



# L'optique dans les réseaux cœur : de l'avènement du WDM à aujourd'hui.

**En trois décennies, la fibre optique a apporté une révolution dans les réseaux de télécommunications. Cet article fait le point sur les évolutions techniques survenues au cours de cette période et les derniers résultats de la recherche ainsi que leur impact sur les produits industriels.**

## **Michel Joindot**

Institut Foton  
UMR CNRS 6082  
F-22305 Lannion

### **Introduction**

La fibre s'est imposée depuis une vingtaine d'années dans les réseaux de télécommunications par sa capacité à acheminer des débits qui n'ont plus rien à voir avec ce qu'ils étaient avant

l'arrivée de l'optique. Cet article se propose de retracer les différentes étapes qui ont jalonné cette histoire depuis l'apparition du multiplexage en longueur d'onde en 1995 et de montrer les innovations techniques qui sont apparues depuis cette date. Nous verrons qu'une rupture essentielle a été l'introduction dans les systèmes optiques des réseaux cœur, de techniques de traitement de communications numériques et de traitement du signal utilisées jusque-là en radio et désormais accessibles aux débits de l'optique grâce aux progrès de l'électronique. L'ambition de cet article est de donner les grandes tendances, sans aborder chacun des thèmes de manière approfondie.

## L'avènement du multiplexage en longueur d'onde (WDM)

### La situation au début des années 90

Les premiers systèmes de télécommunications utilisant la fibre optique sont apparus dans les réseaux au début des années 80. Au début des années 1990, des systèmes permettant la transmission de 2,5 Gbit/s à la longueur d'onde de 1550 nm, avec un espacement entre répéteurs typique de 100 km, étaient industriellement disponibles. Il apparaissait alors que l'optique surpassait en termes de capacité, de qualité comme de coûts d'exploitation les techniques utilisées jusque-là, qu'il s'agisse du câble coaxial ou des faisceaux hertziens [1]. Dans tous les pays allaient alors se construire des réseaux cœur fondés sur ces systèmes : en France le Réseau à Longue Distance (RLD) reliant par des artères optiques les grands pôles du réseau national était achevé vers 1993.

### Le multiplexage en longueur d'onde

Au début des années 1990 apparaît également un produit qui va apporter une révolution dans le monde des transmissions optiques, l'amplificateur optique à fibre dopée. En permettant l'amplification du signal pour compenser les pertes subies par lui lors de sa propagation dans la fibre, il ouvrait la voie à des systèmes dits « amplifiés » où le répéteur-régénérateur est remplacé par un amplificateur à fibre dopée. Or ce dernier est capable d'amplifier des signaux sur une très large bande, typiquement pour les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA *Erbium Doped Fibre Amplifier*), la bande C allant de 1530 à 1565 nm, et correspondant à une largeur spectrale de 4,4 THz environ. L'idée est alors venue d'exploiter efficacement la ressource spectrale en amplifiant non pas un seul signal, mais un multiplex optique constitué de canaux juxtaposés. C'est l'apparition de la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM *Wavelength Division Multiplexing*) : dès 1995, les premiers systèmes WDM transportant 4 canaux à 2,5 Gbit/s sont déployés dans les réseaux.

La technique WDM apporte en même temps la possibilité d'augmenter la capacité du réseau sans changer les infrastructures et une réduction des investissements parce que le coût de l'amplificateur est partagé entre les canaux alors qu'il fallait un répéteur-régénérateur pour chacun d'entre eux. Très vite le débit passera à 10 Gbit/s par canal et, au début des années 2000, des systèmes WDM transportant 160 Gbit/s sur 16 canaux sont disponibles [2][3].

La compatibilité des générations successives de systèmes avec l'infrastructure exigée par les opérateurs impose que les sites d'amplification soient toujours ceux des régénérateurs du RLD. Le maintien du pas d'amplification est rendu possible notamment

par la mise au point de la fibre compensatrice et de techniques de codage correcteur d'erreurs de plus en plus puissantes [5].

Les années 2005/2006 sont marquées par le retour de la technique cohérente qui avait été étudiée dans les années 80, mais sans suite tant en raison des difficultés de mise en œuvre industrielle que de l'arrivée de l'amplificateur optique qui avait permis un gain en sensibilité des récepteurs équivalent à celui qu'apporte la réception cohérente. Mais en 2006, l'électronique permettait de réaliser la chaîne de réception cohérente et Nortel annonçait la transmission de 40 Gbit/s sur un canal optique en utilisant la modulation de phase à quatre états (QPSK) sur deux polarisations orthogonales (PDM QPSK) [4].

Le récepteur cohérent introduit une révolution : désormais les dégradations subies par le signal lors de sa propagation dans la fibre sont compensées grâce à l'électronique et au traitement du signal, qui deviennent le cœur du récepteur, la partie optique étant réduite à la démodulation et à la conversion analogique-numérique, qui est un point difficile. La fibre compensatrice elle-même qui compensait la dispersion chromatique est éliminée au profit d'une compensation purement numérique en bout de liaison. C'est l'électronique et le traitement du signal aussi qui permettent de compenser les interférences entre polarisations orthogonales et donc d'utiliser la transmission sur deux polarisations orthogonales qui double de facto le débit transmis.

La recherche va être très active sur le sujet et vers 2015, des équipements transmettant 100 canaux espacés de 50 GHz, transportant chacun un débit de 100 Gbit/s, sont disponibles. Le débit acheminé sur une seule fibre atteint 10 Tbit/s, soit une multiplication par 4000 en 20 ans. L'opérateur voit la capacité de son réseau cœur augmentée dans des proportions énormes sans aucun nouvel investissement en pose de câbles [6].

## La limite de la capacité de la fibre optique

### Les effets non-linéaires

On pourrait penser que, pour augmenter le débit transmis sur un système WDM amplifié, il suffise d'augmenter la puissance émise, dans la limite des valeurs permises par les sources disponibles. Cette assertion est fautive, en raison des effets non-linéaires rencontrés lors de la propagation, notamment liés à l'effet Kerr, qui relie l'indice de réfraction à la densité de puissance dans la fibre. Il en résulte que, lorsque l'on augmente la puissance, le facteur de qualité (représentatif de la qualité du signal reçu) commence par augmenter, passe par un maximum, puis décroît parce que le surplus de puissance injectée est consacré à augmenter les effets non-linéaires qui dégradent le signal. Ce comportement est à l'opposé de ce qui s'observe sur un canal de transmission linéaire où l'augmentation de la puissance per-



- met d'augmenter la qualité du signal. L'existence de cette barrière liée aux effets non-linéaires qui fixe donc un débit maximal transmissible sur une fibre a conduit dans les années 2010 des équipes de recherche à se pencher sur la capacité de la fibre.

## Calcul de la capacité

En 1947, C. Shannon a montré que, sur un canal à bruit blanc gaussien additif, il existe un débit maximal  $C$  appelé capacité du canal (en bit/s) en dessous duquel il est possible d'assurer une transmission sans erreurs. La capacité dépend de la bande  $B$  et de la puissance émise  $P$  (ou de manière équivalente du rapport signal à bruit SNR) et du nombre de dimensions  $N$  de l'espace des signaux. La capacité  $C$  et le rendement spectral  $\eta$  (en bit/s/Hz) s'expriment par les relations :

$$C = \frac{N}{2} B \log_2(1 + SNR) \quad \eta = \frac{N}{2} \log_2(1 + SNR)$$

Dans le cas d'un système optique amplifié, les amplificateurs successifs sont une source de bruit dit « d'émission spontanée amplifiée » qui peut être considéré comme un bruit gaussien blanc. Mais les interactions non-linéaires au cours de la propagation vont constituer une autre source de bruit dont la puissance augmente avec la puissance de sortie des amplificateurs et qui a été modélisée dans [7].

En partant de ce résultat, Essiambre et al. [8] ont revisité la théorie de Shannon et calculé la capacité en fonction de la puissance. Le résultat fondamental est que :

- lorsque la puissance est suffisamment faible pour que les effets non-linéaires soient négligeables, la capacité augmente en fonction de la puissance en suivant la loi de Shannon ;
- puis elle s'écarte de celle-ci, passe par un maximum et décroît parce que les effets non-linéaires deviennent dominants. Il est im-

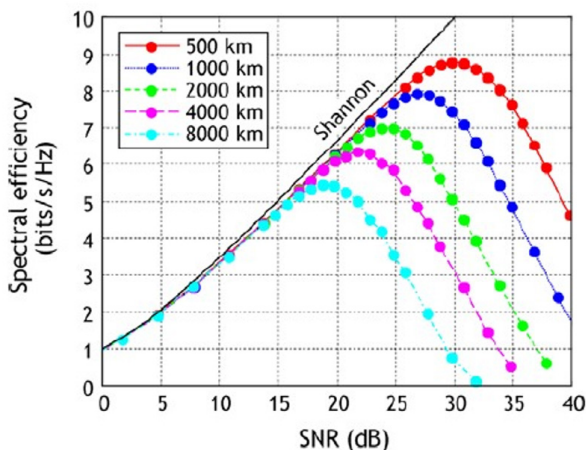


Figure 1 : Rendement spectral d'un lien optique (tiré de [8]).

portant de noter que, parce que les effets non-linéaires sur les pas d'amplification successifs se cumulent, la capacité maximale dépend de la longueur totale de la liaison.

La figure 1 représente le rendement spectral en fonction du rapport signal à bruit pour différentes distances. On voit par exemple, que pour des distances de 2000 km et 8000 km typiques des réseaux terrestres ou sous-marins, les rendements spectraux atteignables sont de 7 et 5,5 bit/s/Hz respectivement. En supposant l'utilisation de la seule bande  $C$ , les capacités correspondantes sont de 28 et 22 Tbit/s. Même si ces valeurs restent au-delà des performances des systèmes actuels, il n'en demeure pas moins que la ressource spectrale offerte par la fibre n'est pas illimitée. C'est un changement fondamental par rapport aux années 90, lorsque le débit transporté par les systèmes était tellement faible par rapport à la largeur de bande de la fibre que l'utilisation du spectre n'était pas un problème. Dès lors que la théorie de l'information montre l'existence d'une borne indépassable dont on se rapproche, les opticiens vont chercher, comme on le fait en radio, à réduire l'écart par rapport à cette limite en exploitant les outils de la théorie des communications numériques.

## Les nouvelles techniques de modulation

### Les modulations à plus de deux dimensions

Traditionnellement, les modulations utilisées en transmission cohérente sont bidimensionnelles, de type QAM, utilisant des signaux caractérisés par leur amplitude et leur phase ou de manière équivalente par leurs composantes en phase et en quadrature  $I$  et  $Q$ , et donc par leurs « constellations » dans le plan. Les performances sur le canal à bruit blanc gaussien additif sont exprimées par la probabilité d'erreur en fonction du rapport de l'énergie par bit transmis à la densité spectrale de bruit  $E_b/N_0$ . En augmentant le nombre d'états, le rendement spectral augmente, au prix d'une sensibilité au bruit également accrue. La figure 2 représente quelques constellations classiques utilisées en communications numériques.

Le recours à deux polarisations orthogonales sur chacune desquelles est transmis un signal de type QAM conduit de facto à travailler dans un espace de dimension 4. Dès lors, une voie est de chercher à optimiser la constellation dans un espace de dimension 4 (4D) plutôt que de traiter de manière indépendante les deux polarisations. La référence [12] présente une étude ex-

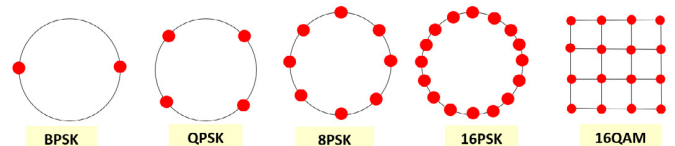


Figure 2 : Quelques exemples de constellations classiques.

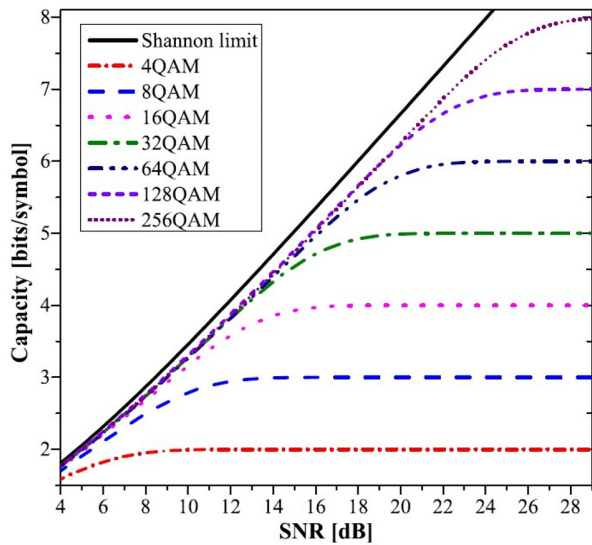


Figure 3 : Capacité d'un canal à bruit blanc gaussien pour des modulations QAM. (Figure tirée de Z. Qu et al. IEEE Access vol.7, 2019).

haustive qui montre par exemple que la modulation PS QPSK (*Polarization Shifted QPSK*) est la modulation 4D optimale sur le canal gaussien.

**La mise en forme probabiliste (Probabilistic Shaping)**

Le théorème de Shannon dit que la capacité d'un canal est atteinte pour une constellation gaussienne, ce qui n'est pas le cas des constellations utilisées en pratique où tous les symboles ont la même probabilité d'occurrence.

Les courbes de la figure 3 représentant la capacité d'un canal à bruit blanc gaussien additif pour des modulations de type QAM à distribution uniforme font apparaître un écart asymptotique de 1,53 dB par rapport à la courbe de Shannon. La mise en forme probabiliste consiste à attribuer des probabilités différentes aux différents symboles de la constellation en s'approchant au mieux de la loi gaussienne à deux dimensions de manière à regagner une partie au moins de cette pénalité : les signaux de plus forte puissance sont utilisés moins souvent que les signaux de faible puissance, ce qui présente en plus l'avantage de réduire la puissance moyenne transmise et l'incidence des effets non-linéaires. De nombreuses démonstrations ont été faites en utilisant la mise en forme probabiliste, comme on le verra dans la référence [12].

**Les modulations codées (Coded Modulation)**

La notion de modulation codée a été introduite en 1982 par G. Ungerböck [10]. Traditionnellement le codage qui protège les données à transmettre contre les erreurs de transmission en introduisant de la redondance et la modulation qui consiste à « imprimer » les données codées sur un signal physique étaient traitées comme deux fonctions bien séparées.

Dans le concept de modulation codée, au contraire, les deux opérations sont totalement liées, les données à transmettre étant associées à une constellation redondante. Par exemple pour transmettre des mots de  $m$  éléments binaires, on fera appel à une constellation redondante de  $2^{m+1}$  signaux, et c'est la redondance ainsi introduite qui apportera la protection contre les erreurs. Cette approche présente un avantage en termes de capacité du canal : comme le montre la figure 3, la capacité d'un canal obtenue en utilisant une modulation de type QAM à  $M$  signaux suit la courbe de Shannon à faible rapport signal à bruit, mais tend asymptotiquement vers  $\log_2 M$  à fort rapport signal à bruit, mettant en évidence l'idée intuitive qu'une constellation de  $M$  signaux en l'absence de bruit ne permet de transmettre que  $\log_2 M$  bit/symbole. Ainsi une modulation de type QPSK (resp. 8QAM) offre au mieux une capacité de 2 bits/symbole (resp. 3 bits/symbole) : la figure 3 montre par exemple que, pour un rapport signal à bruit de 10 dB, la capacité de la modulation QPSK est de 2bits/symbole, alors que celle de la modulation 8QAM atteint 2,8 et celle de la modulation 16QAM 3,2.

G. Ungerböck propose de partager la constellation en  $2^{p+1}$  sous-constellations de  $2^{m-p}$  signaux.

Le mot de  $m$  éléments binaires à transmettre est transformé en un mot de  $m+1$  éléments binaires formé par :

1.  $p+1$  bits, résultant du codage de  $p$  bits (dits bits codés) du mot initial qui vont déterminer la sous-constellation à utiliser ;
2.  $m-p$  bits dits non codés, identiques à ceux du mot à transmettre qui déterminent le symbole à utiliser parmi les  $2^{m-p}$  de la sous-constellation déterminée par les bits codés.

La figure 4 donne un schéma de principe du modulateur. Ungerböck a proposé un codage convolutif, d'où le nom de TCM (*Trellis Coded Modulation* ou modulation codée en treillis), mais le concept peut être appliqué à un code en blocs.

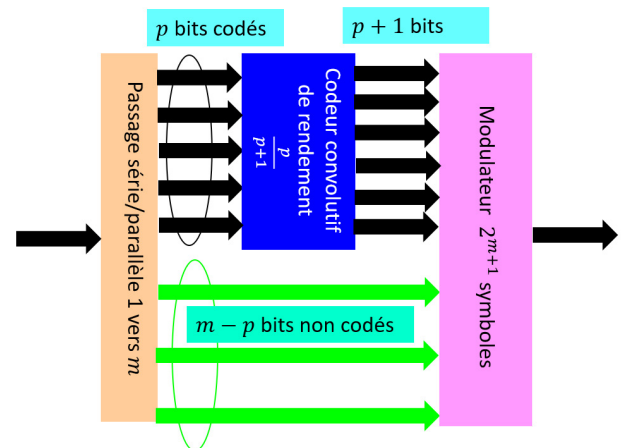


Figure 4 : Schéma de principe du modulateur dans le cas d'une modulation codée.

- C'est le fait que tous les signaux de la constellation ne sont pas utilisés qui introduit la protection contre les erreurs, de même que, dans un code binaire  $(n,k)$ , seul un sous-ensemble de  $2^k$  mots parmi les  $2^n$  mots possibles est utilisé.

Comme beaucoup d'innovations apparues dans le domaine de la radio, les modulations codées ont été étudiées dans le domaine des transmissions optiques à haut débit. Une application intéressante est la modulation de type  $2^k$ SP PDM QAM. On considère une constellation de type PDM  $2^m$ QAM, c'est-à-dire formée de signaux de type  $2^m$ QAM transmis sur deux polarisations orthogonales, au nombre de  $2^{2m}$ , dont on n'utilise qu'une sous-constellation à  $2^{2m-2k}$  signaux. Par exemple, partant de la modulation PDM 16QAM, dont la constellation compte 256 signaux, on peut n'en utiliser que 128, 64, ... ce qui correspond aux modulations dénommées 128 SP PDM 16QAM, 64 SP PDM, 16QAM...[11].

L'intérêt de cette approche est de permettre la réalisation de transpondeurs flexibles [11]: en effet, pour toutes ces modulations, l'équipement matériel reste le même, à savoir un modulateur PDM 16QAM à 8 entrées. La seule différence réside dans le fait que, pour la modulation PDM 16QAM, il est attaqué par 8 trains binaires indépendants alors que, dans le cas de la modulation  $2^{8-k}$ SP PDM 16QAM, il est attaqué par  $8-k$  trains binaires indépendants, tandis que les  $k$  entrées restantes sont obtenues par une opération logique sur les entrées indépendantes. On peut donc ainsi réaliser un transpondeur à débit variable sans changer sa structure matérielle. Par ailleurs, la modulation codée offre un avantage en termes de granularité : dans le cas considéré, elle permet de réaliser des modulations

à 5, 6 ou 7 bits/symbole, intermédiaires entre la modulation PDM QPSK (16 signaux, 4 bits/symboles) et la modulation PDM 16QAM (256 signaux, 8 bit/symbole).

La figure 5 représente le schéma de principe d'un transpondeur à débit variable : il suffit de changer les opérations logiques sur les éléments binaires en entrées pour adapter le débit.

### Synthèse sur l'évolution des systèmes terrestres

Depuis l'apparition des premiers systèmes WDM en 1995, le débit transmis sur une fibre a rapidement augmenté en jouant sur deux facteurs.

- l'augmentation du nombre de canaux : séparés de 8 nm en longueur d'onde (1 THz) dans le premier système de 1995, ils ont pu être resserrés jusqu'à l'adoption d'un plan de fréquence avec un espacement de 50 GHz entre canaux ;
- l'augmentation du débit par canal : au départ de 2,5 Gbit/s, il est rapidement passé à 10 Gbit/s dès la fin des années 90.

La distance entre canaux est évidemment liée à la largeur spectrale des signaux transmis dans chacun d'eux. En utilisant des modulations à plus de deux états, il est possible de réduire la largeur spectrale à débit donné ou, de manière équivalente, d'augmenter le débit par canal sans changer le plan de fréquence. La contrepartie est l'exigence d'un rapport signal à bruit plus élevé. C'est cette évolution qu'a permis la réception cohérente.

Son retour en 2005 a ouvert la voie à des transpondeurs à 40 Gbit/s utilisant la modulation PDM QPSK. A partir de là, la capacité disponible dans les produits industriels va croître rapidement avec l'apparition de techniques de modulation de plus en plus élaborées que nous avons évoquées :

- 2012-2015 : modulation PDM 16QAM offrant des débits entre 50 et 200 Gbit/s ;
- 2016-2019 : PDM 32QAM offrant des débits entre 100 et 400 Gbit/s ;
- 2020 et au-delà : PDM 64QAM, introduction de la mise en forme probabiliste permettant d'accéder à des débits même au-delà de 400 Gbit/s.

Il ne faut pas oublier que le débit possible et la portée sont liés et que les performances seront différentes selon que l'on considère le réseau métropolitain ou le réseau cœur : en effet, la puissance de bruit en fin de liaison est proportionnelle au nombre d'amplificateurs (lui-même proportionnel à

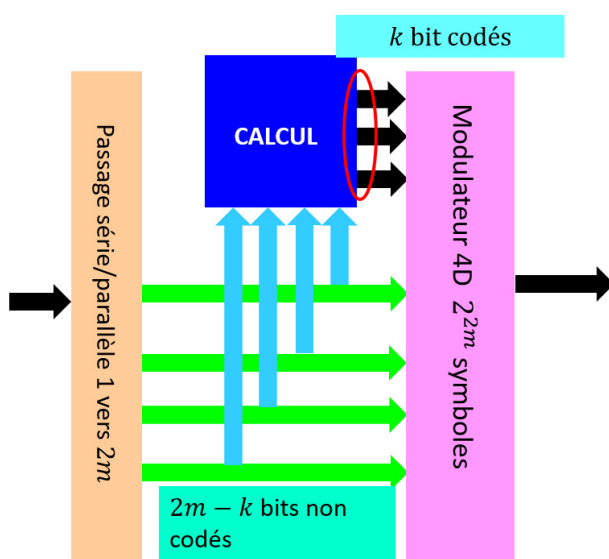


Figure 5 : Schéma de principe d'un transpondeur à débit variable utilisant une modulation codée de type SP PDM QAM.

la distance). Nokia propose ainsi pour le réseau terrestre un transpondeur offrant des débits de 100, 200 (en réseau cœur ou régional) ou 400 Gbit/s (en réseau régional uniquement) avec une rapidité de modulation allant de 28 à 64 Gbaud et utilisant les modulations QPSK, 8 PSK ou 16QAM.

## Le multiplexage spatial (*SDM Spatial Division Multiplexing*)

### Les fibres « faiblement multimodes » et les fibres à plusieurs cœurs

Comme nous l'avons évoqué, le débit transmis sur une fibre a constamment augmenté depuis l'apparition du multiplexage en longueur d'onde grâce à l'augmentation du nombre de canaux et du débit par canal, permis notamment par l'apparition de la technique cohérente au début des années 2000. Chaque conférence internationale sur ce thème était alors marquée par la publication par les grands acteurs du domaine (équipementiers essentiellement) des nouveaux records de capacité et de distance. Toutefois, comme nous l'avons vu, la limite de Shannon revisitée pour tenir compte des contraintes des non-linéarités, impose une limite dont on s'approchait de plus en plus.

Pour pouvoir aller plus loin, l'idée est alors apparue d'utiliser, après le multiplexage en longueur d'onde, le multiplexage spatial qui revient, pour augmenter la capacité d'un lien, à transmettre sur plusieurs fibres en parallèle. De nombreux résultats ont été publiés sur des fibres dites « multi-cœur » qui comportent plusieurs cœurs dans une même fibre. Dans l'hypothèse où aucun couplage n'existerait entre ceux-ci, la fibre est donc équivalente à autant de fibres en parallèle.

Une autre voie est le multiplexage de modes (*MDM Mode Division Multiplexing*) [13][14]. L'idée est d'utiliser une fibre « faiblement multimode », dans laquelle se propagent quelques modes. L'électromagnétisme dit que, si ces modes sont orthogonaux, il n'existe pas de couplage entre eux et la fibre est là encore équivalente à autant de lignes de transmission en parallèle. Bien entendu cette situation idéale n'existe pas et des transferts d'énergie existent entre les modes ou les cœurs ; le recours à des structures de type MIMO bien connues dans le domaine de la radio pourrait apporter une solution. L'effort de recherche important sur le sujet a conduit à de très belles réalisations de laboratoire, mais aucun système de transmission n'a été développé selon ces principes, sans doute en raison des difficultés de réalisation industrielle, en premier lieu celle d'amplificateurs pour de telles fibres qui auraient permis d'amplifier le signal sans devoir démultiplexer puis remultiplexer les différents signaux. Dans un réseau terrestre, le recours à une autre fibre avec un autre système lorsqu'un lien est saturé apparaît comme une solution beaucoup plus simple.

Le multiplexage spatial va cependant réapparaître à la fin des années 2010 dans le domaine de la transmission sous-marine et permettre des progrès spectaculaires en termes de capacité.

### Principe de base

L'idée du multiplexage spatial est de partager l'information à transmettre entre différentes fibres. En soi cette idée peut paraître banale puisqu'il est évident qu'en mettant côte à côte  $N$  fibres transportant le même débit, celui-ci sera multiplié par  $N$ . On pourrait donc ainsi augmenter sans limite la capacité, mais au prix d'une augmentation corrélative de la puissance consommée. Or dans un système optique sous-marin, la puissance électrique consommée qui est au premier ordre proportionnelle à la puissance optique délivrée par les amplificateurs, est limitée : les répéteurs sont en effet alimentés depuis les deux extrémités du câble et la puissance injectée dans le câble ne peut pas dépasser certaines limites.

En revanche, il est possible de montrer [15] qu'il existe, pour une puissance totale fixée, un nombre optimal de fibres dans le câble qui maximise la capacité transportée. En d'autres termes, l'objectif est de maximiser l'efficacité énergétique du système définie comme le rapport de la capacité  $C$  en bit/s à la puissance totale utilisée  $P_{tot}$

Soient  $N_{amp}$  le nombre d'amplificateurs le long de la liaison,  $N_{dim}$  le nombre de dimensions spatiales (c'est-à-dire le nombre de fibres). La puissance délivrée en sortie de chacun des amplificateurs dans chacune des fibres est :

$$P_a = \frac{P_{tot}}{N_{amp} N_{dim}}$$

Le théorème de Shannon nous dit que la capacité atteinte est la somme des capacités de chacune des fibres, soit :

$$C = 2N_{dim}B \log_2(1 + SNR) \quad SNR = \frac{P_s}{N} = \frac{P_a - P_{esa}}{N} \Rightarrow P_a = P_{esa}(1 + SNR)$$

Où  $B$  est la bande de l'amplificateur,  $P_s$  est la puissance de signal délivrée par un amplificateur optique dans une fibre et  $P_{esa}$  la puissance de bruit d'émission spontanée amplifiée supposée identique dans chacun des amplificateurs (ceux-ci compensent les pertes des différents pas et sont supposés régulièrement espacés). Compte tenu de ce que, dans une liaison sous-marine, les amplificateurs travaillent à puissance de sortie constante, on a fait l'hypothèse que  $P_a = P_s + P_{esa}$ . En utilisant la relation de Shannon écrite plus haut qui suppose que la modulation utilisée est elle-même à quatre dimensions, de type PDM QAM.



●●● D'où l'expression de l'efficacité énergétique introduite plus haut :

$$\frac{C}{P_{tot}} = \frac{2N_{dim}B \log_2(1+SNR)}{N_{amp}N_{dim}P_{esa}(1+SNR)} = \frac{B}{N_{amp}P_{esa}} \times \frac{2\log_2(1+SNR)}{(1+SNR)} \quad (1)$$

Les caractéristiques du système (bande des amplificateurs, espacement des répéteurs, nombre d'amplificateurs) étant fixées, l'efficacité énergétique atteint une valeur maximale pour  $SNR=e-1$ . Ceci correspond, en appliquant la formule de Shannon, à un nombre de bits/symbole égal à  $2\log_2 e$ , soit 2,89.

Il est alors possible de trouver le nombre de dimensions spatiales optimal. Lorsque la quantité SNR est optimale, on a :

$$SNR = \frac{P_a}{P_{esa}} - 1 = e - 1 \Rightarrow \frac{P_a}{P_{esa}} = \frac{P_{tot}}{N_{amp}N_{dim}P_{esa}} = e \quad (2)$$

D'où

$$N_{dim} = \frac{P_{tot}}{eN_{amp}P_{esa}} = \frac{P_{tot}}{eN_{amp}^2(FG-1)} = \frac{P_{tot}}{eN_{amp}^2(Fe^{\alpha l}-1)} \quad (3)$$

Où  $F$  est le facteur de bruit des amplificateurs et  $G$  leur gain égal aux pertes du pas d'amplification soit  $e^{\alpha l}$  où  $\alpha$  est le facteur de transmission de la fibre et  $l$  la longueur du pas d'amplification. Ce modèle peut être amélioré en prenant en compte la diminution de la puissance de signal utile le long de la liaison en raison de l'accumulation du bruit des amplificateurs successifs (« *signal droop* ») [15]. Nous ne développerons pas cet aspect, l'idée fondamentale étant qu'il existe un nombre optimal de dimensions spatiales qui permet de maximiser la capacité, pour une puissance totale fixée.

L'équation (3) montre que la capacité est proportionnelle au nombre de dimensions spatiales et donc à la puissance

optique totale utilisée. En première approximation, il est légitime de considérer que la puissance optique en sortie des amplificateurs est proportionnelle à la puissance électrique consommée et le multiplexage spatial réalise donc bien une optimisation de l'efficacité énergétique. En utilisant le nombre de paires de fibres optimal, la capacité du câble croit donc proportionnellement à la puissance totale. Si l'on utilise une fibre unique sur laquelle on injecte la même puissance totale, la capacité a seulement une croissance logarithmique en fonction de la puissance totale, comme le montre la relation de Shannon. Cette explication montre pourquoi il est plus intéressant d'augmenter le nombre de dimensions spatiales plutôt que d'augmenter la puissance totale injectée sur une seule fibre.

### L'application aux transmissions sous-marines

Le multiplexage spatial a entraîné une révolution industrielle dans le domaine des télécommunications optiques sous-marines, en permettant d'atteindre des capacités bien au-delà de ce que permet la transmission sur une seule fibre. La capacité totale transmise sur une seule paire de fibres sur des distances transocéaniques est passée de 14 Tbit/s en 2008 à 71 Tbit/s en 2018, grâce à l'utilisation de modulations de plus en plus complexes que nous avons évoquées précédemment (passage de la modulation QPSK à la modulation 16QAM, puis 64QAM, mise en forme probabiliste, modulations codées), mais la progression a tendance à se ralentir dans les années 2016/2018, comme le montre la figure 6.

Des réalisations récentes utilisant le multiplexage spatial illustrent en revanche la rupture qu'il apporte :

- Le câble Dunant de Google d'une longueur de 6400 km qui relie l'Europe et les Etats Unis (entre Virginia Beach et St Hilaire-de-Riez) transporte un débit total de 250 Tbit/s sur 12 paires de fibres ;
- Le câble « Amitié » mis en œuvre par Orange et Facebook entre l'Europe et les Etats Unis et devant entrer en service en 2022, comporte 16 paires de fibres d'une capacité de 23 Tbit/s chacune.

La mise en œuvre pratique de la technique SDM n'est rendue possible techniquement et économiquement que grâce à des innovations techniques qui la rendent compétitive. On cite notamment le partage des pompes (« *pump farming* » en anglais) qui permet de partager une même pompe optique entre les différentes paires de fibre en évitant ainsi d'avoir un amplificateur optique par fibre et en partageant le coût de l'amplification entre les fibres [16].

Le câble lui-même peut être constitué de fibres séparées, mais le recours à des fibres « faiblement multimodales »

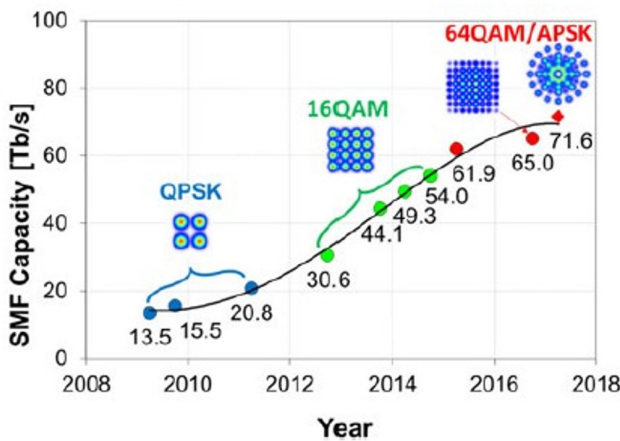


Figure 6 : Evolution de la capacité des liens sous-marins (tirée de [12]).

(FMF « *Few Multimode Fibers* ») puis à des fibres à plusieurs cœurs est une option envisageable.

## Conclusion

Nous venons de voir que l'introduction de la réception cohérente et l'application de techniques de communications numériques ont permis d'augmenter considérablement la capacité des réseaux optiques entre 2005 et 2020. Il faut noter que la fibre utilisée dans les réseaux terrestres est toujours très majoritairement la fibre standard G.652 définie avant même l'arrivée du WDM : les « fibres adaptées au WDM » proposées dans les années 2000 n'ont pas pu s'imposer et le cohérent est venu ensuite rebattre les cartes en offrant une capacité de correction des défauts absente auparavant.

Mais la contrepartie de l'augmentation du débit est l'exigence d'un rapport signal à bruit de plus en plus élevé en réception et les techniques actuelles permettent de s'approcher de la limite de capacité de la fibre : le maintien de la portée des systèmes passera, soit par une diminution des pertes des fibres, soit, dans les réseaux terrestres, par la levée de la contrainte du pas d'amplification imposée par l'histoire. Bien au-delà de la transmission proprement dite, cette question touche la structure même des réseaux. L'histoire de l'optique dans les réseaux cœur terrestres n'est pas finie, mais

## L'auteur



**Michel Joindot** (Ecole Polytechnique 1965, ENST 1970) a mené une activité de recherche au CNET (aujourd'hui Orange Labs) dans le domaine des communications numériques appliqués aux systèmes de transmission radio puis optiques. De 1983 à 1993, il a assuré la direction du DEA Signal Télécommunications Images Radar à l'Université de Rennes 1. Il a été l'un des 15 experts émérites au sein d'Orange Labs et a conduit cinq projets dans le domaine des réseaux optiques. En 2006, il a rejoint l'Institut Foton à l'Enssat, où il occupe une position de professeur émérite et contribue aux recherches dans les domaines des communications optiques et du traitement du signal.

elle ne passera plus par une augmentation permanente du débit sur des liens dont l'infrastructure reste inchangée.

Dans le domaine sous-marin, nous avons vu que s'ouvrent de nouvelles perspectives, notamment autour du multiplexage spatial qui trouvera peut-être aussi une place dans les réseaux terrestres. ■

## Références

- [1] M. Joindot, I. Joindot Les réseaux de télécommunications optiques : construction, évolution et perspectives REE 2012-1 Dossier Lasers Fibres et Télécommunications
- [2] M. Joindot S. Gosselin Optical fiber transport systems and networks: fundamentals and prospects Compte-rendus de Physique vol 9 (2008) pp914-934
- [3] M Joindot State of the art and future of WDM transmission Annales des Télécom tome 58 n°11/12 novembre/décembre 2003
- [4] C. Laperle, B. Villeneuve, Z. Zhang, D. McGhan, H. Sun, M. O'Sullivan Wavelength Division Multiplexing (WDM) and Polarization Mode Dispersion (PMD) Performance of a Coherent 40Gbit/s Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying (DP-QPSK) Transceiver OFC NFOEC 2007 PDP 16
- [5] T. Mizuoichi Recent Progress in Forward Error Correction and Its Interplay With Transmission Impairments IEEE JSTQE vol 12 n°4 juillet/août 2006
- [6] P. Winzer Beyond 100 G Ethernet IEEE Communications Magazine juillet 2010
- [7] P. Poggiolini, Y. Jiang Recent Advances in the Modeling of the Impact of Nonlinear Fiber Propagation Effects on Uncompensated Coherent Transmission Systems IEEE JLT vol 35, n°3 février 2017
- [8] R. J. Essiambre, G. Kramer, P. Winzer, G. Foschini, B. Goebel Capacity Limits of Optical Fiber Networks IEEE JLT vol.28 n°4, février 2010.
- [9] E. Agrell, M. Karlsson, Power-Efficient Modulation Formats in Coherent Transmission Systems IEEE JLT vol 27, n°22 novembre 2009
- [10] G. Ungerböck Channel Coding with Multilevel/Phase Signals IEEE Trans. on Information Theory vol. IT 28 janvier 1982
- [11] J. Renaudier et al. Comparison of Set-Partitioned Two-Polarization 16QAM Formats with PDM-QPSK and PDM-8QAM for Optical Transmission with Error-Correction Coding. ECOC 2012 papier We 1.C.5.
- [12] Jing Xing Cai et al. 70.46 Tb/s Over 7,600 km and 71.65 Tb/s Over 6,970 km Transmission in C+L Band Using Coded Modulation With Hybrid Constellation Shaping and Nonlinearity Compensation IEEE JLT vol.36 n°1 janvier 2018.
- [13] G. Rademacher et al. Long-Haul Transmission Over Few-Mode Fibers With Space-Division Multiplexing IEEE Journal of Lightwave Technology vol.36 n°6 mars 2018
- [14] R. Ryf et al. Space-Division Multiplexed Transmission over 4200-km 3-Core Microstructured Fiber OFC 2012 PDP5C2
- [15] O. V. Sinkin et al. SDM for Power-Efficient Undersea Transmission IEEE JLT vol.36 n°2 janvier 2018
- [16] P. Pecci, O. Courtois SDM a revolution for the submarine industry Submarine Telecom Forum n°106, mai 2019