

LES TECHNOLOGIES DES câbles sous-marins du 21^e siècle

José CHESNOY

Anciennement CTO d'Alcatel-Lucent-Submarine-Networks

Expert de l'écosystème des câbles sous-marins

jose.chesnoy@free.fr

Le domaine technologique des câbles sous-marins, bousculé par l'arrivée de l'optique en 1980, offre des capacités transatlantiques approchant 20 Tbit/s par fibre. Comment en est-on arrivé là et où en serons-nous demain ? Visite des principales révolutions des liaisons sous-marines en fibres optiques et tentative de projection vers l'avenir.

Révolution du débit

Les deux dernières décades du 20^e siècle ont vu une révolution complète des réseaux d'infrastructure fixes de communication avec l'introduction de la fibre optique. Grâce aux technologies optiques, la capacité par câble sous-marin a augmenté d'un facteur supérieur à 10 000 menant, en l'an 2000, à la transmission équivalente à plus de 100 millions d'appels téléphoniques simultanés à travers l'océan sur un seul câble, en sachant que la capacité de transmission sur fibre connaît sa loi de Moore comme l'électronique (*figure 1*). Et, en 2016, après une pause qui a suivi l'éclatement de la bulle Internet, la capacité sur un câble sous-marin a de nouveau augmenté de plus d'un facteur 20, conduisant à une capacité approchant 20 Tbit/s par paire de fibres optiques sur un câble transatlantique.

Dans l'infrastructure des communications internationales voix-données-images, les câbles optiques sous-marins constituent un maillage continu, dépassant désormais un million de kilomètres de câbles optiques au fond des océans (*figure 2*). Il est maintenant connu du grand public qu'ils transportent pratiquement tout le trafic Internet mondial. Leur faible coût et leur efficacité ont permis de créer à l'échelle de la planète le « village global », slogan utilisé dès 2001. Cette capacité de communication, presque illimitée et d'un coût au bit transporté

très faible, rend possible tous les développements du web, y compris l'actuel déploiement du nuage (cloud). De plus, la croissance du trafic ne se limite pas à la communication entre personnes. En effet, le trafic échangé entre les machines a maintenant dépassé la capacité échangée entre les êtres humains. Comment en est-on arrivé là ?

Quatre inventions clés

Les systèmes optiques sont basés sur quatre inventions clés : le laser, la fibre optique, l'amplification optique et la technologie de détection cohérente. Le **laser** à semi-conducteur, démontré en 1962, par Robert Hall, et la **fibre optique** imaginée en 1964, par Charles Kao pour la communication, sont deux technologies qui ont permis les déploiements de

la génération des câbles transocéaniques TAT-8 (Transatlantique) et TPC-3 (Transpacifique) mis en service dès 1988 à 280 Mbit/s par fibre dans la fenêtre 1,3 microns, suivis rapidement de TAT-9 et TPC-4 à 560 Mbit/s par fibre dans la fenêtre à 1,5 micron, derniers grands systèmes utilisant la régénération électronique immergée.

L'**amplification optique** par fibre dopée erbium, démontrée en 1987 par le français Emmanuel Desurvire dans un laboratoire d'AT&T après une formation à l'université de Southampton, remplace dans le répéteur la régénération électronique. Son succès vient de la coïncidence entre la fenêtre de l'amplification optique et la troisième fenêtre de l'atténuation minimale de la fibre de silice à 1,5 micromètre. L'amplification optique a amené avec elle le multiplexage en longueur d'onde (WDM). Dès 1995-96, elle fut installée

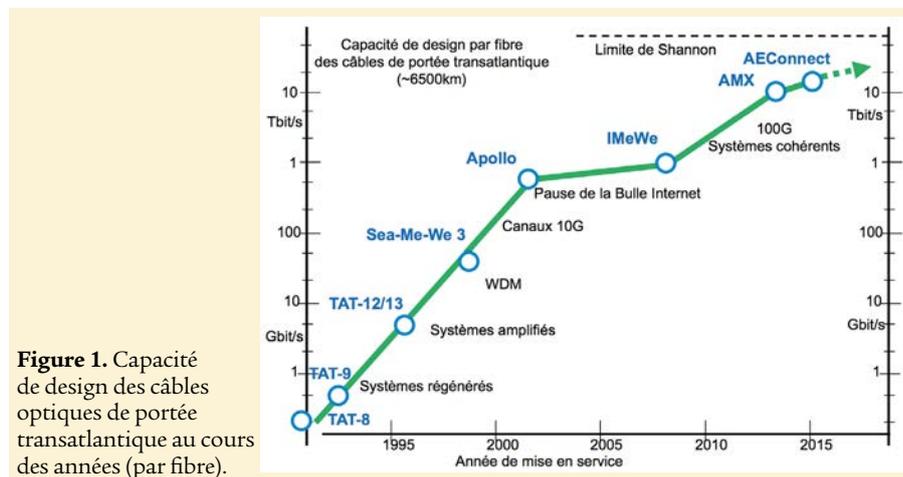


Figure 1. Capacité de design des câbles optiques de portée transatlantique au cours des années (par fibre).

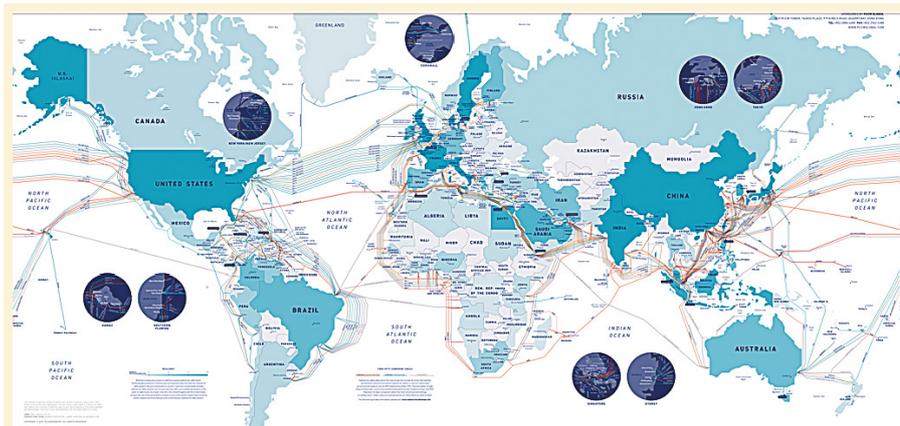


Figure 2. Carte mondiale des câbles sous-marins installés et en projet (source: Telegeography.com).

sur les câbles sous-marins TAT12-TAT13 avec le débit si particulier de 5 Gbit/s. Entre 1995 et 2001, ces trois technologies ont rapidement évolué avec un débit par canal passant de 2,5 Gbit/s (STM16) à 10 Gbit/s (STM64) et un nombre de canaux WDM croissant de 1 à 100.

La quatrième invention clé, la technologie de **détection cohérente** a été développée par Nortel, Lucent et Alcatel et démontrée en 2008 sur les réseaux terrestres. Elle fut mise en œuvre dans les terminaux sous-marins transocéaniques en 2010 pour les montées en capacité des câbles existants tel Sea-Me-We 4. Il s'en est suivi de nouveaux câbles transocéaniques à 100×100 Gbit/s soit 10 Tbit/s avec des fibres à grande dispersion positive (fibres +D ou fibres cohérentes), ainsi que l'intégration électronique massive, rendant possible la généralisation de la transmission de canaux 100 Gbit/s à tous les câbles de la génération optique amplifiée, avec des performances comparables à la transmission IM-DD à détection directe à 10 Gbit/s, ceci grâce à un circuit intégré dédié, l'ASIC ADC-DSP (*analog digital converter - digital signal processor*). L'électronique qui assure le démultiplexage de polarisation permet aussi la correction de la PMD et la compensation de dispersion chromatique. La correction d'erreur (*forward error correction - FEC*) intégrée à cet ASIC est aussi améliorée: la technologie cohérente est maintenant combinée à la décision FEC multiniveaux ou *soft decision* dans un

ADC-DSP dépassant en taille le milliard de portes, la plus grosse taille des circuits intégrés à ce jour.

Décroissance des coûts

L'introduction d'amplificateurs optiques, lancée par les transmissions sous-marines, a essaimé vers les transmissions terrestres. Récemment, la technologie cohérente a été déployée sur les réseaux terrestres puis réutilisée et améliorée sur les câbles sous-marins. La communication entre points de présence «POP to POP», en combinant des segments terrestres et sous-marins, illustre la convergence des technologies de terminaux terrestres et sous-marins. Ces progrès technologiques sont accompagnés d'une forte décroissance des coûts du bit transporté d'autant plus que les systèmes sous-marins ont profité du multiplexage en longueur d'onde sur une même fibre. Le coût a aussi chuté avec le débit par canal car lors d'une transition technologique, un transpondeur a pratiquement le même coût quel que soit le débit transporté. Ainsi, ce coût du bit transporté a décliné mécaniquement d'un facteur 2000, passant de 5 Gbit/s par canal à 100 Gbit/s! Et cette réduction n'inclut pas la miniaturisation de l'électronique qui diminue régulièrement la taille des terminaux et leur consommation avec tous leurs bénéfices opérationnels. Pour illustrer le chemin parcouru pendant les 15 dernières années, la *figure 3* présente le terminal d'une station (Apollo): les deux rangées à gauche


ScienTec
 La Solution à vos mesures

Photométrie

Colorimétrie - Radiométrie



KONICA MINOLTA

Gamme complète d'appareils portables

Spectroradiomètre CL-500A
 Précis & performant
 Source LED/EL,
 Température de couleur, IRC...



Photomètre Chromamètre Luminancemètre CS-150 ou LS-150
 Précis & rapide
 Large plage de luminance...



Luxmètre IRC CL-70F
 Efficace & performant
 Sources lumineuses et LED,
 Nombreux types de mesures...



Photomètre Chromamètre CL-200A
 Polyvalent & léger
 Eclairage,
 R&D et Production...



ScienTec c'est aussi...

Vidéocolorimètres
 Photogoniomètres
 Analyseurs d'écran
 Sources de référence



info@scientec.fr / www.scientec.fr
 01.64.53.27.00

portent la même capacité sur la base de transpondeurs d'origine (2002) à 10 Gbit/s que les deux petites traversées à droite équipées de transpondeurs actuels à 100 Gbit/s.

En sus, la baisse des coûts est confortée par le remplacement progressif de la trame de multiplexage SDH (*synchronous digital hierarchy*) par le trafic de paquets IP, et par l'introduction du concept de reconfiguration immergée. L'unité de branchement (BU), équipement de routage de fibre, devient la ROADM BU (*reconfigurable optical add and drop multiplexer*) permettant à l'énorme capacité d'une fibre d'être divisée dynamiquement sur plusieurs fibres virtuelles. Avec ces deux caractéristiques, l'architecture du réseau évolue de la fibre + SDH à une architecture ROADM + POP avec connexion IP directe.



Figure 3. Terminaux sous-marins transatlantiques multi Tbit/s dans une station de Lannion (câble Apollo).

Les 10 prochaines années...

Les câbles des 10 prochaines années s'appuieront sur les technologies de la génération des systèmes optiques actuels. Aucune révolution technologique nouvelle n'est en préparation dans les laboratoires aujourd'hui, signifiant que la révolution optique, commencée il y a 30 ans, est proche d'avoir complété son cycle technologique. Il reste que de nombreuses évolutions pourront servir l'augmentation de capacité et l'amélioration des services associés avec des voies – additives – possibles : (1) augmenter l'efficacité spectrale; (2) augmenter la bande passante des systèmes; (3) utiliser le multiplexage spatial; (4) améliorer la microélectronique; (5) améliorer le maillage des réseaux; (6) s'appuyer sur du logiciel.

L'**efficacité spectrale** ou débit par largeur de bande spectrale a été d'abord obtenue par l'augmentation du débit des canaux groupés dans un peigne WDM. L'espacement typique 50 GHz des longueurs d'onde a été utilisé pour des canaux à 2,5 Gbit/s, puis à 10 Gbit/s et maintenant à 100 Gbit/s. Aujourd'hui, nous approchons des limites fondamentales car la largeur spectrale d'un canal à 100 Gbit/s est proche de 50 GHz. La limite de l'efficacité spectrale maximale atteignable vient de la théorie de l'information. C'est la limite dite de Shannon. Cette analyse a été documentée dès les années 2000. Pour un câble transatlantique de six mille cinq cent kilomètres à base d'amplificateurs erbium, la limite de Shannon, en maintenant des marges industrielles, conduit à environ 6 bits/s/Hz et seulement deux fois plus au laboratoire, sans les marges industrielles.

Cette limite physique vient du remplissage du spectre disponible par les longueurs d'onde modulées avec un rapport signal à bruit compatible avec la réception en extrémité de fibre. La figure 4 illustre le spectre réel du signal optique d'une fibre chargée de canaux 100 Gbit/s modulés en QPSK et optimisés en encombrement spectral. Contrastant avec les systèmes de la génération précédente à 10 Gbit/s par longueur d'onde et à modulation d'intensité, le spectre est pratiquement rempli pour les canaux à 100 Gbit/s, avec une densité spectrale de 2,5 bits/s/Hz, qui n'est qu'à un facteur deux de la limite de Shannon.

Et, en passant les canaux de 100 Gbit/s à 200 ou 400 Gbit/s, la capacité ne serait-elle pas augmentée d'un facteur 2 ou 4? Cet argument ne fonctionne plus. Si la capacité d'un canal est augmentée d'un facteur X avec le même format de modulation, le spectre sera élargi du même facteur et la densité spectrale restera la même. Il a ainsi été démontré par les laboratoires Bell Labs d'Alcatel France que la transmission en format QPSK à 200 Gbit/s permet la même capacité ultime qu'à 100 Gbit/s sur une ligne sous-marine donnée. Dans ces conditions, une direction d'augmentation de la capacité

du canal pourra être d'augmenter le gain de codage du FEC en augmentant son sur-débit au-delà des 20% actuels, ce qui finalement permettra d'approcher plus près de la limite de Shannon. Cette amélioration sera supportée par l'augmentation de puissance de calcul de la microélectronique.

L'**augmentation de la bande passante**, autre voie pour augmenter la capacité du système, est obtenue en augmentant la bande d'amplification à tous les niveaux, de la ligne au terminal. La capacité totale augmente linéairement avec la largeur spectrale du système. Ceux d'aujourd'hui ont une largeur spectrale voisine de 33 nm dans la bande C soit plus de 4 THz. L'augmentation de la bande passante d'amplification peut être réalisée en augmentant la largeur de la bande C actuelle, soit par l'erbium qui peut l'augmenter de 50% ou, de manière potentiellement plus importante, par l'amplification Raman. Une autre voie est d'introduire une bande supplémentaire d'amplification dans l'erbium, la bande L, qui peut être ajoutée à la bande C. Les progrès les plus prometteurs permettent de viser 80 nm de bande passante soit 10 THz.

Compte tenu de la limite de Shannon d'environ 6 bits/s/Hz (ou 0,75 Tbit/s/nm) et la bande passante de 80 nm au maximum, la capacité réalisable sur un câble sous-marin transatlantique peut atteindre 60 Tbit/s par paire de fibres, soit trois fois l'état de la technologie d'aujourd'hui. Au-delà de la théorie, il faudra de nombreuses années et d'importants efforts de développement pour approcher ces limites. En particulier, une difficulté pratique majeure viendra de la puissance électrique disponible sur un câble sous-marin, ce qui assombrit les possibilités de l'amplification Raman, beaucoup plus consommatrice que l'erbium, et donc inapplicable sur les câbles transatlantiques ou transpacifiques.

Le **multiplexage spatial** est un autre progrès qui viendra directement de l'augmentation du nombre de paires de fibres dans le câble. À ce jour, le nombre de fibres est limité à 8 paires, un doublement est directement

atteignable. Une direction de recherche plus aventureuse du multiplexage spatial est en cours d'étude en transmettant des signaux indépendants sur des modes spatiaux d'une même fibre, en ligne avec l'utilisation déjà faite par le cohérent des deux modes de polarisation. Là encore, la faisabilité dépendra directement de la puissance de l'électronique des futurs ADC-DSP cohérents pour application multimodale. Les laboratoires d'Alcatel Bell Labs sont en pointe sur ce sujet innovant difficile.

Alors que la capacité se rapproche de sa limite théorique, il y a encore une motivation pour une plus grande capacité par canal, non pas pour augmenter la capacité totale, mais pour diminuer le coût du système. Un transpondeur pour une longueur d'onde a historiquement un coût stabilisé indépendant du débit binaire, ce qui

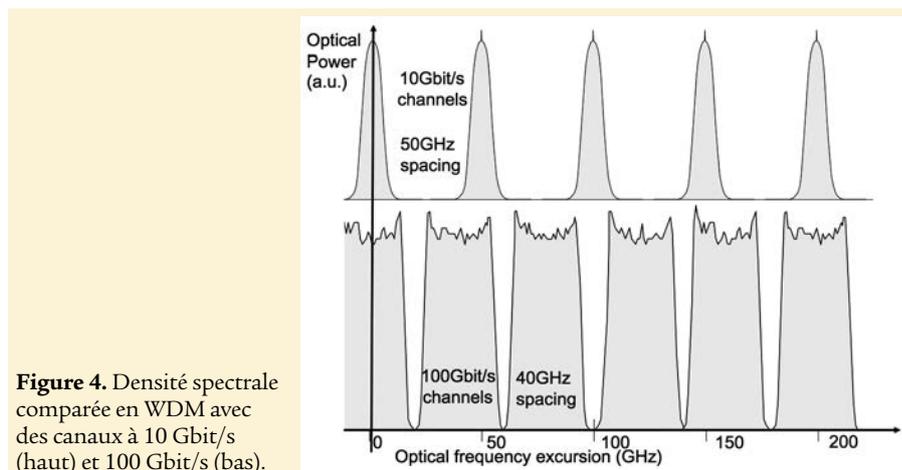


Figure 4. Densité spectrale comparée en WDM avec des canaux à 10 Gbit/s (haut) et 100 Gbit/s (bas).

fait qu'une augmentation du débit par canal améliore directement le bilan économique.

À côté du débit stabilisé à 100 Gbit/s, il existe déjà de nombreuses démonstrations de transmission à 200 Gbit/s ou 400 Gbit/s par longueur d'onde. Ensuite, les progrès industriels sont lents car les limites viennent de

l'électronique analogique. La référence industrielle actuelle étant 100 Gbit/s, les démonstrations des pionniers les plus avancés ciblent les canaux à 1 Tbit/s pour poursuivre l'augmentation des débits ethernet qui évoluent historiquement modulo 10 tels les 1 GbE, 10 GbE, 100 GbE, et le futur 1 TbE.

IDS : Séries de caméras pour projets, économiquement rentables

IDS présente des modèles de caméras professionnelles avec interface USB 3.1

IDS Imaging Development Systems est le premier fabricant de caméras professionnelles à proposer des séries de caméras - les nouvelles séries USB 3 uEye LE - avec le « capteur du futur » USB 3.1 Type-C. Ces petites caméras pour projets, d'un coût abordable, seront proposées en version boîtier ou version carte avec différentes montures d'optique.

Grâce à ses dimensions compactes (36 × 36 mm), la nouvelle génération de caméras USB 3.0 peut être intégrée très aisément dans un système. Comme pour les séries à succès USB 2.0, les séries USB 3.0 seront disponibles dans diverses variantes : version caméra-carte sans monture optique, version caméra-carte avec monture S-Mount ou monture CS-/C, et version boîtier avec monture CS-/C. Le connecteur Type-C constitue le premier pas vers le connecteur USB 3.1 et la gamme IDS comprend les câbles appropriés aux connecteurs USB enfichables de deux manières. La version carte se présente avec un socket 10-pin procurant deux

entrées/sorties polyvalentes, trigger et flash, ainsi qu'un bus I2C pour le contrôle d'appareils externes.

Le premier des nouveaux modèles des caméras modernes CMOS haute-performance est la UI-3860LE avec capteur Sony IMX290 ; le capteur rolling shutter délivre une résolution de 2 MP (1936 × 1096 px, Full HD, environ 120 ips), il est destiné particulièrement aux clients dont les besoins de qualité d'image et de rapidité sont élevés. IDS va également implémenter le capteur CMOS haute-résolution IMX178 de Sony : ce capteur rolling shutter délivre une résolution de 6 MP (3088 × 2076) à des fréquences



atteignant 60 ips. Le modèle de caméra UI-3880LE est très bien adapté aux tâches de visualisation requérant des images très détaillées comme, par exemple, dans les Systèmes de Transport Intelligent (ITS).

CONTACT

IDS Imaging Development Systems
Téléphone: +33 1 42 21 47 04
www.ids-imaging.fr

L'amélioration de la microélectronique sera apportée par l'amélioration des ASIC d'ADC-DSP de la transmission cohérente. Il y a un espace pour l'amélioration du réglage automatique des paramètres de transmission du système, afin d'améliorer la performance et donc le coût du système, en simplifiant le déploiement, l'exploitation, la maintenance et les mises à niveau, mais aussi l'accès au réseau. L'évolution de l'intégration électronique progresse toujours rapidement, avec bientôt 10 milliards de transistors par puce, malgré la conjecture sur le tassement de la loi de Moore.

Le maillage des réseaux sous-marins étant juste engagé avec les ROADM BU, nous pouvons extrapoler que ce type d'architecture aura

d'autres développements. Déjà, la reconfiguration du ROADM est prévue, et non plus seulement par bandes de longueurs d'onde, mais aussi au niveau de la longueur d'onde individuelle. L'introduction de la reconfiguration dynamique suivra. L'interconnexion transparente avec le réseau terrestre progressera ainsi, la connexion « POP to POP » n'étant qu'une première étape à court terme.

Les améliorations logicielles du contrôle et de la gestion des réseaux sous-marins compléteront la flexibilité du réseau et son intégration transparente dans le réseau mondial. La dernière tendance est ainsi le réseau piloté par logiciel (*software defined network* - SDN) qui, comme son nom l'indique, fait rêver d'avoir la configuration du trafic au

bout des doigts pour optimiser globalement en quelques clics l'utilisation des énormes ressources de communication incluant les câbles sous-marins.

En conclusion, et dans une autre perspective des câbles sous-marins, après leur introduction dans les applications pétrolières et gazières, anticipons qu'ils vont couvrir avec le même succès d'autres domaines d'application encore exotiques, comme la surveillance des environnements marins. Laissons l'espace libre pour l'imagination des plus jeunes générations !

POUR EN SAVOIR PLUS

Undersea Fiber Communication Systems, édité par J. Chesnoy, Elsevier/Academic Press (2015). Voir note de lecture en page 12 de ce numéro.

Petit glossaire du cohérent

Détection cohérente

La détection optique cohérente fait suite à la détection de la modulation directe OOK (*on-off keying*) qui consistait à coder par allumage-extinction et à mesurer l'intensité optique reçue. Elle est obtenue en faisant interférer le champ électrique du signal E_s avec le champ électrique lumineux d'un oscillateur local E_{ol} ce qui donne une puissance sur le détecteur proportionnelle au produit scalaire de ces deux champs soit $E_s \times E_{ol} \times \cos(\text{Phase})$. L'information de phase est conservée ce qui donne un degré de liberté pour le codage qui peut être fait en amplitude et en phase.

Multiplexage et contrôle de la polarisation

Dans la fibre, la lumière se propage sur deux états de polarisation orthogonaux entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. Ces états principaux sont conceptuellement proches des états propres de polarisation des milieux isotropes. En détection cohérente, on peut distinguer et contrôler deux signaux indépendants portés par ces deux polarisations grâce à des composants ADC-DSP. Ainsi, contrôler les deux polarisations permet de les détecter séparément et donc de doubler le débit transporté sur une fibre, et aussi de compenser la dispersion de polarisation.

Formats de modulation

L'information transportée est binaire, codée sur des 0 et des 1. Il faut distinguer le débit en ligne exprimé en bauds, débit des changements de transitions entre états successifs, et le débit d'information en bits. En détection directe, les deux sont les mêmes. En codage multiniveaux, le débit en bits devient supérieur au débit en bauds. Par exemple, une modulation à 2 états transporte deux bits (0, 1), alors qu'une modulation à 4 états en transporte deux fois plus (00, 01, 10, 11), une modulation à 16 états transporte 4 fois plus.

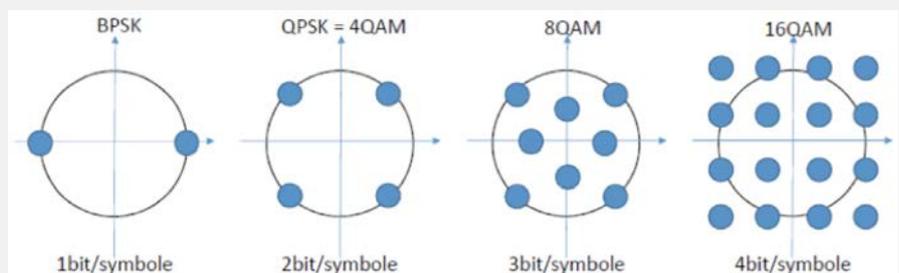
Le cohérent permet le codage multiniveaux en amplitude et en phase offrant donc un débit en bits très supérieur au débit en bauds. Ce facteur multiplicatif est appelé le nombre de bits par symbole. Il se cumule ensuite au facteur 2 du multiplexage de polarisation (*polarisation division multiplexing* - PDM) comme PDM-QPSK.

Les schémas de différents formats, appelés constellations, sont le BPSK (*binary phase shift keying*), modulation à deux états comparable à la modulation directe OOK et le QPSK (*quadrature phase shift keying*), modulation aussi appelée QAM (*quadrature amplitude modulation*), adaptée au cohérent puisque amplitude et phase sont codées. On rencontre le 4QAM à 4 états ou 2 bits/symbole, actuellement le plus courant des formats du cohérent, 8 QAM qui transporte 3 bits/symbole et 16QAM qui transporte 4 bits/symbole.

Attention, en augmentant le nombre de points de la constellation, ils se rapprochent et deviennent plus difficiles à distinguer en présence de bruit. Ainsi, il existe un format au-delà duquel on ne peut transmettre sans erreur.

Correction d'erreur

La correction d'erreur (*forward error correction* - FEC) est une technique qui corrige les erreurs en ajoutant un



sur-débit au signal. Un principe imagé d'un FEC primitif peut être donné par la trame suivante.

	1	2	3	4	5	6
A						
B						
C			X			X
D						
E						
F			X			X

La matrice blanche transporte $5 \times 5 = 25$ données numériques utiles, chacune valant 1 ou 0. Ajoutons la colonne 6, contenant la parité des autres colonnes, et la ligne F, contenant la parité des autres lignes. Si une erreur se produit dans une donnée disons C3, alors les parités C6 et F3 seront erronées ainsi que F6 d'ailleurs, ce qui donnera la position de l'erreur et permettra de la corriger. Les erreurs sur les lignes et colonnes de corrections sont non équivoques. Ce FEC d'école augmente le sur-débit de $6^2 / 5^2$ soit 44%, prix à payer pour corriger les erreurs. Ce schéma corrige des erreurs uniques avec une piètre performance mais les mathématiciens ont inventé des schémas de codage-décodage

beaucoup plus puissants. Pour donner une idée, un signal ayant une erreur pour 10 bits transmis peut maintenant être corrigé sans erreur. Les performances se mesurent par le gain de codage du FEC, rapport d'amélioration du rapport signal à bruit limite pour obtenir une transmission sans erreur. Les meilleurs FEC actuels donnent un gain de codage de 10 dB ce qui signifie qu'ils améliorent virtuellement d'un facteur 10 le rapport signal à bruit, au prix d'un sur-débit de seulement 20%. Ces FEC sont basés sur la numérisation du signal en multiniveaux (*soft decision*, en anglais).

ASIC ADC-DSP

Un ASIC (*application-specific integrated circuit*) est un circuit intégré développé spécifiquement pour une application. L'intégration microélectronique sur silicium permet de réaliser des circuits dépassant un milliard de portes électroniques, équivalentes chacune à 2 transistors minimum. Cette énorme capacité de calcul permet de créer un processeur (*digital signal processing* - DSP) dédié au cohérent qui contient le codage, le traitement du signal cohérent reçu, dont la séparation de polarisation et les compensations de dispersion, et le FEC. L'étage d'entrée de la réception qui fait l'échantillonnage numérique multiniveau ADC (*analog digital conversion*) est délicat à réaliser. Un tel

ASIC, très bon marché à produire, a un coût de développement croissant rapidement avec sa complexité et qui se monte, pour les générations en cours, à près de 50 millions d'euros! Ce coût doit être partagé par plusieurs grandes compagnies ou pris en charge par un systémier ayant un marché important. Les systémiers sous-marins sont tous utilisateurs d'un ADC-DSP partagé avec au moins un fournisseur de transmission terrestre.

100 Gbit/s et 400Gbit/s ou au-delà

Le débit client le plus important à ce jour est le 100 Gbit/s. Comment? On sait transporter 30 GHz de bande passante par l'électronique analogique, soit 25 Gbauds utiles, si on enlève les 20% du FEC. En format BPSK, avec un bit par symbole d'où 50 Gbit/s (25×2 polarisations), il faut donc deux longueurs d'onde pour transporter 100 Gbit/s. Le format QPSK-4QAM avec deux bits par symbole sur les deux polarisations transporte $25 \times 2 \times 2$ soit 100 Gbit/s par longueur d'onde.

Le 8QAM est attendu pour les câbles transatlantiques modernes et le 16QAM pour les systèmes courts. Quant au débit de 400 Gbit/s, un potentiel débit client de l'avenir, il peut être transporté par exemple par deux longueurs d'ondes 16QAM ou quatre longueurs d'onde QPSK.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com