

LA TECHNOLOGIE DES FIBRES OPTIQUES

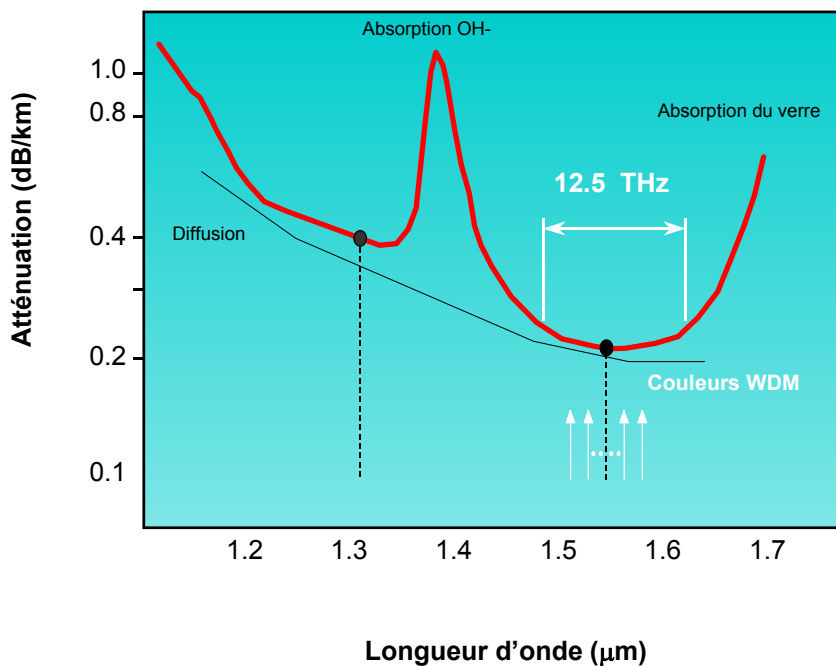
Par Jean-Baptiste Thomine et Loïc Le Fur

1. La transmission par fibre optique.

La transmission par fibre optique est fondée sur l'envoi d'information sous la forme d'impulsions lumineuses dans une fibre optique. Pour que l'information soit intacte, le signal lumineux détecté en sortie de fibre doit avoir un minimum d'énergie. L'énergie de l'impulsion lumineuse décroît avec la distance parcourue dans le support (la fibre). Ainsi, l'atténuation est un facteur limitant important dans la transmission optique par fibre.

L'atténuation de la fibre optique est faible si on la compare à celle des autres supports de transmission comme le cuivre. Faible, elle n'en existe pas moins à des degrés divers, dépendant en particulier de la longueur d'onde optique (qu'on nomme également « couleur ») porteuse des impulsions lumineuses. La figure 1 montre l'atténuation typique d'une fibre de verre en fonction de la longueur d'onde de la lumière porteuse.

Figure 1: La bande de fréquences utilisable



Les meilleures fenêtres de transmission optique sont celles qui minimisent les trois différents phénomènes physiques à l'origine de l'atténuation.

- **La diffusion.** Les photons interagissent faiblement et de manière aléatoire avec les molécules de verre. De temps en temps, un photon est suffisamment dévié de sa trajectoire pour sortir du cœur de la fibre et est alors perdu pour la transmission. Plus grande est la longueur d'onde du photon, plus faible est l'interaction et plus faible la diffusion.

- **L'absorption par les ions OH^-** . Les impuretés de la fibre se présentent sous forme de molécules absorbant la lumière à des fréquences spécifiques. Les longueurs d'onde les plus critiques se situent dans la bande 1400 nm – 1500 nm et l'absorption est due à la présence d'ions OH^- .
- **L'absorption du verre**. Aux fréquences élevées (longueur d'onde supérieure à 1600 nm), les molécules de verre commencent à absorber la lumière, créant une limite naturelle supérieure en terme de longueur d'onde utilisable pour la transmission optique.

Les trois limites ci-dessus sont des conséquences directes de lois fondamentales de la physique et sont de ce fait difficilement surmontables par des améliorations technologiques du procédé de fabrication des fibres de verre. En pratique, ces limites pourraient être repoussées en utilisant de nouveaux matériaux dans la conception des fibres optiques (à la place du verre de silice). Les tentatives dans cette voie, nombreuses dans les années 80, ont maintenant été quasiment abandonnées car leurs résultats étaient peu concluants. Il faut noter de toute façon qu'un changement de technologie verrière aurait nécessité de lourds et longs efforts de conception, de qualification et d'industrialisation, non seulement au niveau de la fibre elle-même, mais aussi des câbles, des lasers, des photodiodes et autres composants opto-électroniques.

Du fait des limitations mentionnées ci-dessus, les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde » :

- La « fenêtre à 1300 nm » qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.
- La « fenêtre à 1550 nm » qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

La fenêtre à 1300 nm présente une atténuation importante mais les composants opto-électroniques à ces longueurs d'onde (lasers et récepteurs) sont peu coûteux. Elle reste donc toujours utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte portée (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité : boucles locales à fibres optiques, réseaux urbains, LANs.

La fenêtre à 1550 nm est utilisée universellement pour les télécommunications longues distances et à haut débit car la faible atténuation dans cette fenêtre permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre de ligne.

2. La largeur de la fenêtre à 1550 nm, correspondance en bande passante

Une fenêtre en longueur d'onde de largeur donnée dans la fibre optique donne accès à une bande passante donnée, la notion de bande passante étant la même que celle couramment utilisée dans les domaines radio (téléphones mobiles, satellites). Il y a néanmoins une différence essentielle avec les domaines radio, qui est l'ordre de grandeur considérable de la bande passante accessible en optique:

- Longueur d'onde et fréquence sont liées par la formule : Longueur d'onde x Fréquence = Vitesse de la lumière ($\lambda \times f = c$).
- « 1 nanomètre de longueur d'onde » (centré autour d'une longueur d'onde de 1550 nm) correspond ainsi à une bande de 125 GHz.
- La fenêtre 1550 nm, large de 100 nm, correspond donc à une bande passante utile totale de **12,5 THz (12 500 GHz)**.

A titre de comparaison, les bandes passantes autorisées pour le GSM et l'UMTS n'excèdent pas quelques centaines de MHz (cinquante à cent mille fois moins !), alors que pour les satellites, on dispose de bandes de l'ordre du GHz (dix mille fois moins !).

3. Bande passante et Capacité.

La capacité accessible sur un système de transmission est directement proportionnelle à sa bande passante. La capacité correspond au nombre possible de signaux transitant aléatoirement de 1 à 0 (bits) dans un temps donné : dans une fibre, un 1 correspondra à la présence d'une impulsion lumineuse, un 0 à l'absence de lumière. Quand la capacité augmente, le nombre de transitions augmente, et donc également la fréquence avec laquelle ces transitions apparaissent. Cette correspondance intime entre la bande passante et la capacité est illustrée par les exemples suivants :

- Radio FM et canaux TV : en France (et ailleurs), l'Etat limite les bandes passantes de fréquence autorisées pour la diffusion, conduisant ainsi à une limitation du nombre de chaînes radio et TV.
- Téléphones mobiles : là encore, les Etats contrôlent les bandes passantes de fréquence, ce qui conduit à n'attribuer des licences qu'à un nombre limité d'opérateurs.

De par la théorie, le nombre de signaux binaires (0 et 1) que l'on peut transmettre en une seconde ne peut guère dépasser le nombre de Hertz disponibles dans la bande transmise. Cette règle « 1 bit = 1 Hertz » est une limite supérieure qui ne tient pas compte des altérations possibles du signal dues au bruit, à la distorsion, à la différenciation des longueurs d'onde, etc.

Ainsi, la capacité maximum théorique de la fenêtre à 1550 nm d'une fibre optique est de l'ordre de **12,5 Tbit/s** en transmission binaire.

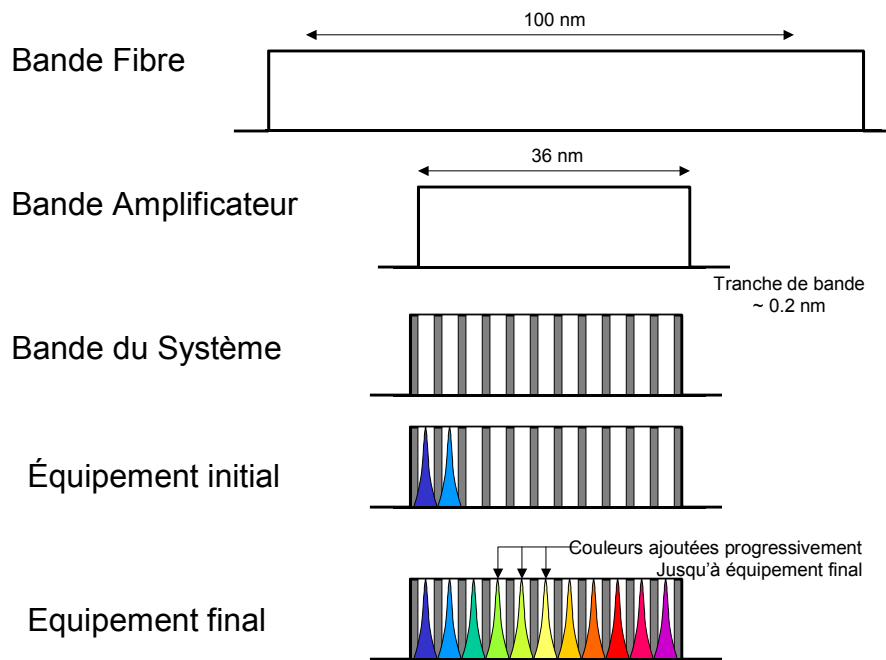
4. Le Multiplexage en longueurs d'onde (DWDM) maximise l'utilisation de la bande passante de la fibre.

La technique WDM (Wavelength Division Multiplexing), en français le multiplexage en longueurs d'ondes, a été développée afin de pouvoir exploiter au mieux la gigantesque bande passante de la fibre optique. En WDM, le « gâteau » de la bande passante est divisé en « tranches », et dans chacune de ces tranches, on insère une longueur d'onde ou « couleur » qui porte un signal binaire. Toutes les couleurs sont transmises ensemble (multiplexées optiquement) dans la fibre. En réception, des filtres optiques séparent les couleurs utilisées, puis chaque couleur est démodulée individuellement pour en extraire sa capacité.

L'espacement entre couleurs (espacement entre deux « tranches du gâteau ») dépend des techniques de transmission et de filtrage. La taille de la couleur (largeur de la « tranche du gâteau ») est directement liée à la capacité transmise (plus la capacité est grande, plus la tranche doit être large : une tranche de 12,5 GHz, un dixième de nanomètre, ne saurait contenir plus de 12,5 Gbit/s, voir §3).

La lettre « D » (D pour dense) du terme DWDM se rapporte aux améliorations récentes dans les techniques de filtrage qui permettent de « densifier » le nombre de « couleurs ».

Figure 2: Principes de la transmission WDM



Les avantages de la transmission DWDM

- La gigantesque capacité potentielle de la fibre (un maximum de 12,5 Tbit/s) est divisée en tranches de capacité de taille plus raisonnable et exploitable par l'électronique des équipements terminaux : Les circuits intégrés au Silicium ne sauraient traiter des capacités de l'ordre de 1 Tbit/s ! Les deux « tranches de capacité » utilisées à l'heure actuelle sont 2,5 Gbit/s et 10 Gbit/s. Une nouvelle tranche à 40 Gbit/s devrait être disponible dans 2 ou 3 ans.
- Le DWDM est très souple d'emploi. Un équipement terminal distinct termine chaque couleur. On peut ainsi augmenter progressivement la capacité au fil des besoins en installant les équipements terminaux de nouvelles couleurs.

Les perspectives futures de la transmission DWDM

- La capacité maximale que les technologies DWDM pourraient offrir dans le futur n'est pas facile à déterminer. Pour la déterminer précisément, il faudrait pouvoir estimer de manière fiable les pénalités dues aux interactions entre couleurs adjacentes, ainsi que les progrès réalisables dans la sélectivité des filtres optiques des équipements terminaux.
- Le nombre maximal théorique de couleurs sur une fibre est par contre simple à estimer. Il s'agit simplement du rapport entre la capacité maximale de la fibre décrit dans §3 (12,5 Tbit/s) et la capacité portée par chaque couleur. La table suivante illustre le nombre maximal de longueurs d'onde pour trois tranches de capacité différentes :

	2,5 Gbit/s par couleur	10 Gbit/s par couleur	40 Gbit/s par couleur
Nombre maximum de couleurs	5000	1250	312
Capacité totale disponible	12,5 Tbit/s	12,5 Tbit/s	12,5 Tbit/s

L'augmentation de la capacité de chaque couleur

- L'analyse du passé industriel dans le domaine des télécommunications montre que le prix d'un équipement terminal augmente grossièrement d'un facteur 2,5 lorsque la capacité de cet équipement terminal est multipliée par 4. Il y donc un certain intérêt économique à augmenter la capacité par couleur, même si le coût des équipements terminaux d'un système de transmission n'est qu'une des composantes du coût total.
- Ceci étant, Les limitations en vitesse de calcul des circuits intégrés au silicium d'une part, et les distorsions optiques dans la fibre (effets complexes que nous ne traiterons pas dans cet article) d'autre part, seront probablement des facteurs de limitation technologique. Dans les applications longue distance, la distorsion est la principale contrainte. Ainsi, l'utilisation de la technologie à 40 Gbit/s est actuellement problématique au delà de 1000 km de transmission sans régénération.

5. Brève histoire de la technologie des systèmes à fibres optiques.

G1 (Première génération): 1989 - 1991.

Les premiers systèmes à fibres optiques utilisaient des répéteurs en ligne basés sur une technologie silicium pour régénérer opto-électroniquement le signal affaibli après passage par chaque section de câble. La capacité de ces systèmes de transmission était de 0,28 Gbit/s par paire de fibre et ils opéraient dans la fenêtre à 1310 nm.

G2 (Seconde Génération): 1992 - 1995.

La technologie G2 constitua une amélioration par rapport à G1 puisque la capacité transmise devint alors de 0,565 Gbit/s par paire de fibres. Ces progrès furent rendus possible par de meilleures performances des circuits au silicium du répéteur, ainsi que par l'utilisation de la fenêtre à 1550 nm.

G3 (Troisième Génération): 1995 - 1997.

Cette génération correspond à une évolution majeure dans le domaine de la transmission optique : l'amplification optique par fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped Fibre Amplifier - EDFA). Cette technique d'amplification, qui évite la régénération du signal dans chaque répéteur et donne accès au « tout optique », est beaucoup plus économique, efficace et fiable, et autorise l'accès à des bandes passantes de ligne considérables. Les limitations provenant de l'utilisation de circuits au silicium dans les répéteurs n'existent alors plus et la capacité passe à 5 Gbit/s par paire de fibres.

G4 (Quatrième Génération): 1998 - 2000.

La technologie EDFA est améliorée, ce qui permet des bandes passantes optiques plus importantes. Ces progrès, associés à d'autres progrès dans le domaine des techniques de filtrage optique, permettent de mettre en oeuvre une première génération de systèmes WDM. La capacité transmise s'élève alors à 20 ou 40 Gbit/s (8 ou 16 couleurs à 2,5 Gbit/s) par paire de fibres.

Génération	Systèmes	Facteur d'augmentation de la capacité (par rapport à la génération précédente)	Facteur d'augmentation cumulé
G1	TAT-8, TPC-3, EMOS	-	-
G2	TAT-9, TAT-10, TAT-11, TPC-4, SMW-2, SAT-2, ITUR	2	2
G3	TAT12/TAT13, TPC-5, APCN, FLAG	8	16
G4	Gemini, AC-1, SMW-3, Atlantis-2, Columbus-3, SAFE, China-US, MAC, PAC	4 à 8	128
G5	TAT-14, Japan-US, PC-1, SAC, SAM-1	4	512
G6	Hibernia, Yellow, FA-1, EAC, APCN-2, AJ, FP-1,	2,5 à 4	3 200
G7		1,5 à 2	6 400
GU	Systèmes de capacité ultime (12,5Tbit/s ?)	6,25	40 000

G5 (Cinquième Génération): 2000 - 2002.

Les systèmes de la cinquième génération sont actuellement en cours d'installation ou mis en service depuis peu. La bande passante des EFDA est à nouveau améliorée, et la capacité par couleur passe à 10 Gbit/s. Ces systèmes fournissent des capacités de l'ordre de 160 Gbit/s par paire de fibres (16 couleurs à 10 Gbit/s).

G6 (Sixième Génération): 2001 -

Cette génération a une base de conception semblable à la génération précédente, les caractéristiques des EFDA sont améliorées et les équipements terminaux, toujours à 10 Gbit/s, présentent de meilleures performances. Ainsi, tout en conservant des terminaux à 10 Gbit/s, ces systèmes peuvent multiplexer jusqu'à 100 couleurs par paire de fibres, offrant des capacités de l'ordre de 1 Tbit/s. La génération G6 est dans les catalogues des constructeurs, pour des mises en service en 2002-2003.

G7 (Septième Génération)

Certains Centres de Recherche et Développement annoncent leurs avancées dans la conception de systèmes DWDM utilisant une technologie à 40 Gbit/s par couleur, avec environ 40 couleurs par fibre. D'autres centres de recherche pensent que la prochaine génération ne sera qu'une amélioration de G6 pour laquelle on accroîtra encore le nombre de couleurs à 10 Gbit/s (soit 150-200x10 Gbit/s). La spécification de cette génération est délicate car on approche des limites physiques de la bande passante de la technologie EFDA. Les problèmes de distorsion de couleurs à 40 Gbit/s sont également difficiles à résoudre.

Figure 3: Evolution de la capacité des systèmes de transmission optique.

