



**Communications optiques et RF :  
une complémentarité pour les  
réseaux de demain**



## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1. Optique et RF : une référence technologique</b>	<b>2</b>
1.1. Débit : le nerf de la guerre des télécommunications	2
1.2. Diffusion large ou ciblée : le problème des interférences et de la sécurité des transmissions	3
1.3. Le prix croissant des fréquences	4
<b>2. Le passage à l'optique</b>	<b>5</b>
2.1. Les turbulences atmosphériques : une limitation de l'optique en espace libre	6
2.2. L'optique adaptative, une technologie historique mais complexe, héritée de l'imagerie	7
2.3. Compenser autrement les turbulences atmosphériques : le MPLC pour décomposer la lumière	7
2.4. Recombinaison photonique : pour lier tous les signaux	9
2.5. Etude de cas	10
<b>Conclusion</b>	<b>11</b>

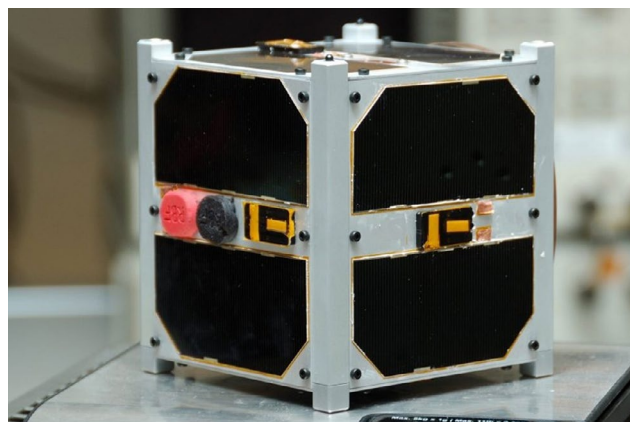
## Introduction

L'écosystème spatial est aujourd'hui dans une nouvelle dynamique d'expansion qui correspond à un accès facilité à l'espace. Alors que les satellites et les lanceurs orbitaux étaient jusqu'à récemment opérés par des puissances étatiques, de nombreuses entreprises (comme Hemeria et Unseenlabs côté satellites ou SpaceX et RocketLab côté lanceur) sont aujourd'hui en mesure de concevoir, fabriquer et lancer ces objets à la pointe de l'innovation.

Cette dynamique et agilité nouvelle, régulièrement traduite dans le terme NewSpace, permet de répondre à des besoins forts, en télécommunication d'abord, avec l'objectif d'un accès Internet dans le monde entier, mais également en observation de la Terre depuis l'espace, un secteur lié aux enjeux environnementaux, économiques et géostratégiques.

Ce développement de l'industrie spatiale se traduit par l'explosion du nombre de satellites en orbite au sein de constellations grâce notamment à de petits satellites plus faciles à concevoir et à lancer, appelés SmallSat. Cependant, pour opérer ces satellites, il est indispensable de disposer de nouvelles infrastructures au sol capables de réaliser des liaisons de communications ou de recueillir les données d'observation.

Les communications entre les satellites et avec le sol se font majoritairement par ondes radiofréquence (RF). Celles-ci présentent de nombreux avantages, mais tendent vers des limites physiques en termes de débit et de fréquences disponibles.



Nanosatellite ESTCube-1 de taille 1U (10x10x10 cm<sup>3</sup>).  
Crédit [https://en.wikipedia.org/wiki/Small\\_satellite](https://en.wikipedia.org/wiki/Small_satellite)

Les opérateurs se tournent donc vers de nouvelles technologies comme les communications optiques en espace libre ou communications laser qui utilisent la lumière comme vecteur de transmission de l'information. Propager une information sécurisée à très haut débit à la vitesse de la lumière est en effet ce que permettent les communications optiques en espace libre.

Ce livre blanc explore, dans un premier temps, les complémentarités entre télécommunications optiques et radiofréquences et les besoins qui poussent les opérateurs à déployer des réseaux hybrides. Il expose ensuite les limitations causées par la turbulence atmosphérique et les techniques de compensation permises par la technologie MPLC (Multi-Plane Light Conversion) qui améliorent la robustesse des liens.



# 1

## Optique et RF : une référence technologique

### 1.1. Débit : le nerf de la guerre des télécommunications

Encore renforcés par la crise sanitaire de la Covid-19, les réseaux de télécommunications sont devenus centraux pour assurer l'ensemble des usages de notre société, que ce soit pour échanger avec nos proches, consulter des médecins, travailler, contacter des commerces locaux ou grandes enseignes, lire les informations, visiter des musées, écouter de la musique, regarder des films, ou même prévoir (ou non) nos déplacements pour les vacances. Tous les pans de notre société, de la santé à la défense, de la culture à l'alimentation, sont désormais numérisés et utilisent les réseaux télécoms.

Fort de ce constat, se pose désormais la question suivante : comment garantir une connexion au réseau à tous alors que 50% des habitants de la planète n'y ont pas accès ?

Une des solutions pour répondre à cet enjeu et qui émerge grâce au NewSpace, est d'utiliser des constellations de satellites pour déployer des réseaux hauts débits, en complément des réseaux fibrés.

Actuellement, les communications au sein des constellations de satellites se font majoritairement via des ondes en radiofréquence. Les débits effectifs se situent aux alentours de quelques centaines de Mb/s. Malheureusement, là où, il y a encore quelques années,

ces débits suffisaient à assurer les échanges entre satellites ou avec la terre, les canaux RF classiques sont désormais saturés. Le déploiement de l'internet satellitaire ou les missions d'observation de la terre génèrent d'importantes quantités de données qu'il faut transmettre. Pour faire face à ces besoins, les débits doivent parfois dépasser le Gb/s voire la dizaine de Gb/s et s'appuyer sur les technologies optiques héritées des communications fibrées.

Les technologies optiques, qu'elles soient fibrées ou non, disposent d'une capacité de débit inégalée. En espace libre, un lien de 10,45 km avec un débit de 13,16 Tb/s a ainsi été réalisé par les équipes du DLR (centre aérospatial Allemand). Si ces débits sont encore loin des 10,16 Pb/s obtenus sur fibre<sup>1</sup> ils sont plus de 2000 fois supérieurs aux autres technologies sans fil, comme les radiofréquences, où les meilleurs liens longue distance atteignent au mieux des débits de 6 Gb/s sur 40 km.

Dans les futurs réseaux, les communications laser permettront de lever un énorme verrou sur le débit. Bien sûr, la RF, aujourd'hui encore plus fiable et mature conservera son utilité sur les opérations critiques, comme le contrôle et la commande des satellites, tandis que l'optique servira d'autoroute de la donnée.



Constellation de satellites en orbite autour de la Terre

<sup>1</sup> D. Soma et al., "10.16-Peta-B/s Dense SDM/WDM Transmission Over 6-Mode 19-Core Fiber Across the C+L Band" Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 16, pp. 1362-1368, 2018.



## 1.2. Diffusion large ou ciblée : le problème des interférences et de la sécurité des transmissions

Dans nos vies quotidiennes, les ondes radio sont souvent associées à une diffusion large de l'information au plus grand nombre de personnes possible. Elles sont ainsi appréciées pour leur dimension multi-interlocuteurs et très avantageuses dans le cadre d'un écosystème composé de plusieurs acteurs. On pense par exemple aux ondes FM pour écouter notre radio favorite.

En revanche, cette dimension multi-interlocuteurs devient problématique dans le cadre d'une transmission sécurisée. Les ondes radio étant peu directionnelles, il est très aisé d'intercepter le signal et de localiser l'émetteur. Ce point est évidemment critique dans le cas d'interventions militaires, mais pas uniquement.



*Constellation de satellites échangeant des données en radiofréquence, ce qui crée des interférences*

Des ondes radios de même fréquence et issues de sources différentes peuvent interférer et dégrader la qualité de la transmission. C'est désagréable lorsque notre autoradio bascule d'une station à l'autre, mais beaucoup plus gênant dans le cadre du déploiement de la 5G sur les fréquences 26 Ghz, historiquement utilisées dans le domaine spatial par les opérateurs satellites, le CNES ou la défense.

On peut penser également aux constellations de satellites, qui, par définition, impliquent la communication permanente et simultanée de nombreux interlocuteurs.

Si SpaceX déploie les 12 000, voire 42 000 satellites prévus, il sera nécessaire de gérer habilement les bandes de fréquences. Les liaisons optiques permettront de désengorger les fréquences RF pour gagner en fiabilité, mais aussi de garantir la furtivité des liaisons.

Les faisceaux optiques sont localisés spatialement avec une faible divergence et ne sont pas cohérents lorsqu'ils sont émis depuis des lasers différents. Ils permettent donc de réaliser des liaisons entre satellites ou avec la terre, sans limitation due aux interférences. D'autre part, la faible étendue du faisceau garantit sa discrétion. Il est très difficile de détecter un faisceau laser infrarouge sans savoir sa position. Surtout, ces faisceaux sont très difficilement interceptables et donc présentent intrinsèquement une sécurité accrue par rapport à la RF. A terme, les technologies optiques pourront également bénéficier des avancées de l'optique quantique pour garantir des liaisons totalement inviolables.

### 1.3. Le prix croissant des fréquences

Enfin, les communications via des ondes RF constituent un coût récurrent important. En effet, l'utilisation des fréquences concernées par les ondes RF est soumise à autorisation et requiert le paiement d'une redevance pour une certaine bande de fréquences. Cette redevance peut atteindre des sommes importantes, comme on a pu l'observer récemment lors de la mise aux enchères des bandes de fréquences utilisées pour la 5G. La redevance totale payée par les opérateurs français de téléphonie mobile atteint quasiment les 3 milliards d'euros<sup>3</sup>.

Candidat	Bouygues Telecom	Free Mobile	Orange	SFR	Total
Fréquence	3570 - 3640 MHz	3640 - 3710 MHz	3710 - 3800 MHz	3490 - 3570 MHz	-
Quantité de fréquence	70 MHz	70 MHz	90 MHz	80 MHz	310 MHz
Montant	602 000 000 €	605 096 245 €	854 000 000 €	728 000 000 €	2 789 096 245 €

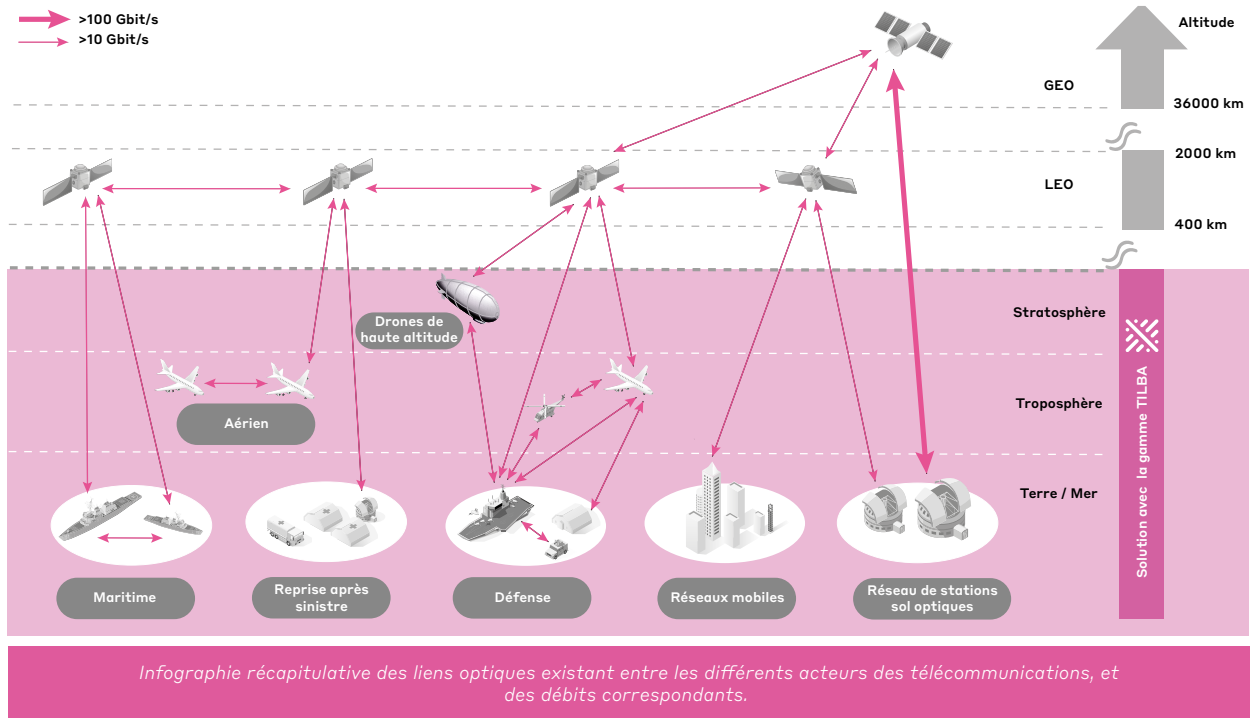
*Redevances payées par les opérateurs français de télécommunications pour opérer en 5G.*

Les liaisons optiques n'empiètent pas spectralement sur des bandes de fréquence déjà allouées. Elles n'engendrent donc pas de conflit de bande passante, d'interférence entre sources et ne nécessitent pas de licence, comme c'est le cas pour les radiofréquences. Il est dès lors possible d'établir une connexion ultra rapide entre deux points simplement en installant un émetteur et un récepteur optique sans nécessiter une autorisation spécifique. Deux bâtiments peuvent, par exemple, être connectés de manière sécurisée et très haut débit (connexion LAN) même s'ils ne sont pas reliés par une fibre.

<sup>2</sup> <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g/frequences-5g-procedure-dattribution-de-la-bande-34-38-ghz-en-metropole.html>

## 2 Le passage à l'optique

Les débits proposés, les possibles interférences et les coûts conséquents incitent à envisager de nouvelles solutions hybrides pour fiabiliser les échanges de données. L'une des solutions est l'utilisation des communications optiques.



Les communications laser en espace libre s'illustrent comme un formidable outil pour propager une information très haut débit là où la fibre n'est pas aisément déployable. Certains géants du numérique comme Facebook ou Google étudient déjà la possibilité de diffuser largement internet dans les zones non fibrées à l'aide de ces technologies. Un contrat entre Alphabet et l'Etat de l'Andhra Pradesh en Inde a par exemple été signé pour tester cette approche sur le terrain. Dans l'espace, les liaisons optiques inter-satellite pour les constellations sont déjà en train de devenir la norme, notamment pour s'affranchir des problèmes d'interférences et de saturation du spectre RF.

Technologie	RF	Réseaux fibrés	FSOC
Débit type	<1 Gb/s	>10 Gb/s	>10 Gb/s
Mobilité	Oui	Non	Oui
Coût	Faible	Important	Faible
Infrastructure	Non	Oui	Oui
Peut être intercepté	Oui	Difficilement	Difficilement
Bande de fréquence spécifique	Oui	Non	Non
Sensible aux conditions extérieures	Non	Non	Oui

Tableau récapitulatif des caractéristiques des communications en RF, en espace libre et dans les réseaux fibrés.

<sup>3</sup> M. Merky, « Alphabet : un accès à Internet grâce à la technologie laser » 23 12 2017.



Malheureusement, le déploiement à grande échelle de ces systèmes est limité par l'influence des perturbations atmosphériques. En effet, quand le faisceau est émis par le satellite vers la station sol, il est soumis à des turbulences qui peuvent entraîner sa déformation et donc une perte d'information à la réception. Pour contrer ce phénomène, des technologies sont étudiées, notamment l'optique adaptative.

## 2.1. Les turbulences atmosphériques : une limitation de l'optique en espace libre

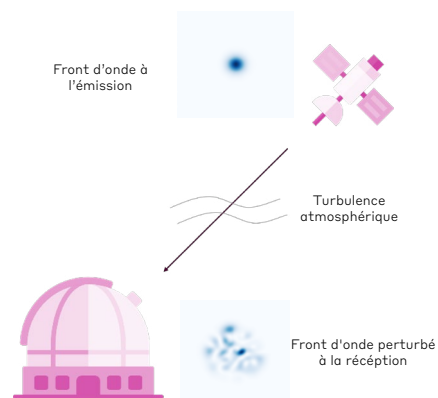
Comme indiqué dans l'ouvrage de référence d'Andrews and Phillips<sup>4</sup>, les communications terrestres en espace libre sont sujettes à un facteur limitant important qu'est la perturbation atmosphérique. Au-delà de restrictions évidentes mais marginales comme la présence d'objets pouvant bloquer la propagation du faisceau, de nombreux facteurs peuvent atténuer l'intensité du signal.

C'est le cas notamment de la fumée en zone de guerre ou de sinistre, mais aussi plus communément du brouillard ou de la pluie. L'intensité lumineuse déterminant le rapport signal-sur-bruit (SNR), donc le débit, ces pertes sont fortement préjudiciables. C'est particulièrement le cas pour des applications longues distances, où l'atténuation peut se révéler importante.

Surtout, l'atmosphère n'est pas un milieu parfaitement homogène. De légères différences de pression, de température ou de composition modifient localement l'indice de réfraction de l'air et dévient les différents trajets optiques du faisceau. Le front d'onde, c'est-à-dire la forme d'un faisceau optique, est modifié continuellement et de manière aléatoire durant sa propagation dans l'atmosphère comme illustré ci-dessous.

Ces perturbations influent sur la forme, la qualité (la phase) et l'intensité du faisceau lumineux collecté et dégradent la qualité du lien. D'autre part, pour être détectée efficacement, la lumière est généralement collectée dans une fibre optique télécom standard, dite fibre monomode (SMF). Si pour des liaisons plus bas débit, des solutions multimodes peuvent exister, dès qu'il est question de très haut débit (supérieur à quelques gigabits par seconde) ou de modulation cohérente, le couplage dans une fibre monomode est indispensable.

Ces dernières, largement utilisées dans l'industrie des télécommunications, sont compatibles avec une très large variété de composants : sources, amplificateurs, détecteurs, bénéficiant d'une grande maturité technologique. Malheureusement, lorsque le front d'onde du faisceau est perturbé, celui-ci se couple moins bien dans les fibres monomodes, entraînant à nouveau des pertes qui dégradent d'autant la qualité du signal.



*Un faisceau se propageant au travers de l'atmosphère est déformé par la turbulence*

<sup>4</sup> L. Andrews and R. Phillips, Laser Beam Propagation Through Random Media, Washington: SPIE Press, 2005. <https://spie.org/Publications/Book/626196?SSO=1>

## 2.2. L'optique adaptative, une technologie historique mais complexe, héritée de l'imagerie

Des approches historiques existent pour compenser ces défauts. L'optique adaptative est par exemple une technique permettant de s'affranchir des déformations du faisceau. Héritée de l'astronomie, elle consiste à reformer le front d'onde à l'aide d'un miroir déformable. Le schéma ci-dessous représente un fonctionnement typique d'optique adaptative. Le signal incident est envoyé sur le miroir déformable qui corrige les déformations du front d'onde. Une fraction du signal corrigé est envoyée vers un analyseur de front d'onde permettant de caractériser en temps réel la qualité de ce dernier. Enfin, l'autre fraction de lumière est envoyée dans la fibre optique vers le récepteur

télécom. Pour cette étude, un photodétecteur à grand champ est aussi utilisé pour mesurer l'intensité totale du front d'onde dans le plan focal.

Si cette technologie répond bien au problème de déformation du front d'onde par la turbulence, elle présente cependant des limitations. Développée à l'origine pour l'observation de l'espace, elle n'est pas spécifiquement adaptée aux communications optiques en raison notamment de son coût, de sa complexité et des éléments mobiles qui la composent et qui rendent complexe un déploiement à grande échelle et dans des environnements sévères.

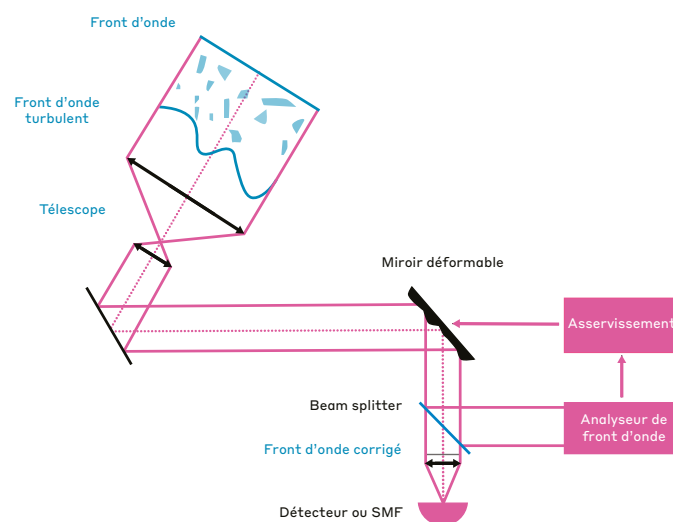


Schéma de principe d'un système d'optique adaptative standard

## 2.3. Compenser autrement les turbulences atmosphériques : le MPLC pour décomposer la lumière

L'approche du MPLC (Multi-Plane Light Conversion), technologie au cœur de TILBA-ATMO, diffère de l'optique adaptative, bien que sa fonction soit similaire. L'objectif n'est pas de compenser activement le front d'onde, mais plutôt de collecter l'ensemble de la lumière et de la transformer passivement en des modes spatiaux utilisables. Une onde lumineuse peut en effet être décomposée sur une base de modes. Dans le cas présent, nous avons choisi des modes Hermite-

Gauss. Le MPLC permet de collecter ces différents modes de perturbation et de les démultiplexer dans autant de fibres monomodes. La dynamique de la turbulence existe toujours, mais se traduit par des variations de phase et d'intensité des modes qui eux, sont figés. Après démultiplexage, ces variations se traduisent donc par des modifications de phase et d'intensité des signaux respectifs mais dans les fibres monomodes.

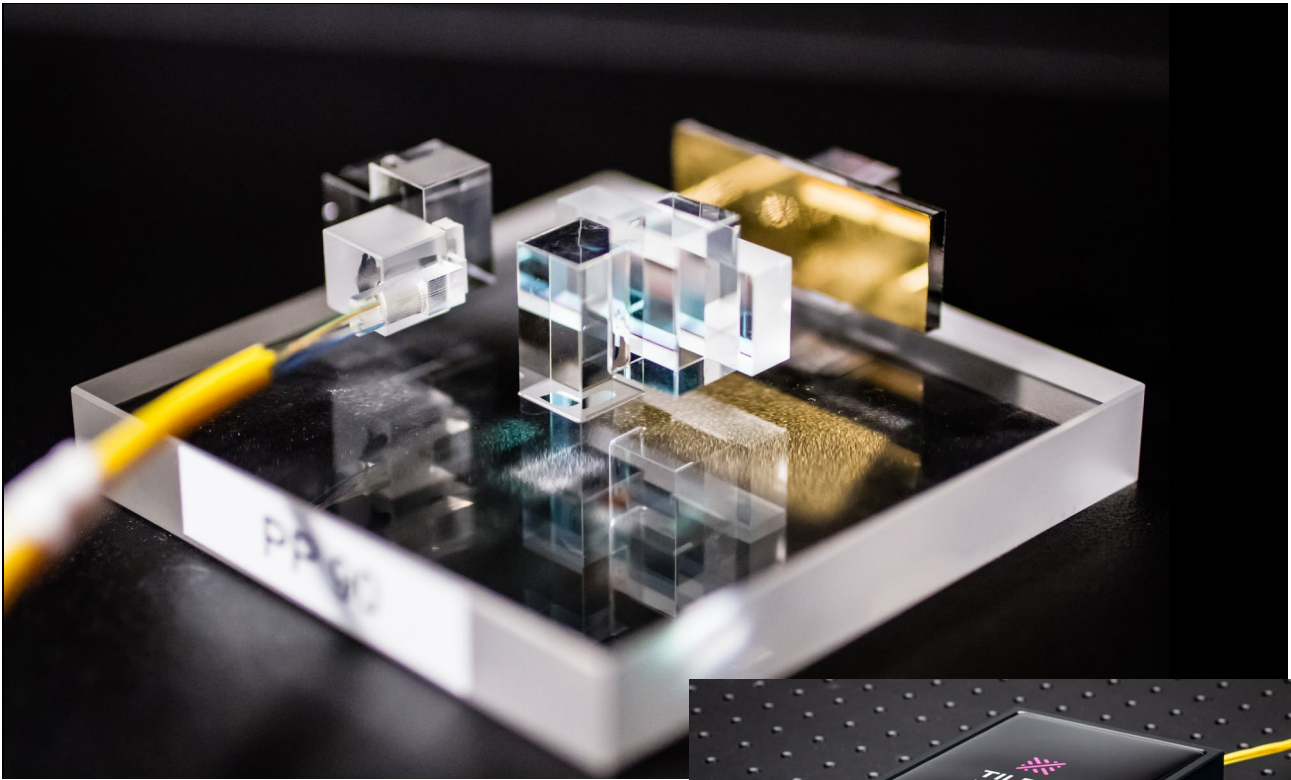
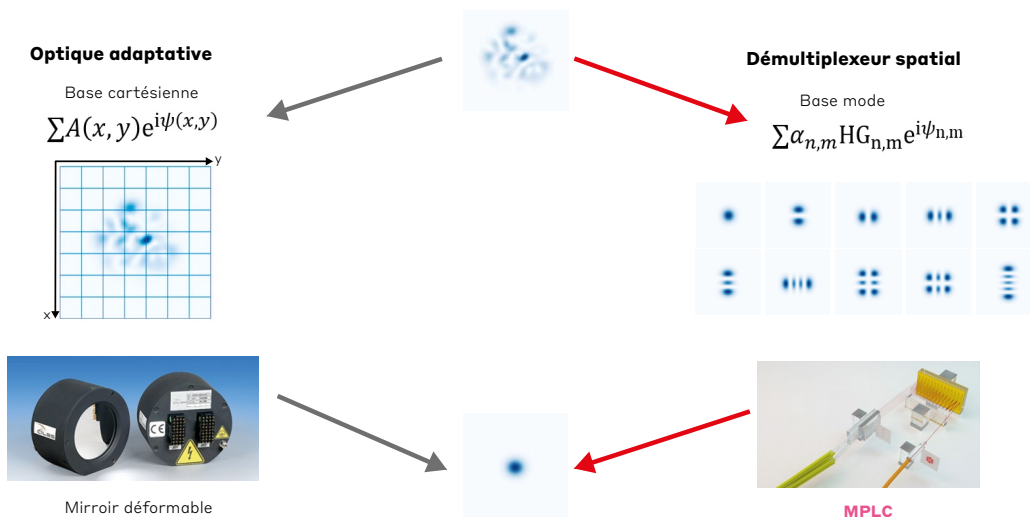


Photo de l'entrée MPLC d'un dispositif TILBA-ATMO

Cette approche passive permet de compenser le déphasage dans les fibres plutôt qu'avec des éléments mécaniques qui sont intrinsèquement limités en rapidité. Notons enfin que l'optique adaptative utilise aussi des bases de modes de phase dans l'analyse de la turbulence, comme des polynômes de Zernike. Le MPLC travaille, lui, sur le champ complexe, c'est-à-dire à la fois la phase et l'amplitude.

Les deux techniques poursuivent donc le même but, mais empruntent des chemins différents pour y parvenir. L'optique adaptative utilise des éléments mécaniquement actifs pour reformer le front d'onde incident perturbé, alors que le MPLC et donc la solution TILBA collecte la lumière, qui est démultiplexée vers des fibres monomodes.

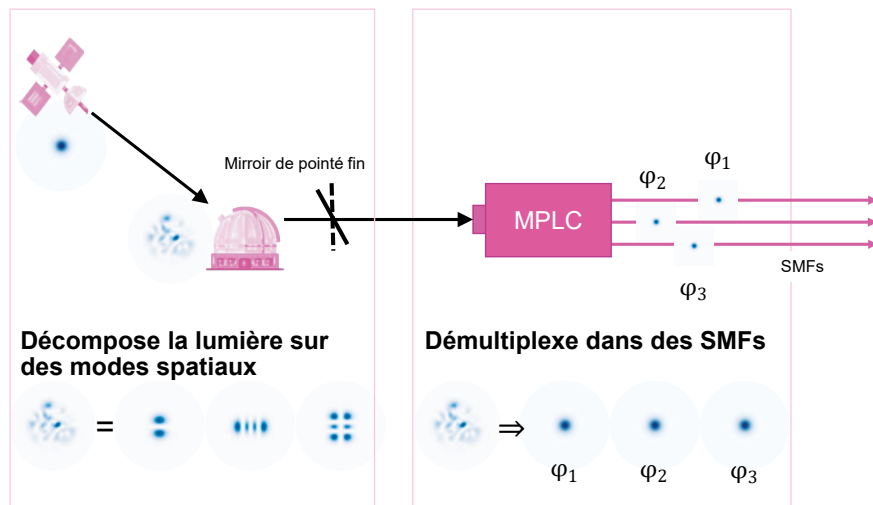


## 2.4. Recombinaison photonique : pour lier tous les signaux

Les fluctuations atmosphériques génèrent des différences de phase et d'amplitude sur le front d'onde lumineux, donc sur les modes. Le MPLC étant un composant passif, il décompose les modes et les couple dans des fibres optiques monomodes sans modifier la phase et l'amplitude du signal. La lumière dans les fibres en sortie de MPLC présente donc une

amplitude et une phase qui varient dynamiquement au gré de la turbulence.

Pour obtenir un unique signal le plus efficace possible, il est nécessaire de recombinaison les signaux de sortie en unique fibre monomode. C'est le rôle du « recombineur photonique » qui est la brique active de TILBA-ATMO.

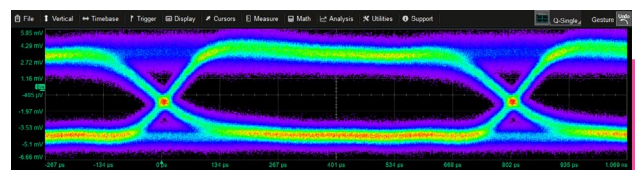


Les fibres de sortie du MPLC sont couplées dans un composant photonique, par exemple une puce photonique intégrée (PIC), mais qui pourra évoluer à l'avenir. Sur chaque voie, un contrôle tout optique de la phase et de l'amplitude permet d'équilibrer ces paramètres en sortie de chaque fibre. A partir d'une architecture en cascade, la puce recombine deux à deux les signaux jusqu'à n'avoir qu'un signal unique de sortie.

L'électronique et le logiciel pour le contrôle du recombineur photonique sont inclus dans TILBA-ATMO afin de fournir un système d'atténuation des turbulences tout-en-un.



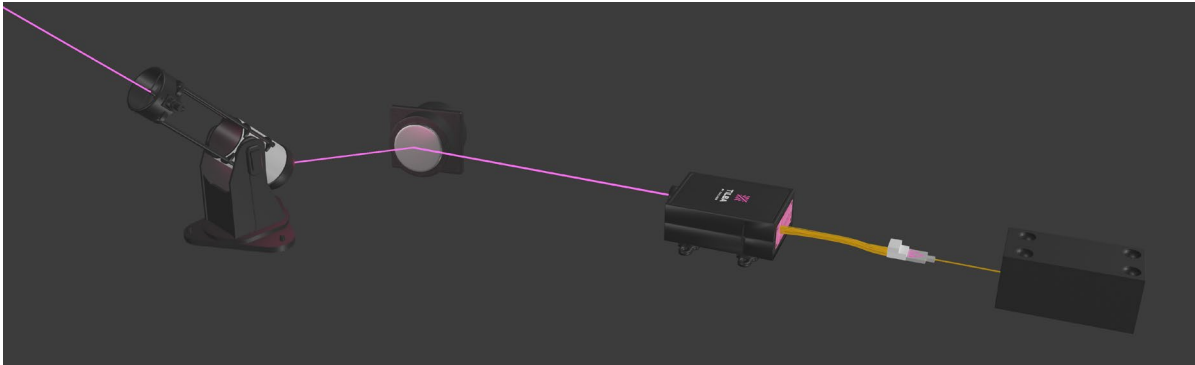
Recombineur optique à base de puce photonique intégrée.



Exemple de diagramme de l'œil pour une transmission turbulente à 1 Gb/s après TILBA-ATMO

En sortie de TILBA-ATMO, une fibre monomode transporte un unique signal télécom composé de toute la lumière collectée. C'est cette fibre qui peut être intégrée à tous les composants télécoms standards et qui fait de TILBA-ATMO un produit clé en main et facilement intégrable.

TILBA-ATMO s'intègre entre le télescope, ou le miroir de pointage fin lorsqu'il est nécessaire, et le bloc de communication optique fibré. Le principal avantage de cette architecture est qu'elle est compatible avec tous les formats de modulations et tous les composants monomodes comme les détecteurs rapides de petit diamètre ou les amplificateurs optiques.



## 2.5. Etude de cas

Dans le cadre d'une session de tests perpétuée avec le DLR, l'agence spatiale allemande, les résultats obtenus avec l'optique adaptative et avec TILBA-R ont été comparés pour compenser les perturbations atmosphériques.

- Le dispositif TILBA-ATMO (demultiplexeur MPLC sans recombinaison) comprend une entrée fibrée de 10 modes démultiplexés vers 10 fibres monomodes. Chaque SMF est reliée à une photodiode dont le signal est sur échantillonné. Les signaux sont ensuite sommés numériquement pour obtenir un unique signal numérique : le signal compensé.

- L'optique adaptative comporte un miroir déformable (MD) de 97 actuateurs couplant le faisceau vers une SMF reliée à une photodiode. Un analyseur de front d'onde Shack-Hartmann mesure une fraction du signal pour piloter le MD, mais aussi estimer le paramètre de Fried. Une caméra à large champ mesure l'intensité du signal dans le plan focal.

Pour découvrir les résultats de ces tests, vous pouvez lire l'étude de cas détaillée, rédigée conjointement avec l'agence spatiale allemande.

<https://www.cailabs.com/etude-de-cas/dlr-deutsches-zentrum-fur-luft-und-raumfahrt-germany/>



## Conclusion

---

Les communications laser vont se développer, c'est aujourd'hui une certitude. Les besoins en quantités de données croissent de manière exponentielle dans tous les secteurs des communications. Étant donnée sa capacité à accroître les débits de plusieurs ordres de grandeur, l'optique est indispensable pour les réseaux en espace libre de demain.

La discrétion et la furtivité de ces liaisons sont également un atout indiscutable pour de nombreux secteurs qui nécessitent des réseaux protégés. D'autant que les communications quantiques qui pourraient s'imposer comme la prochaine génération de communications sécurisées ne sont pas compatibles avec des liaisons RF, contrairement à l'optique. Cela

dit, ne nous y trompons pas : l'avenir sera fait d'une diversité de technologies. L'optique se développera de manière complémentaire à la RF qui restera dans certains cas plus pertinente ou plus fiable. L'optique sera présente là où sa valeur ajoutée est la plus forte. En compensant la turbulence atmosphérique avec une technologie de rupture simple et rentable, Cailabs veut faciliter le déploiement des réseaux optiques en espace libre partout où ils sont nécessaires. Grâce à son savoir-faire en mise en forme de la lumière et son expertise en télécommunications, Cailabs fera partie de l'écosystème d'acteurs des communications laser en accompagnant ses clients et partenaires depuis le composant jusqu'à la station sol.



# cailabs

SHAPING THE LIGHT

## CAILABS

38 boulevard Albert 1er  
35200 Rennes, France

[www.cailabs.com](http://www.cailabs.com)  
[tilba@cailabs.com](mailto:tilba@cailabs.com)

 @CAILabs