

30 novembre 2020

DOSSIER TECHNIQUE FIBRE OPTIQUE FICHE N° 1

Fibre optique : structures et caractéristiques

L'objet de cette fiche est de présenter les principaux éléments et caractéristiques des fibres optiques mises en œuvre dans les réseaux de télécommunication et de transport de données.

1 Historique

C'est en 1966 que la fibre optique a été suggérée comme support potentiellement approprié pour le transport d'information sur de longues distances, mais les niveaux d'atténuation étaient alors trop élevés (de l'ordre de 1 000 dB/km) pour envisager ce type d'application. La démonstration en 1970 de la première fibre optique présentant une atténuation de moins de 20 dB/km (autrement dit préservant au moins 1% de la puissance émise au bout d'un km) a été la première étape fondatrice. Cette avancée majeure a ouvert la voie au développement des systèmes de télécommunication et de transmission de données par fibre optique.

Ce document présente un état de l'art succinct des différents types de fibres optiques utilisées dans les systèmes de télécommunications avec une mise en lumière des fibres optiques utilisées pour les réseaux d'accès.

2 Anatomie d'une fibre optique

Une fibre optique est un « fil » composé d'un guide d'onde optique central dans lequel se propage des ondes lumineuses et d'un revêtement de protection. La structure détaillée est reportée dans la Figure 1.

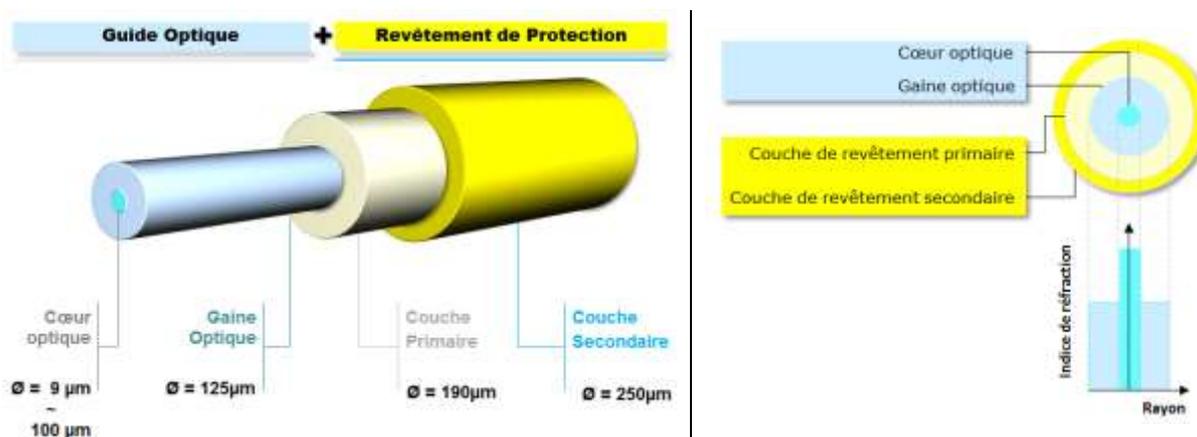


Figure 1 : Schéma d'une fibre optique standard monomode (à gauche). Section transverse et profil d'indice de réfraction associé (à droite).

La structure comprend un cœur optique central et une gaine optique constitués de verre (i.e. silice) revêtue d'un revêtement protecteur. Le cœur et la gaine sont tous deux constitués de silice extrêmement pure et dopée - c'est-à-dire contenant des espèces chimiques permettant de contrôler les valeurs des indices de

réfraction¹. Le verre constituant le cœur central est ainsi dopé par des éléments chimiques permettant d'augmenter très légèrement la valeur de l'indice de réfraction par rapport à celui de la gaine optique, c'est cette condition fondamentale qui permet aux ondes lumineuses de se propager le long de la fibre à l'intérieur du cœur.

La propagation de la lumière le long de la fibre s'effectue par réflexions successives des rayons lumineux à l'interface cœur/gaine. Ces rayons lumineux se propagent selon certaines trajectoires (appelées modes) qui sont déterminées par les paramètres opto-géométriques du cœur optique. En modifiant les variations de l'indice de réfraction dans la section du cœur (appelé profil d'indice) et le diamètre du cœur, il est possible de modifier les propriétés de propagation des ondes lumineuses (vitesse de propagation, formes des trajectoires, nombres de modes...). Selon la forme du profil d'indice, on parle de saut d'indice (comme représenté sur la Figure 1), de gradient (profil en parabole), de trapèze. En réduisant le diamètre du cœur et la différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine, il est possible de réduire la propagation à un seul mode et la fibre est alors appelée fibre monomode (SMF pour Single Mode Fibre en anglais). A contrario, une fibre optique supportant plusieurs modes est dite multimode (MMF pour Multi-Mode Fibre en Anglais). Le diamètre du cœur pour les fibres multimodes est de 50 μm ou 62.5 μm , celui des fibres monomodes varie de 8 à 10 μm .

Le diamètre de la gaine optique est de 125 μm (i.e. 0,125 millimètres, soit un peu plus épais qu'un cheveu) pour les fibres optiques utilisées pour les réseaux de télécommunication. L'ensemble est protégé par un revêtement polymère indispensable pour la préservation de l'intégrité mécanique de la partie en verre de la fibre en en la protégeant de l'humidité, de la saleté... Ce revêtement est constitué de deux couches concentriques appelées primaire et secondaire. Le diamètre extérieur est en règle générale de l'ordre de 250 μm mais peut être plus petit (200 μm) ou plus gros (500 μm). Pour finir, l'ajout d'une fine couche colorée sur cette structure permet l'identification des fibres optiques lors de l'installation et du raccordement des fibres.

A ce stade, il convient de distinguer une fibre optique d'un câble à fibre optique. Un câble à fibre optique est constitué d'un regroupement de plusieurs fibres au sein d'une même structure élaborée pour permettre de protéger la fibre lors de la fabrication, l'installation et l'exploitation du câble. Il existe de nombreux types de câbles aux structures extrêmement variées selon les applications, les niveaux de performances exigés, le nombre de fibres contenues (d'une à plusieurs milliers). En pratique, c'est le câble qu'on installe dans un réseau mais c'est la fibre que l'on raccorde aux équipements optiques.

3 Les différents types de fibres optiques

A chaque type de fibres, correspond une ou plusieurs fenêtres optiques d'utilisation :

- Les fibres multimodes sont utilisées dans la région spectrale située autour de la longueur d'onde de 850 nanomètres (nm). Ces fibres sont adaptées à la transmission sur de courtes distances (jusqu'à plusieurs centaines de mètres) car leur coefficient d'affaiblissement reste supérieur au dB/km - de l'ordre de 2.5 dB/km. Elles constituent cependant une solution économiquement très intéressante par rapport à l'emploi de fibres monomodes si on intègre le coût de l'ensemble des composants nécessaires pour leur mise en œuvre (sources optiques). On trouve ce type de fibres dans les réseaux d'entreprises et les centres de données – *datacenters* en anglais.
- Pour les fibres monomodes destinées aux applications de télécommunications et de transport de données, le spectre optique utilisable est situé dans le proche infrarouge et s'étend sur la plage 1260 – 1675 nm – offrant une bande passante de 59 THz! Cet intervalle spectral a été subdivisé en sous-bandes. On parle ainsi des bandes optiques O (*Original*), E (*Extended*), S (*Short*), C (*Conventional*), L (*Long*), ou U (*Ultra-long*). Sur la Figure 2 sont représentés les intervalles associés. Les distances d'utilisation pour les fibres monomodes varient de quelques centaines de mètre jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres pour les réseaux terrestres.

¹ L'indice de réfraction d'un matériau caractérise la propriété du matériau à ralentir et à dévier la lumière. Il se définit par le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse dans le matériau.

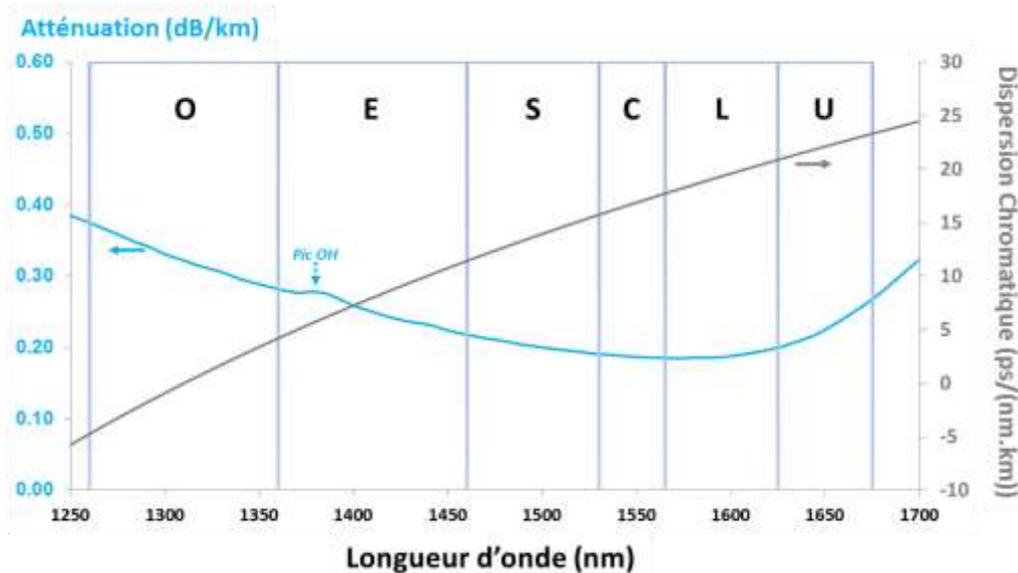


Figure 2 : Spectre d'atténuation d'une fibre G.652.D, et dispersion chromatique associée en fonction de la longueur d'onde. Les bandes optiques sont également rapportées.

Le développement des fibres optiques monomodes a été ponctué par les avancées réalisées dans les techniques de transmission, de traitement du signal, des montées en débits et des applications. Les études sur la transmission par fibre monomode ont démarré au début des années 1980, et ont abouti à la spécification de plusieurs catégories de fibres optiques se distinguant les unes des autres selon plusieurs paramètres relatifs aux bandes spectrales utilisables, aux niveaux d'affaiblissement, aux propriétés de propagation des signaux (comme par exemple la dispersion chromatique²) ainsi que certaines spécifications et tolérances dimensionnelles. Plusieurs types de fibres aux caractéristiques ont donc été définies :

- La fibre dite SSMF - *Standard Single Mode Fibre* en anglais, possédant un profil d'indice en échelon, a été tout d'abord développée pour la transmission à 1300 nm (Bande O) en raison de la disponibilité des sources et d'une dispersion chromatique nulle dans cette bande. La fibre a été ensuite utilisée à 1550 nm en raison des pertes d'atténuation minimales dans cette fenêtre. Cette fibre a été standardisée par l'UIT³ à partir de 1984 et est connue sous la recommandation G.652. C'est la fibre qui est aujourd'hui majoritairement utilisée dans les réseaux de télécommunication métropolitains et longue distance, et plus particulièrement la sous-catégorie G.652.D. Sur la Figure 2 sont rapportées les courbes d'atténuation typique et de dispersion chromatique pour une fibre G.652.D.
- Un deuxième type de fibre DSF - *Dispersion Shifted Fibre* en anglais, ou fibre à dispersion décalée, a ensuite été développée pour viser une dispersion chromatique nulle autour de 1550 nm (Bande C). Celle-ci a été standardisée par l'UIT dans la recommandation G.653 en 1988. La démonstration de l'amplification optique en 1987 a permis la transmission optique multicanaux dans la fenêtre 1550 nm par l'utilisation de multiplexage en longueur d'onde WDM - *Wavelength Division Multiplexing* en anglais. Néanmoins, la dispersion chromatique nulle exacerbant les effets non linéaires entre les différents canaux WDM (i.e. mélange à 4 ondes), l'intérêt pour cette fibre fut très limité par la suite en raison du développement de nouvelles technologies de transmission par fibre optique.
- Les fibres NZDSF - *Non-Zero Dispersion Shifted Fibre* en anglais, ou fibre à dispersion décalée non nulle ont alors été développées, avec pour objectif d'accommoder à la fois les effets non linéaires entre canaux et la nécessité de compenser l'accumulation de la dispersion chromatique. Pour ces fibres, la dispersion chromatique à 1550 nm est comprise entre 4 et 8 ps/(nm.km) à comparer à une valeur de l'ordre de 17 ps/(nm.km) pour une fibre G.652. Ces fibres sont spécifiées

² La dispersion chromatique représente les variations des temps de propagation de la lumière à diverses longueurs d'onde (unité ps/(nm.km)). Elle conduit à une diminution de la bande passante en se manifestant par un élargissement temporel des impulsions transmises le long de la fibre. Ce phénomène peut être évité par l'utilisation de fibres à dispersion chromatique nulle ou réduite.

³ Union Internationale des Télécommunications

par les recommandations G.655 et G.656. L'avènement des systèmes de transmission à détection cohérente combinés au traitement de signaux numériques a permis de s'affranchir d'une gestion complexe de la dispersion chromatique tout en réduisant d'autres effets liés à la propagation dans la fibre. Ces nouvelles techniques ont fait perdre tout attrait pour les fibres G.655 et G.656 au profit de la fibre G.652.D.

- Pour répondre aux contraintes d'installation de la fibre aussi bien à l'extérieur que dans les habitations pour le déploiement des réseaux FTTH – *Fibre-To-The-Home* en anglais, un nouveau type de fibre optique dit « insensible aux courbures » a été développé. Ces fibres sont normalisées depuis 2006 sous la recommandation G.657. L'utilisation de fibres insensibles à la courbure est essentielle pour sécuriser les futures évolutions des réseaux optiques passifs pour le FTTH, avec notamment l'emploi à terme des fenêtres de transmission à 1625 /1650 nm où la sensibilité aux pertes par macro-courbures⁴ est extrême. En France, le déploiement des réseaux d'accès se fonde sur l'emploi de ce type de fibre et notamment de la fibres G.657.A2. Les bandes optiques utilisées dans ce type de réseaux s'étendent sur les bandes O à L.
- Pour terminer cette revue, un dernier type de fibre concerne les transmissions pour les réseaux sous-marins : la recommandation G.654. La particularité de ces fibres réside dans leurs niveaux d'atténuation qui peuvent être aussi faibles que 0,15 dB/km à 1550 nm. A noter également la mise en place très récente d'une sous-catégorie (G.654.E) destinée aux réseaux terrestres à très haute capacité.

Conclusion

Les fibres optiques sont caractérisées par de nombreux paramètres dont certains sont l'objet d'une normalisation ainsi que les méthodes de caractérisation associées. Cette normalisation est essentielle pour évaluer et s'assurer de la compatibilité des fibres optiques entre les différents fabricants.

Pour en savoir plus, consultez les autres fiches du dossier technique fibre optique :

- Fibres optiques G.657.A2 et G.652.D : les principaux types de fibre utilisés dans les réseaux de télécommunication en France
- A propos de la normalisation des fibres optiques

⁴ Macro-courbure : courbure dont le rayon est supérieur au mm.