiplexage par paquets.

**LE MULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE**  
Le terme multiplexage en longueur d'onde provient de l'anglais Wavelength Division Multiplexing (WDM). Dans un système de

multiplexage en longueur d'onde, un multiplexeur est placé à l'entrée de la chaîne de transmission. Les signaux sont alors mélangés, avant d'être séparés à la sortie par un démultiplexeur qui les envoie un à un vers un récepteur. Suivant l'espacement entre les longueurs d'onde des différents signaux qui circulent dans la fibre, on parle de différents types de WDM. Le CWDM (Coarse WDM) concerne des longueurs d'onde espacées de 20 nm. L'avantage de ce multiplexage est son coût faible mais il ne peut contenir que 7 canaux de fréquences différentes sur une distance limitée à 120 km car les signaux ne sont pas amplifiés. Pour des fréquences plus rapprochées, on parle de DWDM (Dense WDM) voire même de UDWDM (Ultra Dense WDM). L'espacement entre deux fréquences est alors de 0,8 nm, 0,4 nm voire 0,1 nm. Il est ainsi possible de contenir 160 canaux pour le DWDM et plus de 400 canaux pour le UDWDM.

On utilise généralement deux domaines d'application classiques :

- Le WDM longue portée, appelé « long haul », appliqué sur de longues distances supérieures à 100 km, avec des régénérateurs de signal tous les 80 km environ et qui utilise la technologie de Dense WDM. Les débits produits sont très élevés, de l'ordre du Gbps.
- Le WDM métropolitain, utilisé pour relier de courtes distances inférieures à 100 km comme dans le cas d'un réseau au sein d'une entreprise par exemple. La technologie utilisée est celle du Coarse WDM et du Dense WDM, généralement sans nœud de régénération.

#### LE MULTIPLEXAGE TEMPOREL

La deuxième manière d'effectuer un multiplexage est le multiplexage temporel : on parle également de Time Division Multiplexing (TDM) : cette technique consiste à affecter à chaque flux la totalité de la bande passante pendant une plage horaire très courte et ensuite à faire passer un second flux pendant un temps identique et de changer ainsi pour les différents flux. Chaque flux est ainsi reconstitué à son arrivée au bout de la fibre optique. De cette manière, les flux ne sont pas

transmis en même temps mais on a l'impression que les flux passent simultanément parce que le temps de transmission de chaque flux est très court. C'est un multiplexeur qui accepte les requêtes de chaque utilisateur, sépare le signal en différents segments puis affecte le signal décomposé à une séquence répétitive qui répartit l'ordre de passage des différents flux. Le signal final qui passe dans la fibre est donc un mélange des données des différents utilisateurs. À l'autre bout de la fibre, les différentes parties du signal sont de nouveau séparées par un circuit appelé démultiplexeur et acheminées vers les bons destinataires. On peut transmettre des données dans les deux sens en même temps mais il faut pour cela placer un multiplexeur et un démultiplexeur à chaque extrémité et utiliser une large bande passante. La flexibilité de ce système est un élément très important. En effet, le système doit constamment adapter le nombre d'utilisateurs différents qui souhaitent faire passer des données. C'est pourquoi dans certains cas le WDM lui est préféré.

#### LE MODE PAR PAQUETS

La troisième manière de transmettre des données dans une fibre optique est le mode par paquet. Ici, les informations sont découpées par paquets de manière asynchrone, c'est-à-dire sans suivre de séquence précise. Ainsi, les paquets peuvent avoir une taille différente et être séparés par des silences de longueurs également variables. Le débit de ce type de multiplexage est donc fortement variable. Pour démultiplexer un tel signal, un élément différenciant est nécessaire. Celui-ci est situé soit au début du paquet soit en fin. Il indique à quel signal initial correspond chaque segment du signal transmis. Cette méthode est particulièrement flexible quand la charge du réseau varie : en effet, l'asynchronisme permet la mise en attente de signaux en cas de congestion sur le réseau (lorsque trop d'utilisateurs souhaitent se servir du réseau en même temps, on crée donc des files d'attente de manière automatique). Les réseaux IP (Internet Protocol) utilisent notamment cette méthode de multiplexage.

Quand on parle de longue distance, on pense immédiatement aux câbles transatlantiques mais dans la réalité les opérateurs de télécommunications possèdent une infrastructure de plusieurs millions de kilomètres de liaisons, aussi bien au niveau téléphonique (maintenant complètement numérisé) qu'au niveau de la **toile Internet**. Il est encore



possible de faire évoluer le réseau optique en France et de multiplier les débits proposés par 10 ou par 100 en remplaçant uniquement les équipements en place et ceci pour des coûts très réduits. En effet, la majeure partie du coût d'un réseau optique correspond à la pose des câbles et de leurs infrastructures d'accueil. La fibre optique représente un modèle d'évolution technique intéressant et une solution pérenne aux nouveaux défis de transmission de données à condition de disposer des infrastructures (fourreaux équipés en fibre)

#### DU MULTIPLEXAGE PARTOUT

Le multiplexage apparaît comme un procédé très récent. Cette technologie est pourtant utilisée depuis plusieurs années déjà par le réseau téléphonique. Il serait inimaginable que chaque abonné dispose de son propre fil, les lignes ont donc été multiplexées afin de véhiculer plusieurs appels en même temps. Le multiplexage a ensuite été utilisé dans le milieu de l'aviation et de l'automobile où un nombre réduit de fils permet de contrôler des calculateurs et des équipements de sécurité et de confort toujours plus nombreux. Le système RDS des radios s'appuie également sur le multiplexage. Dans un message unique se trouve, en effet, le message sonore, le nom de la station et des informations complémentaires comme l'info trafic.

### Le multiplexage en longueur d'onde

