

Pourquoi le destin de la fibre G.654.E est-il foncièrement différent de celui des fibres G.653 et G.655 ?

Leçon du passé, solution pour l'avenir





Dans un monde où la demande en bande passante continue de croître de manière exponentielle, les réseaux optiques longue distance sont confrontés à des défis sans précédent.

Historiquement, l'évolution des infrastructures de câblage a été guidée par l'innovation, chaque nouvelle génération de fibre optique cherchant à repousser les limites de la transmission. Cependant, le rythme effréné des technologies et l'avènement du traitement numérique du signal ont mis en lumière l'obsolescence de certaines solutions passées, comme la fibre G.655.

Ce document analyse les raisons pour lesquelles les fibres d'ancienne génération ne peuvent plus répondre aux besoins actuels des réseaux terrestres longue distance et met en lumière une nouvelle génération de fibres, notamment la fibre G.654.E.

Nous verrons comment, en complémentarité avec les avancées technologiques de la couche active, cette fibre propose une solution durable et pérenne pour optimiser le coût total de possession et répondre aux exigences de débit de demain.

L'importance stratégique du choix de la fibre optique



Contrairement à ce que l'on pense, un réseau n'est pas figé : il évolue constamment avec des mises à jour régulières.

Les mises à niveau des infrastructures de génie civil et des câbles coûtent beaucoup plus cher que celles des équipements électroniques et des logiciels¹.

C'est pourquoi il est essentiel de bien choisir la fibre optique, qui est le cœur du réseau. Elle doit pouvoir permettre l'augmentation future de la bande passante, surtout pour les réseaux longue distance qui agrègent des flux de données nécessitant de plus en plus de débit. Pour garantir la pérennité des investissements sur plusieurs décennies, le câble optique doit être capable de supporter cette croissance continue du débit.

La capacité d'une fibre optique est limitée par un compromis entre le débit et la distance.

Dans le domaine des télécommunications optiques, les vitesses de transmission par longueur d'onde ont connu une accélération fulgurante. Alors qu'elles sont passées de 10 Gb/s à 40 Gb/s en une décennie (des années 1990 aux années 2000), elles ont bondi de 200 Gb/s à 1,6 Tb/s sur la dernière décennie. Cette augmentation est due à l'adaptation rapide des nouvelles technologies pour répondre à la demande croissante de capacité de transmission. Cependant, la capacité d'une fibre optique est limitée par un compromis entre le débit et la distance. Des facteurs tels que l'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires dégradent le rapport signal/bruit optique. Au fil du temps, les technologies de fibres optiques ont évolué pour amener de la valeur ajoutée en compensant certaines dégradations du signal.

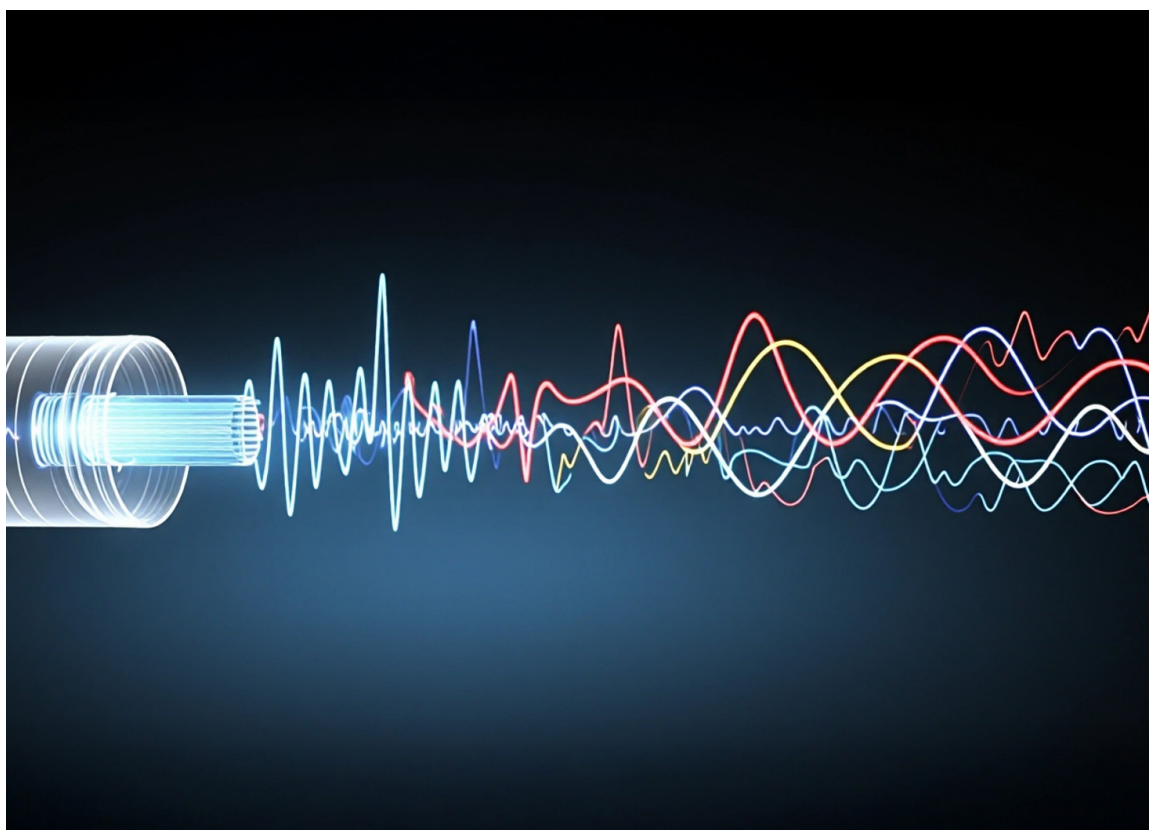
¹ <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Europacable-Guide-Expected-Life-Time-of-Passive-Optical-Infrastructure-21-Oct-2020.pdf>

Des générations de fibre pour compenser le problème de dispersion

Pour des débits de transmission de quelques Gb/s ou dizaines de Gb/s, le codage optique était réalisé par simple modulation d'intensité, en utilisant des formats comme le OOK (On-Off Keying). À ces débits, la forte dispersion chromatique des fibres optiques standard G.652.D provoquait une dégradation significative du signal, limitant ainsi la distance de transmission.

En effet, la fibre G.652.D présente une forte dispersion chromatique (environ 17 ps/nm·km) dans la fenêtre des 1550 nm, ce qui provoquait un élargissement des impulsions lumineuses et limitait la capacité en débit et en distance sans compensation complexe de cette dispersion. Cette dispersion posait problème notamment lorsque l'on souhaitait exploiter les faibles atténuations linéiques de la bande C pour les réseaux longues distances. À cause de cette forte dispersion, les systèmes G.652.D devaient intégrer des modules ou des fibres compensatrices, augmentant la complexité et le coût des réseaux longue distance.

C'est pourquoi, pour maintenir une bonne qualité du signal sur de plus longues distances, il est devenu avantageux d'utiliser des fibres à dispersion décalée (G.653 et G.655), conçues pour minimiser cet effet.



La fibre G.653

Caractéristiques et limites pour les réseaux WDM

La fibre G.653, également connue sous le nom de Dispersion Shifted Fiber (DSF), est une fibre monomode initialement conçue pour les réseaux longue distance. Sa principale caractéristique est le décalage de son point de dispersion chromatique nulle vers la fenêtre de 1550 nm, zone où l'atténuation du signal est la plus faible. Ce décalage permettait d'atteindre de très longues distances avec des débits élevés en utilisant une seule longueur d'onde. Cependant, cette conception a rendu la G.653 rapidement incompatible avec les besoins des réseaux. Dès les années 1990, les réseaux ont commencé à massivement utiliser les technologies de multiplexage en longueur d'onde (WDM). La dispersion nulle à 1550 nm amplifie fortement les effets non linéaires. Cet effet indésirable crée de nouvelles longueurs d'onde qui interfèrent avec les signaux WDM d'origine, provoquant une diaphonie et une dégradation significative du signal. Pour cette raison, la fibre G.653 a été rapidement remplacée par la fibre G.655, qui possède une dispersion faible mais non nulle.

La fibre G.655

Application pour les réseaux longue distance WDM

Développée dans les années 1990, la fibre G.655 (également connue sous le nom de Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, ou NZDSF) a été spécifiquement conçue pour répondre aux besoins des réseaux longue distance WDM. Contrairement à la G.653, cette fibre présente une faible dispersion non nulle dans la fenêtre de 1550 nm (généralement entre 4 et 8 ps/nm.km). Cette caractéristique technique réduit considérablement les effets non linéaires, tout en conservant une dispersion suffisamment basse pour limiter l'élargissement des signaux.

La G.655 s'est ainsi imposée comme une solution idéale dans les années 1990-2000 pour les systèmes de multiplexage dense en longueurs d'onde (DWDM) et les transmissions à haut débit sur de longues distances. À ses débuts, elle a été optimisée pour des débits de 2,5 à 10 Gbit/s par canal, avec la possibilité d'atteindre 40 Gbit/s sur des systèmes optimisés. Elle a ainsi connu son apogée en étant massivement déployée dans les réseaux WDM longue distance.

Malgré son succès, l'évolution fulgurante des débits dans les réseaux a révélé les limites de la fibre G.655. L'émergence de nouvelles technologies d'optique cohérente, notamment les avancées dans le traitement numérique du signal, a permis de compenser ces limitations liées à la dispersion.

L'obsolescence de la fibre G.655 face à l'avènement de l'optique cohérente

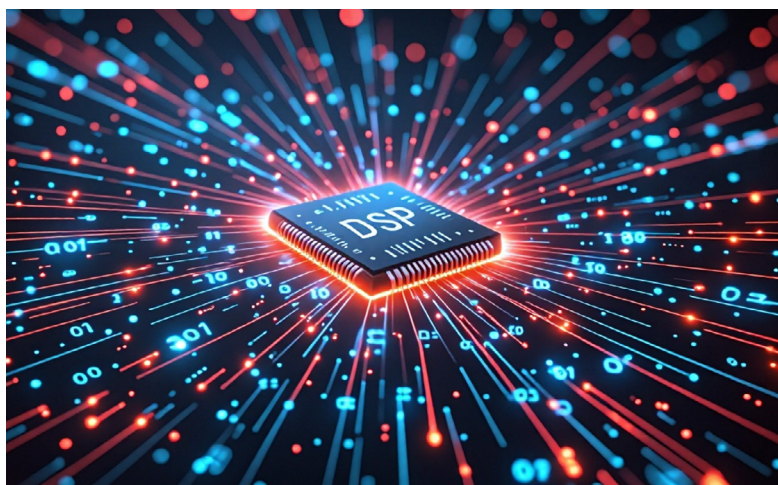
La principale raison de l'obsolescence de la G.655 est l'avènement de nouvelles technologies vers les années 2010, notamment la transmission cohérente et les progrès du traitement numérique du signal (DSP : Digital Signal Processing). L'optique cohérente est une technologie de communication optique qui, en utilisant le codage d'information sur la phase et la polarisation de la lumière en plus de son intensité, permet de transmettre bien plus d'informations avec une meilleure efficacité spectrale et notamment de corriger numériquement les dégradations du signal sur de très longues distances.

Ces innovations ont profondément changé la donne. L'introduction de la technologie cohérente, utilisée dans les systèmes DWDM avec des capacités de transmission par longueur d'onde $\geq 100\text{Gb/s}$, a complètement éliminé

l'impact de la dispersion chromatique sur la qualité de transmission. Par conséquent, la fibre G.655 n'était plus nécessaire. En effet, avec l'explosion des débits et l'arrivée de systèmes cohérents, cette caractéristique de faible dispersion non nulle de la fibre G.655 est devenue un facteur inutile voir limitant. Des phénomènes comme la dispersion modale de polarisation (PMD) et d'autres effets non linéaires réapparaissent à ces hauts débits, affectant la capacité et la fiabilité du réseau.

Les processeurs de signaux numériques peuvent désormais compenser de manière électronique et efficace les effets de dispersion et les non-linéarités, un rôle que la fibre G.655 était initialement censée remplir. Le paradigme a donc basculé : ce n'est plus la fibre qui est la solution aux problèmes de dispersion, mais l'électronique et le logiciel. Pour les très hauts débits (>100 Gb/s), une dispersion plus élevée est en fait devenue préférable, car elle permet une compensation numérique plus performante sans exiger une architecture réseau complexe. En conclusion, la G.655, qui était une solution ingénieuse à son époque, n'est plus adaptée aux exigences de flexibilité et de montée en capacité des réseaux optiques modernes.

La puissance des DSP : un catalyseur pour l'essor de l'ultra haut débit



Les DSP ont marqué un tournant dans les communications optiques en transformant le traitement du signal d'une approche analogique rigide et coûteuse en une solution numérique flexible et puissante. Ces puces électroniques agissent comme le cerveau des transpondeurs optiques, permettant de compenser électroniquement les dégradations du signal sur de longues distances, et ainsi limiter la régénération optique fréquente et coûteuse.

Les principaux bénéfices de l'utilisation des DSP sont les suivants :

- **Correction des dégradations du signal** : les DSP compensent numériquement les effets de la fibre comme la dispersion chromatique ou les effets non linéaires, optimisant ainsi la distance et le débit de la transmission.
- **Augmentation de la capacité** : ils gèrent des modulations complexes (ex. 16QAM, 64QAM) pour encoder plus de données par impulsion lumineuse, ce qui permet d'atteindre de très hauts débits (1,6 Tb/s et plus à l'avenir).
- **Amélioration de la fiabilité** : grâce à des techniques de correction d'erreur (FEC), les DSP reconstruisent les données perdues et augmentent la tolérance du signal au bruit optique.

L'intégration des DSP, combinée aux technologies WDM, a constitué une avancée majeure, permettant de répondre à la croissance exponentielle du trafic de données entre dans années 2000-2020. Grâce à ces technologies, les débits ont été massivement augmentés durant cette période.

Cependant, cette solution est elle-même confrontée à de nouvelles limites : nous approchons désormais de la limite de Shannon, un seuil théorique de la capacité de transmission d'un canal. Pour continuer à augmenter la bande passante, il est désormais nécessaire de repenser l'architecture des réseaux et d'explorer de nouvelles solutions au-delà de la seule optimisation numérique du signal.

La limite de Shannon : le plafond de verre des DSP

La limite de Shannon est une frontière théorique fondamentale qui définit le débit binaire maximal qu'un canal de communication peut atteindre (C en bit/s). Elle dépend de la bande passante du canal (B en Hertz) et du rapport signal/bruit. Un meilleur rapport signal à bruit permet donc d'augmenter le débit de données.

$$C = B \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Dans le domaine des communications optiques, cette limite est une contrainte physique absolue : même avec les algorithmes les plus sophistiqués et les techniques de modulation les plus avancées, il est impossible de la dépasser. La limite de Shannon constitue une frontière absolue à la quantité d'information transmise, même avec des codes correcteurs d'erreurs ou des modulations sophistiquées. Les DSP jouent un rôle crucial en cherchant à s'en approcher en compensant numériquement les dégradations du signal (dispersion, bruit, effets non-linéaires, etc). Plus les DSP sont puissants, plus ils permettent de se rapprocher de ce seuil. Cependant, il existe aussi une "limite de développement" pour les DSP, où l'augmentation de leur complexité ne génère plus de gains significatifs en débit ou en qualité de signal, ou alors à un coût ou une latence prohibitive. En somme, la limite de Shannon reste la barrière physique ultime, à laquelle les technologies de traitement du signal cherchent constamment à se confronter.

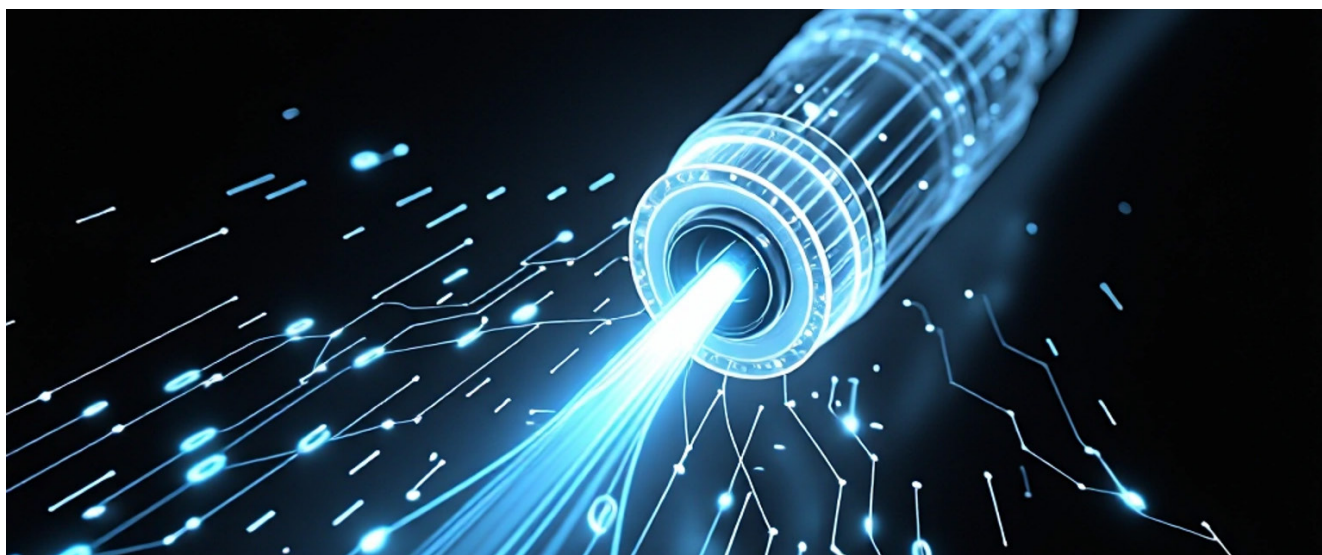
En réponse à la limite de Shannon et des contraintes de développement des DSP, il devient impératif de dépasser la simple optimisation du signal.

La solution pour répondre à la demande croissante de débits réside désormais dans une nouvelle approche : repenser l'architecture de câblage et se tourner vers des fibres optiques à valeur ajoutée qui améliorent intrinsèquement le rapport signal à bruit, conçues pour les besoins des réseaux de nouvelle génération ultra haut débit.

Pour dépasser les 800 Gb/s par canal, le choix des fibres optiques utilisées devient stratégique car il impacte directement les facteurs clés de la capacité selon Shannon : bande passante utilisable, rapport signal à bruit optique, et longueur de transmission sans régénération.

G.654.E : la fibre à valeur ajoutée qui repousse la limite de Shannon

En réponse à l'approche de la limite de Shannon et aux limites des DSP, la fibre G.654.E se présente comme la solution de fibre à valeur ajoutée pour les réseaux de demain pour des débits par canal de 800 Gb/s et plus, notamment de par son cœur en silice pure.



En effet, le dopage dans les fibres optiques consiste à incorporer des éléments chimiques spécifiques dans le cœur de la fibre pour modifier ses propriétés optiques, notamment l'indice de réfraction, et ainsi guider la lumière. Ce dopage peut néanmoins avoir un impact négatif sur l'atténuation linéique de la fibre. Les fibres G.655 et G.652.D ont un cœur dopé au germanium, ce qui permet d'améliorer certaines caractéristiques, mais introduit une atténuation linéique plus élevée que les fibres en silice pure. En revanche, la fibre G.654.E utilise un cœur en silice pure non dopée, ce qui permet de réduire significativement l'atténuation linéique, offrant ainsi de meilleures performances optiques.

Les atouts majeurs de la G.654.E sont les suivants :

- **Atténuation ultra-faible** : avec une perte optique inférieure à 0,16 dB/m, cette fibre permet au signal de conserver une excellente qualité sur de très longues distances. Cela maintient un rapport signal/bruit optique élevé, un facteur crucial qui, selon la formule de Shannon, augmente la capacité théorique du canal.
- **Grande surface effective de cœur** : le cœur élargi de la G.654.E réduit l'intensité de la lumière au sein de la fibre, ce qui diminue considérablement les effets non linéaires. En limitant ces perturbations, elle offre un canal de transmission plus linéaire, ce qui est idéal pour l'utilisation des modulations complexes et permet aux DSP de corriger les erreurs de manière beaucoup plus efficace.



Le germanium est un élément stratégique mais critique en raison des risques d'approvisionnement et de la forte volatilité des prix. Le statut critique du germanium découle de sa production hautement concentrée en Chine (plus de 60% de l'offre mondiale) et du fait qu'il s'agit uniquement d'un sous-produit de l'extraction d'autres métaux (zinc ou charbon). Cette dépendance géographique, exacerbée par le risque de restrictions à l'exportation pour des raisons géopolitiques, rend son approvisionnement fragile. L'utilisation de fibres G.654.E, avec un cœur en silice pure non dopée, constitue donc un atout majeur pour réduire cette dépendance géopolitique et économique dans le déploiement des réseaux.

➤ **Optimisation pour les systèmes cohérents** : en minimisant les pertes et les non-linéarités, la G.654.E est parfaitement adaptée aux systèmes de transmission optique cohérente à très haut débit (>800 Gbit/s par longueur d'onde) qui reposent sur des modulations d'ordre supérieur (QPSK, 16QAM, 64QAM...). Elle permet d'exploiter pleinement les capacités des DSP de dernière génération et de leurs algorithmes de correction d'erreur avancés.

Pour plus de détails sur les propriétés physiques de cette fibre et son intérêt pour l'optique cohérente à très haut débit, veuillez consulter notre livre blanc dédié¹.

Conçue pour compléter les atouts des DSP modernes, la fibre G.654.E dispose d'une atténuation ultra-faible et d'une grande surface effective, permettant ainsi d'améliorer le rapport signal à bruit et donc de repousser les frontières de capacité en agissant sur les caractéristiques physiques mêmes de la transmission optique.

Optimisation et pérennité : comment la fibre G.654.E réduit le TCO des réseaux longue distance

En adoptant la fibre G.654.E, les opérateurs misent sur une technologie qui agit de manière fondamentale sur le débit maximum transmis sur leur infrastructure. Ils investissent donc dans la pérennité de leur infrastructure de câblage, garantissant ainsi une rentabilité à long terme et une réduction significative du coût total de possession. De manière très concrète, les propriétés intrinsèques de cette fibre, notamment sa faible atténuation et sa grande surface effective, permettent de maximiser la distance entre les répéteurs, simplifiant l'architecture du réseau et réduisant les coûts. Sur les liaisons longue distance à haut débit, cette fibre peut même, selon certains cas d'usage, permettre de réduire voire de s'affranchir totalement de l'utilisation de régénérateurs, un avantage majeur en termes de CAPEX et d'OPEX sur le réseau.

La fibre G.654.E permet également de s'affranchir de l'utilisation d'amplificateurs complexes comme les amplificateurs Raman sur des liens longhaul. Bien que ces derniers offrent une meilleure performance en matière de bruit d'amplification par rapport aux EDFA, leur mise en œuvre et leur maintenance est coûteuse et complexe. L'installation des amplificateurs Raman nécessite notamment un accès physique au câble optique en fin de section (ce qui n'est pas toujours possible selon les contrats), une qualification de la fibre sur les premiers kilomètres pour s'assurer de maximiser le gain optique, et nécessite une consommation énergétique plus élevée.

Contrairement à la fibre G.655, qui était conçue pour résoudre des problèmes technologiques, la fibre G.654.E offre de meilleures performances face aux limites fondamentales des réseaux.

¹ https://www.acome.com/sites/default/files/inspirations/pdf/whitepaper-g654e_bd.pdf

La fibre G.654.E, grâce à ses performances optiques supérieures permet ainsi d'avoir une meilleure efficacité spectrale des transmissions, d'obtenir de meilleurs marges optiques et donc une meilleure résilience ou encore d'augmenter la longueurs des spans entre amplificateurs, mais aussi une meilleure efficacité énergétique en termes de Watts consommés par Tb/s transmis, ainsi qu'une meilleure densification des équipements nécessaires à la transmission en termes de "rack unit" par Tb/s transmis.

La fibre G.654.E offre donc une simplification opérationnelle et économique majeure pour les liens terrestres longue distance par rapport aux solutions conventionnelles basées sur des fibres G.652.D associées à des amplificateurs Raman. Cette approche technologique mène à une architecture de réseau plus simple, plus flexible et plus économique, tout en offrant une capacité et une portée inégalées.

Une proposition de valeur technologique durable

Certains peuvent se demander si le sort de la fibre G.654.E ne sera pas le même que celui de la G.655. Toutefois, l'histoire ne se répète pas à l'identique. Contrairement à la G.655, qui était conçue pour résoudre les problèmes d'une technologie de transmission datant des années 1990 (avec des limites qui n'étaient alors pas connues et comprises), la G.654.E est une fibre intrinsèquement conçue pour les défis des réseaux actuels et futurs, à savoir l'approche de la limite de Shannon et les limites des technologies de traitement numérique du signal. Elle n'est pas une solution de compensation temporaire, mais une fondation durable qui complète les DSP les plus avancés. Choisir la G.654.E, c'est donc investir dans une technologie pérenne, répondant à des exigences de capacité à long terme.

La G.654.E : une fondation pérenne pour les réseaux de nouvelle génération

La fibre optique n'est pas un actif statique, mais le cœur d'un réseau en constante évolution. Face à l'augmentation exponentielle des débits, les solutions passées telles que la fibre G.655 se sont révélées obsolètes.

Aujourd'hui, les avancées en matière de DSP nous permettent d'optimiser les performances de transmission, mais nous sommes désormais confrontés à la limite de Shannon, un seuil physique que même les DSP les plus sophistiqués ne peuvent dépasser. Pour continuer à accroître la capacité des réseaux, il est impératif de repenser l'approche et d'agir sur le média lui-même: la fibre optique.

C'est ici que la fibre G.654.E apporte une réponse durable et stratégique. Grâce à ses propriétés uniques — une atténuation ultra-faible et une grande surface effective de cœur — elle améliore intrinsèquement les performances optiques et réduit les limitations physiques du support. Cette fibre permet ainsi aux équipements et aux DSP de fonctionner au plus proche de la limite de Shannon, en supportant des débits supérieurs à 1,6 Tb/s par longueur d'onde sur de longues distances.

Contrairement à la G.655, la G.654.E n'est pas une solution de compensation, mais bien une technologie plus performante intrinsèquement. Pour les liaisons backbone longue distance et les interconnexions de data centers, où chaque amélioration du rapport signal à bruit compte dans la bataille du débit maximal, la G.654.E représente l'investissement le plus judicieux. Elle garantit non seulement une capacité et une portée maximales, mais assure également un coût total de possession optimisé pour les évolutions de débit à venir.



Kevin Lenglé, Ph.D.

ACOME Group

Combinant un diplôme d'ingénieur optronique de l'ENSSAT et un doctorat en physique, Kévin Lenglé possède une solide expérience dans les TIC, allant de la recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) à la gestion de gammes de produits chez des équipementiers télécoms majeurs. Depuis son arrivée en tant que Responsable Marketing France chez ACOME en 2021, il capitalise sur son expertise en optique et télécommunications pour piloter le développement et la commercialisation de solutions de câbles optiques durables.



Découvrez notre livre blanc, co-rédigé par ACOME et Sumitomo Electric, sur l'avenir des réseaux optiques ! Alors que l'explosion du trafic de données (IA, Cloud, streaming) pousse les systèmes à 800 Gb/s et au-delà, les fibres conventionnelles G.652.D approchent leurs limites physiques sur les longues distances. Notre étude explore comment la fibre G.654.E — grâce à son diamètre de champ de mode accru et sa très faible atténuation — améliore drastiquement la performance de débit et de portée, et réduit les coûts d'exploitation en nécessitant moins de répéteurs et de régénérateurs.

Téléchargez le livre blanc pour connaître les solutions qui feront passer votre infrastructure de câblage au niveau supérieur pour un réseau évolutif et pérenne !



52 rue du Montparnasse
75014 Paris - France
T. +33 1 42 79 14 00

www.acome.com