

Des lasers pour les télécommunications optiques par fibres : un luxe ou une nécessité ?

Mehdi Alouini (mehdi.alouini@univ-rennes1.fr)

Institut de Physique de Rennes, UMR CNRS 6251, Université de Rennes 1, 35042 Rennes Cedex, Ingénieur-conseil à Thales Research and Technology.

L'invention du laser, suivie du développement des lasers à semi-conducteurs, a été un élément clef dans l'essor des télécommunications par fibres optiques.

Nous exposons ici les raisons pour lesquelles certaines des propriétés du rayonnement laser, telles que la brillance et la cohérence, sont aujourd'hui incontournables pour réaliser des liaisons pour les télécommunications à longue distance et de haut débit. Les besoins dans ce domaine nous amènent ensuite à comprendre pourquoi les lasers à semi-conducteurs se sont imposés comme les sources optiques de prédilection.

Cinquante ans nous séparent du premier laser. Pourtant, qui aurait pensé que cette expérience de physique allait paisiblement révolutionner nos modes de vie ? Cette lumière aux propriétés si étranges s'est en effet immiscée dans notre quotidien en changeant nos modes de communication, sans même qu'on s'en aperçoive. Les télécommunications optiques ne se seraient sans doute pas démocratisées sans ces lasers : si petits et pourtant si complexes ! Nous tentons ici de montrer pourquoi les propriétés du rayonnement laser ont été déterminantes dans l'essor des télécommunications optiques.

Pourquoi transmettre l'information dans le domaine optique ?

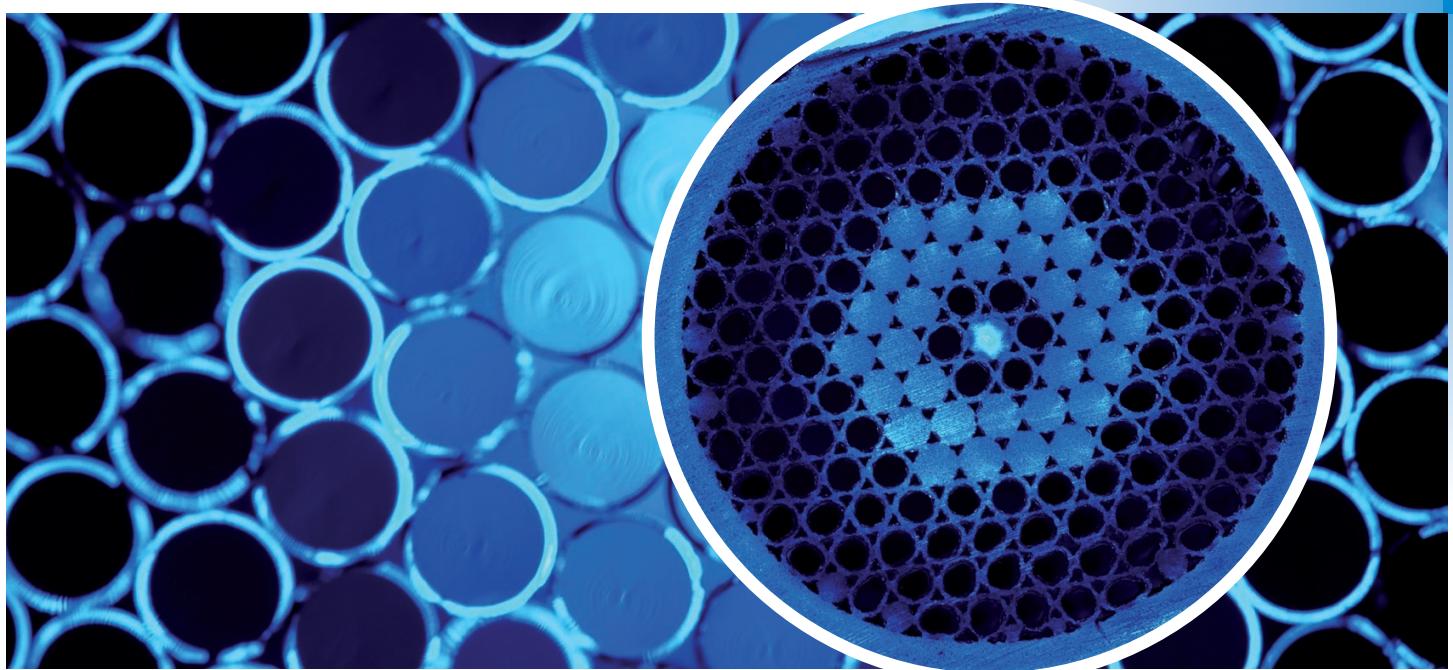
Pour comprendre en quoi les lasers ont aidé à révolutionner le domaine des télécommunications, revenons quelques instants sur le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une liaison optique. Dans le cas le plus simple, une liaison optique est constituée d'un laser, d'une fibre et d'un détecteur. Quelle que soit l'origine du signal à transmettre, celui-ci est d'abord numérisé puis compressé dans le domaine électrique, en une succession de bits « 1 » et « 0 ». Le passage dans le domaine optique se fait *via* un laser, dont on module l'intensité de sorte que la présence de

lumière correspond à un bit « 1 », alors que son absence correspond à un bit « 0 ». On transcrit ainsi l'information sur une porteuse optique, qui va se propager le long de la fibre sur plusieurs dizaines, voire milliers, de kilomètres avant d'atteindre le détecteur. Ce dernier convertit enfin la modulation optique en signal électrique.

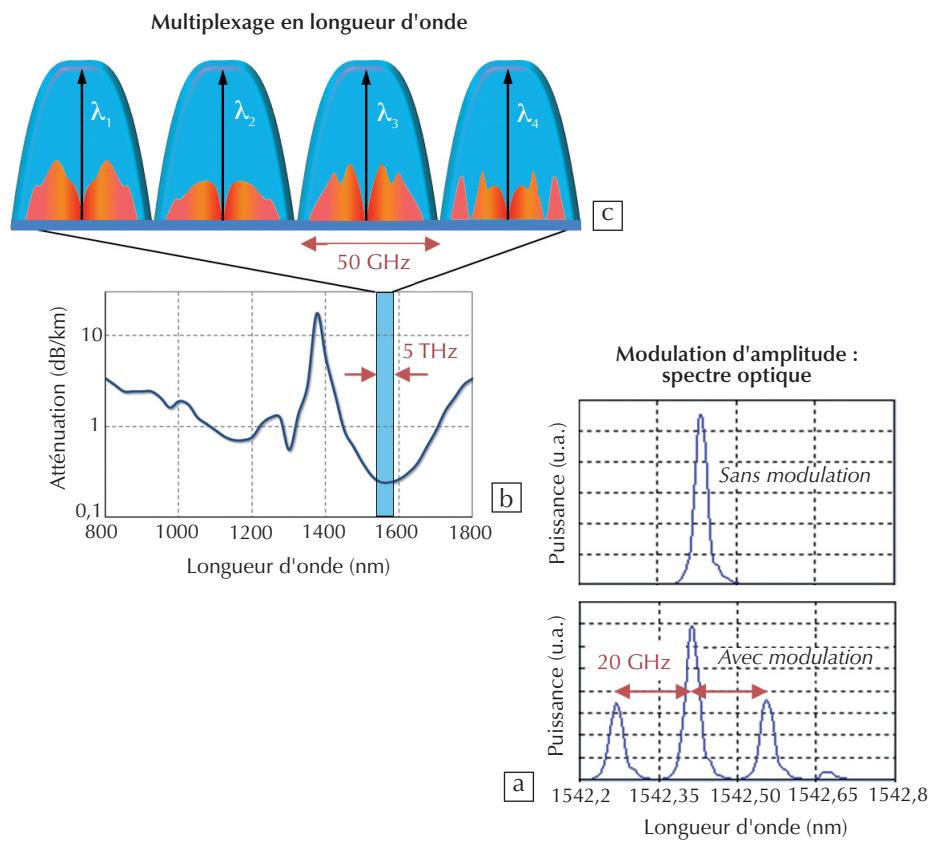
L'utilisation d'une porteuse optique présente deux intérêts majeurs.

Le premier intérêt est la large bande passante, qui est directement liée au nombre d'informations que l'on peut transférer par unité de temps. En effet, à la longueur d'onde des télécommunications optiques qui est de $1,5 \mu\text{m}$, la fréquence lumineuse, ν_0 , est de l'ordre de 200 THz. Moduler l'intensité d'une onde lumineuse avec un signal sinusoïdal à la fréquence ν induit l'apparition dans le domaine spectral de deux raies à $\pm \nu$ de la fréquence lumineuse ν_0 (fig. 1a). Dans le cas où le signal de modulation est quelconque et où sa fréquence la plus élevée est ν , des bandes latérales apparaissent de part et d'autre de la fréquence lumineuse, couvrant un spectre de largeur 2ν centré autour de ν_0 . Ce sont ces bandes spectrales qui contiennent l'information utile. Ainsi, en se limitant à une largeur de spectre utile de 16 nm autour de 1550 nm, la bande passante est déjà potentiellement de 1 THz.

Le deuxième intérêt majeur d'utiliser une porteuse optique est que les fibres présentent aujourd'hui des pertes faibles,



Coupe d'une préforme permettant de réaliser une fibre optique air-solide de 125 μm de diamètre (XLIM, Limoges). © CNRS Photothèque / VRIGNAUD François.



1. Le domaine optique offre une bande passante gigantesque. (a) Spectre optique d'un laser. La modulation de son intensité fait apparaître dans le spectre deux bandes latérales, espacées de la fréquence de modulation. (b) Atténuation d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde. L'atténuation augmente aux petites longueurs d'onde à cause de la diffusion Rayleigh, et aux grandes longueurs d'onde à cause de l'interaction photons-phonons. Le pic à 1380 nm correspond à une transition de l'ion OH⁻. La fenêtre de transparence se situe entre 1530 nm et 1600 nm. (c) Le multiplexage en longueur d'onde consiste à compartimenter le spectre optique en plusieurs canaux de communication. Chaque canal possède sa propre porteuse optique, autour de laquelle sont transposés les signaux électriques à transmettre (en rouge sur la figure). © Inst. Phys. Rennes - M. Alouini

de l'ordre de 0,2 dB/km. Ceci correspond à une atténuation de l'intensité lumineuse d'un facteur 2 au bout de 15 km de propagation. Si l'on devait rester dans le domaine électrique, les pertes de propagation augmenteraient avec la fréquence du signal. Pour donner un ordre de grandeur, l'atténuation d'un câble hyperfréquence à 20 GHz se compte en dB/m. L'atténuation de la puissance électrique est déjà conséquente au bout de quelques mètres. Ce problème ne se pose plus lorsque le signal est porté par l'onde optique, car les fibres sont parfaitement transparentes et présentent peu de pertes sur une plage de longueur d'onde qui excède la centaine de nanomètres autour de 1,5 μm (ce qui représente une plage spectrale supérieure à 5 THz, voir la figure 1b).

On voit donc comment l'utilisation de la lumière comme vecteur de l'information a ouvert la voie aux transmissions de haut débit. Encore fallait-il pouvoir moduler rapidement cette lumière et garantir qu'elle se propage sans pertes d'information. Nous verrons plus loin comment les lasers à semi-conducteurs remplissent parfaitement la première condition. Retenons pour l'instant que la source lumineuse doit pouvoir être rapidement modulée, et voyons pourquoi la deuxième condition lui impose en plus d'avoir une grande brillance. Pour cela, intéressons-nous à la propagation de la lumière dans une fibre.

>>>

>>>

Pourquoi une source lumineuse de forte brillance ?

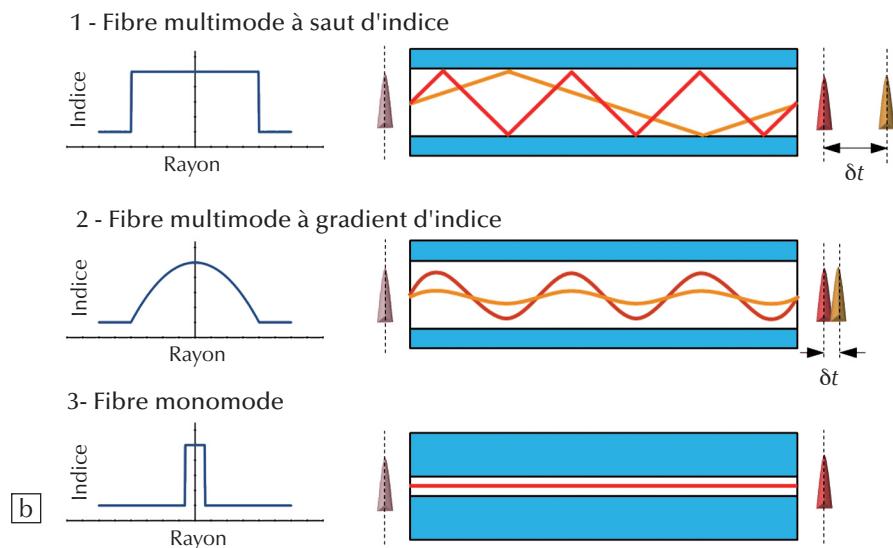
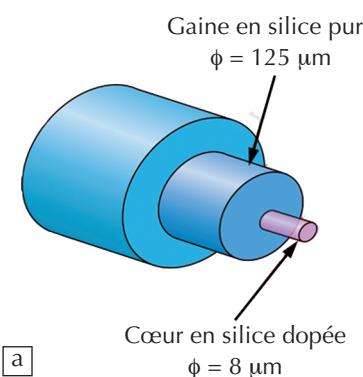
Une fibre optique est constituée d'un cœur qui guide la lumière et d'une gaine, tous deux en silice (fig. 2a). Pour que la lumière reste guidée, on joue sur le dopage de la silice pour que l'indice de réfraction du cœur soit supérieur à celui de la gaine. Lorsque le diamètre du cœur est très grand devant la longueur d'onde, les lois de la réfraction de l'optique géométrique s'appliquent. Ainsi, il existe un angle d'incidence critique (avec la normale à l'interface entre le cœur et la gaine), au-delà duquel se produit la réflexion totale. La lumière se trouve ainsi guidée le long du cœur. Cependant, elle peut emprunter plusieurs chemins tout en restant guidée, pourvu que l'angle d'incidence soit supérieur à l'angle critique. Dans ce cas, la fibre est dite « multimode », car plusieurs modes de propagation sont possibles (fig. 2b). Le calcul rigoureux montre qu'il existe une multitude de modes de propagation, chacun ayant son propre indice effectif, de sorte que les chemins optiques⁽¹⁾ vus par chaque mode sont différents. On parle alors de dispersion modale. Un tel schéma de propagation n'est pas adapté à une transmission de haut débit. En effet, une impulsion lumineuse pouvant emprunter plusieurs chemins optiques,

elle se retrouve étalée en sortie de la liaison (fig. 2b-1). Ceci est d'autant plus rédhibitoire que le débit est élevé, c'est-à-dire que les impulsions sont courtes et rapprochées les unes des autres, et que la liaison est longue. Pour que les impulsions restent bien séparées sur le détecteur, on montre que, dans le cas d'une fibre à saut d'indice (où le profil d'indice à l'interface cœur-gaine forme une marche d'escalier), le produit de la bande passante en fréquence, B , par la longueur de liaison, L , doit rester inférieur à une certaine valeur donnée par la relation : $BL < n_2 c / (n_1^2 \Delta)$, où $\Delta = 1 - n_2/n_1$. Dans ces expressions, n_1 et n_2 sont respectivement les indices du cœur et de la gaine, et c la célérité de la lumière. À titre d'exemple, une liaison de 10 km de long utilisant une fibre multimode à saut d'indice, avec une différence d'indice de 10^{-3} entre le cœur et la gaine, autorise un débit maximum de seulement 30 Mb/s.

Pour minimiser la dispersion modale tout en gardant de grands diamètres de cœur, une solution consiste à utiliser des fibres à gradient d'indice. Dans ces fibres, on s'arrange pour que la valeur de l'indice de réfraction dans le cœur diminue radialement du centre vers les bords. Le profil d'indice est calculé pour que tous les modes voient le même chemin optique. Ainsi, le mode se propageant parallèlement à l'axe de la

fibre, c'est-à-dire celui qui parcourt le moins de distance, voit un indice élevé. À l'inverse, un mode qui serpente de part et d'autre du centre du cœur parcourt plus de distance, mais voit en moyenne un indice plus faible (fig. 2b-2). On montre que le profil d'indice idéal est parabolique. Alors, le produit BL de la liaison devient borné par : $BL < 8c / (n_1 \Delta^2)$. En prenant les mêmes hypothèses que précédemment, notre liaison de 10 km offre maintenant un débit de 360 Gb/s.

Bien sûr, cela est loin d'être suffisant dès lors que les distances à parcourir se comptent en milliers de kilomètres. C'est là que la brillance de la source lumineuse utilisée devient capitale. En effet, dans ce cas, on a recours aux fibres dites « monomodes ». Celles-ci ont un cœur, dont le diamètre est si petit qu'elles n'autorisent la propagation que d'un seul mode spatial. En effet, lorsque les dimensions transverses du guide sont comparables à la longueur d'onde, les lois de l'optique géométrique ne s'appliquent plus. Il faut alors faire appel aux équations de propagation de Maxwell, en tenant compte des conditions aux limites (celles imposées par l'interface cœur-gaine). La résolution de ces équations montre que plus on cherche à confiner l'onde, plus le nombre de modes pouvant se propager diminue. Cette propriété est très générale



2. Fonctionnement d'une fibre optique. (a) Section d'une fibre monomode. (b) Propagation de la lumière dans trois types de fibres en fonction de leur profil d'indice. Dans une fibre multimode, une impulsion lumineuse (en gris) peut parcourir différents chemins optiques à la fois. Une impulsion empruntant le chemin tracé en rouge met pour arriver au détecteur un temps supérieur de δt à celui qu'elle aurait mis si elle avait emprunté le chemin tracé en orange. La dispersion modale produit donc un élargissement des impulsions et, par conséquent, le chevauchement des différents bits contenus dans le signal à transmettre. L'utilisation d'une fibre monomode permet de s'affranchir de ce problème, puisque l'impulsion ne peut emprunter qu'un seul chemin optique. © Inst. Phys. Rennes - M. Alouini

en physique ondulatoire, y compris en mécanique quantique. Ainsi, il devient nécessaire de coupler la puissance lumineuse, typiquement une dizaine de milliwatts, dans un guide de $8 \mu\text{m}$ de diamètre (fig. 2a). Dans les fibres monomodes, la lumière se propage suivant l'axe de la fibre et ne voit qu'un seul indice effectif, dont la valeur est comprise entre celles du cœur et de la gaine (fig. 2b-3). La dispersion modale n'existe plus, puisque seul le mode fondamental est guidé.

Notons que la fabrication des fibres monomodes est une vraie prouesse technologique. On est capable aujourd'hui de tirer plusieurs centaines de kilomètres de fibre monomode, en garantissant un diamètre de cœur de $8 \mu\text{m}$. Cela correspond à un facteur de forme supérieur à 10^{10} ! Signalons aussi que les travaux liés au développement des fibres optiques ont valu à Charles K. Kao le prix Nobel 2009 de physique.

La transmission de signaux de haut débit passe donc par l'utilisation de fibres monomodes. On peut alors se demander en quoi il est important d'injecter dans des guides si petits plusieurs milliwatts de puissance optique. En réalité, cela va de pair avec l'augmentation du débit à transmettre. Plaçons-nous en bout de liaison, au niveau du détecteur. Pour dépasser le seuil de détection relatif au bit « 1 », l'impulsion lumineuse doit contenir un certain nombre de photons. Augmenter le débit revient à raccourcir la durée des impulsions et à en augmenter le nombre par unité de temps. Ceci nécessite une augmentation du nombre moyen de photons par unité de temps, et donc de la puissance moyenne de la source optique utilisée.

Même monomodes, les fibres restent dispersives

Bien que la dispersion modale soit nulle dans les fibres monomodes, il subsiste néanmoins un autre effet de dispersion beaucoup plus petit, lié à la nature même du matériau et au profil d'indice de la fibre. En effet, l'indice effectif vu par le mode dépend très légèrement de sa longueur d'onde. Pour mieux comprendre, revenons à notre signal optique modulé sinusoïdalement à la fréquence ν . Comme nous l'avons vu précédemment, le spectre de ce signal est constitué de la porteuse optique à ν_0 et de deux raies latérales à $\pm \nu$ de ν_0 . Ces trois composantes spectrales ne voyant pas

rigoureusement le même indice effectif, elles se propagent à des vitesses légèrement différentes. Autrement dit, les composantes spectrales d'un signal quelconque n'arrivent pas au même moment sur le détecteur situé en bout de ligne. Ceci résulte en un étalement des impulsions formant le signal. On parle alors de dispersion chromatique. Cette dispersion s'exprime en $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$ et vaut $17 \text{ ps}/\text{km}/\text{nm}$ dans une fibre monomode standard. Ce chiffre traduit le fait qu'une impulsion qui s'étalerait dans le domaine spectral sur 1 nm s'élargit de 17 ps dans le domaine temporel tous les kilomètres. Supposons que la fréquence de modulation ν vole 10 GHz . Le signal couvrirait alors une largeur spectrale de 20 GHz , ce qui correspondrait à $0,16 \text{ nm}$ à la longueur d'onde de $1,5 \mu\text{m}$ (fig. 1a). Au bout de 100 km de propagation, il s'étalerait dans le domaine temporel de 270 ps , c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la période de modulation. Il deviendrait alors difficile de distinguer deux bits successifs.

Contrairement à la dispersion modale, la dispersion chromatique n'est pas handicapante. Cet effet physique est réversible. En plaçant le long de la liaison des tronçons de fibre à dispersion négative, on donne de l'avance aux composantes spectrales qui ont pris du retard et vice-versa, de sorte que la dispersion cumulée en bout de liaison est quasiment nulle. On parle alors de gestion de la dispersion ou encore de *dispersion management*.

Pourquoi une source lumineuse spectralement fine ?

La propriété de cohérence inhérente au rayonnement laser joue aussi un rôle déterminant dans les réseaux de haut débit. Les liaisons les plus performantes possèdent aujourd'hui des débits de l'ordre du Tbit/s dans une seule fibre. Or, la cadence des impulsions lumineuses issues d'un laser est de l'ordre de la dizaine de Gbit/s . On arrive à obtenir des cadences de $40 \text{ Gbit}/\text{s}$, mais au prix d'efforts conséquents. Cette limitation provient principalement de la difficulté qu'on rencontre à convertir un signal électrique de très haute fréquence en modulation optique. Elle provient aussi des circuits électroniques eux-mêmes. Les signaux électriques à transmettre ont souvent une cadence bien plus faible que le Gbit/s . Cependant, pour remplir la bande avant de passer dans le domaine optique, on a

recours au multiplexage temporel et fréquentiel. Le multiplexage temporel consiste à comprimer puis à entrelacer dans le temps les signaux issus de différents canaux électriques. Le multiplexage fréquentiel consiste, quant à lui, à placer les différents canaux côte à côte dans le spectre. Dans les deux cas, on cherche à remplir de manière optimale la bande utile afin d'exploiter efficacement le débit disponible dans un canal optique, à savoir la dizaine de Gbit/s .

Une fois dans le domaine optique, on fait appel au multiplexage en longueur d'onde (fig. 1c). Le principe est similaire à celui du multiplexage fréquentiel dans le domaine électrique, hormis qu'il intervient à l'échelle des fréquences optiques. Pour cela, on couple dans une seule fibre plusieurs signaux issus d'un ensemble de lasers dont les longueurs d'onde sont légèrement décalées, chaque canal optique offrant un débit d'une dizaine de Gbit/s . En pratique, on arrive à multiplexer une centaine de longueurs d'onde, formant un peigne qui couvre le domaine spectral 1530 nm à 1570 nm , et dont les raies sont espacées de $0,4 \text{ nm}$. La gamme de longueurs d'onde choisie correspond au minimum d'atténuation des fibres et à la fenêtre spectrale d'amplification des amplificateurs optiques dopés en erbium (voir dernière section). Le multiplexage en longueur d'onde impose donc que les sources lumineuses utilisées soient fines spectralement et que leurs longueurs d'onde ne dérivent pas plus que $0,01 \text{ nm}$. Sinon, les différents canaux optiques de communication se mélangeront (fig. 1c). Cette contrainte supplémentaire trouve, là encore, une réponse dans une des propriétés du rayonnement laser : sa cohérence.

La fenêtre de transparence des fibres optiques permet des débits largement supérieurs à la dizaine de Tbit/s . Pour cela, il suffirait d'augmenter le nombre de canaux optiques, mais cela s'accompagnerait d'une augmentation démesurée de la puissance optique circulant dans la fibre. On se retrouverait alors rapidement confrontés à une multitude d'effets non linéaires qui dégraderaient la qualité des signaux transmis. En réalité, ce sont souvent les fenêtres d'amplification des répéteurs optiques, ainsi que la saturation de leur gain, qui limitent la bande passante utile, notamment dans les liaisons à longue distance où ils sont insérés tous les 150 km .

>>>

>>>

Pourquoi un laser de petites dimensions ?

Les contraintes que nous venons d'évoquer montrent clairement que les sources lumineuses utilisées en télécommunications optiques ne pouvaient être autre chose que des lasers. Encore fallait-il pouvoir moduler le signal optique à des fréquences GHz, c'est-à-dire allumer et éteindre le flux lumineux un milliard de fois par seconde. Il existe, pour moduler la puissance lumineuse, deux grandes approches : soit on module directement la source lumineuse, soit on place derrière une source continue un modulateur d'amplitude. La première approche est la plus répandue, car elle est économiquement viable et moins compliquée à intégrer.

Contrôler la puissance lumineuse d'un laser à des cadences extrêmement élevées peut paraître incongru. En effet, l'oscillation laser repose sur la présence d'une cavité optique dans laquelle la lumière fait plusieurs allers-retours. Ce processus prend un certain temps. On le caractérise par la durée de vie des photons, τ_p , qui correspond au temps que met la cavité à se vider en l'absence du milieu actif. τ_p dépend de la longueur d'un aller-retour dans la cavité, l_{cav} , et de ses pertes p suivant la relation $\tau_p = l_{cav}/cp$, où c est la célérité de la lumière. Cette relation montre que la durée de vie des photons dans la cavité est d'autant plus petite que la cavité est courte et qu'elle présente des pertes élevées. Ainsi, un laser qui répond rapidement doit avoir une cavité courte et des miroirs faiblement réfléchissants. La conséquence directe est que le milieu actif doit, d'une part, être court et, d'autre part, fournir un gain suffisamment élevé pour compenser les pertes de la cavité.

Dans un laser à semi-conducteurs, les cavités sont extrêmement petites : inférieures au millimètre. Le gain lors d'un simple passage est de l'ordre de 100, ce qui autorise des pertes élevées : de l'ordre de 10. La durée de vie des photons dans la cavité est alors de l'ordre de la ps.

Mais ce n'est pas tout ! Le milieu actif doit, en plus, pouvoir répondre rapidement à une sollicitation extérieure. Autrement dit, l'inversion de population doit pouvoir s'établir et disparaître très rapidement. Pour cela, la durée de vie du niveau excité, τ_{inv} , doit être courte, ce qui est *a priori* antinomique avec l'obtention d'un gain élevé. De nouveau, les milieux actifs à base de

semi-conducteurs permettent de répondre à ce besoin, puisque τ_{inv} est de l'ordre de la ns. En tenant compte de ces deux temps caractéristiques, τ_p et τ_{inv} , la réponse fréquentielle du laser à une modulation de la pompe se calcule assez aisément. Elle est de la forme :

$$|H(v)| = [(1 - v^2/v_r^2)^2 + (\gamma v/v_r^2)^2]^{-1/2},$$
 où v_r est la fréquence des oscillations de relaxation et γ est le taux d'amortissement (exprimé en hertz). On voit que le laser se comporte comme un filtre passe-bas du deuxième ordre (fig. 3a), dont on peut calculer la fréquence de coupure. La fréquence des oscillations de relaxation est proportionnelle à $[(\eta - 1) / (\tau_p \tau_{inv})]^{1/2}$, où η est le taux de pompage, c'est-à-dire la puissance de pompe normalisée à celle du seuil d'oscillation. La bande passante d'un laser est légèrement supérieure à la fréquence des oscillations de relaxation. Comme nous le présentons, τ_p et τ_{inv} doivent être les plus petits possible. Le taux de pompage doit, quant à lui, être le plus grand possible.

Dans un laser à semi-conducteurs, toutes ces conditions sont réunies. En effet, comme nous venons de le voir, τ_p est de l'ordre de la ps, τ_{inv} est de l'ordre de la ns et le taux de pompage est de l'ordre de 10, de sorte qu'on arrive à atteindre des bandes passantes de 20 GHz. Les lasers à semi-conducteurs sont, pour l'instant, les seuls lasers à répondre à tous ces critères simultanément. C'est pourquoi ils se sont imposés naturellement dans le domaine des télécommunications optiques.

Les lasers à semi-conducteurs : des sources techniquement et économiquement viables

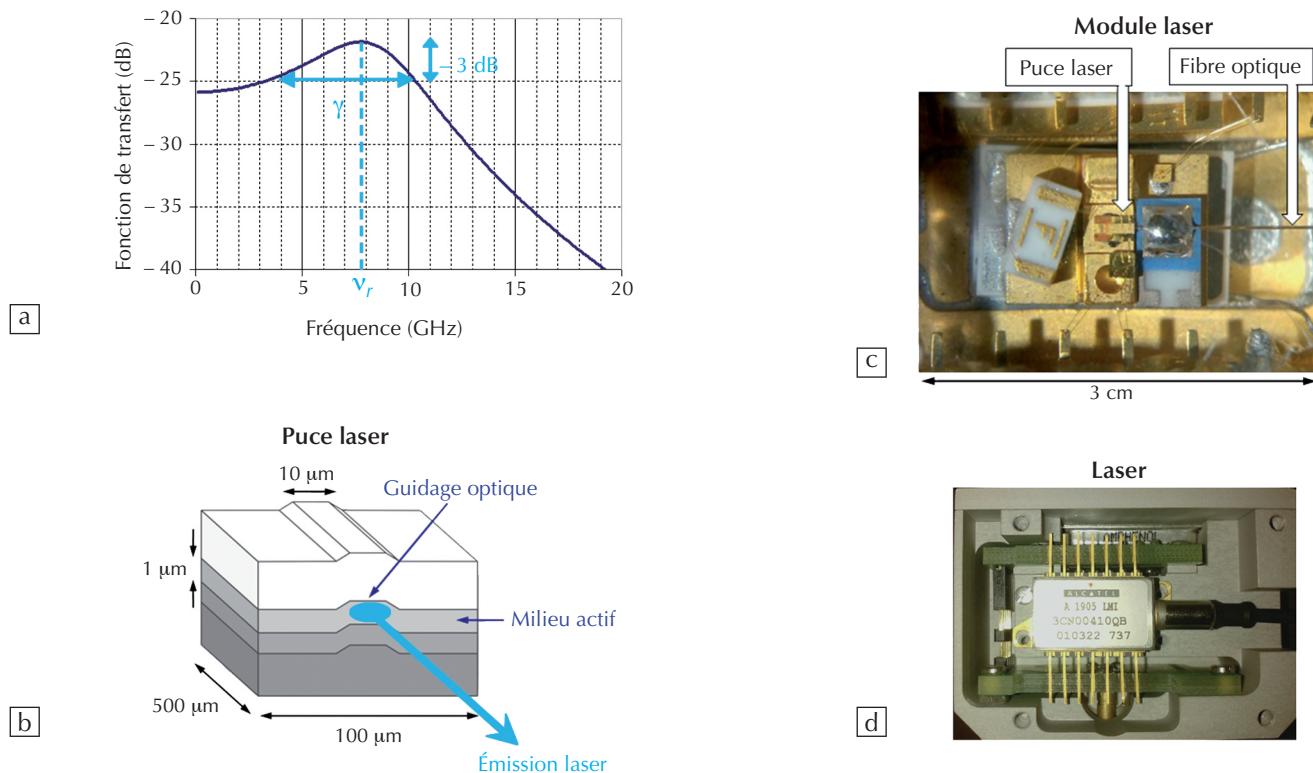
Nous venons de voir que les liaisons optiques de haut débit imposaient aux sources lumineuses utilisées un nombre important de contraintes. Celles-ci trouvent leur réponse dans les propriétés du rayonnement laser et, plus particulièrement, dans les lasers à semi-conducteurs (voir l'article de S. Forget *et al.*, p. 23). D'un point de vue économique, les télécommunications optiques ne se seraient sûrement pas démocratisées sans ces derniers. En effet, quelle que soit l'origine des signaux à transmettre, ils finissent toujours par se présenter sous forme électrique. Les lasers à semi-conducteurs ont, en plus, le mérite d'être pompés électriquement. Ils sont donc parfaitement adaptés à la transmission

de données. On doit leur succès à l'invention des hétérojonctions, notamment par Jores Ivanovitch Alferov, qui s'est vu décerner en 2000 le prix Nobel de physique. En confinant spatialement le courant d'injection, les hétérojonctions ont permis d'obtenir l'inversion de population dans les semi-conducteurs avec des courants ridiculement faibles, de l'ordre du milliampère (mA).

Les lasers à semi-conducteurs ont aujourd'hui envahi le marché. Ils sont présents dans à peu près tous les équipements contenant un laser, qu'ils soient scientifiques, militaires ou civils. Ces lasers sont très compacts, très robustes, consomment peu et, avec le temps, sont devenus très fiables. Un laser télécom a, par exemple, une durée de vie de l'ordre de 10^6 heures. Il existe aujourd'hui un large éventail de lasers télécoms.

Les plus utilisés pour les liaisons de haut débit sont les lasers rubans à émission par la tranche (voir p. 23 et figure 3b). Ils sont constitués d'un empilement de couches semi-conductrices plus ou moins dopées. Le confinement et le guidage de la lumière sont assurés par les contrastes d'indices entre multicoques. Ces lasers sont généralement monomodes transverses, c'est-à-dire qu'ils ne guident qu'un seul mode de propagation, comme pour les fibres monomodes. Pour les rendre monomodes longitudinaux, c'est-à-dire monofréquences, on grave le long du guide un réseau de Bragg, qui sert en outre à fixer la longueur d'onde d'oscillation pour les besoins de multiplexage en longueur d'onde. La puce ainsi formée n'excède pas un millimètre cube (fig. 3c). Elle est généralement soudée sur un support d'alumine, sur lequel sont disposés les circuits d'accès électriques et une photodiode de contrôle. Le tout est posé sur un élément Peltier, dont le rôle est de réguler la température. Un isolateur optique et une optique d'injection dans la fibre viennent compléter l'ensemble. Un tel laser tient dans un boîtier d'un centimètre cube (fig. 3d).

Lorsque les débits recherchés ne sont pas élevés, on a recours à des lasers non refroidis, moins performants, mais beaucoup plus compacts et plus économiques. D'autres technologies existent comme, par exemple, les lasers à émission par la surface (voir p. 23), qui sont bien adaptés aux fibres multimodes, donc à des liaisons courtes ou à faible débit.



3. Lasers à semi-conducteurs pour les télécommunications optiques. (a) Un laser télécom se comporte comme un circuit RLC, qui présente une fréquence de résonance ν_r , et un taux d'amortissement γ . La rapidité avec laquelle on peut moduler le laser dépend de ces deux paramètres. (b) Section d'un laser à semi-conducteur à émission par la tranche. (c) Intégration de la puce laser dans un boîtier télécom. Ce dernier contient, en plus de la puce laser, une optique d'injection dans la fibre, les accès électriques et une photodiode de contrôle. L'ensemble est posé sur un module à effet Peltier qui régule la température du laser. (d) Vue d'un laser télécom dans son compartiment d'alimentation. © Inst. Phys. Rennes - M. Alouini

Finalement, il est important de mentionner que ce sont aussi des lasers à semi-conducteurs qui pompent les amplificateurs à fibre dopée en erbium (EDFA).

Dans les liaisons excédant 200 km de long, comme les liaisons sous-marines par exemple, ces amplificateurs sont disposés tous les 150 à 200 km, afin de compenser les pertes de propagation. Ils sont constitués d'une vingtaine de mètres de fibre monomode, dont le cœur est dopé à l'erbium. L'inversion de population est obtenue en pompant optiquement la fibre à l'aide d'une ou plusieurs diodes laser émettant à 980 nm ou à 1480 nm. L'amplification a lieu ainsi directement dans le domaine optique, sans avoir à reconvertis le signal dans le domaine électrique. Il va de soi que ce schéma d'amplification est incontournable lorsque la liaison est multiplexée en longueur d'onde. Sans ces amplificateurs optiques, les liaisons optiques transocéaniques et transcontinentales de haut débit n'auraient jamais vu le jour.

Conclusion

Nous avons essayé en quelques pages, et sans trop entrer dans les détails techniques, de donner au lecteur un aperçu des raisons qui font que les propriétés du rayonnement laser ont été déterminantes dans le développement des communications optiques par fibre. Les percées scientifiques qui ont permis ce développement sont si nombreuses qu'il serait illusoire de vouloir les dénombrer sans en oublier. Hormis les lasers, elles concernent notamment le guidage de la lumière, le traitement optique de l'information, l'amplification optique à l'aide de terres rares, les technologies de détection, l'électronique rapide, le traitement du signal, les algorithmes de correction d'erreur, les protocoles de codage, etc. Les télécommunications optiques ont constitué, et constituent encore, un prodigieux terrain de jeux pour des techniciens, ingénieurs et chercheurs d'horizons divers. Certaines de ces percées scientifiques ont été décisives. L'invention du laser en fait partie. ■

Pour en savoir plus

- I. Joindot et M. Joindot, *Les Télécommunications par Fibres Optiques*, Dunod, Paris (1996).
- G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3^e édition, Wiley, New York (2002).
- G. P. Agrawal, *Lightwave Technology*, Wiley, New York (2005).
- E. Rosencher et B. Vinter, *Optoélectronique*, 2^e édition, Dunod, Paris (2002).
- G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2^e édition, Springer, Berlin (1993).
- E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, Wiley, New-York (2002).

(1) Le chemin optique entre deux points A et B est défini comme la distance AB parcourue par un rayon lumineux multipliée par l'indice de réfraction que le rayon a rencontré lors de son trajet.