

Télécommunications optiques spatiales

Marie-Thérèse Velluet, Nicolas Védrenne (Onera)
Géraldine Artaud, Frédéric Lacoste (CNES)
marie-therese.velluet@onera.fr

Les télécommunications optiques spatiales, comme hier les communications par fibre optique, ouvrent la voie au très haut débit afin de répondre aux besoins croissants des applications telles que internet, la téléphonie mobile... Les modules principaux de cette liaison optique sol - satellite sont décrits ici et la présentation de quelques réalisations permet d'illustrer l'avancement des études dans le domaine.

L'avènement des télécommunications satellitaires

De l'antiquité au premier satellite

De tout temps, les ondes ont été un moyen privilégié pour communiquer à distance et accroître le champ d'action des hommes (signaux de fumée, sémaphores, phare, tam-tam, tambour...). Jusqu'au dix-huitième siècle, les débits et les portées sont restés très limités. Le premier véritable réseau de communication apparaît à la fin de la Révolution française : en 1794 le télégraphe optique de Chappe relie Paris et Lille par un réseau de sémaphores véhiculant des messages codés de proche en proche. Sa vitesse de propagation effective est de 35 km/h. Toutefois, l'optique est rapidement abandonnée au profit de l'électronique dont la maîtrise progresse plus rapidement. Entre 1837, découverte du morse, et 1960, lancement par la NASA du premier satellite de communication (Echo 1), les télécommunications n'ont cessé de se développer : première liaison par câbles en 1850 entre l'Europe et l'Amérique, première émission télévisée officielle en France en 1935.

Les premiers satellites

Pour bénéficier de liens à l'échelle mondiale en s'affranchissant de structures terrestres lourdes et vulnérables, les satellites artificiels apparaissent vite comme une solution d'avenir. En 1962, Telstar 1 est le premier vrai satellite de communications. Equipé d'un récepteur et d'un émetteur de grande puissance, il retransmet en direct

aux États-Unis les premières émissions diffusées en Europe. L'année suivante, la NASA expédie le premier satellite sur l'orbite géostationnaire, Syncom 1, avec une capacité équivalente à un canal de télévision ou 50 communications téléphoniques simultanées. En 1965, le lancement du premier satellite de télécommunications géostationnaire, Intelsat 1, marque le véritable début de l'ère des télécommunications par satellites qui permet une couverture totale du globe.

Vers le haut débit

Aujourd'hui les besoins en débit croissent très rapidement. Du fait de l'augmentation de la taille et du nombre d'images acquises par les futurs satellites d'observation, les systèmes de télémesure vont requérir une centaine de Tb (terabits) par jour. Pour satisfaire les exigences liées à la téléphonie mobile et à Internet, des débits de données de l'ordre du Tb par seconde seront bientôt nécessaires. Les bandes de fréquences utilisées (10 – 20 GHz) sont saturées et en limite de débit. L'utilisation de bandes de fréquences plus hautes en radiofréquence (RF) (bande Q/V, W... 30 à 110 GHz) et dans le domaine optique (~ 200 THz) est à l'étude.

Avantages et inconvénients de l'optique/RF

Le faisceau laser présente une faible divergence (typiquement quelques 10 à 100 μradians) contrairement aux ondes RF

pour lesquelles la divergence est au moins 1000 fois plus grande. Le bilan de flux est ainsi plus favorable avec un gain de l'ordre de 60 dB réduisant la puissance nécessaire de la source. Par sa directivité, le faisceau est difficile à intercepter et donc permet des communications intrinsèquement sécurisées. Les problèmes d'interférence entre voies sont également résolus et la régulation du spectre inutile. La masse, l'encombrement et la puissance électrique nécessaires sont beaucoup plus faibles ainsi que le coût global du système. Les antennes embarquées sur satellite en orbites basses ont des dimensions de quelques dizaines de centimètres et émettent de l'ordre du watt pour les liens optiques ; elles sont plutôt de l'ordre du mètre et plusieurs dizaines de watt pour les liens RF.

Toutefois, si elle présente des avantages certains, la faible divergence du faisceau est également un défi technologique car elle requiert un pointage extrêmement précis du faisceau vers le récepteur, pointage perturbé par l'environnement (les vibrations du système émetteur, la turbulence atmosphérique proche du sol). Par ailleurs, la propagation des ondes optiques dans l'atmosphère est fortement dépendante des conditions météorologiques (présence de nuages) et des perturbations locales comme la turbulence atmosphérique.

Finalement, même si l'optique bénéficie des composants développés pour les transmissions par fibre optique, la technologie n'a pas encore la maturité de la bande RF.

État de l'art des composants-clés

L'utilisation des longueurs d'onde optiques sur des distances de type sol – espace est devenue possible grâce à l'avènement des sources laser découvertes dans les années 1960 et des progrès technologiques sur les détecteurs.

Les sources laser

Les premiers lasers à gaz ou à lampe n'étaient pas très adaptés pour les télécommunications spatiales car peu puissants et encombrants. Les lasers à semiconducteurs découverts dans les années 80 ont permis de pallier ces inconvénients, et les sources à amplification fibrées actuelles sont encore plus prometteuses de par les puissances laser et les excellentes qualités de faisceau (proche de la diffraction) accessibles. Ces sources très directives, associées à une optique adaptée, permettent de concentrer le flux lumineux sur une surface relativement faible, typiquement quelques dizaines de m^2 à 1000 km de distance. Elles sont également modulables à des fréquences importantes compatibles des débits demandés. Elles présentent par ailleurs de faibles encombrement, poids et consommation.

Les détecteurs

Les principaux détecteurs utilisés sont des diodes PIN en silicium (0,5 à 1,1 μm) ou InGaAs (1,1 à 1,6 μm). Comme alternative, les photodiodes à avalanche (APD) permettent une amplification du signal au détriment de la bande passante. Le signal reçu étant très faible, les amplificateurs à fibre optique dopée erbium (ou EDFA) sont également très utilisés, ils sont effectifs aux longueurs d'onde autour de 1,5 μm . Les bandes passantes de tous ces détecteurs sont compatibles avec les besoins en débit demandés.

Le système télécom

La communication se fait entre une station sol et un satellite géostationnaire (GEO¹) ou un satellite défilant sur une orbite plus basse, l'orbite LEO². Des

¹ Geostationary orbit (36 000 km)

² Low Earth Orbit (500 – 1 500 km)

relais peuvent exister également entre des satellites GEO et LEO et des drones. Pour les télécommunications, la liaison est bidirectionnelle et le besoin en débit est peu différent dans les deux sens. Pour la télémesure, le haut débit concerne seulement le lien descendant. Le système de télécommunication est constitué d'un module émission, d'un module réception et d'un système de pointage assurant la permanence de la liaison.

Le module émission

Aujourd'hui, les longueurs d'onde les plus communément utilisées sont 0,8, 1,06 et 1,55 μm . Il semblerait toutefois que l'on s'achemine vers une normalisation à 1,55 μm pour bénéficier des développements réalisés dans le cadre des télécommunications fibrées mais également de la sécurité oculaire.

Le module PAT

(pointing, acquisition and tracking)

Le signal émis étant très directif, une des difficultés est de pointer avec précision le faisceau vers le récepteur à la fois durant la phase d'accrochage mais également au cours du temps du fait des mouvements de la plateforme et des erreurs d'orbite. Ce module doit être très performant. La phase d'acquisition est réalisée à l'aide

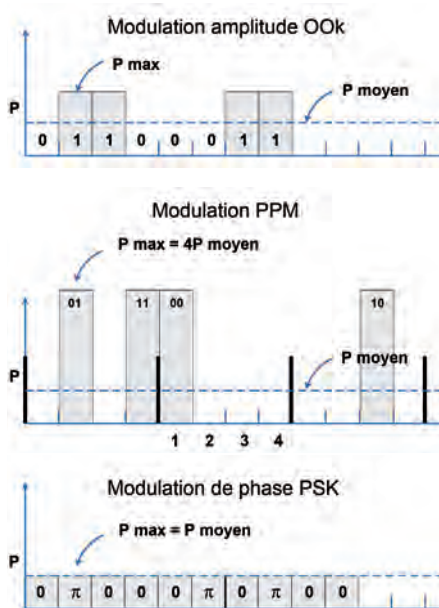


Figure 1. Différents types de modulation du signal. De haut en bas : modulation d'intensité, modulation position du pulse, modulation de phase.

d'une balise divergente (de l'ordre du milliradian) émise depuis le sol vers le satellite. La divergence de la balise est liée à la précision avec laquelle sont connus l'orbite du satellite et le champ de vue du récepteur. Si la puissance disponible n'est pas suffisante, il convient de scruter l'espace jusqu'à émission d'un signal retour par le satellite qui utilise l'information de direction de la balise pour s'orienter vers la station sol. Ce système permet ensuite de corriger les différents défauts de pointage pour assurer la permanence de la liaison.

Le module détection

La détection peut être cohérente (hétérodyne) ou incohérente (directe). Dans le cas de la détection cohérente, le signal reçu interfère avec un oscillateur local. Le choix de la détection dépend essentiellement du type de source et de modulation.

La modulation du signal

La modulation d'amplitude ou « on-off keying » (OOK) est la plus communément utilisée car la plus simple à mettre en œuvre. On peut citer également la « pulse position modulation » (PPM), qui requiert moins d'énergie moyenne que la modulation OOK pour un même taux d'erreur à la réception mais avec une plus grande bande passante et une synchronisation à la réception plus difficile. Cette dernière modulation est principalement utilisée pour les communications vers l'espace lointain (Lune, Mars...). On peut également citer le « differential phase shift keying » (DPSK) qui pourrait être moins sensible à la turbulence (figure 1). La modulation peut être assurée par un interféromètre de Mach-Zinder ou un modulateur électro-optique.

Le codage

Les variations de signal liées aux effets atmosphériques sont appelées « fading ». Le système doit donc composer avec une importante dynamique de détection et une sécurisation de la transmission. L'introduction de redondances par le biais de codes correcteurs d'erreur appropriés permet de limiter l'influence des perturbations du canal de type micro coupures : par exemple intégration de bits de contrôle destinés à s'assurer

de l'intégrité du message. Ainsi, lorsqu'une anomalie est détectée à la réception, un signal d'ARQ (*Automatic Retransmission reQuest*) est renvoyé à l'émetteur pour notification. Parmi les méthodes de codage actuellement envisagées, les outils utilisés pour les liaisons télécoms RF (norme DVB-S2) comme les codes Reed-Solomon Low Density Parity Check par exemple suscitent un vif intérêt. Ils doivent cependant être adaptés aux spécificités des perturbations rencontrées (durée des atténuations et probabilité d'occurrence notamment). Il existe également des codes entrelaceurs. Ils consistent à permuter une séquence de bits de manière à ce que deux symboles proches à l'origine soient le plus éloignés possibles l'un de l'autre. Cela permet en particulier de transformer une erreur portant sur des bits regroupés en une erreur répartie sur l'ensemble de la séquence et ainsi diluer l'information transmise sur une échelle de temps longue comparativement aux caractéristiques statistiques des perturbations qui affectent le signal.

Le canal de propagation

Le niveau de signal reçu est fortement dépendant de l'atmosphère : atténuation (essentiellement les nuages) et turbulence. Comment s'en affranchir ?

Les nuages

Les ondes optiques sont généralement absorbées par les nuages, seuls les nuages très haut en altitude de type cirrus ont une transmission non nulle. Une manière de s'affranchir de l'influence de la couverture nuageuse est de disposer à la surface du globe de plusieurs stations sol (réseau) et de jouer sur la décorrélation spatiale du phénomène. Pour anticiper le basculement d'une station à l'autre sans perte de signal plusieurs solutions sont à l'étude : exploitation des prédictions météorologiques ou des images grand champ satellitaires. Des études statistiques permettent d'évaluer le nombre de stations et leur localisation en fonction du taux de couverture recherché.

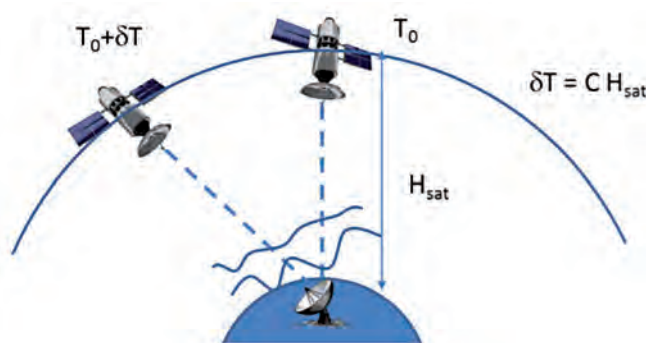


Figure 2. Pointage en avant, C vitesse de la lumière.

Turbulence atmosphérique et compensation

La turbulence atmosphérique induit des variations locales de l'indice de réfraction de l'air. Le front d'onde (ou phase) d'une onde s'y propageant est alors déformé. Cette déformation entraîne, dans le plan d'un récepteur distant, des perturbations de phase et d'amplitude qui évoluent très rapidement (temps de corrélation de l'ordre de la milliseconde). Les perturbations d'amplitude se traduisent par une fluctuation du flux collecté par une pupille de réception. Lorsque le niveau de turbulence est élevé, la dynamique des perturbations peut être importante, rendant la lecture d'un signal modulé à très haut débit difficile, voire impossible sans traitement adapté. Ces effets de scintillation sont d'autant plus grands que le diamètre du télescope de réception est petit. Pour les limiter, on privilégiera des diamètres de réception de plusieurs dizaines de centimètres. Les perturbations de la phase, quant à elles, dégradent la qualité optique de la tache focale et compromettent la qualité du couplage dans une fibre monomode nécessaire lorsqu'une méthode de détection cohérente est envisagée. Pour rétablir la cohérence de l'onde, des solutions de correction en temps réel des défauts de phase, comme l'optique adaptative (OA), sont mises en œuvre. La complexité de l'OA croît avec le diamètre du télescope. La conception d'un système de réception adapté aux liaisons optiques satellite – sol résulte donc d'un compromis sur le choix du diamètre, il doit être suffisamment grand pour limiter les effets de scintillation mais pas trop pour limiter la complexité de l'OA.

Le lien sol-espace n'est pas symétrique, les effets perturbateurs se trouvent dans les 20 premiers kilomètres au-dessus du sol dégradant le faisceau montant au niveau de son émission et le faisceau descendant au niveau de sa réception. Pour le lien descendant, il est possible de corriger ces effets en bénéficiant des travaux sur l'OA réalisés en astronomie pour les grands télescopes. Pour le lien montant, cette correction est plus difficile. En effet, le pointage du faisceau nécessite de tenir compte du déplacement du satellite entre le moment de l'émission du faisceau au niveau de la station sol et celui où il atteint le satellite. C'est ce que l'on appelle l'angle de pointage en avant (*figure 2*). Le faisceau est donc émis sous un angle différent de celui du faisceau reçu qui a servi à mesurer les déformations induites par la turbulence. Les couches turbulentes traversées par les deux faisceaux étant différentes, la correction n'est pas parfaite, et ce d'autant plus que l'angle est grand. D'autres techniques sont envisagées pour limiter l'influence de la turbulence sur le faisceau montant. Parmi celles-ci on peut citer l'usage de plusieurs faisceaux séparés angulairement pour moyenniser les effets.

Réalizations – Perspectives

Pour l'instant, les télécommunications optiques spatiales sont au stade de la démonstration. Depuis le début des années 2000, quelques liens optiques ont été déjà réalisés. On peut citer :

- 2001 : SILEX – Semiconductor Laser Inter-Satellite Link Experiment (*figure 3*). Liaison LEO – GEO à 50 Mbps³ entre le satellite géostationnaire de télécommunication ARTEMIS de l'ESA⁴ et SPOT-4 situé à 31 000 km de là. Le système a été réalisé par Astrium (ADS) et est installé sur les deux satellites. Il utilise une diode laser GaAlAs de 60 mW à 800 nm, un capteur APD et un système de tracking à base de matrices CCD et d'un miroir de basculement. La modulation est de type PPM.

³ Megabits par seconde

⁴ European Space Agency



ESA

orbite basse NFIRE (NASA) et la station sol OGS⁶ de Tenerife. Il s'agit d'une liaison BPSK avec détection homodyne à 5,6 Gbps⁷. La source laser est un laser YAG (1,06 μm) de 0,7 W de puissance moyenne. Elle présente de larges plages de télécommunications sans erreurs entrecoupées de pics d'erreurs dues à la scintillation du faisceau laser dans l'atmosphère turbulente.

- 2014 : liaison sol – satellite GEO haut débit. Un terminal de communication laser développé par TESAT et fourni par le DLR est embarqué sur le satellite Alphasat qui vient d'être mis en orbite. La station de réception est le télescope OGS (Ténérife). Le débit attendu est de l'ordre de 1,8 Gbps. La source est à 1,06 μm , la modulation de type BPSK (figure 4).
- 2014: LLCD – Lunar Laser Communication Demonstrator. Liaison entre le sol et la Lune à haut débit. Trois stations ont été utilisées : OGS à Ténérife, l'Optical Comm Telescope Lab du JPL à Table Mountain et un terminal spécifique constitué de 4 émetteurs de 15 cm et de 4 récepteurs de 40 cm situé à White Sands (figure 5). Les caractéristiques de la liaison : 3 longueurs d'onde autour de 1,5 μm ; 622 Mbps pour le lien descendant et 20 Mbps pour le lien montant, modulation de type PPM.

⁶ Optical Ground Station

⁷ Gigabits par seconde

Figure 3. Silex : lien entre satellite Geo Artemis et LEO Spot 4.

- 2006 : LOLA Liaison Optique Laser Aéroportée. Liaison avion – GEO effectuée par ADS et financée par la DGA. Elle vise à établir une liaison de 40 000 km de long entre un aéronef et le satellite ARTEMIS. Il s'agit d'une liaison bidirectionnelle. Le lien montant est un lien BPPM à 2 Mbps, le lien descendant un OOK à 50 Mbps. La source est la diode laser GaAlAs d'ARTEMIS émettant à 800 nm.
- 2008 : 1^{re} liaison télécom bidirectionnelle LEO – sol. Les japonais du NICT⁵

⁵ National Institute of Information and Communications (Japon)

établissent une liaison bidirectionnelle entre Tôkyô et le satellite LEO OICETS/Kirari (montant BPPM à 2Mbps, descendant OOK à 50 Mbps) autour de 800 nm. La liaison est maintenue pendant les 6 minutes du passage du satellite par temps clair. Les taux d'erreurs atteints sont de 10^{-7} sur le lien montant, 10^{-4} sur le descendant.

- 2011 : 1^{re} liaison bidirectionnelle LEO – sol haut-débit. Cette liaison est réalisée par l'ESA, le Centre aérospatial allemand (DLR) et TESAT (entreprise allemande spécialisée dans les télécommunications par satellite), entre le satellite en

SPACE THE FINAL FRONTIER.

These are the voyages of the LASEROPTIK enterprise. Its continuing mission: To develop new coatings, to seek out new applications and new challenges, to boldly go where no optics have gone before...

LASEROPTIK is participating in many private and public missions of different organizations and space agencies.

With our qualified coating processes, we manufacture custom optics made of dense, environmentally stable and radiation hardened layers for ground, earth orbit, deep space and near-solar applications.

LASEROPTIK

Home of high power coatings and optics

LASEROPTIK GmbH
Horster Str. 20, D-30826 Garbsen
Phone +49 (0) 51 31 45 97 -0, Fax -20
service@laseroptik.de
www.laseroptik.de

Online shop and configurator:
www.laseroptik.de/loop

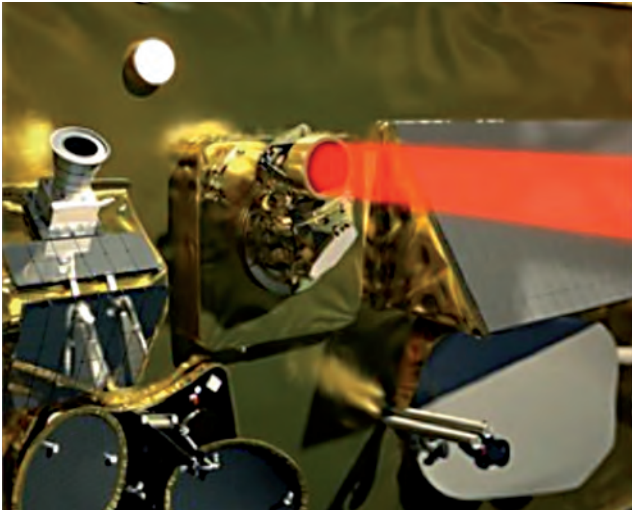


Figure 4. Terminal optique sur le satellite géostationnaire Alphasat (36 000 km) – station sol (OGS Tenerife) .

- 2014 : SOTA – *Small Optical TrAnspnder*. Liaison sol-micro satellite LEO de 1 à 10 Mbps à 1,5 et 1,06 μm . L'équipe japonaise du NICT a développé un petit module de télécommunication optique destiné à équiper des satellites de télécommunication de moins de 50 kg. Pour la démonstration il est passager du satellite SOCRATES (*Space Optical Communications Research Advanced Technology Satellite*). Ce seront les premiers tests de différents codages sur une liaison sol-satellite (OOK – Reed Solomon et LDGM). Dans le cadre d'un projet Cnes, regroupant l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), ADS, Thales Aliena Space et l'Onera, une liaison entre SOTA et le télescope Meo de l'OCA

doit être établie d'ici 1 an. L'Onera est responsable de la caractérisation du canal de propagation.

- 2014 : Opals – Optical PAYload for Lasercomm Science. Lien laser entre la station ISS et le sol pour de la transmission vidéo à 50 Mbps : 175 Mb ont été transmis en 3,5 s au lieu des 10 minutes habituelles (débit standard radio). Le message a été transmis plusieurs fois pendant cette session de communication (148 sec. en tout) avec les caractéristiques suivantes : modulation OOK, longueur d'onde 1,5 μm et une précision de pointage de 0,01°. Ce démonstrateur doit permettre de valider la faisabilité d'un lien sol-sondes lointaines (Mars et au-delà) (figure 6).

Conclusions

Du fait de la demande croissante de débits, les télécommunications optiques spatiales sont en plein développement. Depuis une quinzaine d'années, de nombreux démonstrateurs ont été testés entre le sol et l'espace.

Les débits actuellement atteints sont de l'ordre de quelques Gbps sur un seul lien. Le déploiement d'un réseau complet de liaisons optiques n'est pas encore effectif mais le projet LaserLight d'une constellation de satellites optiques sur orbite MEO⁸ avec une capacité de 6 Tbps pourrait relever ce défi.

⁸ Medium Earth Orbit (5 000 – 10 000 km)



Figure 5. Terminal à White Sand pour LLCD.

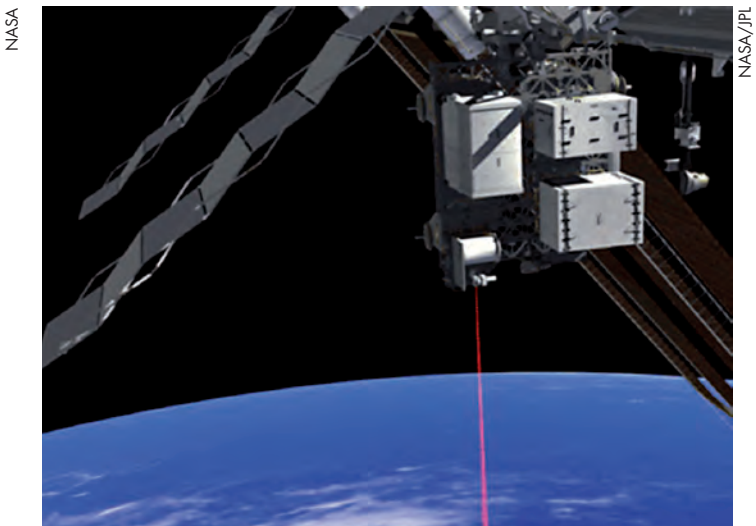


Figure 6. Terminal optique OPALS sur la station ISS et son lien laser.