
(English version follows)

Sujet de thèse

Laboratoire : Institut Fresnel

Directeur de thèse : Ali Khalighi

Email : Ali.Khalighi@fresnel.fr

Adresse : Institut Fresnel, Domaine Universitaire de Saint Jérôme, 13397 Marseille

Tel : 04 13 94 54 35

Titre : **Communications laser pour des réseaux de microsattellites**

Description

Contexte :

Le nombre de satellites lancés dans l'espace a considérablement augmenté ces dernières années [1]. Ces satellites fournissent différents services tels que l'observation de la Terre, la communication, la localisation, etc. La technologie optique en espace libre (lasercom ou FSO, Free-Space Optics) peut permettre à la nouvelle génération de satellites de transmettre des données en toute sécurité sur de très longues distances [2]. Cela a été récemment démontré par les liaisons optiques inter-satellites de l'Agence spatiale européenne ainsi que par la collaboration euro-chinoise pour la validation expérimentale de la distribution de clés quantiques spatiales impliquant la transmission de photons sur des liaisons satellite-Terre ultra-longues [3,4]. En effet, avec l'avènement des ordinateurs quantiques, les systèmes cryptographiques traditionnels peuvent devenir peu fiables pour maintenir la sécurité de nos réseaux. La distribution de clé quantique (QKD) basée sur la transmission de données codées sous forme d'états quantiques de photons uniques peut résoudre ce problème.

D'autre part, un des objectifs des futurs réseaux 6G est l'« inclusion digitale » en donnant l'accès Internet haut-débit aux zones géographiques isolées à l'échelle de la planète. Les solutions envisagées pour de telles connexions considèrent, en particulier, l'utilisation des drones (UAV : Unmanned Aerial Vehicle), des plateformes haute-altitude (HAP : High Altitude Platform), ou des réseaux de microsattellites. Elles sont souvent appelées les réseaux non-terrestres (NTN : Non-Terrestrial Networks) et considérées comme les « technologies de transformation » pour la 6G. Un tel réseau dans sa globalité pourra également fournir des connexions Internet très haut-débit, de haute qualité de transmission, et à faible latence, pour servir de liens de connectivité complémentaires pour les connexions existantes de nature critique.

Parmi les premières tentatives, on peut citer le projet Loon de Google, Aquila de Facebook (qui a été récemment abandonné...) ou encore le projet Zephyr d'Airbus. Très récemment on a vu l'engagement des projets plus ambitieux, comme Starlink de SpaceX, Kuiper d'Amazon, ou encore OneWeb d'Airbus, sur la mise en place d'un réseau de communication global au niveau de la planète nécessitant le lancement des milliers de microsattellites dans les orbites basses (cf. Fig.1).

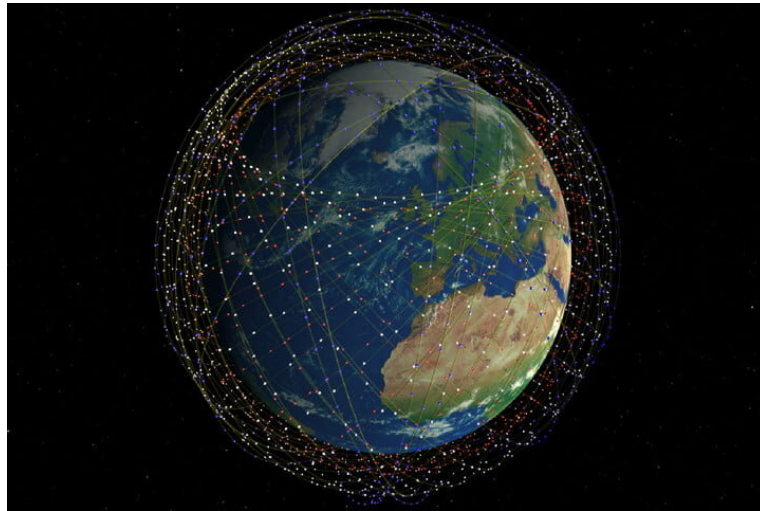


Fig.1. © SpaceX, Illustration du projet Starlink®

Notre laboratoire de recherche a une expertise riche de plus de 15 ans sur la technologie FSO dans différents contextes d'application, tels que les liaisons terrestres, entre des UAVs, ou avec des trains à grande vitesse, etc. [5-14], et a acquis une renommée internationale dans ce domaine.

Principaux objectifs :

Le but de cette thèse est de proposer des techniques efficaces de transmission FSO entre des microsattellites pour constituer un réseau backbone de très haut débit, fiable et robuste. Les techniques proposées doivent prendre en compte les caractéristiques de la propagation du signal optique qui sont très différentes de celles des liaisons FSO terrestres. Une attention particulière sera aussi dédiée à l'aspect de sécurité de transmission des données.

Description du projet :

L'objectif de cette thèse est d'une part de proposer des techniques de transmission avancées pour établir des liaisons de communication à haut débit et à grande fiabilité entre les microsattellites, et d'autre part, de proposer des solutions de pointage, acquisition et suivi (PAT : Pointing, Acquisition, Tracking) adaptées à cette application.

Concernant la transmission du signal, les solutions proposées doivent prendre en compte les conditions atmosphériques pour lesquelles il faudrait développer des modèles statistiques adaptés, ainsi que les vibrations des payloads qui peuvent provoquer des erreurs de pointage relativement importantes. En ce qui concerne les techniques PAT, les particularités de ces liaisons, telles que le type des faisceaux laser utilisés, les caractéristiques des payloads et les contraintes sur la complexité calculatoire, doivent être prises en compte.

Notre expertise sur la modélisation statistique des canaux et les techniques avancées de transmission du signal pour les liaisons FSO terrestres nous sera particulièrement bénéfique au cours de cette thèse. Aussi, nous nous appuyons sur nos collaborations internationales pour prendre en compte les

paramètres réels des microsattellites et de telles connexions. Nous pouvons également profiter des outils de simulations disponibles chez notre partenaire à l'Université d'Edimbourg pour une analyse précise des effets atmosphériques pour différents paramètres géométriques.

Dans ce projet, nous étudierons également l'analyse des performances des protocoles QKD sur les liaisons intersatellites. De telles liaisons peuvent être des éléments constitutifs d'un réseau spatial qui peut potentiellement connecter deux points sur la terre, où qu'ils soient. [3,15,16] (cf. Fig.2). En fait, les progrès actuels dans le développement de liaisons QKD (que ce soit sur une liaison FSO ou par fibre optique), sont limités par la distance de la liaison en raison de l'atténuation exponentielle du signal optique.

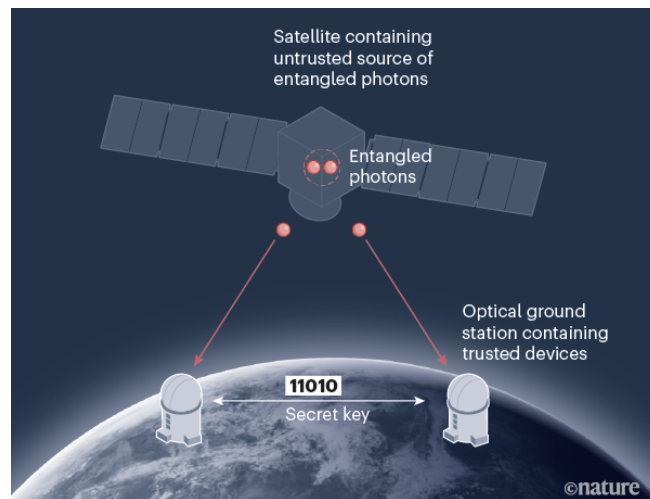


Fig.2 : Illustration du principe de QKD en utilisant des liaisons satellites © nature 2020 [3].

Collaborations :

Cette thèse sera réalisée en collaboration étroite avec le laboratoire « LiFi Research Center » de l'Université d'Édimbourg avec plusieurs séjours courte-durée prévus tout au long de la thèse. Elle bénéficiera également d'un réseau de collaboration international sur les communications spatiales dans le cadre d'un projet collaboratif actuellement coordonné par l'Institut Fresnel (l'Action COST CA19111). Aussi, ce travail se réalisera avec des échanges réguliers avec nos partenaires tels que le CNES et le DLR.

Compétences requises :

Une base solide en optique et optoélectronique est un atout important, ainsi que une bonne connaissance et maîtrise des techniques de traitement du signal. Une expérience ou une formation en transmissions numériques est aussi souhaitable.

Le(la) candidat(e) doit avoir un très bon niveau en anglais (expressions orale et écrite) et prêt(e) pour des séjours courte-durée dans les laboratoires partenaires.

Références bibliographiques :

- [1] S. Clarck, SpaceX smashes record with launch of 143 small satellites, SPACEFLIGHTNOW, 24 Jan. 2021, <https://spaceflightnow.com/2021/01/24/spacex-launches-record-setting-rideshare-mission-with-143-small-satellites/>
- [2] Optical inter-satellite links are best tech for Galileo, ESA, Shaping the Future, 12/07/2019, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Optical_inter-satellite_links_are_best_tech_for_Galileo
- [3] E. Diamanti, A step closer to secure global communication, News and Views, 22 June 2020, <https://www.nature.com/articles/d41586-020-01779-7>
- [4] Real-world intercontinental quantum communications enabled by the Micius satellite, University of Science and Technology of China, <https://phys.org/news/2018-01-real-world-intercontinental-quantum-enabled-micius.html>
- [5] M.A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014
- [6] M.T. Dabiri *et al.*, "Blind Signal Detection Under Synchronization Errors for FSO Links with High Mobility," *IEEE Transactions on Communications*, 2019.
- [7] M.T. Dabiri *et al.*, "Channel Modeling and Parameter Optimization for Hovering UAV-Based Free-Space Optical Links," *IEEE Journal on Special Areas in Communications, Special issue on Airborne Communication Networks*, 2018
- [8] G. Yang *et al.*, "Performance evaluation of receive-diversity free-space optical communications over correlated Gamma-Gamma fading channels," *Applied Optics*, 2013.
- [9] M.A. Khalighi *et al.*, "Double-laser differential signaling for reducing the effect of background radiation in free-space optical systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2011.
- [10] M.A. Khalighi *et al.*, "Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009.
- [11] F. Xu *et al.*, "Coded PPM and multi-pulse PPM and iterative detection for Free-Space optical links," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009.
- [12] F. Xu *et al.*, "Channel coding and time-diversity for optical wireless links," *Optics Express*, 2009.
- [13] H. Safi, A. Dargahi, J. Cheng, and M. Safari, "Analytical Channel Model and Link Design Optimization for Ground-to-HAP Free-Space Optical Communications," *J. Lightwave Technol.* 38, 5036-5047, 2020.
- [14] S. Huang and M. Safari, "Free-Space Optical Communication Impaired by Angular Fluctuations," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 11, pp. 7475-7487, Nov. 2017.

PhD Thesis Proposal

Research Lab: Fresnel Institute

Thesis Main Supervisor: Dr. Ali Khalighi

Email: Ali.Khalighi@fresnel.fr

Address: Institut Fresnel, Domaine Universitaire de Saint Jérôme, 13397 Marseille

Phone: +33 (0) 4 13 94 54 35

Title: Efficient Transmission Technologies for Network of Microsatellites

Description

Context:

The number of satellites being launched every year has significantly increased in the past few years [1]. These satellites provide different services such as Earth observation, communication, localization, etc. Free-space optical (FSO) technology can enable the new generation of satellites to transmit data securely over very long links [2]. This has been recently demonstrated by the European Space agency inter-satellite optical links as well as the European-Chinese collaboration for experimental validation of space quantum key distribution (QKD) involving the transmission of single photons over ultra-long satellite-to-Earth links [3,4]. Indeed, with the advent of quantum computers in the future, the traditional cryptographic systems can become unreliable in maintaining security of our networks. QKD, which is based on the transmission of data encoded as quantum states of single photons, can resolve this problem.

On the other hand, one of the goals of the future 6G networks is "digital inclusion" by giving high-speed Internet access to isolated geographic areas around the world. The solutions considered for such connections include, in particular, the use of drones (UAV: Unmanned Aerial Vehicle), high-altitude platforms (HAP: High Altitude Platform), or microsatellites. They are often referred to as Non-Terrestrial Networks (NTNs) and considered the "transformative technologies" for 6G. Such a network as a whole will also be able to provide very high-speed Internet connections, high transmission quality, and low latency, to serve as complementary or back-up solution for the existing wireless connectivity infrastructures of critical nature.

Among the first attempts, we can cite the Google's Loon project, the Facebook's Aquila (which was recently abandoned...) or the Airbus's Zephyr project. Very recently, a few ambitious projects appeared, such as Starlink from SpaceX, Kuiper from Amazon, or OneWeb from Airbus, which aim at establishing a global communication network based on a network of thousands of microsatellites in low orbits (see Fig.1).

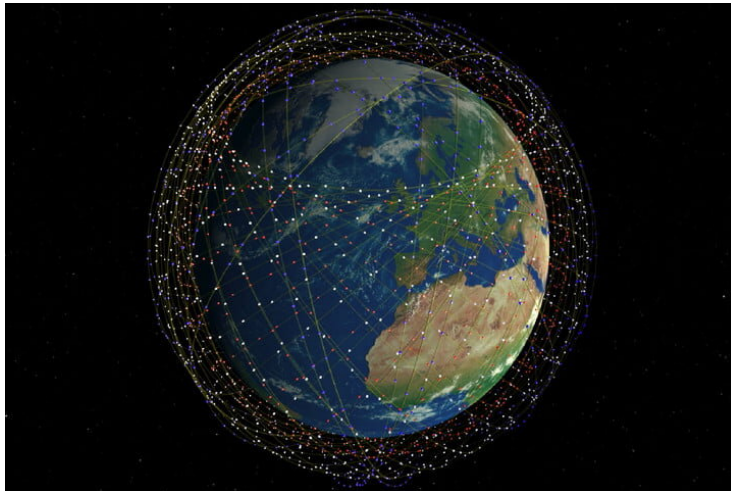


Fig. 1. Illustration of the Starlink® project, © *SpaceX*

Our research laboratory has a rich expertise of more than 15 years on the FSO technology in different application contexts, such as terrestrial links, FSO links between UAVs, with high-speed trains, etc. [5-14], and has gained an international reputation in this field.

Main objectives and description of the proposed project

The aim of this thesis is to propose efficient FSO transmission techniques between microsatellites to constitute a very high speed, low latency, and robust backbone network.

On the one hand, advanced transmission techniques will be proposed to establish high-speed and high-reliability communication links between microsatellites. On the other hand, appropriate and effective pointing, acquisition and tracking (PAT) solutions will be designed to reduce pointing errors effect. Since the current advancement in developing QKD links whether over an optical or terrestrial FSO link is limited by the link range due to exponential attenuation of optical signal in both channels, in this project, we will also investigate the performance analysis of QKD protocols over intersatellite links as the building blocks of a space network that can possibly connect every two points on earth [3,15,16] (see Fig.2).

Regarding signal transmission, the proposed solutions must take into account the effect of atmosphere for which it is necessary to develop suitable statistical models, as well as that of payload vibrations, which can cause relatively large pointing errors. Indeed, the characteristics of the optical signal propagation are very different from those of terrestrial FSO links.

With regard to PAT techniques, the particularities of these links, such as the type of laser beams used, the characteristics of the payloads, and the constraints on the implementation complexity, must be taken into account.

Our expertise on statistical channel modeling and advanced signal transmission techniques for terrestrial FSO links will be particularly beneficial for this study. Also, we will rely on our international collaborations (see below) to take into account the real parameters of microsatellites and such connections. We can also take advantage of the dedicated software tools provided by our partner in Edinburgh University for precise analysis of atmospheric effects for different geometrical settings.

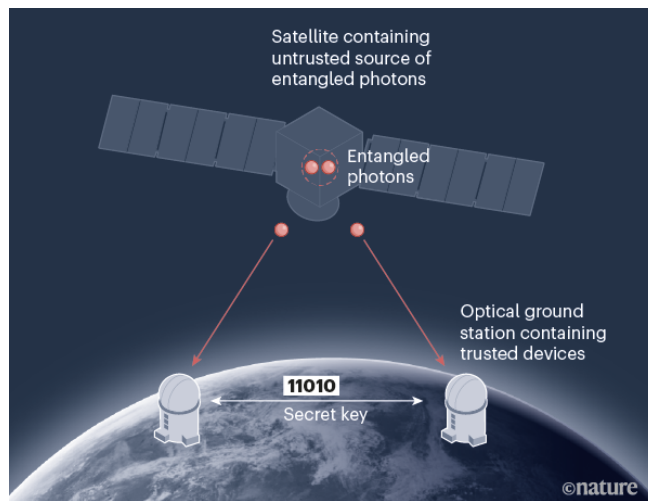


Fig. 2. Illustration of QKD principle using satellite links © nature 2020 [3].

Collaborations:

This thesis will be carried out in close collaboration with the "LiFi Research Center" laboratory at the University of Edinburgh with several planned short stays in this laboratory throughout the thesis. It will also benefit from an international collaborative network on space communications within the framework of a collaborative project currently coordinated by the Fresnel Institute (H2020 COST Action CA19111).

Also, this work will benefit from regular discussions with our partners such as CNES and DLR.

Required skills:

A solid background in optics and optoelectronics is an important asset, as well as a good knowledge of signal processing techniques. An experience or training in digital communications is also very welcome. The candidate must have a very good English language proficiency (oral and written expression) and be keen for short-term stays in partner laboratories.

References:

- [1] S. Clark, SpaceX smashes record with launch of 143 small satellites, SPACEFLIGHTNOW, 24 Jan. 2021, <https://spaceflightnow.com/2021/01/24/spacex-launches-record-setting-rideshare-mission-with-143-small-satellites/>
- [2] Optical inter-satellite links are best tech for Galileo, ESA, Shaping the Future, 12/07/2019, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Optical_inter-satellite_links_are_best_tech_for_Galileo
- [3] E. Diamanti, A step closer to secure global communication, News and Views, 22 June 2020, <https://www.nature.com/articles/d41586-020-01779-7>

- [4] Real-world intercontinental quantum communications enabled by the Micius satellite, University of Science and Technology of China, <https://phys.org/news/2018-01-real-world-intercontinental-quantum-enabled-micius.html>
- [5] M.A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014
- [6] M.T. Dabiri *et al.*, "Blind Signal Detection Under Synchronization Errors for FSO Links with High Mobility," *IEEE Transactions on Communications*, 2019.
- [7] M.T. Dabiri *et al.*, "Channel Modeling and Parameter Optimization for Hovering UAV-Based Free-Space Optical Links," *IEEE Journal on Special Areas in Communications, Special issue on Airborne Communication Networks*, 2018
- [8] G. Yang *et al.*, "Performance evaluation of receive-diversity free-space optical communications over correlated Gamma-Gamma fading channels," *Applied Optics*, 2013.
- [9] M.A. Khalighi *et al.*, "Double-laser differential signaling for reducing the effect of background radiation in free-space optical systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2011.
- [10] M.A. Khalighi *et al.*, "Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009.
- [11] F. Xu *et al.*, "Coded PPM and multi-pulse PPM and iterative detection for Free-Space optical links," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009.
- [12] F. Xu *et al.*, "Channel coding and time-diversity for optical wireless links," *Optics Express*, 2009.
- [13] H. Safi, A. Dargahi, J. Cheng, and M. Safari, "Analytical Channel Model and Link Design Optimization for Ground-to-HAP Free-Space Optical Communications," *J. Lightwave Technol.* 38, 5036-5047, 2020.
- [14] S. Huang and M. Safari, "Free-Space Optical Communication Impaired by Angular Fluctuations," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 11, pp. 7475-7487, Nov. 2017.
- [15] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden, "Quantum cryptography," *Rev. Mod. Phys.* 74, 145-145 (2002).
- [16] M. Safari, M. Uysal, "Relay-Assisted Quantum-Key Distribution Over Long Atmospheric Channels," *J. Lightwave Technol.* 27, 4508-4515, 2009.