

# La fibre optique embobine la Terre

Sébastien BIGO et Jean-Pierre HAMAIDE

Depuis les années 1970, les recherches sur la communication par ondes lumineuses sont aiguillonnées par un objectif permanent : transmettre plus d'information, plus rapidement et sur de plus longues distances.

Toutes les informations que nous échangeons, le son de nos téléphones, le texte de nos fax ou de nos courriers électroniques, nos photos ou nos vidéos, transitent sous forme de lumière dans une fibre optique. Entourée d'une gaine de protection, une fibre optique ressemble à un fil électrique, qui transmettrait la lumière au lieu de l'électricité. La fibre elle-même est un mince cheveu de verre d'un dixième de millimètre de diamètre extérieur. Elle est formée de deux couches de verre concentriques, appelées gaine et cœur. Les deux couches sont composées essentiellement de silice, mais différent par la quantité d'additifs chimiques qu'elles ont reçus lors de la fabrication. Ces additifs altèrent les propriétés optiques des deux couches de verre, de telle sorte que l'indice de réfraction du cœur est plus grand que celui de la gaine. Ainsi le cœur piège et « guide » toute lumière injectée dans la fibre.

La lumière se propage dans la fibre optique à environ 200 000 kilomètres par seconde, vitesse équivalente à celle des ondes électroniques dans un câble électrique. L'intérêt de la fibre optique réside donc non pas dans sa « vitesse », mais dans la possibilité d'y propager des données sans distorsion à un débit, c'est-à-dire un nombre de bits par seconde, largement supérieur à celui accessible dans les autres matériaux connus.

La fibre optique, comme nous le verrons, est aussi un milieu privilégié pour transmettre l'information sur de longues distances. Aujourd'hui, les systèmes à fibre optique quadrillent le monde, sur la terre ferme, autour ou entre les grandes villes, et sous les mers, sur des milliers de kilomètres (voir la figure 1). Les satellites complètent les réseaux de télécommunications mondiaux, pour amener l'information dans des régions d'accès difficile, ou pour établir des liaisons à haut débit temporaires entre deux points. Toutefois la fibre n'a pas d'égal dès qu'il s'agit de former des artères où s'échangent les plus grands volumes de données, aujourd'hui à un téraoctet par seconde (mille milliards de valeurs binaires par seconde). Pour obtenir un tel débit, il a fallu développer plusieurs techniques et astuces. Avant de décrire les dernières en date, comme la modulation de phase et les codes correcteurs de dernière génération, nous vous invitons à suivre le cheminement du signal lumineux à l'intérieur d'une liaison optique standard.

## Un mélange de lumières pures

Pour transmettre l'information sur de longues distances, il faut éviter les pertes de signal. Parmi les milieux de propagation possible, la fibre optique présente un coefficient de pertes sans égal, avec seulement quatre pour cent de l'éner-

gie perdue après une distance d'un kilomètre. Toutefois, un tel coefficient n'est accessible que pour certaines couleurs du spectre lumineux, auxquelles le verre de silice est le plus transparent (voir la figure 2). Dans la gamme de couleurs auxquelles notre œil est sensible, on atteint une perte cumulée de quatre pour cent après seulement quelques dizaines de mètres. Pour atteindre des distances de l'ordre du kilomètre, il faut utiliser une lumière invisible, dans le proche infrarouge, à des longueurs d'onde autour de 1,5 micromètre, ce qui signifie environ 200 térahertz en fréquence (un térahertz vaut  $10^{12}$  hertz). Il faut aussi des composants optoélectroniques miniaturisés capables de produire, traiter et détecter de la lumière à 1,5 micromètre.

Les sources lumineuses des fibres optiques sont des lasers à semi-conducteur, longs de quelques dizaines de micromètres seulement. Ceux-ci émettent une lumière à la longueur d'onde adéquate et très pure : leur précision dépasse 0,01 pour mille. Ces lasers fonctionnent en continu. Pour convertir des bits d'information électriques en bits optiques, on fait suivre chaque laser d'un interrupteur optique (un « modulateur »), que contrôle le signal électrique portant les données à transmettre. Ce signal électrique évolue entre deux états, haut et bas, suivant que l'information est « 1 » ou « 0 », à un rythme prédéfini, appelé

fréquence d'information. La fréquence d'information des systèmes optiques actuels atteint 2,5 ou 10 gigahertz (un gigahertz vaut  $10^9$  hertz), ce qui donne accès à des débits binaires de 2,5 ou 10 gigabits par seconde. Cependant, jusque très récemment, l'électronique disponible n'était pas capable de fournir un modulateur et un dispositif de commande opérant à un tel rythme.

Au lieu de chercher à augmenter la fréquence d'information, il est apparu plus efficace de moduler en parallèle la lumière de plusieurs lasers, chacun d'une couleur différente, que nous appellerons « canaux ». Ces canaux sont combinés entre eux (on dit « multiplexés ») dans une même fibre. Arrivé à destination, le signal est décomposé en canaux (« démultiplexés »), qui sont détectés sur autant de photodiodes qu'il y a de lasers (voir la figure 3). Les longueurs d'onde de deux canaux voisins ne diffèrent que de quelques dixièmes de nanomètre : là réside l'avantage de la remarquable précision en longueur d'onde des lasers à semi-conducteurs.

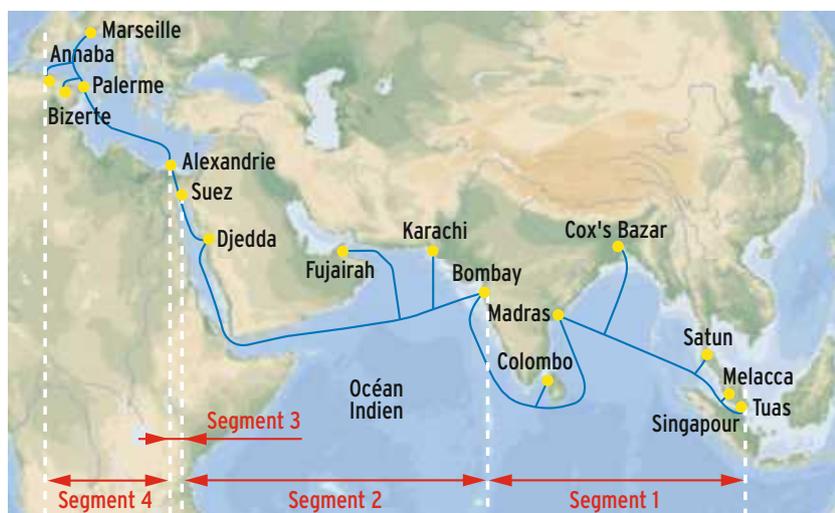
Cette méthode, appelée multiplexage en longueur d'onde (WDM pour *Wavelength Division Multiplexing* en anglais), permet de transmettre dans une seule fibre jusqu'à 100 fois le débit d'un laser individuel : avec 100 canaux à dix gigabits par seconde, on arrive au téra-bit par seconde annoncé ci-dessus. Le multiplexage en longueur d'onde s'est imposé dans les réseaux de télécommunications optiques, aidé en cela par les progrès des dispositifs de multiplexage et démultiplexage optique.

Ces dispositifs sont de deux types. Le premier est une cascade de filtres colorés, chacun laissant passer un canal et réfléchissant tous les autres. Le second, plus fréquent, est un réseau de diffraction : de la même façon qu'un prisme décompose la lumière blanche en ses composantes colorées, le réseau de diffraction dévie un faisceau incident avec un angle qui dépend de sa longueur d'onde. À la sortie du dispositif de démultiplexage, on récupère la lumière de chaque canal dans une fibre dédiée, pourvu que celle-ci soit orientée selon la déviation angulaire adéquate. Le processus est réversible : dans le sens inverse, plusieurs canaux sont multiplexés en un seul faisceau.

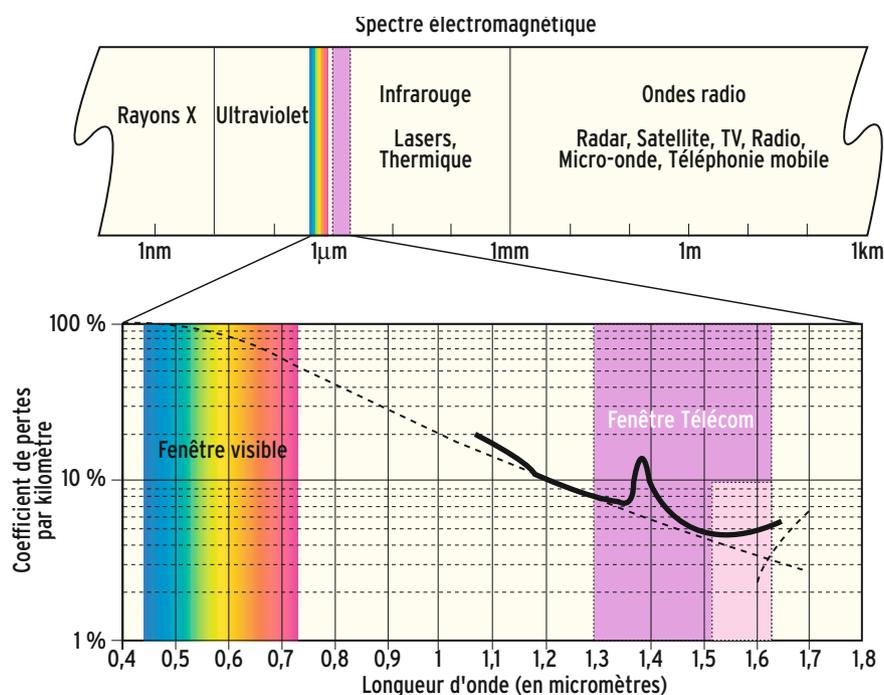
## Un coup de fouet périodique

Le multiplexage en longueur d'onde réduit le nombre de fibres nécessaires, et donc le coût de la communication. Une autre raison de son succès tient à sa compatibilité naturelle avec les amplificateurs optiques. En effet, bien que faibles, les pertes de quatre pour cent par kilomètre de fibre se cumulent, si bien qu'après la traversée de l'Atlantique, il ne resterait de

l'énergie injectée que...  $10^{-130}$ . Autrement dit, les meilleures photodiodes ne pourraient détecter aucun signal à New York dans aucune fibre optique, même si l'on y concentrait à Brest toute l'énergie de l'Univers. Des amplificateurs optiques sont nécessaires, afin de redonner un coup de fouet au signal optique et le ramener à son niveau initial. Ils sont répartis au sein de répéteurs, situés tous les 50 à 100 kilomètres de liaison optique.

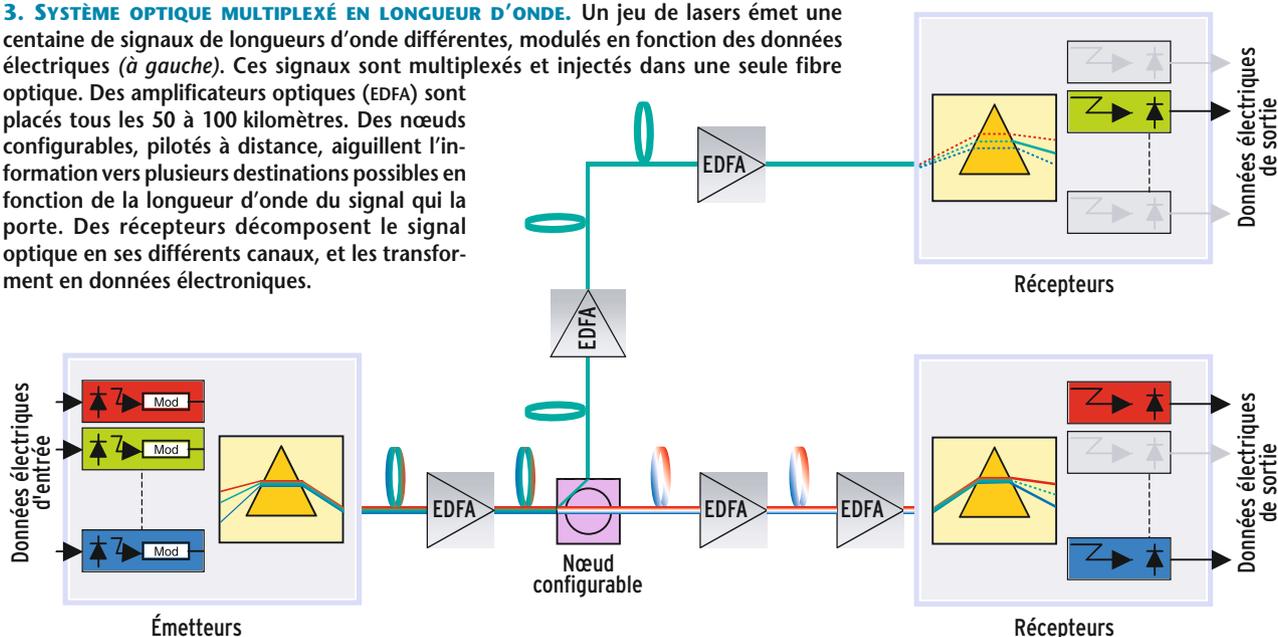


**1. LA PLANÈTE EST EMMALOTÉE** dans un réseau de télécommunication par fibres optiques. Le système optique le plus moderne (achevé en 2006) relie Marseille à Singapour sur 19 000 kilomètres : il transporte 64 canaux à 10 gigabits par seconde par paire de fibre. Il est fait de quatre segments reliés par des interfaces électroniques.



**2. LES FIBRES OPTIQUES** sont transparentes à la lumière infrarouge, proche de la lumière visible (en haut). Plus précisément, l'atténuation du signal optique dans la fibre dépend de sa longueur d'onde (courbe noire, en bas) : elle est minimale entre 1,5 et 1,6 micromètre.

**3. SYSTÈME OPTIQUE MULTIPLEXÉ EN LONGUEUR D'ONDE.** Un jeu de lasers émet une centaine de signaux de longueurs d'onde différentes, modulés en fonction des données électriques (à gauche). Ces signaux sont multiplexés et injectés dans une seule fibre optique. Des amplificateurs optiques (EDFA) sont placés tous les 50 à 100 kilomètres. Des nœuds configurables, pilotés à distance, aiguillent l'information vers plusieurs destinations possibles en fonction de la longueur d'onde du signal qui la porte. Des récepteurs décomposent le signal optique en ses différents canaux, et les transforment en données électroniques.



L'amplification des répéteurs est tout-optique, c'est-à-dire qu'elle se fait sans conversion du signal sous forme électronique ; cela évite d'altérer le débit d'information. Un amplificateur optique de type EDFA (pour *Erbium-Doped Fiber Amplifier* en anglais) est une section de quelques dizaines de mètres de fibre spéciale, au cœur de silice dopé par des ions erbium (voir la figure 4). On injecte dans ce cœur, en plus du signal à amplifier, un faisceau optique de quelques centaines de milliwatts, à la longueur d'onde de 980 nanomètres. Ce faisceau amplifie le signal par émission stimulée : il excite les ions erbium, qui se dés excitent ensuite en rétrocedant au signal leur surplus d'énergie sous forme de photons. Ces photons ont des longueurs d'onde spécifiques, caractéristiques de l'ion  $\text{Er}^{3+}$ , si bien qu'un EDFA traditionnel ne peut amplifier que les canaux dont les longueurs d'onde sont comprises dans une bande de 30 à 50 nanomètres autour de 1,55 micromètre. Aujourd'hui, un EDFA délivre un coefficient de gain uniforme à toutes les longueurs d'onde dans cette bande, ce qui est d'un intérêt pratique lorsque le système compte plusieurs dizaines de canaux.

Au bout de la liaison optique, un récepteur convertit la lumière en un signal électrique à deux états. Pour cela, il compare le signal optique détecté avec un seuil de référence : au-dessus du seuil, le signal est reconnu et transcrit comme un « 1 » électrique ; au-dessous, c'est un « 0 » électrique. Toutefois, comme tout

amplificateur, chaque EDFA affecte le signal par de petites perturbations aléatoires de son amplitude et de sa phase, que l'on désigne sous le terme générique de bruit. Ce bruit est d'autant plus élevé que les pertes de la fibre à compenser sont grandes. Au total, il augmente proportionnellement avec le nombre d'amplificateurs placés périodiquement le long de la liaison optique, et donc avec la longueur de la liaison.

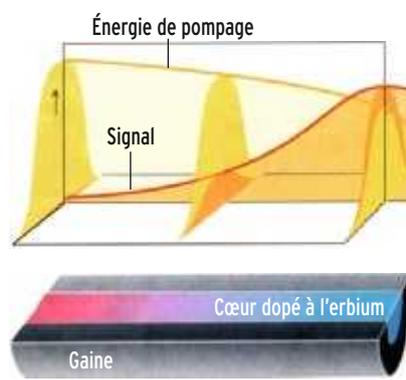
Lorsque la distance à couvrir augmente, le bruit rend plus difficile la discrimination entre les « 1 » et les « 0 », et le nombre d'erreurs (de « 1 » pris pour des « 0 », et de « 0 » pris pour des « 1 ») peut dépasser le très faible seuil garanti de une erreur sur  $10^{12}$  bits transmis. Un moyen pour corriger ce désagrément est d'améliorer le rapport signal

sur bruit, en augmentant la puissance du signal en sortie de tous les amplificateurs optiques. Malheureusement on s'expose alors à des effets non linéaires optiques, qui brouillent le signal.

Ces effets sont exacerbés par la géométrie de la fibre : un cœur de faible diamètre et des longueurs de plusieurs centaines de kilomètres. En conséquence, l'indice de réfraction de la fibre dépend de la puissance du signal : il varie selon que l'information transmise par un canal est un « 1 » ou un « 0 », mais aussi selon la valeur du signal des canaux voisins. Il en résulte des déformations temporelles des données optiques, qui se combinent à celles causées par le bruit des amplificateurs et compliquent, voire empêchent la discrimination entre les « 1 » et les « 0 ». Finalement, la spécification des puissances optiques dans un système résulte d'un compromis entre le bruit et les effets non linéaires optiques.

## Deux techniques clés

Pour anticiper la croissance du volume de données échangées, plusieurs laboratoires dans le monde étudient des systèmes optiques qui présentent un débit par canal de 40 gigabits par seconde. En 2001, deux équipes d'*Alcatel* et de *NEC* ont atteint le débit le plus élevé, à dix térabits par seconde, à partir de l'équivalent d'environ 250 canaux à 40 gigabits par seconde. Malheureusement la distance de propagation était limitée à



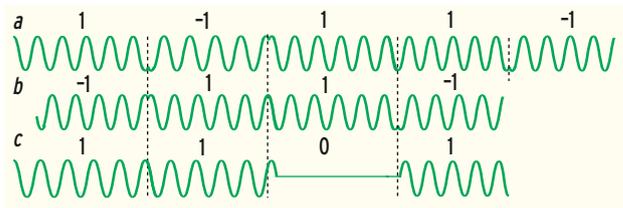
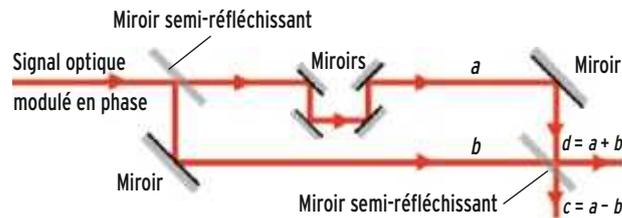
**4. UN AMPLIFICATEUR OPTIQUE (EDFA) est une fibre optique dont le cœur dopé à l'erbium propage à la fois le signal et un rayonnement de pompage. Les atomes d'erbium absorbent le rayonnement de pompage, puis transfèrent leur énergie aux signaux.**

trois fois 100 kilomètres. La même équipe d'Alcatel a réalisé en 2004 une expérience de transmission avec un débit total record à peine inférieur, de six térabits par seconde, sur la distance transatlantique de 6 120 kilomètres : ce débit correspond à dix millions de personnes qui enverraient simultanément, de l'autre côté de l'océan et dans une seule fibre optique, des données à haut débit à dix autres millions de personnes.

Pour y parvenir, entre autres innovations, l'équipe d'Alcatel a changé le format de modulation. Au lieu d'allumer et éteindre la lumière d'un canal selon l'information binaire, comme on le fait dans les systèmes actuels, le laser reste allumé, et c'est sa phase que l'on fait varier de  $\pi$  selon que l'information à transmettre est un « 1 » ou un « 0 ». Autrement dit, le train de données à transmettre est constitué d'impulsions « +1 » et « -1 ».

Ce format de modulation est intéressant parce que deux impulsions consécutives déphasées de  $\pi$  restent mieux séparées. Ainsi, les interactions entre impulsions voisines causées par les effets non linéaires s'en trouvent réduites. Cependant les détecteurs optiques ne sont pas sensibles à la phase. Il faut donc convertir de nouveau le signal modulé en phase en un signal modulé en amplitude détectable. C'est une problématique fréquente en optique, qui trouve sa solution la plus simple dans l'interférométrie : il suffit de comparer le signal avec lui-même, mais décalé d'un bit.

Pour cela, on divise le faisceau en deux faisceaux identiques avant de les recombiner dans un interféromètre à deux bras, dont un est plus long que l'autre de la longueur équivalente à un bit. Ainsi, quand deux bits consécutifs ont la même phase, l'interféromètre est bloquant (signal « 0 »). Il devient passant (signal « 1 ») quand deux bits consécutifs sont en opposition de phase (voir la figure 5). Cette technique, dénommée détection différentielle, présente un avantage supplémentaire : elle supporte deux fois plus de bruit que la détection habituelle.



**5. MODULATION DE PHASE.** Les « 1 » et « 0 » sont modulés sous forme de « +1 » et « -1 » déphasés de  $\pi$  (a). Pour lire ce type de message, on fait interférer le signal avec lui-même, décalé d'un bit (b) : quand deux bits successifs ont la même phase, le signal est « 0 », s'ils sont en opposition de phase, le signal est « 1 » (c).

On améliore encore la transmission en utilisant des codes correcteurs d'erreurs, disponibles à très haut débit depuis seulement quelques années. Les codes d'erreurs consistent à calculer des bits supplémentaires à partir de l'information binaire, et à les transmettre avec l'information. Les bits supplémentaires sont « redondants ». Comme les erreurs sont aléatoires, il est très peu probable qu'elles affectent à la fois les bits d'information et les bits redondants correspondants. En analysant les bits reçus, on identifie les erreurs survenues. On peut même les corriger, puisqu'on connaît la relation de calcul entre l'information et les bits redondants.

Les codes d'erreurs les plus performants utilisés dans les télécommunications optiques limitent le taux d'erreurs en sortie à 1 sur  $10^{12}$  bits utiles, contre un bit faux sur 1 000 en moyenne sans code correcteur. On obtient ce résultat en n'utilisant que sept pour cent de bits redondants supplémentaires, c'est-à-dire en travaillant au débit de 10,7 gigabits par seconde au lieu de 10, ou de 42,7 gigabits par seconde au lieu de 40.

## Des nœuds transparents

Les résultats atteints grâce au multiplexage en longueur d'onde ont favorisé l'émergence de l'optique pour remplir d'autres fonctions que la simple transmission dans les réseaux de télécommunications. Ces réseaux sont constitués de liaisons optiques qui se croisent en des nœuds, le plus souvent dans les grandes villes. Aujourd'hui, la plupart de ces nœuds

sont électroniques : l'information y est soit insérée, soit extraite, soit simplement en transit. Autrement dit, l'information optique de chaque canal est convertie en signal électronique à son arrivée dans un nœud, même si elle n'est qu'en transit vers le nœud suivant. Or ce traitement électronique, inutile pour une information en transit, est coûteux.

Les ingénieurs préparent aujourd'hui des nœuds partiellement transparents en optique, afin que les informations circulent sous forme optique jusqu'à leur destina-

tion. La solution retenue consiste à réserver certaines longueurs d'onde pour l'information en transit, tandis que d'autres longueurs d'onde portent l'information insérée ou extraite localement, donc converties en données électroniques.

Les nœuds transparents s'imposent d'autant mieux s'ils seront dotés de fonctionnalités réservées aux circuits électroniques dans les systèmes actuels, à savoir des possibilités de re-configurations à distance. Jusque récemment, quand un client réservait une ou plusieurs longueur(s) d'onde, l'opérateur du réseau devait intervenir physiquement sur la liaison. Désormais, des dispositifs optiques d'aiguillage (ou « commutation »), sélectifs en longueur d'onde, permettent d'éviter de telles interventions. L'optique sert, non plus seulement à la transmission de l'information, mais aussi à sa commutation. Ainsi, une nouvelle phase de l'expansion de l'optique aux réseaux de télécommunications est sur le point d'être franchie.

**Sébastien BIGO et Jean-Pierre HAMAIDE sont chercheurs pour la Société Alcatel.**

E. DESURVIRE, B. DESTHIEUX, D. BAYART et S. BIGO, *Erbium-doped fiber amplifiers : device and system developments*, J. Wiley & Sons, New York, 2002.

G.P. AGRAWAL, *Nonlinear fiber optics*, 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 1997.

S. BIGO, *Multi-terabit/s DWDM terrestrial transmission with bandwidth-limiting optical filtering*, papier invité in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, numéro spécial *Optical Communication*, vol. 10, n° 2, pp. 329-340, mars-avril 2004.

*IEEE Proceedings of the IEEE*, numéro spécial *Technologies for next-generation optical networks*, vol. 94, n° 5, mai 2006.