

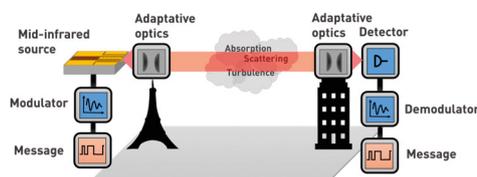
ESSOR DES COMMUNICATIONS OPTIQUES EN ESPACE LIBRE

Frédéric GRILLOT^{1,*}, Salvatore PES²

¹ Institut Polytechnique de Paris, Télécom Paris, 19 place Marguerite Perey, 91120 Palaiseau, France

² III-V Lab, 1 Av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France, France

*frederic.grillot@telecom-paris.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202412651>

L'essor des communications en espace libre transforme notre façon de partager l'information. La photonique moyen infrarouge y joue un rôle essentiel, permettant des échanges plus rapides et sécurisés, et ouvrant ainsi de nouvelles perspectives passionnantes pour les liaisons optiques.

UN PEU D'HISTOIRE

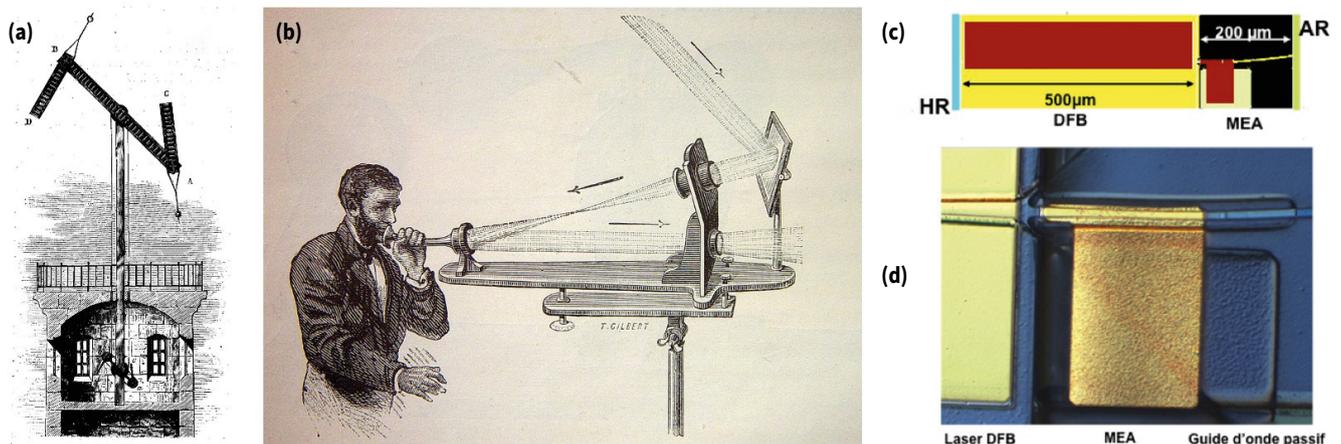
Les origines des communications optiques remontent à l'Antiquité, lorsque les gens échangeaient des informations à l'aide de signaux émis par des feux au sommet des montagnes ou à l'aide d'un phare. Au 18^e siècle, Claude Chappe, pionnier des télécommunications, a inventé le télégraphe aérien, un réseau de tours équipées de bras mobiles permettant de transmettre des messages via des positions codées (Figure 1a). Ce système a été largement utilisé

en France avant d'être remplacé par le télégraphe électrique. À la fin du 19^e siècle, Alexander Graham Bell a introduit le photophone (Figure 1b), un appareil révolutionnaire utilisant la lumière pour transmettre

des informations sonores sans fil. Le photophone modulait la lumière du soleil à travers un miroir vibrant, convertissant les vibrations sonores en variations d'intensité lumineuse. Ces variations étaient ensuite détectées par un récepteur à distance, ce qui permettait de reproduire le signal sonore. Le photophone a ainsi posé les fondations des technologies de communication optique modernes.

Au départ, la lumière se propageait principalement en espace libre, mais dans les années 1960, ●●●

Figure 1. (a) Illustration du télégraphe de Chappe ; (b) principe du photophone inventé par Graham Bell ; (c) modulateur à électro-absorption (MEA) intégré directement avec un laser à réaction distribué (DFB) ; (d) Image du composant correspondant (Source : III-V Lab).



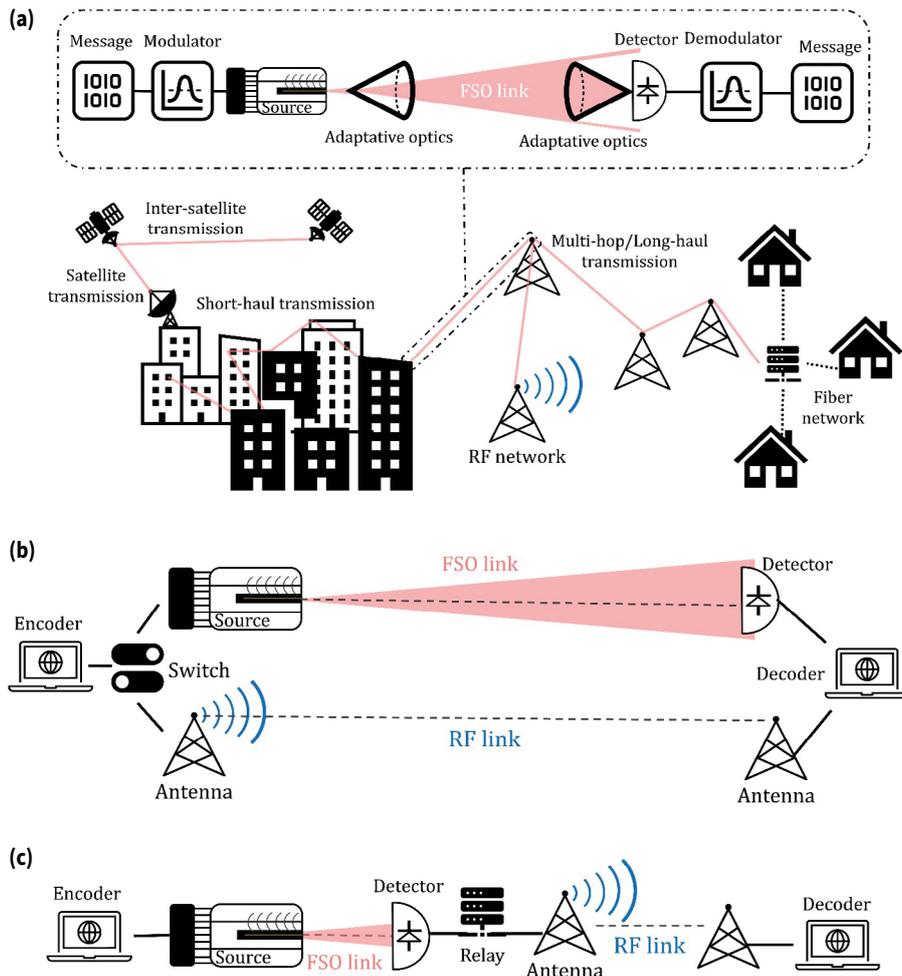


Figure 2. (a) Configuration d'un système FSO montrant la mise en œuvre différenciée, de la transmission à courte distance entre bâtiments à la communication entre le sol et le satellite. Les composants fondamentaux du système FSO sont illustrés ; (b) liaison à double saut qui incorpore à la fois les technologies RF et FSO ; (c) liaison hétérogène qui utilise à la fois les technologies FSO et RF. Credit : Pierre Didier, Thèse de Doctorat, Télécom Paris (2024)

Charles Kao et George Hockham ont révolutionné ce concept en proposant l'utilisation de fibres de verre pour guider la lumière avec de faibles pertes, ouvrant ainsi la voie à la transmission de données par fibre optique. Cependant, la fabrication de verre de haute qualité posait un problème, et ce n'est que dans les années 1970 que Corning a réussi à produire du verre de meilleure qualité, permettant ainsi le déploiement massif des fibres optiques. En 1976, AT&T a installé le premier système expérimental de fibre optique à Atlanta, utilisant

une diode laser à modulation directe. Cependant, cette technologie a rapidement rencontré des limitations en matière de bande passante et de stabilité en fréquence du laser. Dans les années 1970, la modulation externe de la lumière s'est imposée comme une solution beaucoup plus efficace. À partir des années 1980, des modulateurs à électro-absorption (EAM) intégrés directement avec des diode lasers monomode (DFB) ont vu le jour (Figure 1c), améliorant considérablement les performances des systèmes commerciaux. Aujourd'hui, bien que

l'utilisation de la fibre optique soit la méthode de communication la plus performante, elle reste néanmoins coûteuse en termes d'infrastructure et de maintenance, limitant son accessibilité dans les régions à faible densité de population.

LES COMMUNICATIONS EN ESPACE LIBRE

Les systèmes de communications en espace libre utilisent des signaux optiques ou radios pour transmettre des informations dans l'air ou dans le vide, sans support physique. Après la découverte des ondes radio par Heinrich Hertz au 19^e siècle, Guglielmo Marconi a réalisé en 1901 une transmission historique entre Terre-Neuve et l'Angleterre. Cet exploit a marqué une avancée majeure dans les communications sans fil et a ouvert la voie à aux communications radios longue distance. Aujourd'hui, l'utilisation des radiofréquences (RF) est essentielle pour de nombreuses applications allant de la radiodiffusion à l'internet sans fil en passant par les réseaux mobiles. Les bandes RF de 1 GHz à 100 GHz sont la norme pour les réseaux 4G et 5G. Néanmoins, les systèmes RF proposent des débits limités (100-1000 Mbit/s) et nécessitent l'obtention de licences pour les bandes de fréquence en raison des interférences électromagnétiques. De plus, les débits diminuent avec la densité des utilisateurs et les conditions atmosphériques défavorables.

En revanche, l'optique offre une solution prometteuse pour le développement de systèmes en espace libre à haut-débit, à faible coût et nécessitant une infrastructure minimale. En effet, les liaisons optiques en espace libre (FSO) sont capables de transmettre des informations sur des distances variant de quelques centaines de mètres à des dizaines de milliers de kilomètres, ce qui les rend adaptées à diverses applications terrestres, aériennes, spatiales et inter-satellites

(figure 2a). Un système FSO utilise une source optique modulée (diode laser) dont le faisceau est corrigé par de l'optique adaptative afin de compenser les turbulences atmosphériques. Le signal traversant l'atmosphère, est reçu par un détecteur et démodulé pour récupérer l'information transmise (figure 2a). Les systèmes FSO actuels exploitent les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge. Le signal optique émis par le laser étant directionnel, il est naturellement discret, ce qui le rend difficile à détecter. Enfin, les systèmes FSO ont une meilleure efficacité énergétique et peuvent être déployés rapidement et à moindre coût, même dans des environnements complexes.

Pour assurer une communication sans faille, même dans des conditions difficiles, un système hybride tirant parti du mariage des technologies FSO et RF constitue bonne alternative. Dans les cas où la communication est interrompue en raison d'obstacles ou de conditions météorologiques défavorables, le système peut alors commuter de l'optique vers la RF, assurant ainsi une connexion ininterrompue (figure 2b). Bien que les liaisons RF puissent également être affectées par des phénomènes atmosphériques, elles sont souvent moins susceptibles d'être influencées par ces conditions, en particulier à des fréquences plus basses. Pour pallier à ce problème, le système FSO peut être utilisé, dans certaines conditions, comme méthode de communication principale, tandis que le système RF sert de relais en cas de perturbation ou de conditions météorologiques défavorables susceptibles de limiter le débit (figure 2b). Un système FSO/RF trouve des applications dans divers domaines, notamment les communications militaires, les réseaux cellulaires et l'accès à l'internet à haut débit dans les zones urbaines. Sa capacité à fournir des communications à large bande et son adaptabilité à différentes conditions environnementales en font un choix privilégié dans les scénarios où la fiabilité et la continuité de la connectivité sont primordiales. Une troisième approche

pourrait être envisagée, où les données sont d'abord transmises via une liaison FSO (Figure 2c). Cependant, pour surmonter les limitations des liaisons FSO telles que la nécessité d'une communication en visibilité directe, la transmission RF est utilisée pour le dernier tronçon de la communication, permettant ainsi de transmettre les données à l'utilisateur final.

La sélection des longueurs d'onde appropriées pour les systèmes FSO repose sur les fenêtres de transparence de l'atmosphère (Figure 3a), qui sont des zones où l'absorption atmosphérique est minimale. Ces fenêtres de faible absorption sont déterminées par la composition moléculaire de l'air. L'absorption des photons par les molécules atmosphériques provoque des transitions électroniques vers des niveaux d'énergie électronique vibrationnelle ou rotationnelle plus élevés, avec des transitions spécifiques dépendant de la molécule. Il existe plusieurs bandes de faible absorption dans le spectre infrarouge. Notamment, les longueurs d'onde du proche infrarouge autour de 1,55 microns (SWIR) mais aussi la fenêtre du moyen infrarouge (MIR) entre 3 et 5 microns (MWIR), et entre 8 et 14 microns (LWIR). La disponibilité de transmetteurs et de détecteurs de haute qualité fonctionnant dans la fenêtre du proche infrarouge fait de la longueur d'onde optique de 1,55 microns un choix naturel pour les systèmes d'optique en espace libre. Une équipe internationale a récemment accompli une démonstration remarquable dans le domaine de la transmission en espace libre à cette longueur d'onde. Ils ont atteint une vitesse de transmission record de 1 Tbit/s sur une distance de 53 km, avec un dénivelé d'environ 2900 mètres (Figure 3b) [1]. Cette prouesse a été accomplie grâce à un mélange astucieux de techniques alliant détection cohérente, amplification optique, multiplexage en longueur d'onde, optique adaptative, ainsi que de la correction d'erreur. Enfin, la photonique silicium permet aujourd'hui de développer des compensateurs de turbulence efficient à 1,55 microns. La mise en œuvre d'un tel système est ●●●

25 + 26 September 2024
Jena, Germany



Visit
us!

Marketplace for
High-tech innovations

Optics, photonics,
electronics & mechanics



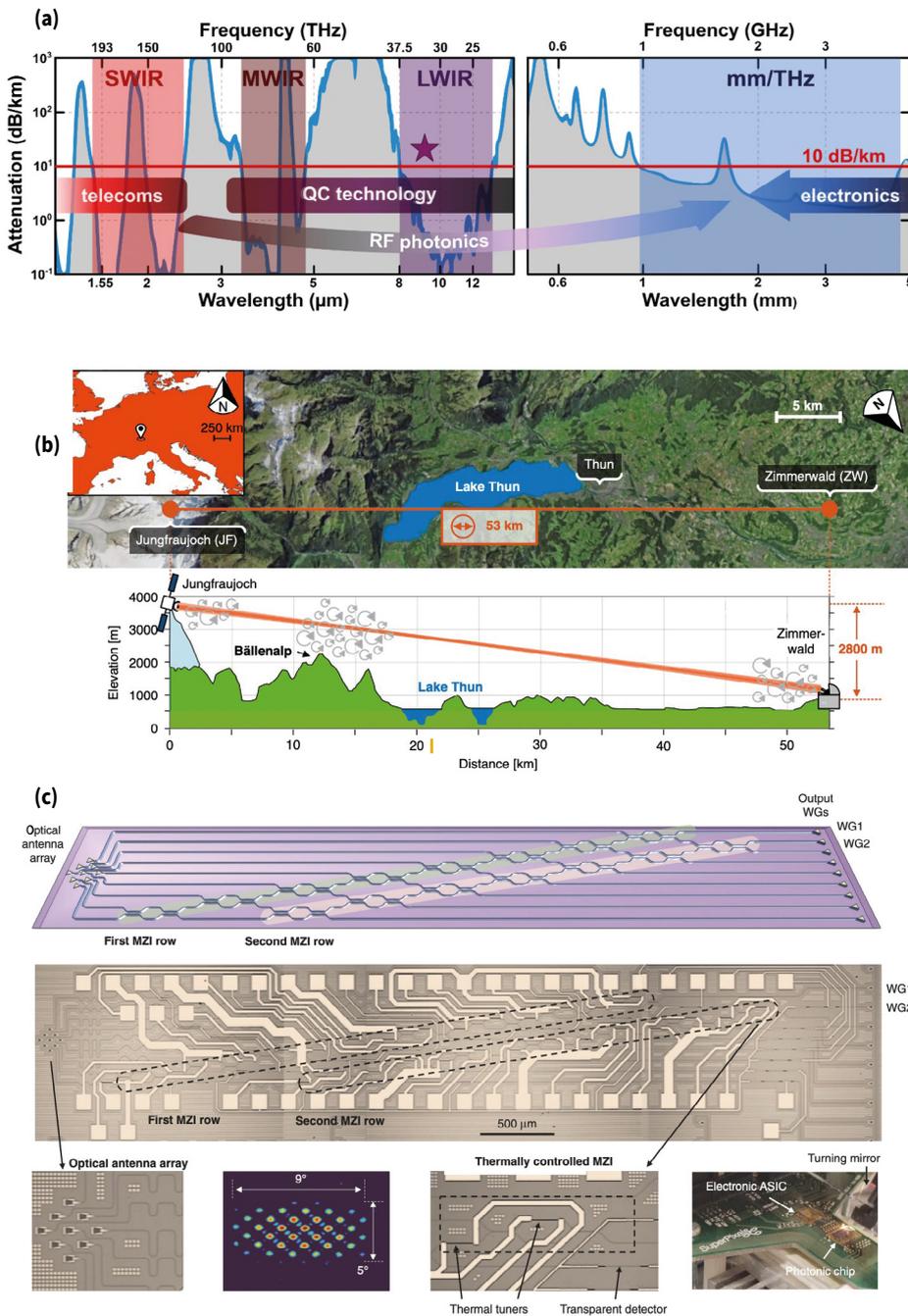


Figure 3. (a) Atténuation atmosphérique en fonction de la longueur d'onde, calculée pour une propagation horizontale à niveau du sol et un taux d'humidité de 50% (Source : HITRAN). Les différentes fenêtres de transmission sont indiquées ; (b) Topographie de la liaison FSO de 53 km avec turbulence ainsi qu'une vue aérienne de l'expérience et du profil d'élévation correspondant [1] ; (c) Photo du processeur photonique pour la compensation de la turbulence atmosphérique [2].

constituée d'un maillage d'interféromètres Mach-Zehnder accordables directement intégrés sur un circuit silicium (Figure 3c). L'algorithme de compensation du signal associé au processeur photonique permet

de restaurer la puissance du signal optique même en présence de fortes turbulences, ce qui constitue une avancée prometteuse pour le développement des liens FSO dans la région du SWIR [2].

LA PHOTONIQUE MOYEN INFRAROUGE

Dans le cas de liaisons soumises à des conditions météorologiques variables ou dégradées, la transmission du signal dans la gamme spectrale du MWIR et du LWIR présente des avantages significatifs [3, 4]. Ces longueurs d'onde offrent une résilience accrue par rapport au SWIR et aux ondes RF, ce qui se traduit par une meilleure disponibilité du canal de communication. En effet, ces grandes longueurs d'onde sont moins sensibles à la diffusion causée par les aérosols et les turbulences atmosphériques, ce qui permet une transmission plus stable du signal. Cet avantage majeur s'ajoute à des potentialités inégalées en termes de furtivité grâce à la faible diffusion de Mie et la présence d'un fond continu de photons incohérents ce qui permet de noyer le signal optique dans le bruit thermique, tout en gardant des fréquences de porteuse optique compatibles avec un transfert de données à haut débit. Parmi les nouvelles applications de la photonique MIR, on retrouve notamment les communications FSO ainsi que le développement de systèmes de détection optique avancés (LiDAR). L'intérêt pour les communications optiques dans la région du MIR est apparu simultanément avec les premiers développements des lasers à cascade quantique (QCL). Ces lasers, démontrés pour la première fois en 1994, sont des dispositifs à semi-conducteurs unipolaires où l'émission stimulée se produit *via* des transitions électroniques très rapides (sub-picoseconde) entre des états d'énergie discrets de la bande de conduction (Figure 4a). Grâce à une ingénierie quantique de la structure de bande, la longueur d'onde d'un QCL peut être accordée sur une large plage spectrale, allant de 3 microns jusqu'à des centaines de microns. Ils offrent ainsi un haut degré de liberté dans la région de l'infrarouge moyen du spectre électromagnétique. Des sources QCL de

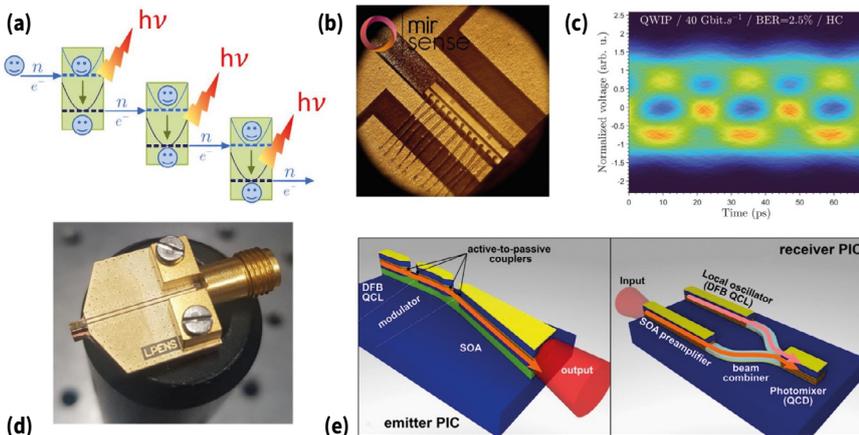
**Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance,
Innovation**

faible largeur de raie, largement accordables, et fonctionnant à température ambiante sont aujourd'hui disponibles commercialement (Figure 4b), tout en produisant une puissance de sortie allant de quelques centaines de milliwatts avec des DFB, jusqu'à plusieurs watts avec des lasers Fabry-Perot.

Les efforts visant au développement de solutions FSO dans le MIR suivent actuellement plusieurs approches technologiques, présentant chacun des avantages et inconvénients. On peut citer la conversion non-linéaire de fréquence SWIR-MIR, qui bénéficie de l'abondance de composants matures issus de la filière télécom, des formats de modulation classiques en phase et amplitude, et des techniques de multiplexage en longueur d'onde ou spatiale. En contrepartie, cette solution est intrinsèquement limitée par un rendement de conversion réduit et par la difficulté de miniaturisation, et donc d'intégration dans des systèmes photoniques compacts. Une deuxième approche consiste à utiliser des composants unipolaires discrets issus de la technologie à cascade quantique. Une étude récemment démontré des transmissions de données très prometteuses en associant un QCL, un modulateur Stark, et un détecteur QWIP

(Quantum Well Infrared Photodetector) dans le LWIR à 9,3 microns, mettant en évidence les potentialités de la technologie unipolaire (Figures 4c-d) [5]. Cette avancée est à la base des futurs développements visant leur intégration dans des plateformes de photonique intégrée. Mis au point plus récemment, les lasers interbandes à cascades quantiques (ICL) exploitent des transitions radiatives entre la bande de conduction et la bande de valence. Ils offrent une alternative intéressante au QCL de par leur faible consommation ainsi qu'un large choix de longueurs d'onde jusqu'à 7 μm . Des débits relativement élevés ont été récemment obtenus avec des ICL modulés directement et des photodétecteurs interbandes en cascade (ICIP) dans la fenêtre 3-5 microns [6]. Cependant, même si les avancées technologiques des sources QCL et ICL sont très encourageantes, le principal obstacle au développement des systèmes FSO/LiDAR reste fondamentalement lié aujourd'hui à un manque de briques de base complémentaires. En effet, l'absence de dispositifs photoniques commerciaux tels que des modulateurs électro-optiques de phase ou d'amplitude, des amplificateurs optiques ou des détecteurs rapides est fortement pénalisante pour le développement ●●●

Figure 4. (a) Illustration de la structure de bande d'un laser à cascade quantique ; (b) Image d'un laser QCL (Crédit : mirSense), (c) Transmission à 40 Gb/s obtenue avec un QCL, un QWIP et un modulateur Stark opérant à 9,3 microns [5]. (d) Image d'un modulateur Stark LWIR (Crédit : LPENS Paris) ; (e) Illustration artistique d'une plateforme hétérodyne pour le moyen infrarouge intégrant les concepts des circuits photoniques intégrés et des dispositifs à cascade quantique (source : projet H2020 cFLOW, <https://cfLOW-project.eu/>).



PHOTOMÈTRE
OFDR LASER EDFA
SWITCH DAS BOSA OSA DTS
COMPOSANTS FBGI
TLS VOA



INFOS www.wavetel.fr
DÉMO about.wavetel.fr



desdites applications. Ces objets manquent dans la perspective de leur co-intégration dans des plateformes de type émetteur-récepteur.

La troisième solution est effectivement celle qui s'intéresse directement au développement de la photonique intégrée MIR. Deux choix principaux sont alors possibles : d'une part l'intégration hétérogène de composants discrets dans une plateforme commune, permettant l'optimisation indépendante des différentes fonctions optiques, de l'autre l'intégration monolithique de composants dans la même plateforme, qui permettrait de bénéficier d'une miniaturisation ultime, de coûts limités et d'une fiabilité du système accrue. Ces deux approches sont schématisées dans la Figure 4^e, où les concepts de circuits intégrés photoniques sont rassemblés pour réaliser une plateforme hétérodyne dans le MIR, composée d'un émetteur et d'un récepteur intégrant les éléments de base de la technologie à cascade quantique. L'émetteur présente un schéma d'intégration hétérogène, où les briques de bases sont intégrées sur un support hôte par de techniques de collage de type « flip-chip », alors que le récepteur est basé sur l'intégration monolithique d'un oscillateur local (QCL-LO), d'un détecteur à cascade quantiques (QCD) et des fonctions de routage optique au sein de la même puce optique. Une telle approche est possible dans la filière de matériaux InGaAs/AlInAs sur InP, qui est désormais assez mature pour pouvoir envisager dès aujourd'hui la réalisation de circuits photoniques intégrés dans le MIR.

Malgré ses nombreux avantages, les liens FSO ne bénéficient pas de la protection des données assurée par la couche physique du canal de propagation. La diffusion croissante d'informations sensibles et la menace constante de la cybercriminalité obligent à rechercher des solutions ingénieuses pour garantir la sécurité des données. La distribution optique de clés quantiques (QKD)

en espace libre est une technologie prometteuse en raison du haut niveau de sécurité assuré par les propriétés intrinsèques de l'intrication quantique. Cependant, elle demeure encore limitée par les performances des appareils de transmission, qui peuvent offrir des débits limités, un rendement restreint et un coût élevé. En outre, cette technologie n'est pas encore disponible au MIR en raison de l'absence d'émetteurs et de détecteurs de photons unique. Pour pallier ces obstacles, la cryptographie par chaos est un outil très attractif pour sécuriser l'information, bénéficiant accessoirement de la furtivité accrue du rayonnement thermique. Avec ce protocole, il est possible d'intégrer un message dans une porteuse chaotique du signal émetteur. Le déchiffrement du message est réalisé grâce à la synchronisation de chaos entre deux QCL similaires, puis en calculant la différence entre la sortie synchronisée du laser récepteur avec celle du signal transmis par l'émetteur. La toute première communication cryptée par chaos a été réalisée avec dans le MWIR à 5,6 microns [7], puis très récemment dans le LWIR à 9,3 microns [8]. Cette dernière configuration peut être utilisée pour des applications où la protection du message transmis est cruciale mais où des débits de données élevés ne sont pas indispensables, comme les applications militaires ou les transmissions sol-satellite.

CONCLUSIONS

Les télécommunications optiques en espace libre représentent une alternative intéressante face à la saturation progressive des canaux dédiés aux technologies sans fil et aux exigences croissantes en matière de largeur de bande. Il existe manifestement un fort intérêt sociétal à proposer des solutions alternatives pour contrer les limitations atmosphériques et augmenter la portée des systèmes de télécommunications optiques, même dans un environnement dégradé. Les technologies optoélectroniques actuelles permettent d'envisager le développement de telles liaisons sécurisées, à haut-débit lesquelles peuvent être combinées aux systèmes de communication RF. En particulier, les progrès récents des plates-formes intégrées MWIR et LWIR permettront de faire progresser ces systèmes de communication. Il s'agira notamment d'accroître les performances en développant les communications cohérentes, de pousser l'intégration photonique et le multiplexage en longueur d'onde. La conception de nouveaux composants (modulateurs, amplificateurs, détecteurs ultrarapides) jouera un rôle essentiel. Enfin, le perfectionnement des méthodes de filtrage et l'application de techniques de correction du front d'onde pour compenser les effets de la diffusion et de la turbulence seront également nécessaires. ●

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Horst *et al.*, *Light: Sci. Appl.* **12**, 1 (2023)
- [2] S. SeyedinNavadeh *et al.*, *Nat. Photonics* **18**, 149 (2024)
- [3] A. Delga *et al.*, *Proc. SPIE* **10926**, 1092617 (2019)
- [4] R. Martini *et al.*, *Electron. Lett.* **37**, 191 (2001)
- [5] P. Didier *et al.*, *Adv. Photon.* **4**, 056004 (2022)
- [6] P. Didier *et al.*, *Photonics Res.* **11**, 582 (2023)
- [7] O. Spitz *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 3327 (2021)
- [8] P. Didier *et al.*, *Optica*. **11**, 626 (2024)