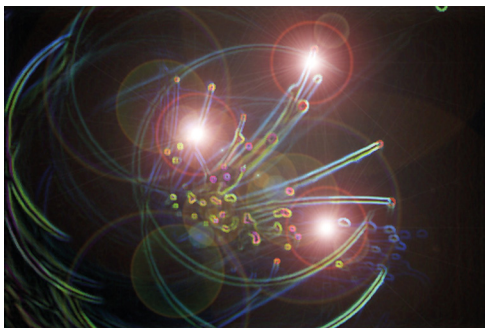
L'AMPLIFICATION PAR FIBRE OPTIQUE DOPÉE À L'ERBIUM : LA CLÉ DU MONDE DE L'INTERNET

Emmanuel DESURVIRE*

Thales Research & Technology (retraité), 1 Av. Augustin Fresnel, 91120 Palaiseau, France
***emmanuel.desurvire@orange.fr**



https://doi.org/10.1051/photon/202513552

L'amplificateur à fibre dopée à l'erbium a non seulement révolutionné les télécommunications mais également rendu possible l'Internet dans son caractère d'ubiquité ou présence globale. L'explication vient de ce que désormais, les données numériques sont transportées à l'autre bout du monde sous forme de signaux optiques, sans traitement électronique sur leur parcours pour limiter le débit, et sans perte de puissance non plus, grâce à cette amplification optique.

Après l'invention du laser dans les années 1960, les télécommunications optiques naquirent dans les années 70 grâce aux premières fibres de verre de la société *Corning Glass* : 99% du signal lumineux était absorbé au bout de 1 km de fibre, mais le 1% restant suffisait pour être électroniquement « répété » ; à la fin des années 80, grâce à la purification ultime du verre de silice, la même performance était obtenue pour 100 km: les premiers câbles sous-marins FO furent déployés dans l'Atlantique et le Pacifique, transportant l'information à 622 Megabit/s, un débit limité par l'électronique des répéteurs.

Autour de l'an 2000, la demande de l'échange des « data » entre banques et services l'emporta sur la téléphonie, et il fallait bien trouver une solution ; mais les répéteurs électroniques étaient encore limités au Gigabit/s. Alors resurgit une ancienne idée : régénérer les signaux lumineux directement dans le cœur de la fibre, en jouant sur l'effet LASER, autrement dit : l'effet d'*émission stimulée* d'Einstein, où chaque photon se dédouble, et ainsi de suite par avalanche.

Dans cet article, nous verrons comment le dopage de la fibre par l'ion erbium (une terre-rare) permet d'amplifier, non pas un mais plusieurs signaux optiques simultanément, cette découverte ayant rendu possible l'internet, en termes de portée globale et de débits virtuellement illimités, cela sous l'angle de mon parcours personnel.

L'effet Raman pour l'amplification dans les fibres optiques

En 1980, je commençais ma thèse au *Laboratoire Central de Recherches de Thomson-CSF, Corbeville* (Palaiseau). Le sujet était très exploratoire : étudier l'amplification de signal par « *diffusion Raman stimulée* » dans les fibres optiques (FO), avec l'idée d'une application aux télécoms optiques à λ=1,3 µm. À cette époque, *R.H. Stolen des Bell Labs* (BL) venait de découvrir les *non-linéarités* des FO (*i.e. Raman, Brillouin, Kerr, automodulation de phase*), autant d'effets dits « exotiques » sans application immédiate en vue.

La chance me fut donnée de pouvoir effectuer un « *post-doc* » au laboratoire *Ginzton* de l'U. de Stanford

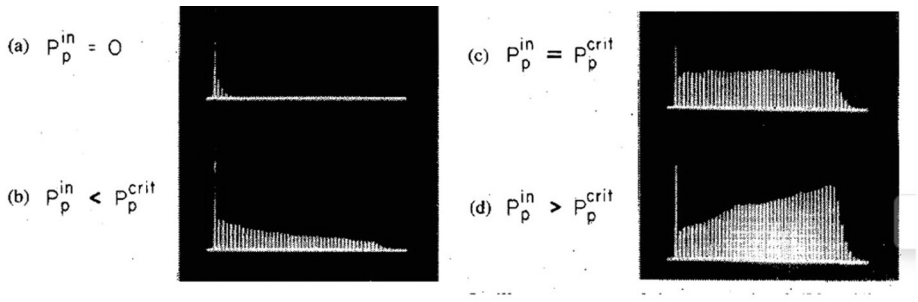


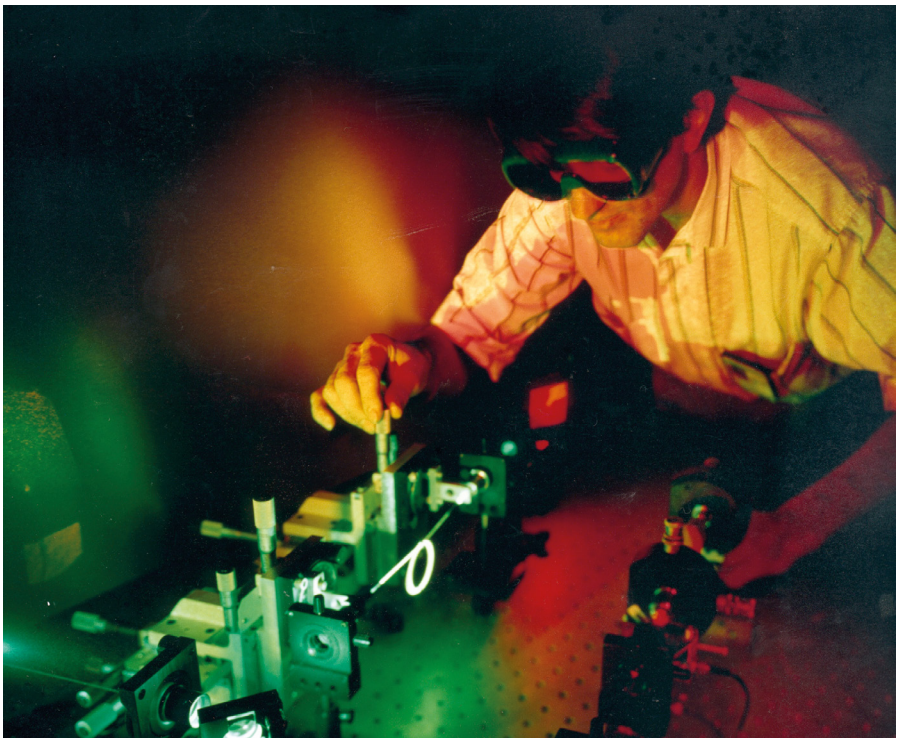
Figure 1. Ligne à retard recirculante à fibre optique amplifiée Raman. Signal de sortie (a) en l'absence de pompage Raman (puissance de pompe et amplification nulle), le signal décroit exponentiellement avec le nombre de recirculations, à cause de l'atténuation T de la fibre ; (b) Puissance pompe sous-critique, le signal recircule plus longtemps, grâce au gain Raman G<T ; (c) À la puissance pompe critique, les pertes sont exactement compensées par le gain Raman G=T, le signal recircule à puissance constante, jusqu'à l'extinction de la pompe ; (d) Au-dessus de la puissance critique, la puissance signal augmente du fait que G>T.

(Californie). Il y avait un intérêt notamment pour les lignes à retard RF pour antennes à réseau de phase — donc les lignes à retard optiques. Mon projet fut de réaliser une boucle à FO dite « recirculante » ; où, grâce à l'amplification par effet Raman stimulé, une impulsion nanoseconde pouvait ainsi « recirculer » un certain nombre de fois sans atténuation, jusqu'à se perdre dans le bruit d'amplification ; soit ici, 800 circulations de près d'un kilomètre, *cf.* Figure 1 [1]. Cette première intéressa vivement *L.F. Mollenauer* (BL) pour l'étude de la propagation des *solitons* picosecondes dans les FO sur des distances transocéaniques (10.000 km). Pour ce dernier, solitons et amplification Raman distribuée le long de la fibre devaient être la seule solution d'avenir pour les transmissions optiques haut-débit…

La fibre dopée erbium contre l'amplification par diode à semiconducteur

En 1986, je rejoignais *AT&T Bell Labs* à *Crawford Hill* (New Jersey). On s'y intéressait notamment aux LAN (réseaux d'accès local) optiques. Ici, le problème n'était pas l'atténuation du signal, mais sa duplication en 1:N, limitant le réseau à peu d'utilisateurs (N=10-100) ; si l 'amplification Raman pouvait lever cet obstacle (*e.g.* N=1000), le projet ne vit jamais le jour ; car cette même année, *D.N. Payne* de l'U. de *Southampton* (*Royaume-Uni*) réactiva le domaine des FO dopées aux *terres-rares* ; l'élément *erbium* (Er) présentant une bande de fluorescence autour de λ=1,55 µm (minimum des pertes de la fibre optique), il existait un certain potentiel d'amplificateur optique à usage télécom (*cf.* Encadré)
Pour les BL, l'idée n'était pas nouvelle : dans les années 70, on y avait déjà exploré les lasers à fibre dopée au *néodyme* (Nd), émettant à λ=1,06 µm, comme sources pour les télécom (les premières diodes laser mirent rapidement fin à ce projet). De son côté, *E. Snitzer*, l'inventeur des lasers terres-rares — Nd et Er, avait démontré le premier amplificateur à fibre optique dopée Nd, pompé par lampe-flash à 1 kHz : une réalisation pionnière, mais sans utilité pratique. L'initiative de Southampton fut plutôt fraichement accueillie par les experts de BL, au moins pour une très ● ● ●

Figure 2. L'auteur dans son laboratoire aux Bell Labs. La lumière verte diffuse est issue du laser de pompe Argon-ion à 514 nm ; le signal d'entrée, d'une diode laser émettant à 1 ,55 µm (à droite, un laser He-Ne rouge utilisé pour visualiser le faisceau). Pompe et signal sont couplés par un miroir dichroïque (en bas à gauche). On observe au centre la fibre dopée erbium (ici 1 m de longueur).



bonne raison : à *Murray Hill* (MH) on s'activait déjà sur *l'amplificateur à semiconducteur* (SOA), compact et activable directement par courant électrique. Mon responsable, *I. Kaminow*, accepta de bonne grâce que je me lance sur le sujet, à condition de ne pas m'y égarer (!). À MH, le laboratoire de J.B. MacChesney (inventeur de la MCVD, processus de fabrication des FO) avait tout le savoir-faire des fibres dopées terres-rares : en peu de temps et sans formalités, je disposais d'un premier échantillon de fibre dopée erbium (EDF).

Il se trouvait ainsi deux équipes concurrentes pour explorer le sujet des EDFA (A pour amplificateur). Pour le pompage optique de la fibre, Southampton utilisait alors un laser à colorant pompé lui-même par un laser krypton émettant dans le rouge ; de mon côté un laser argon-ion de récupération, émettant dans le vert, *cf.* Figure 2. On imagine les sarcasmes des spécialistes télécoms de MH devant ce qui ressemblait à de la physique amusante plutôt qu'une solution d'avenir. En somme, les équipes rivales de SU et de BL se trouvaient unies dans un même combat contre le scepticisme : une forme de *coopétition* dans la compétition. Je bénéficiais néanmoins du soutien d'Ivan K., certes un peu tiède (je cite) : « *je ne suis pas convaincu [de l'amplification erbium] mais ne le suis pas non plus du SOA.*» Si nous partagions au moins une conviction, c'était que la vieille technologie éprouvée, à savoir celle des *répéteurs électroniques*, représentait un goulot d'étranglement pour la montée en débit : tôt ou tard, une solution de « *répéteur optique* » devait nécessairement s'imposer. Mais laquelle ?...

Pour son malheur, le SOA présentait au moins deux inconvénients majeurs : la sensibilité du gain à la polarisation du signal d'entrée (les FO télécom ne maintenant pas la polarisation), et les pertes de couplage fibre/SOA/fibre (celles d'entrée impactant le rapport signal-à-bruit) ; accessoirement, la difficulté de réaliser le « *packaging* » industriel de ce composant hybride (problème certes largement résolu aujourd'hui par la *Photonique intégrée Silicium*). Un troisième défaut du SOA était la dynamique nanoseconde (GHz) du gain, causant une intermodulation désastreuse entre signaux simultanément amplifiés.

Côté EDFA, le défaut majeur était le manque de solution pratique pour le pompage ; il y avait certes la bande

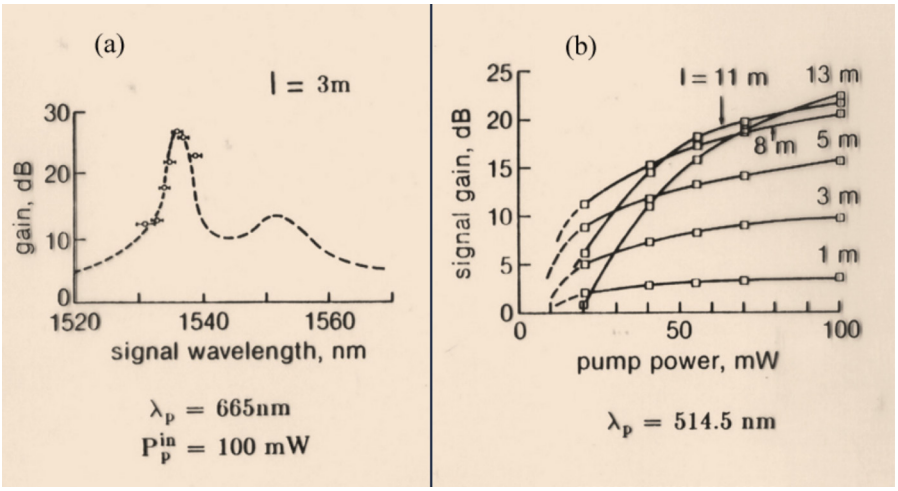
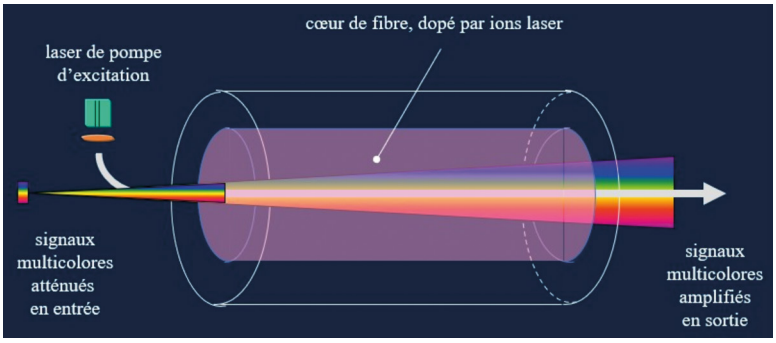


Figure 3. Mesures expérimentales du gain EDFA présentées dans les deux articles fondateurs : (a) L'U. de Southampton pour le spectre du gain (en pointillé l'émission spontanée amplifiée) obtenu avec une fibre dopée de l=3 m (100 mW de pompe à 665 nm), et (b) Bell Labs pour la dépendance du gain en puissance de pompe (0-100 mW à 514,5 nm) pour différentes longueurs de fibre (l=1-13 m).

PRINCIPE DE L'AMPLIFICATION MULTICOLORE DE SIGNAUX LUMINEUX À TRAVERS UN SEGMENT DE FIBRE DOPÉE

Le dopant, ici l'ion erbium, est excité par un laser de pompe auxiliaire ; par effet d'émission stimulée, les signaux incidents à différentes longueurs d'onde se trouvent simultanément amplifiés au cours de la traversée du segment de fibre dopée, avec un facteur d'amplification *G* qui est le gain, typiquement *G*=100, ou 20 décibels. Disposé en ligne tous les 50-100 km, le dispositif agit comme un « répéteur optique multicanaux »



d'absorption de l'ion Er^{3+} à λ=810 nm, correspondant aux diodes laser de type *AsGa* (arséniure de gallium), un marché industriel alors émergeant, nous y reviendrons. En 1987, à quelques mois d'intervalle, les protagonistes de l'EDFA (SU et BL) publièrent les deux premier articles fondateurs [2][3], *cf.* Figure 3. Ils apportaient la « preuve d'existence » du concept, avec deux caractéristiques frappantes : une large bande passante de l'ordre de 30 nm, et un gain de +25 décibels (gain de 300) pour des puissances de pompe de l'ordre de 100 mW. Si la controverse s'en trouva renforcée, une partie de la communauté télécom, aussi alertée que curieuse, se décida à se lancer dans l'aventure, notamment à *British Telecom* (BT) suivis par *Nippon Telegraph & Telecom* (NTT), dont nous reparlerons. Mais outre leur savoir-faire de fabrication complexe de la fibre dopée, les premiers avaient une bonne longueur d'avance !

En quête du Saint-Graal : l'EDFA pompé par diode laser

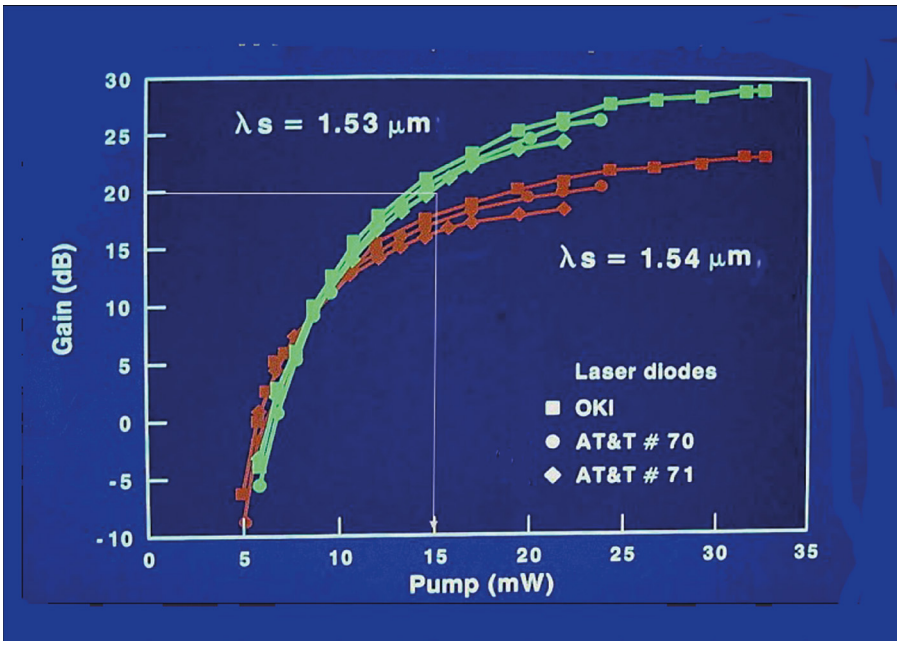
Les deux années suivantes (1988-1989) allaient apporter les réponses, aussi inattendues pour les détracteurs qu'inespérées pour les explorateurs.

D'un côté, *Elias Snitzer* démontra la possibilité de pomper l'EDFA directement dans la bande d'absorption-émission de l'ion Er^{3+}, soit à λ=1480 nm, une longueur d'onde techniquement accessible à la technologie *InGaAsP* utilisée pour les sources télécom λ=1550 nm ; mais pour un résultat extrêmement modeste (quelques décibels de gain), car ne lisait-on pas dans les manuels qu'on ne peut pas pomper un laser dans sa bande d'émission ? Et s'agissant en plus d'un laser à trois niveaux (difficiles à inverser, contrairement au cas à 4-niveaux). Ensuite, BT démontra le premier EDFA pompé par diode laser (LD), soit à base *AsGa* (λ=810 nm) : un succès sans gloire, car inefficace question rendement énergétique (dû à un effet contraire d'absorption de pompe dans l'état excité). L'équipe de SU concentra alors ses efforts sur le pompage à λ=980 nm, une autre bande ayant le potentiel de pompage par LD.

Côté BL, mon équipe incluant alors *C.R. Giles* fit une importante découverte : l'insensibilité de l'EDFA à l'intermodulation (*crosstalk*) entre signaux amplifiés. La dynamique du gain étant relativement lente (*i.e.* de l'ordre de 1 ms), les signaux à haut-débit (Gbit/s, soit 1 ns/bit) ne peuvent interférer entre eux ; ainsi, plusieurs signaux ayant des longueurs d'ondes différentes peuvent être amplifiés simultanément dans le même EDFA, sans interférer -ie. sans pénalité aucune en termes de taux d'erreur binaire), contrairement au SOA (comme vu précédemment). Cette expérience représenta la démonstration de l'amplification WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*, ou multiplexage en longueur d'onde), préfigurant la révolution WDM encore à venir. D'autre part, nous concentrâmes nos efforts sur le pompage à λ=1480 nm, pour une raison très simple : les diodes correspondantes (InGaAsP) n'allaient pas tarder à arriver sur le marché, une fois l'EDFA ayant fait ses preuves ; nous avions la chance d'avoir à disposition un laser à centre coloré (pompé par laser YAG :Nd), accordable autour de cette longueur d'onde — un dispositif de loin pire que celui de SU (*i.e.* laser à saphir de titane pompé par laser krypton). Notre avantage sur la concurrence était aussi celui de la modélisation ; aussi nous avons pu optimiser les performances de l'EDFA, jusqu'à à la limite théorique, et identique en touts point à ce que le pompage par LD pourra obtenir peu après, *cf.* Figure 4.

Enfin, l'étude et la caractérisation du bruit (émission spontanée amplifiée) permit de déterminer que l'EDFA pompé à 980 nm de SU atteint la limite quantique en termes de « *facteur de bruit* », alors que ● ● ●

Figure 4. Gain EDFA obtenu aux deux longueurs d'onde signal [1,53 (vert) et 1,54 µm (rouge)] par pompage laser-diode à 1,48 µm (fabrication OKI et AT&T) ; on observe qu'une puissance de pompe LD de 15-20 mW suffit à générer un gain de 20 dB, soit pour compenser exactement l'atténuation de 100 km de fibre optique.



son concurrent BL se trouve moins performant (à hauteur d'un décibel, soit 20%) — un détail, mais qui aura son importance pour l'évolution des futures liaisons transocéaniques amplifiées. Il fallait encore développer des LD à base GaAs émettant à 980 nm, ce qui prit plusieurs années, alors que les LD à 1480 nm étaient immédiatement accessibles pour la technologie.

Le tsunami de Kobe

Au tout début de 1989, l'équipe de *M. Nakazawa* à NTT fit sensation en publiant le premier article [4] sur un EDFA pompé par LD à 1480nm : question performance, efficacité et compacité potentielle, c'était le prototype presque parfait de l'objet recherché. Soit !... se disaient encore les esprits chagrins, les managers sceptiques, et les inconditionnels du SOA. C'était sans compter sur la conférence IOOC'89 qui se tint peu après à Kobe (Japon). Les équipes japonaises, soit NTT et aussi KDD (autre opérateur télécom, également câblier sous-marin) frappèrent très fort les esprits avec la démonstration des premières *liaisons optiques amplifiées par EDFA pompés LD*, pulvérisant en même temps, et de loin, les précédents records de débit-distance (*e.g.* 1,2 Gbit/s sur 270 km, 12 Gbit/s sur 200 km).

L'EDFA avait remporté la bataille, par sa vague puissante, le *tsunami* de Kobe avait en quelques jours retourné les consciences de tous les spécialistes et décideurs du monde des télécoms. Depuis l'invention du laser et de la fibre optique, lesquelles avaient pris des décennies à se développer, personne n'avait vu quelque chose d'aussi étonnant, à la fois si simple conceptuellement, si prometteur techniquement, et immédiatement à portée d'exploitation.

En soi, cette percée phénoménale n'aurait pu avoir qu'un intérêt innovatif, à mettre de côté pour l'avenir ; mais elle arrivait exactement au rendez-vous de l'Histoire. En effet, la montée irrésistible du trafic de données, les « data » (télex, banque, finance, réservations et communications aériennes...) prenant le dessus de la « voix » (téléphonie), exerçait alors une pression croissante sur les réseaux transocéaniques — principaux vecteurs des échanges intercontinentaux, loin devant le satellite. Tôt ou tard, l'ancienne technologie des répéteurs électroniques n'allait plus suivre — et quand bien même, le progrès serait incrémental, face à une demande présumée exponentielle ; à noter qu'à ce stade, l'*internet* n'était encore qu'une curiosité à l'usage des chercheurs du CERN.

L'année précédente (1988), l'opérateur-câblier AT&T avait à peine déployé, à travers l'Atlantique et le Pacifique, les tout premiers câbles à fibres optiques (à répéteurs électroniques) nommés *TAT-8* et *TPC-5*, avec pour chacun une capacité de 2 paires opérant à 622 Mbit/s — soit celle d'une « box » internet d'aujourd'hui !... Suite à l'évènement de Kobe, il fallut cinq années d'un développement au pas de course pour mettre en place la toute première liaison à base de *répéteurs optiques* (Figure 5), avec un débit par fibre de la classe 2,5 Gbit/s ; puis le passage au WDM avec 10 Gbit/s par canal se fit tout aussi rapidement. L'aventure du déploiement des réseaux optiques sous-marins est décrite en réf. [5] ; pour plus de détails techniques, confer [6].

Aujourd'hui, les systèmes transocéaniques ont atteint une capacité de plus de *100 Terabit/s* [1 Tera (10^{12}) = 1000 Giga], et le trafic internet global (téléphonie mobile incluse) s'élève annuellement à plusieurs milliers de *Zeta-bytes* [1 Zeta (10^{21}) = 10^3 Exa ou 10^6 Peta ou 10^9 Tera ou 10^{12} Giga, et 1 byte = 8 bits], une masse phénoménale de données dont 99,8% passe par la fibre optique amplifiée EDFA. Pour la découverte et l'invention de l'EDFA, en 2008 D. Payne, R. Giles et l'auteur ont été nommés lauréats du *Millennium Technology Prize* de Finlande, *cf.* Figure 6.

Figure 5. Répéteur optique monté sur câble transocéanique mis à la mer ; à gauche, l'arrière du navire-câblier, le câble se déroulant vers la droite ; le répéteur contient typiquement 12 fibres (six paires bidirectionnelles) soit 12 EDFA ; les répéteurs des liaisons transocéaniques sont espacés de 50 km, pour des distances allant jusqu'à 12.000 kilomètres (Crédit : *Alcatel Submarine Networks*)

Figure 6. RLes lauréats du Millennium Technology Prize, 2008 (de g. à dr. : E. Desurvire, C.R. Giles et Sir D. N. Payne)

Conclusion

Depuis l'invention du télégraphe, qui reliait déjà les continents au XIX[e] siècle par câbles analogiques en codage Morse, les télécommunications globales ont connu un progrès aussi régulier qu'incrémental, suivant le cours des technologies émergentes. Avec les premières fibres à faibles pertes des années 1970, les télécommunications suivirent le chemin de l'optique, d'abord à l'échelle locale, puis mondiale dès la fin des années 80. Mais il y avait un chaînon manquant : un répéteur (*i.e.* amplificateur en ligne) capable d'assurer, comme la fibre, la transmission de débits virtuellement illimités, ceci pour faire face à la demande exponentielle des data. En l'espace de deux ans seulement, l'EDFA s'est imposé pour remplacer le répéteur électronique, non sans avoir été initialement contesté – comme il se devait en tant que rupture technologique radicale. Et avec l'émergence de l'Internet, autour de l'an 2000, l'EDFA se fondit dans la « transparence » du réseau global et de sa capacité ubiquitaire comme virtuellement illimitée. Il n'était nullement dans les prérogatives de l'*U. de Southampton* de révolutionner les télécoms, ni de *Crawford Hill*, à *AT&T Bell Labs*, de détrôner l'amplification par SOA ; mais la physique elle-même aura tranché la question, malgré les obstacles technologiques considérables que l'on pouvait reprocher à l'idée de l'EDFA. Celui-ci aura même supplanté l'amplificateur *Raman*, pour lequel il était aussi juste de douter. Cet épisode historique n'est pas sans rappeler la fameuse image de la Caverne de Platon ; il faut que des chercheurs osent s'aventurer *au-dehors*, à la lumière du monde des Idées, plutôt que de se contenter des ombres. Notre époque est celle où les décideurs ne peuvent plus se permettre de douter du chercheur, ni de manquer « *l'Idée du temps* », en contraignant trop strictement son imagination fertile.

RÉFÉRENCES

[1] E. Desurvire, M.J.F. Digonnet, H.J. Shaw, J. Lightwave Technol., **LT-4, n°4**, 426 (1986)

[2] R.J. Mears, L. Reekie, N. Jauncey, D.N. Payne, Electron. Lett. **23**, 1026 (1987)

[3] E. Desurvire, J.R. Simpson, P. Becker, Optics Lett. **12**, 888 (1987)

[4] M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, Appl. Phys. Lett. **54**, 295 (1989)

[5] E. Desurvire et J. Chesnoy, LA RECHERCHE **297**, 64 (1997)

[6] E. Desurvire, SubTelForum, https://issuu.com/subtelforum/docs/subtel_forum_issue_88

AdValue Technology

par OPTON LASER INTERNATIONAL

AMPLIFICATEURS À FIBRE (CW, PULSÉS)

SOLUTION D'AMPLIFICATION CONÇUE SUR MESURE

- Régime continu ou pulsé
- $M^2 < 1,2$
- Amplification d'impulsions ns, ps et fs
- Puissance de sortie >120 W à 1 µm
- Également disponible pour 1,5 µm et 2 µm
- Format compact et robuste
- Refroidissement par conduction (pas de circuit d'eau interne ou externe)

Envoyez-nous vos spécifications d'entrée et de sortie à :

contact@optonlaser.com

www.optonlaser.com