

# En route vers le 100 Gbit/s...

Jean-Michel MUR – Président du Club optique  
[jm.mur@orange.fr](mailto:jm.mur@orange.fr)

En juin 2010, l’Ethernet à 100 Gbit/s a été officiellement normalisé. Quelques 18 mois après, où en est-on ? De fait, le 100 Gbit/s est déployé dans une bonne centaine de réseaux optiques chez les opérateurs grâce à cinq facteurs clés : compatibilité, construction intellectuelle, création de composants, support de transmission inchangé et normalisation dans la mesure des services.

C’est le 17 juin 2010 que l’IEEE, association professionnelle américaine, a officiellement ratifié la norme IEEE 802.3ba dédiée à deux nouveaux débits d’Ethernet natif dans les réseaux optiques : le 40 Gigabit Ethernet à 40 Gbit/s (40 GbE) et le 100 Gigabit Ethernet à 100 Gbit/s (100 GbE) (tableau 1). Ceux-ci étaient réclamés par les plus grands exploitants de réseaux de communication confrontés à la folle croissance de la demande de débits de la part des abonnés et donc de bande passante disponible dans les réseaux. La commercialisation des solutions a été un franc succès puisque plus d’une centaine d’opérateurs ont sauté le pas. Voyons les cinq raisons qui ont présidé à ce bon démarrage.

## Compatibilité

Une de ces cinq raisons majeures est la compatibilité ou, plus exactement, une double compatibilité. La première dans l’organisation IEEE elle-même ou compatibilité ascendante. En effet, les nouveaux réseaux s’appuyant sur la norme IEEE 802.3ba sont compatibles avec les réseaux déjà installés respectant les autres normes IEEE 802.3. Ainsi, les investissements précédents dans cette technologie comme les 1 GbE et 10 GbE sont préservés. Et la nouvelle norme permet d’espérer des économies concrètes dans les coûts d’exploitation et une efficacité améliorée grâce à la simplification des agrégations et transmissions de débits : une fois 100 Gbit/s est plus facilement gérable que 10 x 10 Gbit/s. À noter que pour avoir un vrai 100 Gbit/s, la norme

Tableau 1. Dénomination des différents types de couches physiques définies dans la norme IEEE 802.3ba.

Nom	Description
40GBASE-KR4	Transmission de 40 Gbit/s via un encodage sur 4 liens parallèles d’un fond de panier, sur une distance minimum de 1 mètre.
40GBASE-CR4	Transmission de 40 Gbit/s via un encodage sur 4 liens parallèles d’un câble en cuivre blindé, sur une distance minimum de 7 mètres.
40GBASE-SR4	Transmission de 40 Gbit/s via un encodage sur 4 fibres optiques multimodales parallèles, sur une distance minimum de 100 mètres.
40GBASE-LR4	Transmission de 40 Gbit/s via un encodage sur 4 longueurs d’onde multiplexées (WDM – <i>wavelength division multiplexing</i> ) d’une fibre optique monomode, sur une distance minimum de 10 kilomètres.
100GBASE-CR10	Transmission de 100 Gbit/s via un encodage sur 10 liens parallèles d’un câble en cuivre blindé, sur une distance minimum de 7 mètres.
100GBASE-SR10	Transmission de 100 Gbit/s via un encodage sur 10 fibres optiques multimodales parallèles, sur une distance minimum de 100 mètres.
100GBASE-LR4	Transmission de 100 Gbit/s via un encodage sur 4 longueurs d’onde multiplexées (WDM – <i>wavelength division multiplexing</i> ) d’une fibre optique monomode, sur une distance minimum de 10 kilomètres.
100GBASE-ER4	Transmission de 100 Gbit/s via un encodage sur 4 longueurs d’onde multiplexées (WDM – <i>wavelength division multiplexing</i> ) d’une fibre optique monomode, sur une distance minimum de 40 kilomètres.

Nota : C = copper - S = short wavelength serial - L = long wavelength serial - E = extra long wavelength serial.

demande que puisse être transmis un débit d’environ 112 Gbit/s, le sur-débit étant dû à des en-têtes et au contrôle d’erreur de transmission (*forward error correction* – FEC) non normalisé.

La seconde compatibilité tient à un fait à signaler dans le domaine de la normalisation : les études sur le 100 Gbit/s ont été menées conjointement entre le groupe de travail IEEE P802.3ba et le groupe de travail 15 (*Study Group 15*) de l’Union Internationale des Télécommunications (UIT-T). Ainsi, et parallèlement, le 11 juin 2010, a été publié l’amendement 1 à la recommandation G.709/Y.1331 : « ...to

*make mappings of 40GBASE-R into OPU3 and 100GBASE-R into OPU4 normative consented by ITU-T SG15... ».* OPU ou *optical payload channel unit* est la structure de l’information à utiliser pour adapter l’information du client à son transport via un canal optique. Cela comprend l’information elle-même ainsi que les en-têtes pour assurer la bonne transmission. OPU3 est dédié aux débits proches de 40,149 Gbit/s et OPU4 à ceux proches de 104,134 Gbit/s. Ainsi, le travail conjoint IEEE-UIT-T permet d’assurer aux exploitants de réseaux que ces nouveaux débits d’Ethernet pourront être transportés

sur les réseaux de transport optiques (OTN - *optical transport network*). Intéressante supplémentaire, le 5 mai 2011, la norme IEEE 802.3ba a été approuvée par l'ANSI (*American National Standards Institute*). C'est bien, mais comment transmettre ces débits ?

### Construction intellectuelle

La réponse tient en deux mots : « construction intellectuelle ». Certains parlent d'évolution et d'autres oseraient même le mot de révolution. Ce point de vue, Sébastien Bigo, directeur du département réseaux optiques, Alcatel-Lucent Bell Laboratories, le développe ainsi : « La transmission du 100 Gbit/s pourrait être considérée comme une révolution intellectuelle car c'est la combinaison de cinq technologies qui, chacune à leur tour, avaient été étudiées et testées mais, au final, toutes jugées peu intéressantes. Ces cinq technologies sont la modulation de phase multiniveaux, le multiplexage en polarisation, la détection cohérente, le traitement du signal et la conception de liens sans compensation de dispersion en ligne » (figure 1).

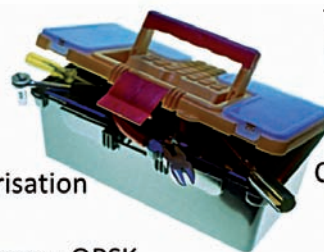
Quelques dates, pour resituer dans le temps : c'est à 2001, que remonte la première expérimentation de transmission de 10 Térabits par seconde via le multiplexage en polarisation. Et, à l'été 2008, l'association Optical Internetworking Forum (OIF) a donné son feu vert aux travaux sur le 100 Gbit/s pour transmission en longues distances en couplant modulation de polarisation, modulation de phase multiniveaux (*dual polarization quadrature phase shift keying - DP-QPSK*) et détection cohérente. L'objectif était de couvrir 1000 à 1500 kilomètres sans régénération du signal et avec une bonne efficacité dans l'utilisation du spectre. L'emploi de la double polarisation permet de transmettre un signal sur la polarisation horizontale et un autre sur la polarisation verticale, les deux signaux sont sur la même fréquence mais, comme ils sont polarisés à 90° l'un de l'autre, ils n'interagissent pas. Quant à la modulation QPSK, son apport a un fort intérêt : en modulation traditionnelle, il y a un bit par

Photonique intégrée

Modules émetteurs

Multiplexage de polarisation

Modulation de phase – QPSK



Traitement du signal numérique – DSP

Récepteur cohérent

Correction d'erreur - FEC

Convertisseurs analogique-numérique

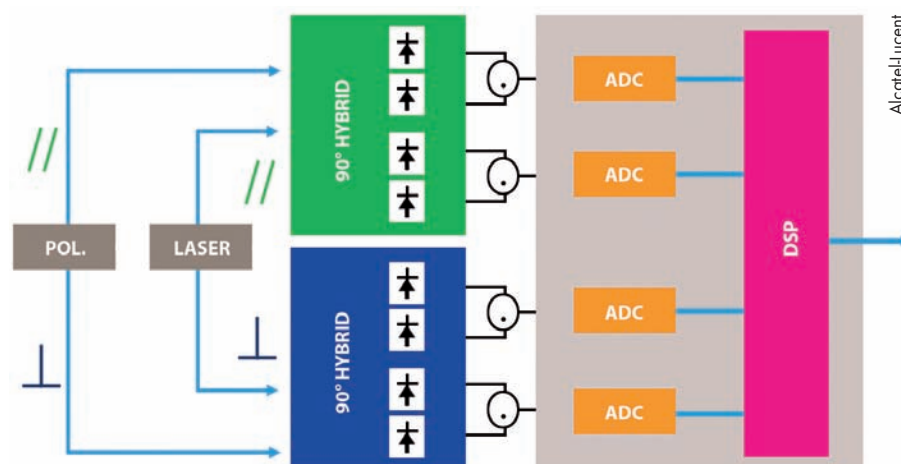
Figure 1. Boîte à outils du 100 Gbit/s.

intervalle – présence de lumière ou non – mais le QPSK permet la transmission de deux bits par intervalle car le signal peut être dans une des quatre phases 0/0, 1/1, 0/1 ou 1/0. Ainsi, DP-QPSK permet la transmission de 2 x 2 bits, soit quatre bits, en lieu et place d'un seul précédemment. Ceci a pour avantage majeur de diviser par quatre le débit en gigabauds – 25 Gbauds sont suffisants – et, corollairement, d'avoir une électronique de commande moins complexe et donc moins onéreuse.

### Création de composants

La construction intellectuelle, c'est bien. Mais, concrètement, comment cela se passe-t-il ? Par exemple, côté détection, rappelons qu'au début les récepteurs optiques détectaient l'intensité lumineuse – allumé ou éteint – à travers une modu-

lation basique connue sous le nom OOK ou *on-off keying*. Désormais, les récepteurs optiques à détection cohérente reconnaissent polarisation, fréquence et phase d'un signal DP-QPSK. Aussi, Jean-Paul Faure, responsable de la ligne de produits WDM, Alcatel-Lucent division optique, tient à préciser : « Concevoir et fabriquer un transmetteur pour le 100 Gbit/s est complexe mais réalisable. Par contre, de vraies difficultés surgissent lors de la conception et la fabrication des récepteurs cohérents pouvant affranchir la transmission de la dispersion chromatique et de la dispersion de mode de polarisation grâce au principe d'interférométrie transcrivant les transitions de phase en transitions d'amplitude et d'intensité ». Tout l'intérêt de la détection cohérente se trouve dans le fait que dans le réseau on peut laisser « filer » les dispersions car leur compensation se fera au niveau du récepteur (figure 2).



POL. Multiplexage de polarisation – ADC Conversion analogique/numérique  
 DSP Digital signal processing – Traitement du signal numérique

Figure 2. Schéma d'un récepteur cohérent.



ADVA Optical Networking

Figure 3. Exemple d'une carte pour le 100 Gbit/s sur un réseau métropolitain.

Et, Jean-Paul Faure complète : « La plus-value pour ce type de récepteur n'est plus dans la maîtrise de la conception et de la fabrication de composants optoélectroniques mais dans la partie de traitement numérique du signal ou DSP - digital signal processing - à travers l'écriture des logiciels et la recherche d'algorithmes performants ».

Ainsi, les solutions à 100 Gbit/s s'installent progressivement dans les réseaux de longues distances. Pour les réseaux métropolitains et les réseaux d'accès, cela pourrait être vrai dans le futur. Actuellement, une autre solution semble préférée : le multiplexage de quatre longueurs d'onde à 28 Gbit/s chacune. Compte tenu des en-têtes et contrôles d'erreur, ces

4 x 28 Gbit/s représentent 4 x 25 Gbit/s utiles. Vincent Castay, responsable avant-vente, ADVA Optical Networking, l'explique ainsi : « Le 100 Gbit/s cohérent est une très bonne solution pour interconnecter les gros commutateurs ou les gros routeurs sur de longues distances. Mais, pour les réseaux métropolitains le 4 x 28 Gbit/s est un choix qui présente quatre avantages clés : un coût plus raisonnable, une consommation électrique plus faible, un encombrement minimal et une densité spectrale optimale. Entre autres, une application phare pour le 4 x 28 Gbit/s est l'interconnexion de data centers ». Effectivement, il est d'usage pour assurer la sauvegarde des données, d'interconnecter des centres de données distants de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. Ainsi, une solution transportant 80 longueurs d'onde à 28 Gbits/s permet une sauvegarde pouvant atteindre jusqu'à deux Térabits par seconde utiles et ce jusqu'à 500 kilomètres (figure 3).


Signalons qu'en ce qui concerne le 40 Gbit/s, des solutions existent. Mais, il semblerait, d'après les professionnels du secteur, que cela ne soit qu'une étape intermédiaire qui devrait disparaître à court terme. Voilà donc, le 100 Gbit/s ou le 4 x 28 Gbit/s, oui mais sur quels supports de transmission ?

### Support de transmission

Avec l'arrivée du 100 Gbit/s, les opérateurs déjà échaudés dans les décennies précédentes avaient de gros doutes concernant la pérennité de leurs réseaux. Quelques retours en arrière... Dans les années 1980, les transmissions se faisaient sur une seule longueur d'onde et la fibre reine était la G.653, fibre optique monomode à dispersion décalée (dispersion shifted fiber - DSF). Avec l'arrivée du multiplexage en longueur d'onde (wavelength division multiplexing - WDM), la transmission se faisait alors sur plusieurs longueurs d'onde simultanément. Et là, sur la G.653, de nouvelles contraintes apparurent comme le mélange quatre ondes (four waves mixing). Aussi, furent créées dans les années 2000, les G.655, fibres optiques monomodes à dispersion



An Excel Technology Company



The High Energy Laser Company™



**Ultrafast Systems**



**High Energy YAG**



**kHz Solid State**



**Tunable Systems**

### Innovative Laser Solutions for Science and Industry

**Ultrafast Systems**  
femtosecond oscillators, terawatt systems  
179 nm - 22 µm tunable systems

**High Energy YAG Systems**  
to 8 Joules

**Kilohertz Solid State Systems**  
solid state lasers for industrial applications

**Nanosecond Tunable Systems**  
for Science and Research, 205 nm-2550 nm



22 Avenue de la Baltique  
91 140 Villebon sur Yvette  
Tel: 01 69 74 13 80  
Email: ETF@excel-france.com

Serving France for over 25 years



**Figure 4.** Exemple de câbles à très forte densité de fibres optiques

décalée non nulle (*non zero DSF*), avec diverses variantes - G.655 A, B, C, D et E - définies entre 2003 et 2006. Durant ces années-là, arrivèrent également les G.656, fibres optiques monomodes à dispersion non nulle destinées au transport à large bande, extension des G.655 et prenant en charge les applications en multiplexage dense (DWDM).

En parallèle, les G.652, fibres optiques monomodes pour des liaisons longues distances vivaient leur vie. Ces fibres, créées en 1984, sont les plus courantes et les plus installées par les exploitants de réseaux. Elles ont connu plusieurs versions à travers plusieurs révisions de leurs caractéristiques. La plus importante, en 2003, concernait les G.652-C et G.652-D et caractérisait l'affaiblissement pour les fibres à faible pic OH<sup>-</sup> (*reduced water peak*), à faible dispersion modale de

polarisation (*polarization mode dispersion - PMD*) et amenait le diamètre des tests des macro-courbures à trente millimètres. Les versions de 2005 et de novembre 2009 n'ont apporté que des modifications minimales afin que ces fibres puissent poursuivre leur carrière commerciale. Et c'est ce que confirme Alain Bertaina, responsable produit fibre monomode chez Prysmian Group : « On aurait pu craindre que la montée vers les très hauts débits rende obsolètes les fibres G.652. Or, il n'en est rien. En fait, grâce aux systèmes actuels basés, entre autres, sur la détection cohérente et le traitement numérique des signaux, le phénomène de dispersion n'est plus un problème. Ainsi, les fibres G.652-D sont compatibles avec le 100 Gbit/s et les investissements des opérateurs sont sauvegardés ». Ceci explique en grande partie leur appétence pour la montée vers le 100 Gbit/s. Doit-on s'attendre à des nouveautés en matière de supports de transmission ? Pour Alain Bertaina : « Les développements portent essentiellement sur les résistances aux macro-courbures et aux micro-courbures. Cela passe par des verres à insensibilité aux micro-courbures améliorée, un meilleur revêtement et, surtout, par la sécurisation des affaiblissements en densifiant les câbles. Certains peuvent contenir jusqu'à 720 fibres optiques dans un diamètre de 15 millimètres » (figure 4).

### Méthodes de mesures

Enfin, le dernier élément pour le déploiement du 100 Gbit/s concerne les méthodes de mesures avec deux points de vue complémentaires : le transport du débit sur les réseaux, et la délivrance du service aux abonnés. Les mesures de transport du débit sont cruciales car corrélées à la qualité de service (QoS) et aux pénalités financières associées. Les principaux fabricants d'appareils de mesures ont des équipements assurant les différents types de tests de conformité, fonctionnalités et performances, tests définis par des normes des entités IEEE, UIT-T, TIA...

Pour les mesures de la délivrance des services aux abonnés, je vais vous présen-

ter SAM. SAM existe, je l'ai rencontré... Mais, qui est SAM ?

En fait, c'est l'acronyme de *service activation methodology*, une nouvelle méthode de tests pour les services transportés sur les réseaux. Certes, les OTDR sont là pour la couche physique, couche 1 du système OSI. Et, pour les couches 2 à 4, la recommandation RFC 2544, créée pour le travail en laboratoire, permet de connaître, sur le terrain, l'état d'activation des services voix, données ou vidéo, indépendamment les uns des autres. Or, d'une part, la méthodologie RFC 2544 est séquentielle, donc les sous-tests sont effectués les uns après les autres jusqu'à ce qu'ils soient tous terminés, cela peut prendre plusieurs heures, synonyme de coûts élevés, et, d'autre part, avec l'arrivée des offres multiservices (*triple et quadruple play*), il a été jugé nécessaire de tester ces services ensemble. Pour cela une méthodologie a été définie par l'UIT-T et c'est l'objet principal de la norme ITU-T Y.1564 « *Ethernet service activation test methodology* » publiée le 25 mars 2011. Cette méthodologie d'activation des services ou SAM peut simuler tous les types de services - voix, données et vidéo - d'un réseau et qualifier leurs paramètres clés dont les performances du réseau en termes de débits ou de congestion avec des durées d'étape déterminées. Désormais, cette norme est intégrée dans la plupart des équipements de mesures et proposée par les fabricants, chacun ayant sa dénomination comme EtherSAM d'Exfo, SAMcomplete de JDSU, IntelliSAM de Sunrise Telecom, etc.

Voilà pour le 100 Gbit/s. Mais la demande de débits devant continuer de croître, que se passera-t-il demain ? De nombreux travaux portent sur le débit de 400 Gbit/s grâce à un nouveau type de modulation - *quadrature amplitude modulation* (QAM) - ou de nouveaux types de fibres optiques multicœurs. Un dernier coup de projecteur sur une percée majeure réalisée par Alcatel-Lucent dans le domaine des réseaux optiques : le record mondial de 100 Pétaoctets par kilomètre-seconde atteint de manière expérimentale, en septembre 2011, par les Bell Laboratories.